

Modelado de una luminaria tipo LED mediante un método basado en álgebra matricial

Iván Javier Blanco Moreno

Andrés Felipe Gómez González

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista

Director

Gabriel Alexis Malagón Carvajal

Doctor en Ingeniería. Área Ingeniería Eléctrica

Codirector

César Antonio Duarte Gualdrón

Doctor en Ingeniería Eléctrica y Computación

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga 23 de marzo de 2022

### **Dedicatoria**

Dedico con todo mi corazón este trabajo de grado a Dios que me ha permitido llegar y superar todas las dificultades que se me han presentado a lo largo de la carrera y la vida, a mi madre Isabel Moreno Almeida, mi padre Carlos Javier Blanco Diaz, mi madrina Mónica Janeth Blanco Diaz y mis dos nonos Agripina Diaz y Luis Enrique Blanco los cuales siempre me han apoyado y creído en mi a lo largo de mi proceso de formación tanto estudiantil como ser humano.

Ivan Javier Blanco Moreno

Dedico este trabajo de grado a todos los futuros ingenieros electrónicos y electricistas que por diversos motivos consideran abandonar sus estudios y dejar inconclusa su respectiva carrera. Les recomiendo que no abandonen su sueño, que no se detengan hasta concluir sus estudios y ser ingenieros e ingenieras titulados. Finalmente, nunca dejen de perseguir sus sueños, porque un sueño solamente muere cuando se ha hecho real.

Andrés Felipe Gómez González

## Agradecimientos

**E**n el camino de la vida nos encontramos personas con grandes cualidades y virtudes, las cuales nos enseñan a enfrentar los problemas que vivimos cotidianamente de una manera más optimista y de la mejor forma mediante sus consejos, su apoyo incondicional para que demos lo mejor de nosotros cada día, de las cuales siempre he admirado y tengo mucho respeto, por eso mediante estos agradecimientos por enseñarme a levantarme y crecer como ser humano quiero expresar mi más sincera gratitud a:

En primer lugar, gracias a Dios por todas las bendiciones que me ha dado, por otorgarme excelente salud, por brindarme excelentes personas a mi alrededor y llenar me de virtudes como sabiduría, paciencia, gallardía para afrontar los problemas de la mejor manera posible.

A mi madre, mi padre, mi madrina que me apoyaron tanto económicamente como personalmente para hacer las cosas de la manera correcta.

A mi novia Laura Vanessa que me ha apoyado de manera incondicional en estos últimos semestres de mi carrera en todos los sentidos y aspectos de mi vida, por ser ese soporte incondicional.

A mis amigos Oswaldo Bueno, Amaury Ochoa, Pilar Garcés, Daniel Cárdenas, Maicol Bueno, Melissa Acevedo y Oscar Ardila quienes siempre han estado apoyándome desde primer semestre y creyeron en que podría cumplir mis metas y sueños

A mi director de tesis Gabriel Alexis Malagón y codirector Cesar Antonio Duarte por permitirme trabajar con ellos en este proceso de formación, por sus enseñanzas de hacer las cosas de la manera correcta y el conocimiento que me concedieron durante toda la carrera.

A Luis Eduardo Acuña y Jorge García que siempre estuvieron pendientes de mi en todo este proceso de formación, con los cuales pude estudiar, aprender y compartir de manera grata muchos momentos en la universidad.

A Felipe Sánchez un amigo que siempre ha sido incondicional, amable y persona que tiene mi respeto junto con mi admiración, por creer en mi durante todo este proceso y darme como ejemplo nunca ceder ante las adversidades de la vida.

Finalmente le doy gracias a mi compañero, a mi mejor amigo Andrés Felipe Gómez con el cual tuve la oportunidad de realizar este trabajo de grado y con el cual he compartido muchos momentos académicos como personales, los cuales me han hecho madurar y crecer como persona, por su comprensión en todo momento antes las diferentes adversidades que se presentaron en todo el camino.

Ivan Javier Blanco Moreno

**M**i vida ahora que tengo 26 años ha estado rodeada de diversas situaciones y ahora que estoy a puertas de concluir mis estudios universitarios (en lo que a pregrado respecta), quisiera darle un especial y sincero agradecimiento a:

Dios por encima de todo, que sin su apoyo constante seguramente hubiera tirado la toalla en un momento sensible de la carrera.

A mi padre **Ciro Alfonso Gómez Aguilar** y a mi madre **Olga patricia González Mantilla** y mi hermana **Silvia Juliana Gómez González** que en todos estos años me han apoyado, dado ánimo y llenado de mucho ánimo y fuerza para seguir adelante y sin importar que seguir adelante más fuerte que nunca.

A mi compañero y mejor amigo **Iván Javier Blanco Moreno**, que gracias a él en más de un momento recibí apoyo, consejo y motivación para continuar hacia adelante en mis estudios.

A **María Juliana Saavedra Ayala** quien en más de una oportunidad me dio todo su apoyo, cariño y motivación para nunca rendirme, tomar las cosas con calma y atacar el problema con más serenidad.

Al grupo educativo **Galileo**, sin el apoyo de ellos seguramente no hubiera estudiado ingeniería eléctrica.

A todos mis profesores que han brindado sus conocimientos y experiencia en mi formación profesional, en especial a nuestro director Gabriel Alexis Malagón Carvajal.

Finalmente, a todas las personas que en este trayecto aportaron algo en mi crecimiento profesional, en especial a Omar Camilo Martin Rolón y a Julieth Carolina Carrillo quienes fueron mis compañeros y amigos en ciclo básico.

Andrés Felipe Gómez González

## Tabla de Contenido

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
1.1. Objetivos .....	15
1.1.1. Objetivo General .....	15
1.1.2. Objetivos Específicos .....	15
1.2. Resultados .....	16
<b>2. MODELADO DE LUMINARIAS LED UTILIZANDO MÉTODOS MATRICIALES ..</b>	<b>16</b>
2.1 Modelo del circuito equivalente para la luminaria LED.....	17
2.2 Estándares para la forma de onda de la tensión de alimentación .....	19
2.3 Organización matricial para los datos.....	19
2.4 Método Nassif-Yong-Xu.....	22
2.5 Modelo Tensorial (M-Tensorial) .....	26
2.6 Variación con Delta de Corriente en el Modelo Tensorial .....	30
2.7 Evaluación de error de ajuste y desempeño .....	31
<b>3. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN .....</b>	<b>35</b>
3.1 Recolección de datos .....	35
3.2 Modelo de Matrices Armónicamente Acopladas (MMAA) .....	39
3.3 Modelo Tensorial (M-Tensorial) y Variación en el modelo tensorial (V-M-Tensorial) .....	39
3.4 Errores cuadráticos medio total, de magnitud y fase .....	40
<b>4. RESULTADOS DE DESEMPEÑO DE LOS MODELOS .....</b>	<b>41</b>
4.1 Evaluación del modelo Nasiff-Yong-Xu .....	42

4.2 Resultados del modelo de matrices armónicamente acopladas con la modificación identificada.....	44
4.3 Comparación entre el método propuesto por Nassif-Yong-Xu y la modificación identificada en el modelo de matrices armónicamente acopladas.....	47
4.4 Modelo Tensorial (M-Tensorial).....	49
4.5 Comparación entre el modelo de matrices armónicamente acopladas y el modelo tensorial.....	52
4.6 Variación en el modelo tensorial.....	52
4.7 Comparación del modelo de matrices armónicamente acopladas, modelo tensorial y su variación.....	55
<b>5. DISCUSIÓN.....</b>	<b>57</b>
<b>6. CONCLUSIÓN.....</b>	<b>58</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>61</b>

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Parámetros del circuito .....	18
<b>Tabla 2.</b> Límites de distorsión superior individual, UNE-EN50160 del 2015 .....	19
<b>Tabla 3.</b> Errores de ajuste y desempeño para el modelo con el método propuesto por Nassif -Yong-Xu.....	43
<b>Tabla 4.</b> Errores de ajuste y desempeño en el modelo de matrices armónicamente acopladas con la modificación propuesta.....	45
<b>Tabla 5.</b> Errores de ajuste y desempeño en el modelo tensorial .....	49
<b>Tabla 6.</b> Errores de ajuste y desempeño para la variación en el modelo tensorial .....	53

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Modelo del circuito equivalente para una luminaria LED.....	18
<b>Figura 2.</b> Circuito equivalente del modelo completo de matriz de admitancias, .....	24
<b>Figura 3.</b> Parametrización mediante tensores .....	27
<b>Figura 4.</b> Representación Box-Plot .....	34
<b>Figura 5.</b> Diagrama de flujo para la recolección de datos en el dominio de la frecuencia determinista. ....	38
<b>Figura 6.</b> Box-Plot para el modelo de matrices armónicamente acopladas aplicando el método propuesto por Nassif-Yong_Xu y la modificación identificada para el error de ajuste. ...	46
<b>Figura 7.</b> Box-Plot para el modelo de matrices armónicamente acopladas aplicando el método propuesto por Nassif-Yong_Xu y la modificación identificada para el error de desempeño. ....	47
<b>Figura 8.</b> Box-Plot para el modelo tensorial para el error de ajuste.....	50
<b>Figura 9.</b> Box-Plot para el modelo tensorial para el error de desempeño.....	51
<b>Figura 10.</b> Box-Plot para la variación en el modelo Tensorial para el error de ajuste ....	54
<b>Figura 11.</b> Box-Plot para la variación en el modelo Tensorial para el error de desempeño .....	55

## Resumen

**Título:** Modelado de una luminaria tipo LED mediante un método basado en álgebra matricial

**Autor:** Iván Javier Blanco Moreno, Andrés Felipe Gómez González.

**Palabras Clave:** Luminaria LED, carga no lineal, tensor, energía, error, corriente de corte, modelo, algebra matricial, fasor y señal.

**Descripción:** Las cargas no lineales como lo son las cargas tipo LED, tienen un impacto en el sistema eléctrico, debido a que este tipo de cargas pueden ocasionar distorsión en la tensión como en la corriente. Cuando se tienen es tipo de cargas se puede afectar el factor de potencia y esto puede tener un impacto significativo en los equipos que se usan en la industria. El presente trabajo de grado está orientado al modelado de la luminaria LED utilizando los modelos de matrices armónicamente acopladas (MMAA), el modelo tensorial (M-Tensorial) y por último una variación de este último modelo. Para los métodos de estimación de los modelos se evalúan los errores de ajuste y desempeño, los cuales permiten evaluar su utilización con respecto a las señales de tensión y corriente obtenidas en la recolección de datos. Para el montaje experimental y toma de datos se usa un modelo en el dominio del tiempo simulado en la herramienta Matlab Simulink, el cual permite variar sistemáticamente la tensión de alimentación tomando como referencia los estándares UNE-EN50160-2015 y ANSI 84.1. Estos resultados comparan los dos modelos implementados y se evalúan las diferencias de los errores de ajuste (señales de tensión con una variación sistemática de un armónico a la vez) y desempeño (señales aleatorias que cumplen con los límites de distorsión individual y total).

## Abstract

**Title:** Modeling of a LED type luminaire using a matrix algebra-based method

**Author:** Iván Javier Blanco Moreno, Andrés Felipe Gómez González.

**Key Words:** LED lighting, nonlinear load, tensor, energy, error, cutting current, model, matrix algebra, phasor and signal.

**Description:** Non-linear loads, such as LED-type loads, have an impact on the electrical network, because these types of loads can cause distortion in voltage as well as current. When this type of load is present, the power factor can be affected and it can have a significant impact on the equipment used in the industry. The present degree work is oriented to modeling of the LED luminaire using three models: harmonically coupled matrix model, tensor model and finally a variation of this last model. For the methods and models, the adjustment and performance errors are evaluated, which allow observing their performance with respect to the voltage and current signals obtained in the data collection; For the experimental setup and data collection, a time domain model is simulated in the Matlab Simulink tool, which allows the supply voltage to be systematically varied taking as reference the UNE-EN50160-2015 and ANSI 84.1 standards. These results allow comparing the implemented models and the differences in adjustment errors (voltage signals with a systematic variation of one harmonic at a time) and performance (random signals that comply with the individual and total distortion limits) are evaluated.

## Introducción

El bajo consumo de energía de un diodo emisor de luz (LED) ha aumentado su uso como dispositivo de iluminación. Las lámparas LED más comerciales tienen una potencia nominal inferior a los 25 [W] y operan con una distorsión armónica total (THD) cercana al 100%. Estas cargas ocasionan un bajo factor de potencia lo cual indica un incremento en las pérdidas de potencia por efecto joule. El modelado y estudio de estas cargas permite determinar el posible impacto de estas cargas sobre los sistemas de distribución puesto que el nivel de contaminación en la red de distribución es elevado y un gran número de estas cargas suelen estar conectadas al mismo barraje (Molina, Mesas, Mesbahi, & Sainz, 2016).

El modelo en el dominio del tiempo implementado en la herramienta Matlab Simulink, se adopta de (Molina, Mesas, Mesbahi, & Sainz, 2016), quienes presentan un circuito compuesto por: capacitancia, resistencia, diodos ideales y una fuente de corriente en DC.

