

Métodos de ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia utilizando señales sintéticas de corriente y tensión: caso de estudio cargador de vehículo eléctrico.

Diego Alejandro Caballero Villamil y Jefferson Damian Camargo Castro

Trabajo de Grado para optar por el Título de Ingenieros Electricistas.

Director

César Antonio Duarte Gualdrón

PhD. Electrical and Computer Engineering

Codirector

Gabriel Alexis Malagón Carvajal

PhD. Electrical Engineering

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2023

**Dedicatoria**

*Dedico de todo corazón este trabajo de grado a Dios, por bendecir mi camino y orientarme en cada una de las decisiones de mi vida, a mi abuelita que en paz descanse, quien fue mi mayor fuente de inspiración para continuar mis estudios y me brindó ese amor infinito de madre, a mis tías por el apoyo incondicional, por brindarme todo el cariño y amor que me ayudó para afrontar cada una de las dificultades que se presentaron en mi camino, a mis amigos que me acompañaron y me brindaron su apoyo en toda mi estadía en la universidad, a mi pareja que siempre estuvo conmigo en los momentos difíciles, por su apoyo, fortaleza y motivación en cada uno de mis días.*

***Jefferson Camargo***

*Quiero agradecer principalmente a Dios, fuente de mi fortaleza y guía en cada paso de mi camino, A mi amada familia, cuyo amor y apoyo incondicional han sido mi mayor fortaleza en este arduo camino, mis profesores, por su dedicación y sabiduría compartida, A mi pareja, por ser mi compañera de vida y a mis compañeros.*

***Diego caballero***

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Generalidades del Proyecto.....	11
1.1 Objetivo general.....	11
1.2 Objetivos específicos. ....	11
2. Marco teórico .....	13
2.1 Modelo en el dominio del tiempo. ....	13
2.2 Experimento de un armónico a la vez.....	14
2.3 Modelo en el dominio de la frecuencia.....	16
2.4 Método parametrización de tensores .....	17
2.5 Evaluación de errores.....	20
3. Procedimiento para la evaluación del error de ajuste y de desempeño del modelo tensorial...	21
3.1 Modificación del modelo de Simulink.....	22
3.2 Organización de datos del experimento .....	23
3.3 Corriente estimada con el modelo.....	23
3.4 Error de ajuste .....	24
3.5 Error de desempeño .....	24
4. Resultados .....	26
4.1 Error de Ajuste Modelo Tensorial Fase R. ....	26
4.2 Error de Ajuste Modelo Tensorial Fase S.....	30
4.3 Error de Ajuste Modelo Tensorial Fase T.....	31

4.4 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase R, Norma UNE EN 50160:2015 .....	32
4.5 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase S, Norma UNE EN 50160:2015.....	34
4.6 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase T, Norma UNE EN 50160:2015 .....	35
4.7 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase R, Estándar IEEE 519:2014 .....	37
4.8 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase S, Estándar IEEE 519:2014.....	39
4.9 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase T, Estándar IEEE 519:2014 .....	40
5. Conclusiones .....	42
6. Recomendaciones. ....	43
Referencias Bibliográficas .....	44
Apéndices.....	46

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Desviación de tensión .....	15
Tabla 2. Límites de distorsión de tensión .....	25
Tabla 3. Evaluación del Error de ajuste - fase R.....	27
Tabla 4. Evaluación del Error de ajuste - fase S .....	30
Tabla 5. Evaluación del Error de ajuste - fase T.....	32
Tabla 6. Evaluación del Error de desempeño Norma UNE EN 50160:2015 - fase R.....	33
Tabla 7. Evaluación del Error de desempeño Norma UNE EN 50160:2015- fase S.....	35
Tabla 8. Evaluación del Error de desempeño Norma UNE EN 50160:2015– fase T.....	36
Tabla 9. Evaluación del Error de desempeño Estándar IEEE 519:2014 - fase R .....	38
Tabla 10. Evaluación del Error de desempeño Estándar IEEE 519:2014 - fase S.....	39
Tabla 11. Evaluación del Error de desempeño Estándar IEEE 519:2014 - fase T .....	41