Debido a que el estudio de este trabajo de grado está orientado al modelado de la carga no lineal LED se realiza un enfoque determinista para el barrido de frecuencia (Malagón Carvajal, 2020) el cual consiste en variar sistemáticamente la tensión según los estándares UNE-EN50160-2015 (UNE-EN50160, 2015) y ANSI 84.1-2012 (Standards, 2012). Estos estándares establecen los límites de distorsión individuales para cada orden armónico. Para el ajuste de los modelos en el dominio de la frecuencia se utiliza el barrido de frecuencia, variando sistemáticamente la componente fundamental tanto en magnitud como en ángulo hasta llegar al límite superior propuesto por el estándar ANSI 84.1-2012 (Standards, 2012); luego se superpone la tensión

fundamental con las variaciones sistemáticas en magnitud y ángulo de cada nuevo orden armónico según el estándar UNE-EN50160-2015 (UNE-EN50160, 2015). Se registran las señales de tensión aplicada a la carga y la corriente de carga en el dominio del tiempo, y estas señales luego son transformadas al dominio de la frecuencia. Para el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA) se utiliza el método propuesto en el artículo (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010), con la modificación en el cálculo de la matriz Hermitian indicada por (Malagón Carvajal, 2020). Después de ajustar el modelo, se estiman las señales de corriente para la estimación de los errores de desempeño y ajuste propuestos en (Malagón Carvajal, 2020).

Para el modelo tensorial (M-Tensorial) presentado en (Caicedo , y otros, 2018) se utiliza el mismo método presentado en (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) en donde al tratarse de números reales puede ser utilizado directamente sin ninguna modificación.

Una vez estimadas las señales en el dominio de la frecuencia por los dos modelos se calcularon los errores de desempeño junto con los errores de ajuste. Para el error de desempeño se tomaron 10000 señales aleatorias del conjunto total y para el error de ajuste se abarca todo el conjunto de señales que corresponde a 72 variaciones en magnitud, 20 variaciones en ángulo de fase y 32 armónicos impares, lo cual corresponde a 46080 señales. Finalmente, se calculan los índices de error cuadrático medio total, para magnitud y fase propuestos por (Malagón Carvajal, 2020).

Luego de determinar los índices de error cuadrático medio, se realiza un diagrama de caja (Box-Plot) el cual muestra los datos estadísticos de: mínimo, primer cuartil, segundo cuartil o

mediana, tercer cuartil, máximo y rango Inter cuartil para cada índice de error cuadrático medio (Malagón Carvajal, 2020). Se comparan los valores estadísticos y sus diagramas de caja (Box-Plot), posteriormente se procede a realizar una variación en el segundo modelo. Esta variación consiste en cambiar la corriente de corte o de referencia que se presenta en (Caicedo , y otros, 2018). Esta corriente es igual a la corriente que se obtiene al aplicar la tensión sinusoidal a la carga LED como se propone en (Malagón Carvajal, 2020).

## **1.1. Objetivos**

### ***1.1.1. Objetivo General***

Evaluar el error de desempeño de los modelos en el dominio de la frecuencia: modelo tensorial (M-Tensorial) a partir de la descomposición de fasores y el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA) utilizando métodos basados en álgebra de matrices para una luminaria tipo LED.

### ***1.1.2. Objetivos Específicos***

- Establecer el procedimiento para el desarrollo del experimento y posterior cálculo de los modelos usando una fuente de tensión controlada y un método basado en álgebra matricial.
- Proponer los escenarios de análisis donde se desea evaluar el desempeño del modelo tensorial (M-Tensorial) y el modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas (MMAA) para el modelado de una luminaria LED.
- 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 propuestos empleando una luminaria tipo LED.

## **1.2. Resultados**

El procedimiento establecido para el desarrollo del experimento junto con los escenarios donde se trabajan los modelos de matrices armónicamente acopladas, modelo tensorial y su variación, están dados por (Malagón Carvajal, 2020) junto con los estándares (Standards, 2012) y (UNE-EN50160, 2015) para los límites de distorsión. Los métodos basados en álgebra matricial que se usaron se encuentran en los artículos (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) y (Caicedo , y otros, 2018). Los errores de ajuste y desempeño indicados en (Malagón Carvajal, 2020), al evaluarlos en los dos modelos propuestos en este trabajo de grado junto con la variación en el modelo tensorial, se observó que los dos modelos son iguales en los valores de sus parámetros estadísticos. También al realizar el respectivo diagrama de caja se observa que son iguales gráficamente. Esto significa que ambos modelos son equivalentes, ambos hacen una buena reconstrucción de la señal de corriente para la luminaria LED. En la variación del modelo tensorial, los valores de los parámetros estadísticos son mayores en comparación con los dos modelos trabajados. Pero esta variación en el modelo tensorial también realiza una buena reconstrucción en la señal de corriente para la luminaria LED.

## **2. Modelado de luminarias LED utilizando métodos matriciales**

La distorsión armónica es una de las perturbaciones más graves de la calidad de energía eléctrica, la cual se ha estudiado desde los ochenta, desarrollando así estándares de compatibilidad y límites de emisión para garantizar el funcionamiento apropiado del sistema de energía (Barros, Diego, & De Apraz, 2013).

Con el paso del tiempo la distorsión armónica en redes de distribución de baja tensión ha aumentado debido a las cargas no lineales que se han conectado y al creciente uso por parte de las personas, por ejemplo: carros eléctricos, inversores fotovoltaicos, iluminación del tipo fluorescente y LED (Cunill Solá & Salichs, 2007).

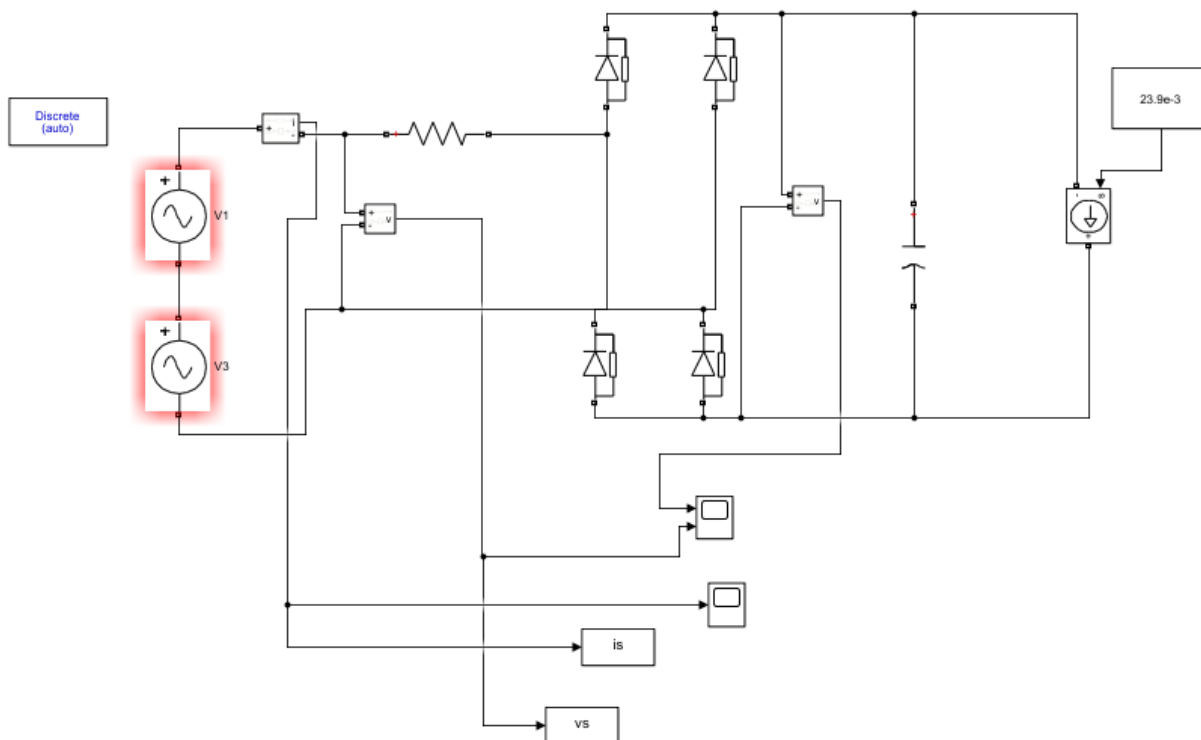
Inicialmente solo se consideraba el estudio de grandes cargas lineales, ahora con el incremento de cargas de este tipo en baja tensión y con la incorporación del convertidor monofásico, las cargas no lineales en sistemas de distribución se convirtieron en una preocupación en el análisis armónico.

Gran cantidad de estudios en esta área tratan acerca de la modelización de los electrodomésticos a partir de la simulación en el dominio del tiempo. La cual proporciona con precisión las señales de corrientes para cargas no lineales, las cuales permiten el estudio en el dominio de la frecuencia para el estudio de los modelos (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010).

## **2.1 Modelo del circuito equivalente para la luminaria LED**

La recolección de datos se realiza con la herramienta Matlab-Simulink. En La figura 1 se presenta el circuito para la luminaria LED propuesto en (Molina, Mesas, Mesbahi, & Sainz, 2016).

**Figura 1.** Modelo del circuito equivalente para una luminaria LED.



Los valores de la resistencia, capacitor y fuente de corriente continua son tomados de (Molina, Mesas, Mesbahi, & Sainz, 2016) y se presentan a continuación:

**Tabla 1.** Parámetros del circuito

Resistencia	Capacitancia	Tensión eficaz	Fuente	Frecuencia
20,2 [Ohm]	8,63 [ $\mu$ F]	220 [Vrms]	23,9 [mA]	50 [Hz]

## 2.2 Estándares para la forma de onda de la tensión de alimentación

En la Figura 1, la variable V1 modela la componente fundamental y la variable V3 modela los órdenes armónicos en la tensión de alimentación, los cuales varían sistemáticamente tomando como límites para el fundamental el estándar ANSI C84.1-2012 (Standards, 2012) y la norma europea UNE-EN50160-2015 (UNE-EN50160, 2015) para los órdenes armónicos, a continuación se presentan los límites superiores para la variación sistemática de los órdenes armónicos de la tensión de alimentación:

**Tabla 2.** Límites de distorsión superior individual, UNE-EN50160 del 2015

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Armónico de orden h	UH [%]	Armónico de orden h	UH [%]	Armónico de orden h	UH [%]
5	3,0	3	3,0	2	1,5
7,11	2,5	9	1,5	4	1,0
13,17	2,0	15,21	0,5	6	0,5
19,23	1,5	>21	0,3	>6	0,3
25	1,0				
>25	0,5				

## 2.3 Organización matricial para los datos

La organización matricial de las medidas de tensión y corriente en el dominio de la frecuencia se realiza con base en la organización matricial propuesta en la tesis (Malagón Carvajal,

2020). La matriz propuesta tiene como finalidad organizar las señales en columnas, de manera que los órdenes armónicos de cada señal están ubicados en filas, esta organización se aplica para las medidas de tensión y corriente.

Para garantizar que el método propuesto por (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) no tenga problemas se deben garantizar matrices linealmente independientes para tener finalmente matrices con dimensiones de  $32 \times 46080$  donde el número de filas son los órdenes armónicos impares que se obtienen en respuesta a las variaciones en magnitud y ángulo, tomando desde el armónico fundamental hasta el orden armónico 63. El número de columnas son las señales generadas por cada variación de orden armónico, magnitud y ángulo. Partiendo de que se varía primero solo la componente fundamental sin distorsión, hasta el límite superior dado por (Standards, 2012). Se tienen 72 señales solo por la primera variación en magnitud. Al multiplicar las 20 variaciones en magnitud por las 72 variaciones de ángulo de fase se obtiene un conjunto de 1.440 señales solo para la componente fundamental. Después de realizar las variaciones solo para la componente fundamental sin distorsión, se procede a superponer la componente fundamental con el orden armónico respectivo hasta llegar al límite superior de distorsión dada por (UNE-EN50160, 2015). Debido a que del armónico 3 al 63 hay 31 armónicos impares, y sabiendo que por cada armónico se realizan 20 variaciones en magnitud y 72 variaciones en ángulo de fase, se obtiene un conjunto de 44.640 señales, este conjunto de señales junto con el primer conjunto de señales nos da un conjunto total de 46.080 señales, lo cual nos indica que tenemos dimensiones de  $32 \times 46080$ . Estas dimensiones se tienen en las matrices de tensión y corriente.

En las ecuaciones 1 y 2 se puede apreciar la organización matricial de las señales de tensión y corriente, donde cada elemento está representado por la forma  $V_{hs}^{kj}$  dónde:

- 1- k representa el número de variaciones en magnitud. Al ser 20 variaciones, se obtiene  $k=1, 2, 3, 5 \dots, 20$ ,
- 2- j representa el número de variaciones en ángulo  $j=1, 2, 3, 5 \dots 72$ ,
- 3- h representa el orden armónico organizado fila a fila.
- 4- s representa la señal la cual está ubicada en cada columna  $s=1, 2, 3, 4, 5 \dots 46080$ .

**Ecuación:** Organización matricial para las señales de tensión.

$$V = \begin{bmatrix} V_{1_1}^{1_1} & V_{1_2}^{1_2} & \dots & V_{1_72}^{1_72} & \dots & V_{1_73}^{2_1} & \dots & V_{1_25500}^{20_2} & \dots & V_{1_46080}^{20_72} \\ V_{3_1}^{1_1} & V_{3_2}^{1_2} & \dots & V_{3_72}^{1_72} & \dots & V_{3_73}^{2_1} & \dots & V_{3_25500}^{20_2} & \dots & V_{3_46080}^{20_72} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ V_{25_1}^{1_1} & V_{25_2}^{1_2} & \dots & V_{25_72}^{1_72} & \dots & V_{25_73}^{2_1} & \dots & V_{25_25500}^{20_2} & \dots & V_{25_46080}^{20_72} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ V_{63_1}^{1_1} & V_{63_2}^{1_2} & \dots & V_{63_72}^{1_72} & \dots & V_{63_73}^{2_1} & \dots & V_{63_25500}^{20_2} & \dots & V_{63_46080}^{20_72} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Observando la matriz anterior, se tiene que la primera señal (primera columna de la matriz de tensiones) corresponde a la primera variación en magnitud con el armónico fundamental y la primera variación en el ángulo de fase, las filas de esta primera columna corresponden al orden armónico que se obtienen como respuesta al aplicar la variación descrita anteriormente. De esta manera la segunda señal o columna de la matriz de tensión, es la misma primera variación en magnitud, pero en esta segunda señal se utiliza la segunda variación en el ángulo de fase, de esta

manera se llega hasta la columna 72 las cuales son las primeras 72 señales que se obtienen al tener la primera variación de magnitud junto con la combinación de las 72 variaciones en ángulo. Terminadas las primeras 72 variaciones de ángulo se hace la segunda variación en magnitud y se combinan nuevamente con las 72 variaciones en ángulo. De esta manera se completan todas las variaciones en magnitud. Finalmente, al terminar con el armónico fundamental se repite para los siguientes ordenes armónicos hasta llegar al orden armónico 63.

De igual forma la organización matricial de la señal de corriente tiene la forma  $I_{hs}^{kj}$  donde los subíndices k, j, h y s representan los números de variaciones mencionados anteriormente.

**Ecuación:** Organización matricial para la señal de corriente

$$I = \begin{bmatrix} I_{1_1}^{1_1} & V_{1_2}^{1_2} & \dots & I_{1_72}^{1_72} & \dots & I_{1_73}^{2_1} & \dots & I_{1_25500}^{20_2} & \dots & I_{1_46080}^{20_72} \\ I_{3_1}^{1_1} & V_{3_2}^{1_2} & \dots & I_{3_72}^{1_72} & \dots & I_{3_73}^{2_1} & \dots & I_{3_25500}^{20_2} & \dots & I_{3_46080}^{20_72} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_{25_1}^{1_1} & V_{25_2}^{12} & \dots & I_{25_72}^{1_72} & \dots & I_{25_73}^{2_1} & \dots & I_{25_25500}^{20_2} & \dots & I_{25_46080}^{20_72} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_{63_1}^{11} & V_{63_2}^{12} & \dots & I_{63_72}^{1_72} & \dots & I_{63_73}^{2_1} & \dots & I_{63_25500}^{20_2} & \dots & I_{63_46080}^{20_72} \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 2.4 Método Nassif-Yong-Xu

En el artículo (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) los autores proponen un método para el ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia a partir de la relación entre las tensiones y las corrientes.

**Ecuación:** Modelo Nassif-Yong-Xu

$$I_{ac} = Y^+ V_{ac} + Y^- V_{ac}^* \quad (3)$$

Donde  $I_{ac}$  es la corriente de la carga no lineal,  $Y^+$  y  $Y^-$  son matrices de admitancias acopladas las cuales relacionan la tensión con la corriente,  $V_{ac}$  y  $V_{ac}^*$  son tensión por orden armónico y su tensión conjugada respectivamente (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010).

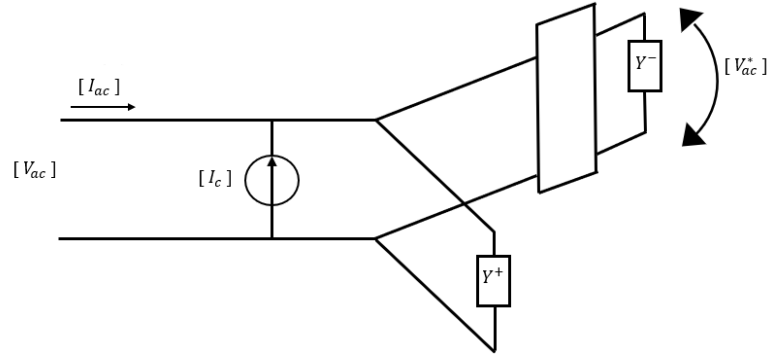
En base a la ecuación matricial anterior, los autores realizan un ajuste y obtienen un modelo basado en la misma estructura, pero destinado a representar convertidores no-controlados. Este modelo es llamado por los autores modelo completo el cual tiene la siguiente ecuación:

**Ecuación:** modelo completo propuesto por A,B, Nassif, J, Yong, W, Xu

$$I_{ac} = I_c + Y^+ V_{ac} + Y^- V_{ac}^* \quad (4)$$

En la siguiente figura, se presenta el modelo dado por la ecuación (4):

**Figura 2.** Circuito equivalente del modelo completo de matriz de admitancias,



Nota: Adaptado de (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010)

**Ecuación:** Modelo completo A,B, Nassif, J, Yong, W, Xu

$$I_{n \times m} = I_{c \ n \times m} + Y^+_{n \times n} \cdot V_{n \times m} + Y^-_{n \times n} \cdot V^*_{n \times m} \quad (5)$$

**Ecuación:** Representación matricial para calcular la corriente consumida por la carga no lineal

$$I_{n \times m} = \begin{bmatrix} I_{c \ n \times 1} & Y^+_{n \times n} & Y^-_{n \times n} \end{bmatrix}_{n \times 2n+1} \begin{bmatrix} 1_{1 \times m} \\ V_{n \times m} \\ V^*_{n \times m} \end{bmatrix}_{2n+1 \times m} \quad (6)$$

Donde n y m son los sub-índices de orden armónico y la señal que se obtuvo al realizar la toma de datos.

Ahora se definen las matrices A y B como se presenta a continuación:

**Ecuación:** Matrices A y B para el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA)

$$A = \begin{bmatrix} 1_{1 \times m} \\ V_{n \times m} \\ V^*_{n \times m} \end{bmatrix}_{2n+1 \times m} \quad (7)$$

$$B = [1_{m \times 1} \quad V_{m \times n} \quad V_{m \times n}]_{m \times 2n+1} \quad (8)$$

Donde la matriz B es la matriz transpuesta conjugada de la matriz A o Hermitian identificada por (Malagón Carvajal, 2020). Multiplicando a ambos lados de la igualdad por la matriz B se obtiene

$$I_{n \times m} \cdot B = [I_{c_{n \times 1}} \quad Y^+_{n \times n} \quad Y^-_{n \times n}]_{n \times 2n+1} \cdot A \cdot B$$

Finalmente, las matrices  $I_{c_{n \times 1}}$ ,  $Y^+_{n \times n}$  y  $Y^-_{n \times n}$  que utilizan en la reconstrucción de las señales de corriente, se calculan multiplicando por la inversa de la matriz resultante de la multiplicación las matrices A y B:

**Ecuación:** Cálculo de la matriz concatenada

$$[I_{c_{n \times 1}} \quad Y^+_{n \times n} \quad Y^-_{n \times n}]_{n \times 2n+1} = I_{n \times m} B (A \cdot B)^{-1} \quad (9)$$

Esta última ecuación matricial se usa como método de ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia.

## 2.5 Modelo Tensorial (M-Tensorial)

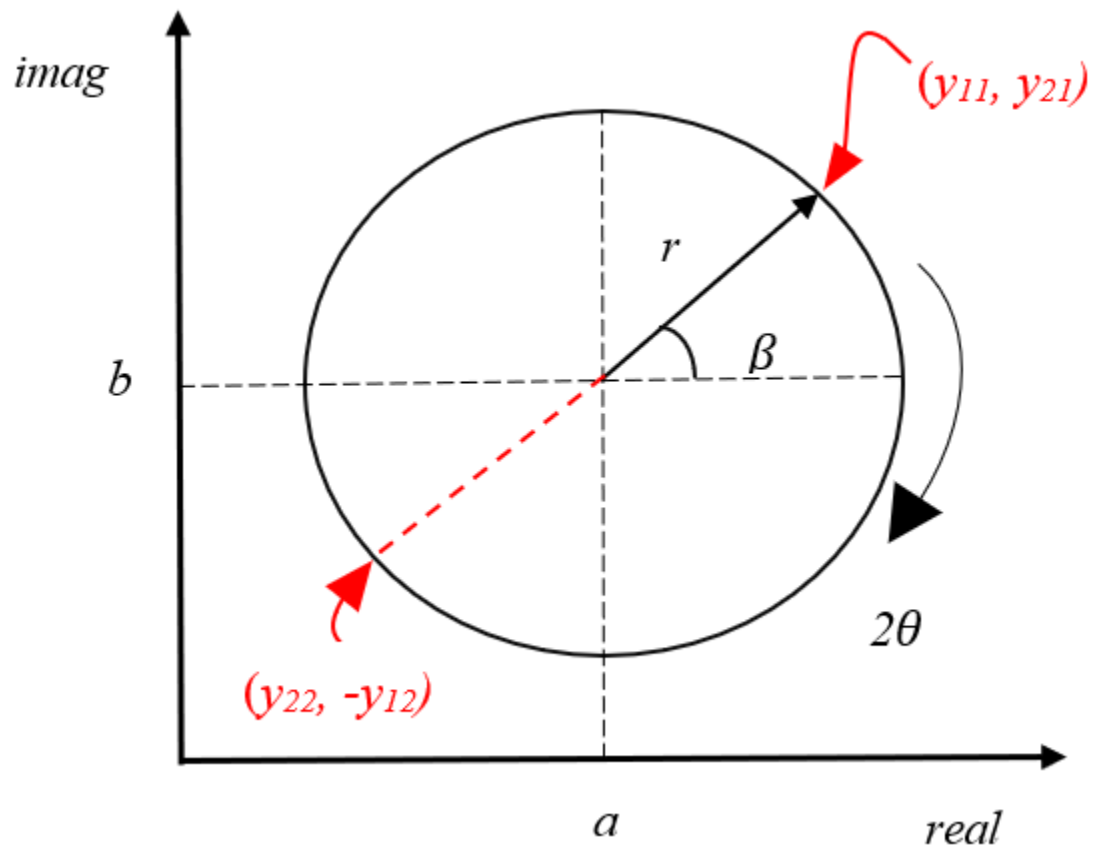
El comportamiento de una carga no lineal puede ser modelado utilizando la parametrización mediante un tensor, al aplicar la descomposición en tensores para una corriente y una tensión, se obtiene una matriz de tensores de admitancia de 2x2 la cual se representa por las siguientes matrices:

**Ecuación:** Cálculo de corriente imaginaria y real mediante parametrización tensorial.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{real} \\ \Delta I_{imag} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{real} \\ \Delta V_{imag} \end{bmatrix} \quad (10)$$

El tensor es representado geoméricamente en un círculo en el plano complejo, como lo muestra la Figura 3. La componente de admitancia de la matriz gira alrededor de su centro, en el plano complejo, con radio r. El ángulo Beta indica la componente calculada con ángulo de tensión armónico igual a cero. Además, como el ángulo de la tensión armónica aplicada, Theta varía, la admitancia en la matriz cambia en el sentido de las agujas del reloj con una tasa de 2 Theta (Caicedo , y otros, 2018).

**Figura 3.** Parametrización mediante tensores



Nota: Adaptado de (Caicedo , y otros, 2018)

Este modelo surge a partir de la descomposición de los fasores en tensores, las ecuaciones matriciales se encuentran en la tesis (Malagón Carvajal, 2020) y se pueden apreciar a continuación:

**Ecuación:** Modelo tensorial a partir de la descomposición de fasores

$$\begin{bmatrix} [I_r] \\ [I_i]_3 \\ [I_r] \\ [I_i]_5 \\ \vdots \\ [I_r] \\ [I_i]_\mu \\ \vdots \\ [I_r] \\ [I_i]_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_r] \\ [I_i]_3 \\ [I_r] \\ [I_i]_5 \\ \vdots \\ [I_r] \\ [I_i]_\mu \\ \vdots \\ [I_r] \\ [I_i]_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [y_{11} & y_{12}] & [y_{11} & y_{12}] & \dots & [y_{11} & y_{12}] & \dots & [y_{11} & y_{12}] \\ [y_{21} & y_{22}]_{33} & [y_{21} & y_{22}]_{35} & \dots & [y_{21} & y_{22}]_{3v} & \dots & [y_{21} & y_{22}]_{3h} \\ [y_{11} & y_{12}] & [y_{11} & y_{12}] & \dots & [y_{11} & y_{12}] & \dots & [y_{11} & y_{12}] \\ [y_{21} & y_{22}]_{53} & [y_{21} & y_{22}]_{55} & \dots & [y_{21} & y_{22}]_{5v} & \dots & [y_{21} & y_{22}]_{5h} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [y_{11} & y_{12}] & [y_{11} & y_{12}] & \vdots & [y_{11} & y_{12}] & \vdots & [y_{11} & y_{12}] \\ [y_{21} & y_{22}]_{\mu 3} & [y_{21} & y_{22}]_{\mu 5} & \vdots & [y_{21} & y_{22}]_{\mu v} & \dots & [y_{21} & y_{22}]_{\mu h} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [y_{11} & y_{12}] & [y_{11} & y_{12}] & \dots & [y_{11} & y_{12}] & \dots & [y_{11} & y_{12}] \\ [y_{21} & y_{22}]_{h3} & [y_{21} & y_{22}]_{h5} & \dots & [y_{21} & y_{22}]_{hv} & \dots & [y_{21} & y_{22}]_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_r] \\ [V_i]_3 \\ [V_r] \\ [V_i]_5 \\ \vdots \\ [V_r] \\ [V_i]_\mu \\ \vdots \\ [V_r] \\ [V_i]_h \end{bmatrix} \quad (11)$$

Al usar el método propuesto por (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010), se busca encontrar el vector  $I_c$  y la matriz  $Y$  del modelo en la Ecuación (11) para hacer la respectiva reconstrucción de la señal de corriente.

La organización matricial, tanto para tensión, como para corriente, se mantuvo igual a la descrita anteriormente en las ecuaciones (1) y (2), ubicando las señales en columnas, pero, con la diferencia de que son matrices de números reales y las filas de las matrices se duplican, debido a que los fasores que componen cada señal se descomponen en su parte real y parte imaginaria a lo largo de la columna y se ordenan de tal manera que queden uno detrás de otro en las filas, para una misma columna (Malagón Carvajal, 2020).

Para el cálculo de la matriz concatenada  $[I_c \ Y]$ , se aplica el siguiente procedimiento:

**Ecuación:** Cálculo de la corriente a partir de las matrices  $I_c$  y  $Y$  para el modelo tensorial.

$$I_n = I_c + Y * V \quad (12)$$

Agrupando términos en la ecuación (12) se obtiene el siguiente arreglo:

$$I_{n \times m} = [I_{C_{n \times 1}} \ Y_{n \times n}] \begin{bmatrix} 1_{n \times m} \\ V_{n \times m} \end{bmatrix}$$

A continuación, se definen dos matrices importantes para el cálculo de la matriz concatenada.

**Ecuación:** Matrices C y D para el modelo tensorial.

$$C = \begin{bmatrix} 1_{1 \times m} \\ V_{n \times m} \end{bmatrix} \quad (13) \quad D = [1_{m \times 1} \ V_{m \times n}] \quad (14)$$

Donde la matriz B representa la matriz transpuesta de la matriz A, realizando el despeje de las ecuaciones anteriores se obtiene:

**Ecuación:** Cálculo de la matriz de concatenación para el modelo tensorial

$$[I_{C_{n \times 1}} \ Y_{n \times n}] = [I_{n \times m}] ([1_{m \times 1} \ V_{m \times n}] * \left( [1_{m \times 1} \ V_{m \times n}] * \begin{bmatrix} 1_{1 \times m} \\ V_{n \times m} \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (15)$$

**Ecuación:** Cálculo de la matriz de concatenación a partir de las matrices C y D para el modelo tensorial

$$[I_{C_{n \times 1}} \ Y_{n \times n}] = [I_{n \times m}] D (DC)^{-1} \quad (16)$$

## 2.6 Variación con Delta de Corriente en el Modelo Tensorial

Este modelo tiene como objetivo aplicar una variación en la cual la corriente de corte se considera conocida. En este caso, se elige la corriente en respuesta a la sinusoidal de tensión senoidal (Malagón Carvajal, 2020). Este método consiste en el ajuste del modelo mediante el cálculo de la matriz  $Y$ .

**Ecuación:** Variación delta de corriente y cálculo de la variación a partir de las matrices  $Y$  y  $V$ .

$$\Delta I = I - Ic \quad (17)$$

$$\Delta I = Y * V \quad (18)$$

Definiendo las matrices  $E$  y  $F$  como:

**Ecuación:** Matrices  $E$  y  $F$  para la variación delta de corriente en el modelo tensorial

$$E = [V_{n \times m}] \quad (19)$$

$$F = [V_{m \times n}] \quad (20)$$

Donde  $F$  es la matriz traspuesta de  $E$ , debido a que tenemos la misma organización matricial para señales de tensión y corriente donde solo se trabaja con números reales, tenemos el siguiente despeje para calcular la matriz  $Y$ :

**Ecuación:** Cálculo de la matriz de concatenación para la variación delta de corriente en el modelo tensorial.

$$Y = (I - Ic)([V_{m \times n}]) * (([V_{m \times n}]) * ([V_{n \times m}]))^{-1} \quad (21)$$

**Ecuación:** Cálculo de la matriz de concatenación con las matrices E y F para variación delta de corriente en el modelo tensorial.

$$Y = (\Delta I)F(FE)^{-1} \quad (22)$$

## 2.7 Evaluación de error de ajuste y desempeño

Para la evaluación de error de ajuste se utilizan todo el conjunto de señales en el barrido por frecuencia que se obtuvo a partir de la reconstrucción y para la evaluación del error de desempeño se seleccionaron 10000 señales aleatorias del conjunto total (Malagón Carvajal, 2020), las cuales cumplen con los límites de distorsión individual dados por (Standards, 2012) y (UNE-EN50160, 2015).

Una vez obtenidas las señales aleatorias y el conjunto total, se usa un método para la evaluación del error basado en la definición del “Mean Squared Error-MSE” y el teorema de Parseval (Malagón Carvajal, 2020), el cual consiste en vincular la magnitud y fase de la señal estimada en el dominio del tiempo (modelo en el dominio del tiempo) junto con la señal obtenida de la reconstrucción (modelo en el dominio de la frecuencia), para todos los métodos aplicamos las siguientes ecuaciones:

**Ecuación:** MSE señal estimada en el dominio del tiempo

$$I_{\mu} = \frac{I_{original}^2}{2} \quad (23)$$

**Ecuación:** MSE señal estimada en el dominio de la frecuencia

$$I_{F\mu} = \frac{I_{reconstruccion}^2}{2} \quad (24)$$

Donde la ecuación (23) que está representada por  $I_{\mu}$  donde el subíndice  $\mu$  representa el MSE de la señal estimada en el dominio del tiempo y la ecuación (24) que está representada por  $I_{F\mu}$ , donde el subíndice  $F\mu$  representa MSE de la señal estimada en el dominio de la frecuencia (Malagón Carvajal, 2020). Para estas dos ecuaciones anteriores se aplican las siguientes ecuaciones para hallar el MSE total, MSE total de magnitud y el MSE de ajuste total debido al error de fase:

**Ecuación:** MSE total

$$MSE [\%] = \frac{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu} - I_{F\mu}|^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \times 100\% \quad (25)$$

**Ecuación:** MSE total de magnitud.

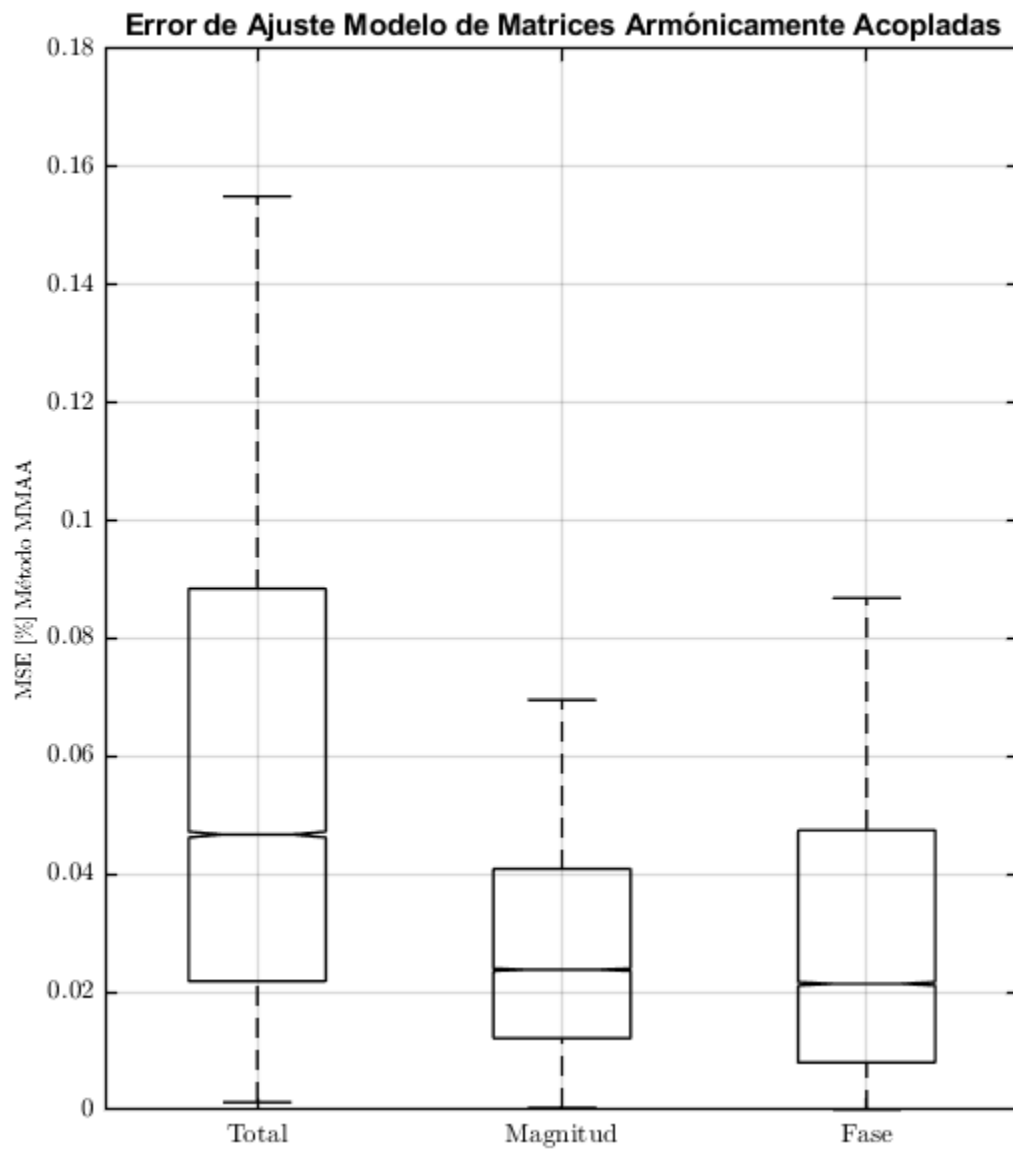
$$MSE_{\mu}^m [\%] = \sum_{\mu=1}^h \left( \frac{[|I_{\mu}| - |I_{F\mu}|]^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \right) \times 100\% \quad (26)$$

**Ecuación:** MSE de ajuste total debido al error de fase

$$MSE_{\mu}^{\Delta\theta} [\%] = \sum_{\mu=1}^h \left( \frac{|I_{\mu} - I_{F\mu}|^2 - [|I_{\mu}| - |I_{F\mu}|]^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \right) \times 100\% \quad (27)$$

Una vez calculados estos datos se procede a realizar un diagrama de caja (Box-Plot) el cual consiste en la presentación del error de ajuste y error de desempeño, donde en estos diagramas encontramos los siguientes datos: mínimo, primer cuartil, segundo cuartil, tercer cuartil, máximo (Malagón Carvajal, 2020).

A continuación, se aprecian tres Box-Plot. Uno para MSE total otro para MSE total de magnitud y finalmente uno para MSE de ajuste total debido al error de fase como se puede apreciar en la siguiente figura.

**Figura 4.** Representación Box-Plot

Como se aprecia en la figura 4, cada línea horizontal del Box-Plot representa el mínimo, el primer cuartil, el segundo cuartil, el tercer cuartil y el máximo para el MSE total, MSE total de magnitud y MSE de ajuste total debido al error de fase.

### **3. Metodología de experimentación**

En esta sección se explican los experimentos llevados a cabo para el ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia, los estándares utilizados para limitar las zonas de operación en el experimento de un armónico a la vez, así como la aplicación de los métodos que se proponen en el capítulo 2, para el ajuste de modelos.

#### **3.1 Recolección de datos**

Para el desarrollo del experimento se realizó el enfoque determinista para el barrido de la frecuencia, el cual busca resolver la definición de la zona de operación en la tensión de alimentación. Este enfoque tiene como objetivo la obtención de mejores resultados en la estimación de corrientes junto con la disminución de tiempo y trabajo durante la realización del experimento para caracterizar y modelar cargas no-lineales propuestos por (Malagón Carvajal, 2020).

El experimento está compuesto por una fuente de tensión AC programable, la cual permite variaciones en la magnitud y el ángulo de fase (Malagón Carvajal, 2020). Para el desarrollo de este trabajado de grado se emplea la herramienta MATLAB-Simulink, esta permite elaborar el circuito equivalente para la luminaria LED que se aprecia en el capítulo 2.1. Esta herramienta nos permite tener una fuente de tensión la cual permite programar e ir variando sistemáticamente la tensión de alimentación y así cumplir con el respectivo barrido de frecuencia, junto con las distorsiones de referencia encontradas en el capítulo 2.2.

Para el número de armónicos que se implementó el cual es igual a 63 armónicos, primero se realiza una comparación con una señal de corriente obtenida en el laboratorio, esta es proporcionada por (Malagón Carvajal, 2020). Esta señal de corriente esta muestreada en el dominio del tiempo. La señal en el tiempo se lleva al dominio de la frecuencia con la FFT (Fast Fourier Transform). Una vez obtenida esta señal en el dominio de la frecuencia se calculan los respectivos armónicos de la señal de corriente y se comienza a reconstruir la señal de corriente adicionando un armónico a la vez. Al realizar el procedimiento anterior y comparar su energía con la señal que fue muestreada, se observa que al utilizar 63 armónicos (pares e impares) en el cálculo de la energía se obtiene un error de 0,000011%. Al ser un error mínimo se decide utilizar 63 armónicos (pares e impares) iniciando desde el armónico fundamental.

Finalmente, para el número de variaciones aplicadas en la parte experimental, se toman las mismas variaciones indicadas en (Malagón Carvajal, 2020). Porque al tener un barrido más grande en pasos de magnitud y ángulos de fase se obtiene un mejor barrido de frecuencia en el enfoque determinista.

Durante la variación de la componente fundamental de tensión  $V_1$  de 220 [Vrms] se realizan 20 variaciones en magnitud y 72 variaciones en el ángulo de fase, las variaciones en magnitud se incrementan iniciando el incremento en 0,1% hasta llegar a un 5% por arriba de la tensión fundamental de acuerdo con los límites de regulación de tensión propuestos por la ANSI C84.1-2012 (Standards, 2012). Esto se realiza aumentando proporcionalmente la magnitud según

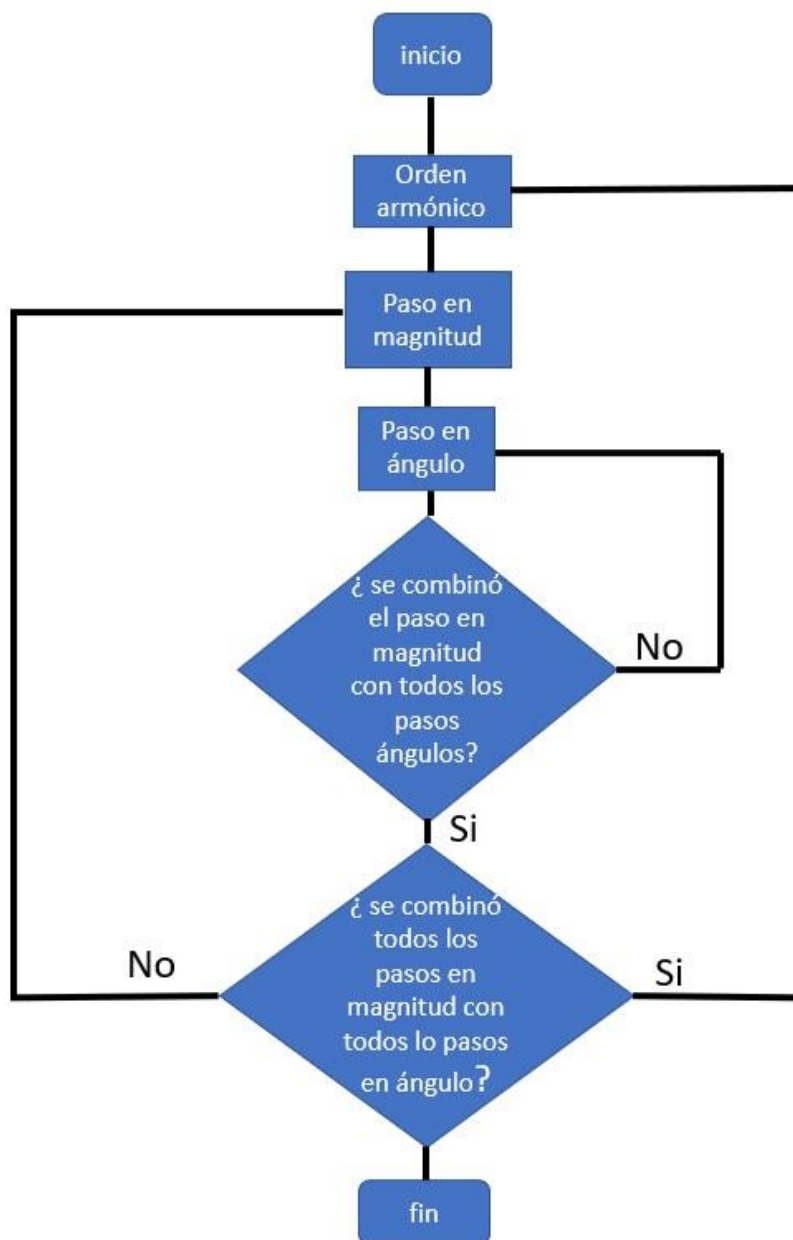
el número de variaciones implementadas en magnitud; al realizar la primera variación en magnitud esta se deja fija y se varía el ángulo 72 veces, desde  $0^\circ$  hasta  $355^\circ$  (aumentando proporcionalmente el ángulo según el número de variaciones implementadas en ángulo); al finalizar se obtiene un total de 1.440 señales y cada señal tiene 128 muestras, con las cuales al aplicar la FFT (Fast Fourier Transform) es posible calcular 63 componentes de frecuencia para cada señal.

Posterior a ello se deja fija la tensión del fundamental y se implementa la fuente de armónicos V3 para generar la distorsión armónica, solo usando armónicos impares con 20 variaciones en magnitud y 72 variaciones en ángulo de fase. Las variaciones en tensión inician en un 0.1% del valor fundamental y se utiliza como límite superior los límites propuestos por la norma UNE-EN50160-2015 (UNE-EN50160, 2015).

Al aplicar los límites superiores de distorsión individual para cada orden armónico se obtienen 1.440 señales por cada variación de orden armónico superpuesto al fundamental, debido a que solo se trabajó con armónicos impares y en las 63 componentes de frecuencia para cada señal, se tienen 32 armónicos impares del armónico 1 al 63, se obtiene un total de 46.080 señales que salen del producto de 20 variaciones en magnitud, 72 variaciones en ángulo, 32 armónicos impares. De esta forma obtenemos matrices de  $32 \times 46.080$ , con 32 armónicos impares para las señales de tensión y corriente que con el experimento de un armónico a la vez puede ser posible garantizar que las medidas son linealmente independientes.

A continuación, se presenta en la siguiente figura un diagrama de flujo de cómo se realizó la recolección de datos para el barrido de frecuencia determinista.

**Figura 5.** Diagrama de flujo para la recolección de datos en el dominio de la frecuencia determinista.



### 3.2 Modelo de Matrices Armónicamente Acopladas (MMAA)

En el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA) se aplica la ecuación (4) propuesta por (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010), la cual consiste en hallar la matriz concatenada que está compuesta por una matriz de corriente de corte  $I_c$ , una matriz  $Y^+$  y una matriz  $Y^-$ . La matriz concatenada se usa para hacer la reconstrucción de la señal de corriente teniendo la tensión de alimentación y aplicando el cálculo de la matriz Hermitian identificado por (Malagón Carvajal, 2020).

Aplicando la ecuación (9) con los datos recolectados de tensión y corriente, se encuentra las dimensiones de la matriz concatenada y de cada elemento de la misma. A continuación, se observan las dimensiones:

$$[I_{c_{32 \times 1}} \quad Y^+_{32 \times 32} \quad Y^-_{32 \times 32}]_{32 \times 65}$$

### 3.3 Modelo Tensorial (M-Tensorial) y Variación en el modelo tensorial (V-M-Tensorial)

Para la reconstrucción de la señal de corriente que consume la carga no lineal LED, se aplica la organización matricial descrita para el modelo propuesto por (Malagón Carvajal, 2020), posterior a la organización matricial se procede a implementar la ecuación (16) la cual se utiliza para el cálculo de la matriz concatenada la cual tiene las siguientes dimensiones:

$$[Ic_{64 \times 1} \ Y_{64 \times 64}]_{64 \times 65}$$

Cuando se aplica la variación descrita en el marco teórico en la sección 2.6 y la ecuación (22) se obtiene una matriz concatenada de iguales dimensiones que la matriz concatenada para el modelo tensorial (M-Tensorial).

Los escenarios donde se evalúa el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA), modelo Tensorial (M-Tensorial) y variación en el modelo tensorial (V-M-Tensorial) son con los errores de ajuste y desempeño descritos en el capítulo 2.7 propuestos por (Malagón Carvajal, 2020). La evaluación de estos errores consiste en comparar las señales de corriente que se obtuvieron en la recolección de datos descrita en la sección 3.1 junto con las señales de corriente estimadas por los modelos descritos en los capítulos 3.2 y 3.3.

### **3.4 Errores cuadráticos medio total, de magnitud y fase**

Realizado el cálculo de la matriz concatenada con las ecuaciones (9), (15) y (21) para los tres modelos respectivamente propuestos en este trabajo de grado, se procede a realizar la estimación de la señal de corriente de la luminaria LED con las ecuaciones (6), (12) y (18). Una vez hecha esta estimación, se almacenan los datos en un archivo en la herramienta Matlab-Simulink para realizar el cálculo de los errores cuadrático medio total, de magnitud y fase. Para los modelos y métodos en el dominio de la frecuencia descritos en el capítulo 2, y para la variación en el modelo tensorial (V-M-Tensorial). Se aplica para el cálculo del error de la ecuación (24) y

para las señales tomadas del modelo en el dominio del tiempo en la recolección de datos se aplica la ecuación (23), una vez realizado este cálculo se implementa en cada uno de los modelos y/o métodos las ecuaciones (25), (26) y (27) para calcular los errores cuadráticos medios total, de magnitud y fase para posteriormente ser organizados en matrices y así realizar el diagrama de caja (Box-Plot).

#### **4. Resultados de desempeño de los modelos**

En este capítulo se presentan los resultados de desempeño de los métodos propuestos por (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) y (Caicedo , y otros, 2018) junto con las modificaciones propuestas por (Malagón Carvajal, 2020) además de la variación en el modelo tensorial (V-M-Tensorial). Las figuras Box-Plots (Diagrama de Caja) que están en este capítulo contienen información acerca de los errores de ajuste y desempeño evaluados para cada uno de los modelos (Modelo de matrices armónicamente acopladas, Modelo tensorial y Variación en el modelo tensorial). Adicional, después de cada figura para cada modelo se exhibe información de los valores estadísticos de: mínimo, máximo, rango Inter cuartil (IQR) y cuartiles (Q1, Q2, Q3), estos cuartiles tienen información de los errores (MSE total, MSE total de magnitud, MSE de ajuste total debido al error de fase) organizados de manera ascendente. Los cuartiles Q1, Q2, Q3 dividen el conjunto total de los datos en cuatro partes iguales, representando en porcentaje respectivamente el 25% de los datos, 50% de los datos (mediana) y el 75% de los datos. El rango inter-cuartil corresponde a la diferencia entre tercer cuartil (Q3) y el primer cuartil (Q2) el cual permite identificar el 50% de los datos.

#### **4.1 Evaluación del modelo Nasiff-Yong-Xu**

En esta sección se presentan los resultados para el método propuesto por (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) y su respectiva modificación identificada por (Malagón Carvajal, 2020), para la evaluación de los errores de ajuste y desempeño.

A continuación, se presenta la Tabla 3 con los errores de ajuste y desempeño para el modelo en la luminaria LED, aplicando el método propuesto por (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010).

**Tabla 3.** Errores de ajuste y desempeño para el modelo con el método propuesto por Nassif -Yong-Xu.

Errores de Ajuste [%]							
Modelo de Matrices	Errores	Mínimo	(1er Cuartil) Q1	(Mediana) Q2	(3er Cuartil) Q3	Máximo	IQR
Armónica mente Acopladas (MMAA)	MSE Total	147,7965	197,5556	197,9907	198,6825	236,1788	1,1270
	MSE Total	0,0004	0,0122	0,0238	0,0409	7,4616	0,0287
	Magnitud						
	MSE Total de Fase	146,5171	197,5241	197,9650	198,6502	228,7172	1,1261
Errores de Desempeño [%]							
Modelo de Matrices	Errores	Mínimo	(1er Cuartil) Q1	(Mediana) Q2	(3er Cuartil) Q3	Máximo	IQR
Armónica mente Acopladas (MMAA)	MSE Total	147,7965	196,5755	198,2101	200,6701	236,1788	4,0947
	MSE Total	0,0004	0,0210	0,0450	0,2019	7,4616	0,1809
	Magnitud						
	MSE Total de Fase	146,5171	196,5222	198,1728	200,5568	228,7172	4,0345

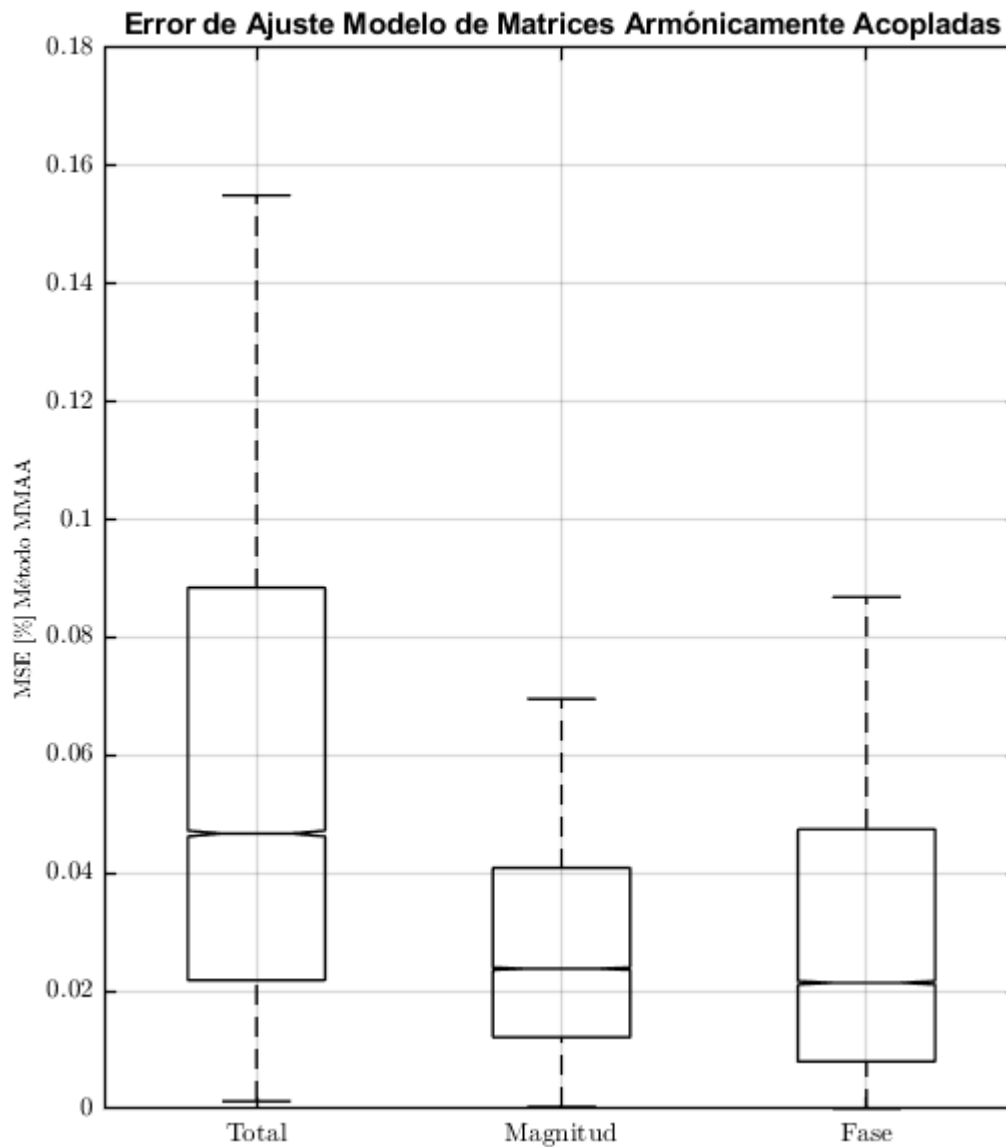
## **4.2 Resultados del modelo de matrices armónicamente acopladas con la modificación identificada**

Se presentan los resultados para el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA) con la modificación identificada por (Malagón Carvajal, 2020), en la Tabla 4 y el Box-Plot (Diagrama de caja) en las Figura 6 y Figura 7 para el modelo aplicado con su modificación.

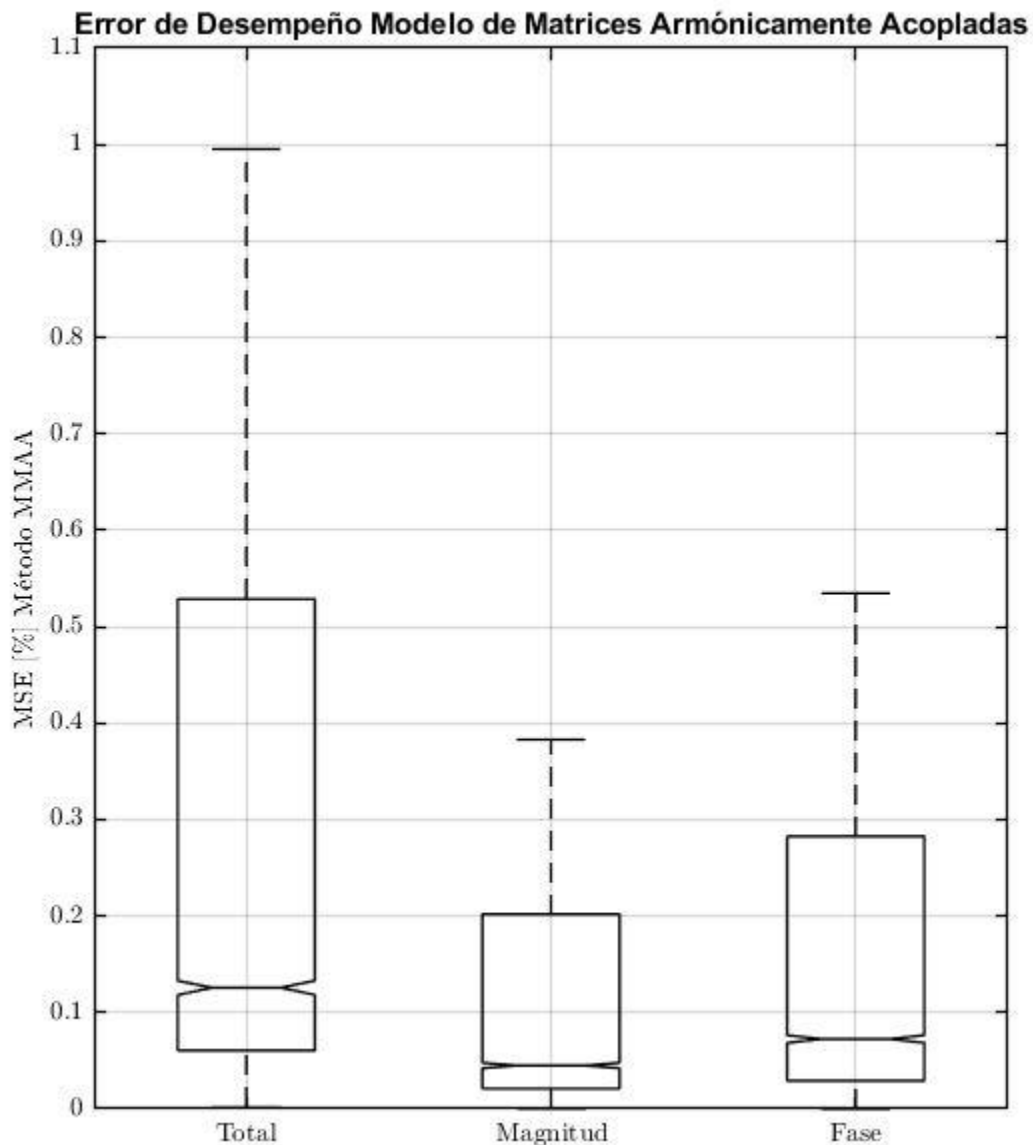
**Tabla 4.** Errores de ajuste y desempeño en el modelo de matrices armónicamente acopladas con la modificación identificada

Errores de Ajuste [%]							
Modelo de Matrices Armónicamente Acopladas (MMAA)	Errores	Mínimo	(1er Cuartil) Q1	(Mediana) Q2	(3er Cuartil) Q3	máximo	IQR
	MSE Total	0,00129	0,02184	0,04672	0,08844	0,15500	0,06660
	MSE Total Magnitud	0,00036	0,01216	0,02379	0,04089	0,06956	0,02873
	MSE Total de Fase	0,00005	0,00804	0,02140	0,04746	0,08686	0,03942
Errores de Desempeño [%]							
Modelo de Matrices Armónicamente Acopladas (MMAA)	Errores	Mínimo	(1er Cuartil) Q1	(Mediana) Q2	(3er Cuartil) Q3	Máximo	IQR
	MSE Total	0,0015	0,0606	0,1256	0,5287	0,9952	0,4681
	MSE Total Magnitud	0,0004	0,0210	0,0450	0,2019	0,3829	0,1809
	MSE Total de Fase	0,0002	0,0292	0,0725	0,2827	0,5347	0,2535

**Figura 6.** Box-Plot para el modelo de matrices armónicamente acopladas aplicando el método propuesto por Nassif-Yong\_Xu y la modificación identificada para el error de ajuste.



**Figura 7.** Box-Plot para el modelo de matrices armónicamente acopladas aplicando el método propuesto por Nassif-Yong\_Xu y la modificación identificada para el error de desempeño.



#### **4.3 Comparación entre el método propuesto por Nassif-Yong-Xu y la modificación identificada en el modelo de matrices armónicamente acopladas**

Se observa al comparar las Tablas 3 y 4 que los valores estadísticos: mínimo, Q1(primer cuartil), Q2(media), Q3(tercer cuartil), máximo e IQR (rango Inter cuartil), en la aplicación del

método con la modificación identificada por (Malagón Carvajal, 2020) da como resultado porcentajes de error mucho más pequeños (Tabla 4), en comparación con los errores obtenidos en la Tabla 3 con el método propuesto por (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010).

Tomando el error de ajuste en la columna de valores mínimos para el MSE total, magnitud y de fase en el método de (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) y comparando los respectivos valores en la modificación identificada por (Malagón Carvajal, 2020), se tiene una mejora de 114.570,93 veces para el MSE total. 1,11 veces para MSE magnitud. Y 2.930,34 veces para MSE de Fase al aplicar la modificación de la matriz Hermitian identificada por (Malagón Carvajal, 2020).

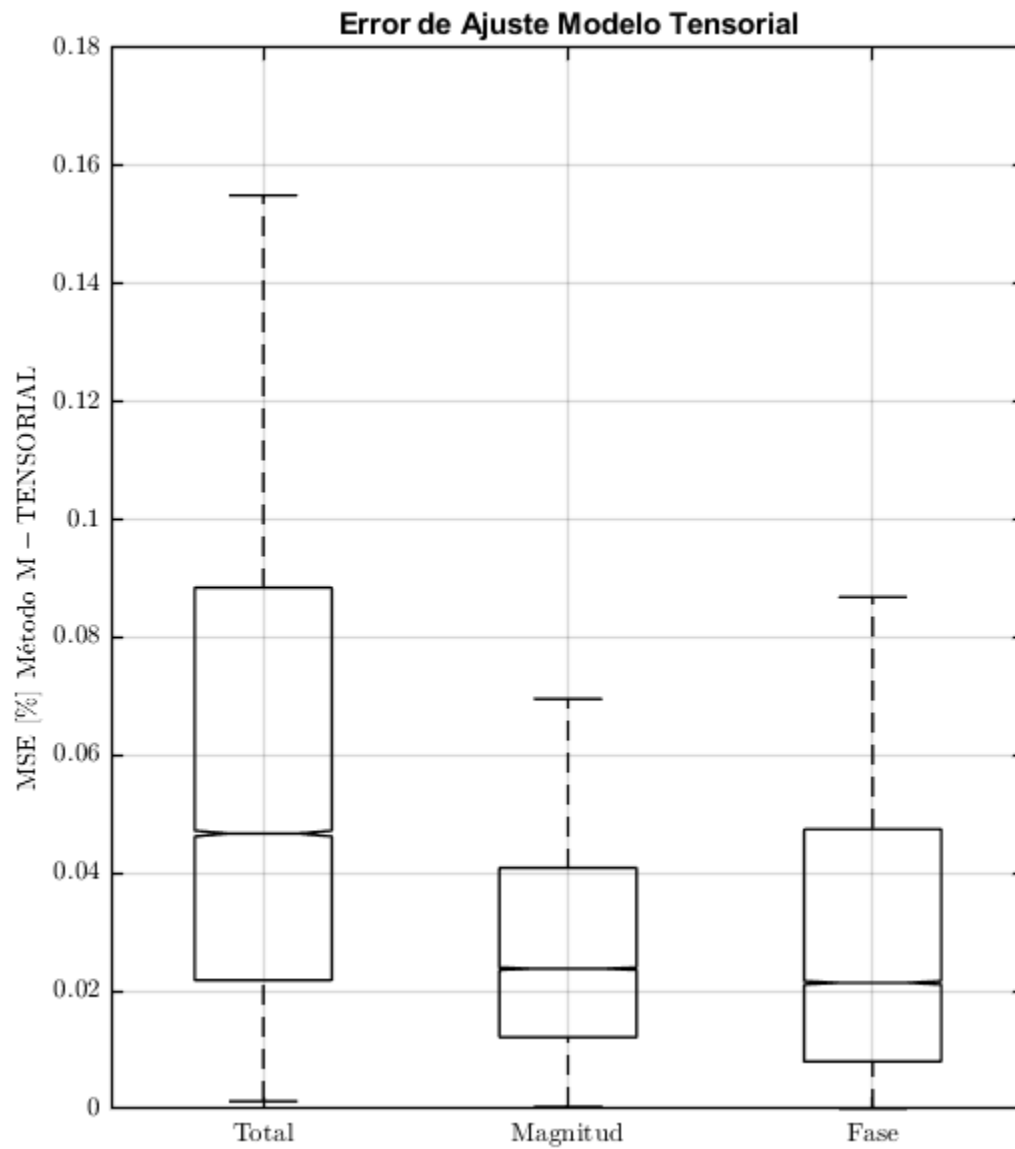
De igual forma al comparar los tres valores mínimos en el error de desempeño, para el MSE total, magnitud y de fase aplicando el método de (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) con los respectivos valores en la modificación identificada por (Malagón Carvajal, 2020) se tienen mejoras de 98.531 veces para el MSE total, para MSE magnitud es igual en valor cuantitativo y 732.585,5 veces para MSE de Fase al aplicar la modificación de la matriz Hermitian identificada por (Malagón Carvajal, 2020).

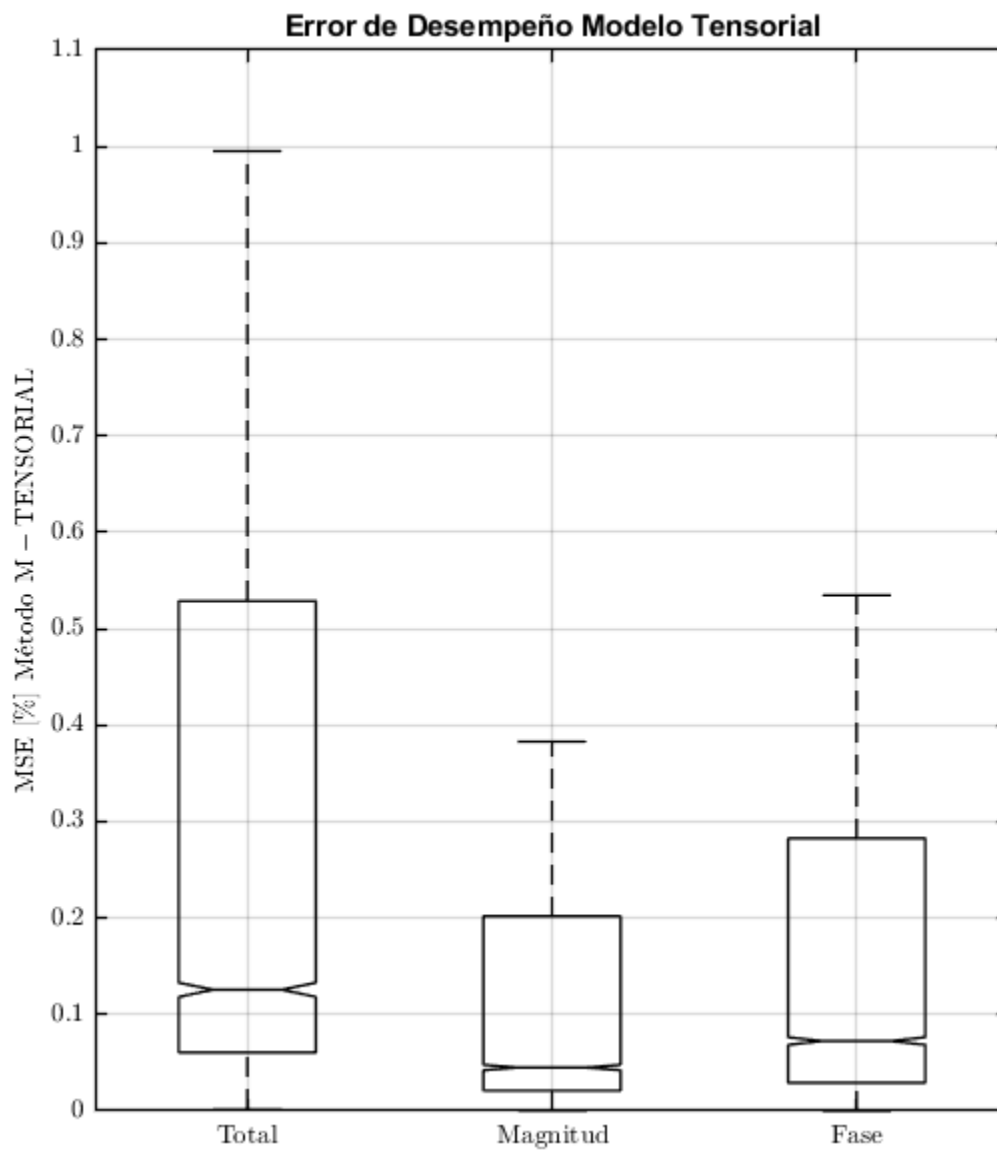
#### 4.4 Modelo Tensorial (M-Tensorial)

A continuación, se presentan en la Tabla 5 los errores de ajuste y desempeño para el modelo tensorial (M-Tensorial) junto con su respectivo Box-Plot (Diagrama de Caja) en la Figura 8 y Figura 9 para los errores de ajuste y desempeño respectivamente.

**Tabla 5.** Errores de ajuste y desempeño en el modelo tensorial

Errores de Ajuste [%]							
Modelo	Errores	Mínimo	(1er Cuartil) Q1	(Mediana) Q2	(3er Cuartil) Q3	máximo	IQR
Tensorial (M-Tensorial)	MSE Total	0,00129	0,02184	0,04672	0,08844	0,15500	0,06660
	MSE Total Magnitud	0,00036	0,01216	0,02379	0,04089	0,06956	0,02873
	MSE Total de Fase	0,00005	0,00804	0,02140	0,04746	0,08686	0,03942
Errores de Desempeño [%]							
Modelo	Errores	Mínimo	(1er Cuartil) Q1	(Mediana) Q2	(3er Cuartil) Q3	Máximo	IQR
Tensorial (M-Tensorial)	MSE Total	0,0015	0,0606	0,1256	0,5287	0,9952	0,4681
	MSE Total Magnitud	0,0004	0,0210	0,0450	0,2019	0,3829	0,1809
	MSE Total de Fase	0,0002	0,0292	0,0725	0,2827	0,5347	0,2535

**Figura 8.** Box-Plot para el modelo tensorial para el error de ajuste

**Figura 9.** Box-Plot para el modelo tensorial para el error de desempeño

#### **4.5 Comparación entre el modelo de matrices armónicamente acopladas y el modelo tensorial**

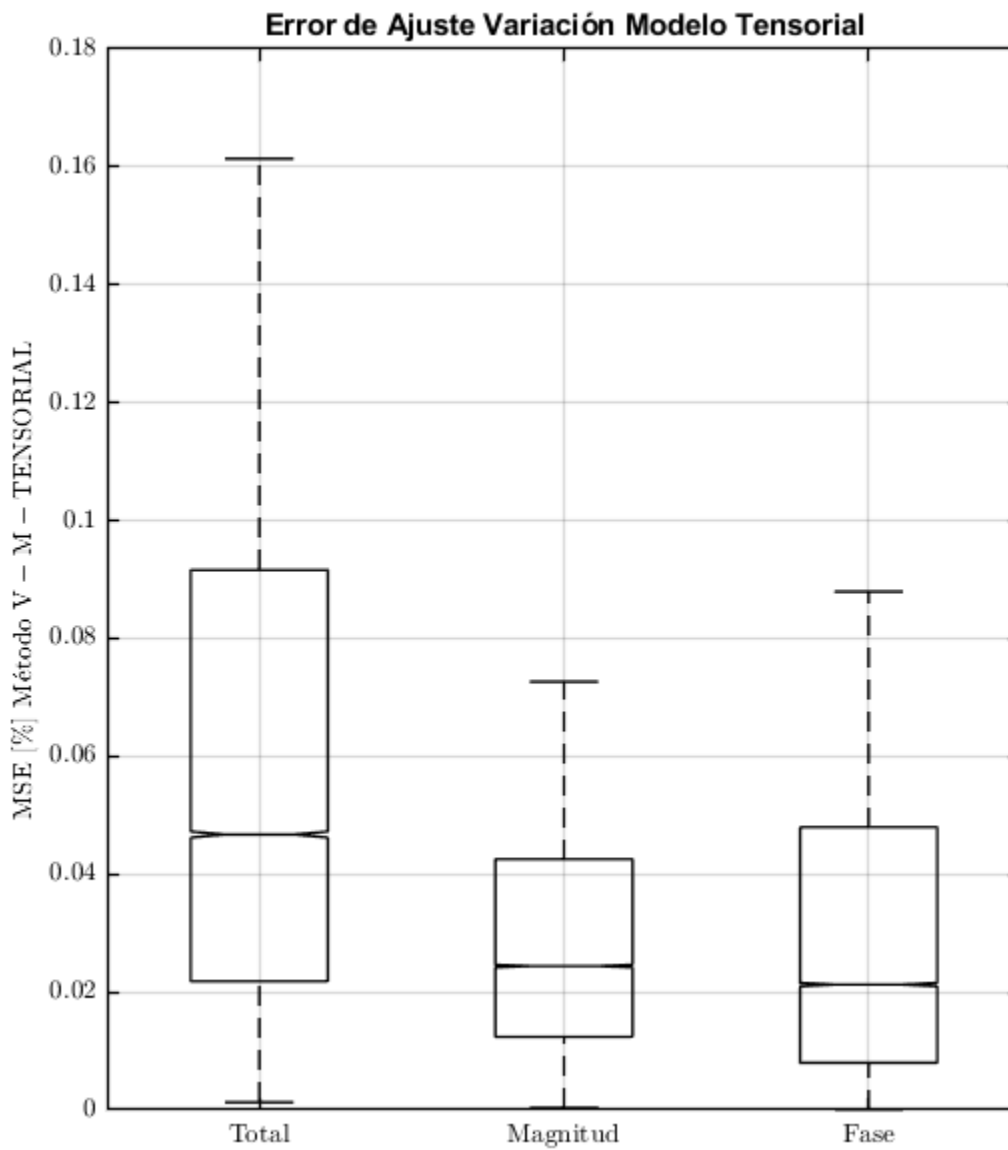
Se observa que en las Tablas 4 y 5 para los valores estadísticos se obtienen el mismo porcentaje de error lo cual indica que el desempeño de ambos modelos es igual, con la diferencia que para el modelo tensorial (M-Tensorial) se usan números reales. Caso contrario para el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA), el cual usa números complejos. También se puede observar de manera gráfica en el Box-Plot (Diagrama de Caja) de las Figuras 6 y 8 en el error de ajuste e igualmente las Figuras 7 y 9 en el error desempeño, son iguales respectivamente comparando el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA) y el modelo tensorial (M-Tensorial).

#### **4.6 Variación en el modelo tensorial**

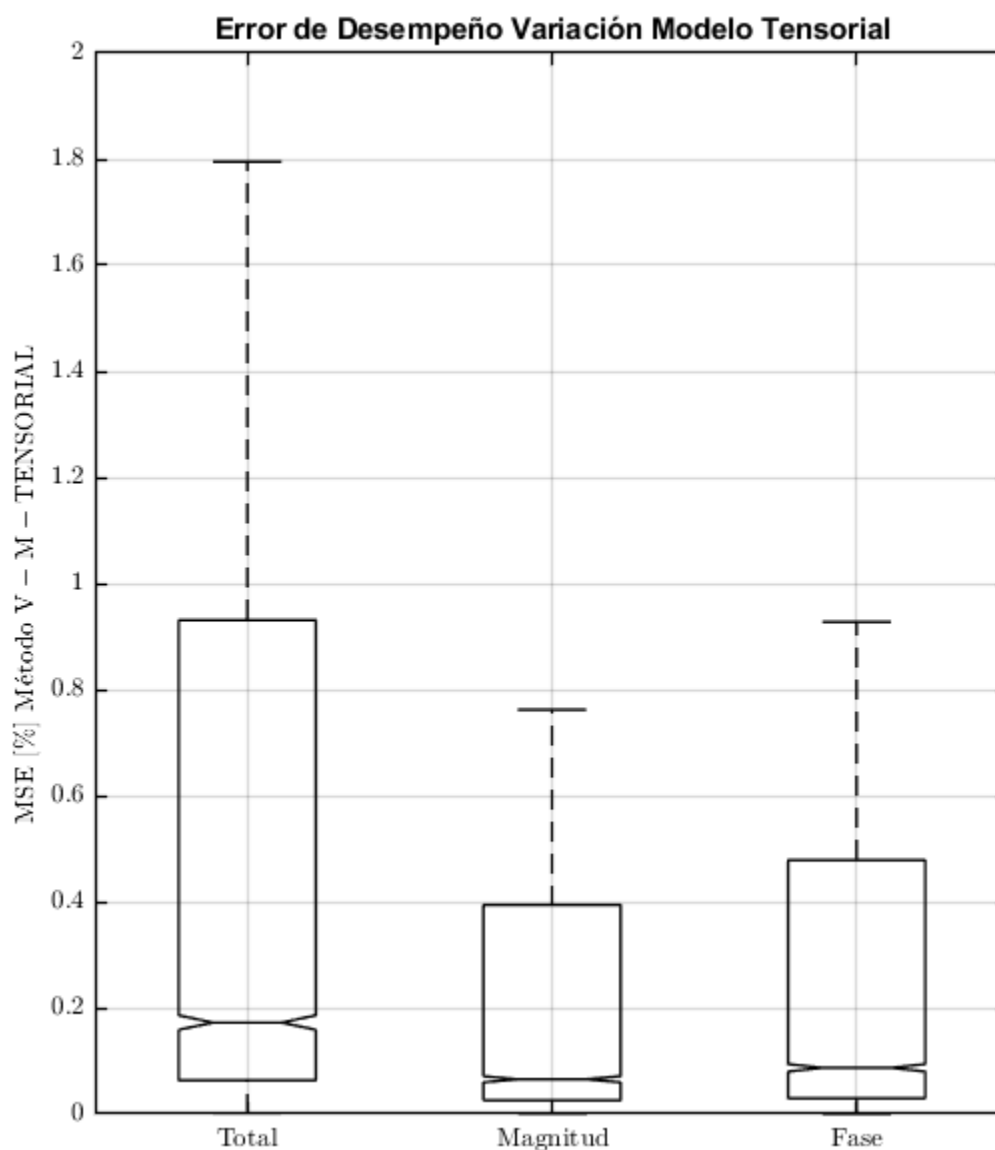
Los siguientes resultados para los errores de ajuste y desempeño son los encontrados al aplicar la variación propuesta para el modelo tensorial (M-Tensorial). En la Tabla 6 se observan sus porcentajes de error, así como también se observa su respectivo Box-Plot (Diagrama de Caja) en la Figura 10 y Figura 11 para los errores de ajuste y desempeño.

**Tabla 6.** Errores de ajuste y desempeño para la variación en el modelo tensorial

Errores de Ajuste [%]							
Variación	Errores	Mínimo	(1er Cuartil) Q1	(Mediana) Q2	(3er Cuartil) Q3	máximo	IQR
Modelo Tensorial (V-M-Tensorial)	MSE Total	0,00129	0,02182	0,04672	0,09162	0,16137	0,06980
	MSE Total Magnitud	0,00036	0,01239	0,02441	0,04254	0,07266	0,03014
	MSE Total de Fase	0,00005	0,00799	0,02127	0,04797	0,08795	0,03998
Errores de Desempeño [%]							
Variación	Errores	Mínimo	(1er Cuartil) Q1	(Mediana) Q2	(3er Cuartil) Q3	máximo	IQR
Modelo Tensorial (V-M-Tensorial)	MSE Total	0,0015	0,0633	0,1722	0,9309	1,7950	0,8676
	MSE Total Magnitud	0,0004	0,0258	0,0654	0,3942	0,7620	0,3685
	MSE Total de Fase	0,0002	0,0295	0,0869	0,4785	0,9276	0,4490

**Figura 10.** Box-Plot para la variación en el modelo Tensorial para el error de ajuste

**Figura 11.** Box-Plot para la variación en el modelo Tensorial para el error de desempeño



#### 4.7 Comparación del modelo de matrices armónicamente acopladas, modelo tensorial y su variación

Al comparar los tres modelos se puede apreciar cómo se describió la sección 4.6, que el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA) es idéntico al modelo tensorial (M-

Tensorial). Teniendo presente que los dos modelos son iguales se compara el modelo tensorial (M-Tensorial) con su variación contrastando los errores de ajuste y desempeño respectivamente para cada modelo. Se aprecia que los errores de ajuste y desempeño definidos en la sección 2.7 del capítulo 2, en la Tabla 6 son mayores que los errores de la Tabla 5 e igualmente para sus Box-Plot (Diagrama de Caja) se observa que los errores de ajuste y desempeño en ellos son más grandes en la Figura 10 a comparación con la Figura 8 en el error de ajuste, también en la Figura 11 a comparación con la Figura 9 en el error de desempeño.

Al comparar los valores de las tablas 5 y 6 en el tercer cuartil (Q3) para el MSE total, magnitud y fase en el error de ajuste para el modelo tensorial (M-Tensorial) y la variación del modelo tensorial (V-M-Tensorial), Se aprecia un incremento en MSE total, magnitud y de fase para la variación en el modelo tensorial (V-M-Tensorial) de 1,0359 veces, 1,0403 veces y 1,0107 veces respectivamente.

Para los valores del tercer cuartil (Q3) en el error de desempeño (tablas 5 y 6) para el MSE total, magnitud y de fase en el modelo tensorial (M-Tensorial) y la variación en el modelo tensorial (V-M-Tensorial). Se aprecia incremento en el error de desempeño para MSE total, magnitud y de fase de 1,7607 veces, 1,9524 veces y 3,5751 para la variación en el modelo tensorial (V-M-Tensorial).

## 5. Discusión

Para el caso del modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA), aplicando el método propuesto por Nassif-Yong-Xu (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) se presenta un error máximo de 236,1788% según la Tabla 3, tomando como referencia el valor más elevado de todos los parámetros de las tablas de errores de ajuste y desempeño, lo cual indica que al aplicar este método no se hace una estimación adecuada para la señal de corriente en la luminaria LED.

Aplicando el método propuesto por (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) y realizando la modificación identificada por (Malagón Carvajal, 2020) se obtienen un error de 0,1550% en la evaluación del error de ajuste y en el error de desempeño un error de 0,9952% según la Tabla 4. Estos dos errores corresponden a los valores más elevados de todos los parámetros estadísticos. Con base en los errores se aprecia que se tiene una estimación mejor de 1.524,73 veces y 237,31 veces en los errores de ajuste y desempeño, para la señal de corriente en la luminaria led utilizando el método con la modificación.

Cuando se comparan las Tablas 4 y 5 y las Figuras 6 y 8 para el modelo tensorial (M-Tensorial) se observa que se obtienen los mismos parámetros estadísticos que en el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA). Analizando los errores de ajuste y desempeño en el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA) se observa que en el error de desempeño se aumenta 6,42 veces con respecto al error de ajuste. En la variación del modelo tensorial se aprecia que hay un incremento en el error de ajuste de 1,04 veces y en error de desempeño de 1,80 veces en comparación con el modelo tensorial (M-Tensorial), con esto es posible apreciar que a

pesar de que aumentan los errores tanto como en los valores de las Tablas 5 y 6 como gráficamente en las Figuras 8 y 10 con respecto a al modelo tensorial, se siguen obteniendo una buena estimación para las señales de corriente.

## 6. Conclusión

En este trabajo de grado se utilizan el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA), el modelo tensorial (M-Tensorial) y una variación de este último, aplicando los métodos propuestos (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) y (Malagón Carvajal, 2020) todos usando una fuente de tensión de alimentación controlada. Estos modelos se implementaron usando señales teniendo en cuenta los límites de distorsión establecidos por las normas (Standards, 2012) y (UNE-EN50160, 2015). A estos modelos se les realiza un ajuste denominado ajuste del modelo mediante arreglos matriciales propuesto por Nassif-Yong-Xu (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010), permitiendo obtener las matrices  $I_c$ ,  $Y^+$ ,  $Y^-$ , adicionalmente se realiza un ajuste a los métodos mediante la implementación de la modificación identificada por (Malagón Carvajal, 2020). Esta modificación busca comparar los resultados entre el método propuesto por (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) utilizando el mismo conjunto de señales recolectadas previamente, y realizar la evaluación de los errores de ajuste y desempeño al estimar la señal de corriente. Todos estos cálculos se realizan implementando los modelos en el dominio de la frecuencia para la corriente con el modelo en el dominio del tiempo. Al comparar los resultados del modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA) con los resultados del modelo tensorial (M-Tensorial) (matrices con solo números reales), se obtiene iguales errores de ajuste y desempeño. En la evaluación del error de desempeño se observa que el error incrementa en comparación con el error

de ajuste y finalmente al aplica la variación en el modelo tensorial (V-M-Tensorial) se observa que los errores de ajuste y desempeño aumentan con respecto al modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA) y el modelo tensorial (M-Tensorial).

## Bibliografía

A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu. (2010). Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances. *IET Gener. Transm. Distrib*, Vol. 4, Iss. 3, p. 363–375.

Barros, J., Diego, R. I., & De Apraz, M. (2013). A discussion of new requirements for measurement of harmonic distortion in modern power supply systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1-2.

Caicedo , J. E., Romero, A. A., Zini, H. C., Langella, R., Meyer, J., & Watson , N. R. (2018). impact of reference conditions on the frequency coupling matrix of a plug-in electric vehicle charge. *IEEE*, 2-6.

Cunill Solá, J., & Salichs, M. (2007). Study and Characterization of Waveforms From Low-Watt (<25 W) Compact Fluorescent Lamps With Electronic Ballast. *IEEE*, 2305.

Malagón Carvajal, G. A. (diciembre de 2020). 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. Bucaramanga, Santander, Colombia.

Molina, J., Mesas, J., Mesbahi, N., & Sainz, L. (12 de noviembre de 2016). LED lamp modelling for harmonic studies in distribution systems. Caracas, Venezuela.

Standards, A. N. (2012). *Electric power systems and equipment voltage ratings 60 (Hz)*. national electrical manufacturers association.

UNE-EN50160. (2015). *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. Madrid-España: AENOR.

## Anexos

En este apartado se encuentra información respecto a los códigos que se desarrollaron en la elaboración de este trabajo de grado. Se presentan 7 scripts y un diseño del circuito en el dominio del tiempo, el cual está encargado de generar las señales de tensión y corriente para la carga no lineal LED en la herramienta Matlab-Simulink.

El nombre del circuito en el dominio del tiempo es simulación\_armónicos\_a\_50\_UN50160.slx

Los nombres de los 7 scripts son:

- muestras\_a\_50\_un50160.m
- modelo\_armonicas.m
- modelo\_tensorial.m
- modelo\_delta.m
- senales\_aleatorias.m
- calculos\_errores.m
- box\_plot.m

El orden en cual se deben ejecutar los 7 scripts son del número 1 al número 7, a partir de la ejecución del script 1 al script 6 se generan archivos adicionales tipo Matlab Data, cada archivo adicional se carga de manera automática al siguiente script siguiendo el orden de ejecución.

Los nombres de los archivos adicionales son:

- medidas\_luminarias\_led\_simulink\_completo
- calculos corrientes
- calculos corrientes tensorial
- calculos corrientes delta
- calculos corrientes aleatorios, calculos corrientes aleatorios tensorial, calculo corrientes aleatorios delta
- errores\_de\_ajuste, errores\_de\_desempeno, errores\_de\_ajuste\_tensorial, errores\_de\_desempeno\_tensorial, errores\_de\_ajuste\_delta, errores\_de\_desempeno\_delta

#### **Anexo A.** Recolección de datos

En el código `muestras_a_50_un50160.m` (1) se tienen las variables `numero_de_pasos`, `numero_de_pasos_angulo`, `porcentaje_de_inicio`, `numero_de_armonicos_implementados` y el archivo de Simulink simulación `simulación_armonicos_a_50_UN50160.slx`, el cual se implementa para la recolección de las señales de tensión y corriente en el circuito en el dominio del tiempo.

Las variables mencionadas representan respectivamente el número de variaciones en magnitud el cual es 20, el número de variaciones en ángulo el cual es de 72, `porcentaje_de_inicio` es el porcentaje desde donde se inicia la primera variación en magnitud el cual es de 0,1%, la variable.

`numero_de_armonicos_implementados`, indica hasta qué orden de armónicos impares se implementó para la toma de datos. Después de definir las variables, el código entra en un ciclo `for`

el cual dependiendo del orden armónico que se analiza dentro del ciclo for, realiza la respectiva distorsión en la tensión de alimentación según (UNE-EN50160, 2015) y (Standards, 2012) explicadas en la sección 2.2.

Obtenidas las señales en el dominio del tiempo, se realiza la respectiva FFT (Fast Fourier Transform) y se almacenan todas las señales en el dominio de la frecuencia en el primer archivo adicional `medidas_luminarias_led_simulink_completo` en un archivo de Matlab Data.

### **Anexo B.** Aplicación de los modelos

En los scripts `modelo_armonicas.m` (2), `modelo_tensorial.m` (3) y `modelo_delta.m` (4) de Matlab se utilizan para trabajar el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA), el modelo tensorial (M-Tensorial) y su variación respectivamente propuestos en este trabajo de grado en las secciones 3.2 y 3.3. Estos scripts tienen los datos del archivo `medidas_luminarias_led_simulink_completo` para realizar la estimación de las señales mediante la matriz concatenada de cada modelo, la variable `renglón_reconstruccion` se usa para graficar en el dominio del tiempo la señal de corriente de la toma datos y la señal de corriente de la estimación a partir del modelo aplicado. Se puede observar que en las líneas de los códigos se trabaja la organización matricial propuesta por (Malagón Carvajal, 2020) y se aplica el respectivo calculo de la matriz concatenada junto con la reconstruccion a partir de la matriz concatenada. Para finalizar se guarda un archivo de Matlab Data con los nombres cálculos corrientes, cálculos corrientes tensorial, calculos corrientes delta al ejecutar respectivamente cada script.

### **Anexo C. Cálculos de errores**

Obtenidas las señales de corrientes para cada modelo, se utilizaron estas señales en el script `senales_aleatorias.m` (5) para generar las 10000 señales aleatorias para el cálculo de error de desempeño. Adicionalmente se guardaron en un archivo de Matlab Data estas señales aleatorias con los nombres de: cálculo corrientes aleatorios, cálculo corrientes aleatorios tensorial, calculo corrientes aleatorios delta para el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA), el modelo tensorial (M-Tensorial) y su variación respectivamente. Los archivos adicionales del número 2 al número 5 son implementados en el script `calculos_errores.m`. El script `calculos_errores` (5) realiza los respectivos cálculos de error correspondientes a las ecuaciones (27), (28), (29), (30) y (31) de la sección 2.7. El script almacena estos errores en los siguientes archivos `errores_de_ajuste` y `errores_de_desempeno` para el modelo de matrices armónicamente (MMAA) acopladas, `errores_de_ajuste_tensorial` y `errores_de_desempeno_tensorial` para el modelo tensorial (M-Tensorial) y `errores_de_ajuste_delta` y `errores_de_desempeno_delta` para la variación en el modelo tensorial (V-M-Tensorial). Todos estos archivos mencionados anteriormente son de tipo Matlab Data.

### **Anexo D. Diagrama de cajas (Box\_Plot)**

Con los archivos de los errores tipo Matlab Data presentados para cada modelo en el anexo C, se importan al script `box_plot.m` (7) proporcionado por (Malagón Carvajal, 2020). El código almacena los valores de: mínimo, primer cuartil, mediana, tercer cuartil, máximo y el rango intercuartil en la matriz TMSE para los errores de ajuste y para los errores de desempeño en la

matriz `TMSE_desempeno` de los tres modelos aplicados. También en este script, se grafican los valores que se encuentran en la matrices `TMSE` y `TMSE_desempeno`.