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. DC Fast Charger for Electric Vehicle (Model - Simulink/Matlab).....	14
Figura 2. Parametrización de un punto de admitancia armónica dependiente de fase. ....	18
Figura 3. DC Fast Charger for Electric Vehicle (Model - Simulink/Matlab) modificado.....	22
Figura 4. Error de ajuste - fase R .....	27
Figura 5. Error de magnitud por armónicos - fase R .....	28
Figura 6. Error de ángulo de fase por armónicos - fase R .....	29
Figura 7. Error de ajuste - fase S.....	30
Figura 8. Error de ajuste - fase T .....	31
Figura 9. Error de desempeño del modelo Tensorial Norma UNE EN 50160:2015 - fase R.....	33
Figura 10. Error de desempeño del modelo Tensorial Norma UNE EN 50160:2015 - fase S .....	34
Figura 11. Error de desempeño del modelo Tensorial Norma UNE EN 50160:2015 - fase T.....	36
Figura 12. Error de desempeño del modelo Tensorial Estándar IEEE 519:2014 - fase R.....	38
Figura 13. Error de desempeño del modelo Tensorial Estándar IEEE 519:2014 - fase S .....	39
Figura 14. Error de desempeño del modelo Tensorial Estándar IEEE 519:2014 - fase T.....	40

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Los códigos de programación que se utilizan en Matlab, para la ejecución de este trabajo de grado se encuentran en el siguiente hipervínculo. ....	46

## Resumen

**Título:** Métodos de ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia utilizando señales sintéticas de corriente y tensión: caso de estudio cargador de vehículo eléctrico\*.

**Autores:** Diego Alejandro Caballero Villamil, Jefferson Damian Camargo Castro\*\*.

**Palabras Clave:** Modelo, Distorsión Armónica, Cargadores, Frecuencia, Corriente, Tensores.

### Descripción:

El presente trabajo de grado busca realizar un análisis del desempeño de un modelo en el dominio de la frecuencia comparándolo con un modelo en el dominio del tiempo para un cargador de vehículo eléctrico.

Para esto, se desea evaluar el ajuste de un modelo en el dominio de la frecuencia, el cual utiliza un método basado la parametrización de tensores. Luego estos resultados del modelo en el dominio de la frecuencia son comparados con los resultados del modelo en el dominio del tiempo.

Este modelo en el dominio del tiempo corresponde a una configuración circuital, de donde se obtienen las medidas o formas de ondas de la tensión de alimentación y corriente de la carga, con estas señales y el método de ajuste se puede obtener el modelo en el dominio de la frecuencia.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónico y Telecomunicaciones  
Director: César Antonio Duarte Gualdrón PhD. Electrical and Computer Engineering. Codirector: Gabriel Alexis Malagón Carvajal Doctor en Ingeniería Área Ingeniería Eléctrica

### Abstract

**Title:** Methods of adjusting models in the frequency domain using synthetic current and voltage signals: case study electric vehicle charger\*.

**Authors:** Diego Alejandro Caballero Villamil, Jefferson Damian Camargo Castro\*\*.

**Keywords:** Model, Harmonic distortion, Chargers, Frequency, Current, Tensioners.

**Description:**

The present work seeks to carry out an analysis of the performance of a model in the frequency domain comparing it with a model in the time domain for the case of electric vehicle charger.

For this, we want to evaluate the adjustment of models in the frequency domain, which uses a method based on the parameterization of tensors, then these results of the model in the frequency domain are compared with the results of the model in the domain of time.

This model in the time domain corresponds to a circuit configuration, from which the measures or waveforms of the supply voltage and current of the load are obtained, for with these signals and the adjustment method to obtain the model in the frequency domain.

---

\* Work of the Grade

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónico y Telecomunicaciones  
Director: César Antonio Duarte Gualdrón PhD. Electrical and Computer Engineering. Codirector: Gabriel Alexis Malagón Carvajal Doctor en Ingeniería Área Ingeniería Eléctrica

## Introducción

En los últimos años, se ha observado un aumento en la demanda de Vehículos Eléctricos (VE) en Colombia. Esto ha permitido una renovación progresiva de los vehículos convencionales por vehículos eléctricos, los cuales ofrecen diversas ventajas en términos de eficiencia energética y respeto por el medio ambiente. Como resultado directo de este crecimiento, se ha generado la necesidad de instalar nuevas estaciones de carga de vehículos eléctricos.

No obstante, en su operación, los cargadores de vehículos eléctricos son cargas de tipo no lineal, esto conlleva a la presencia de distorsión armónica en la red eléctrica, produciendo sobretensiones, sobrecalentamiento en los conductores y reducción de la vida útil del cargador.

Para analizar las cargas no lineales se utilizan modelos en el dominio del tiempo y modelos en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, los modelos en el dominio de la frecuencia tienen como ventaja menores tiempos de simulación, menor capacidad del equipo de cómputo y son herramientas útiles para probar la funcionalidad específica de un modelo.

En (JE Caicedo, AA Romero, HC Zini, 2017), se lleva a cabo un análisis de la distorsión armónica de un puente rectificador monofásico de diodos con carga resistiva. Este análisis se basa en un modelo tensorial que se desarrolla Matlab.

En este trabajo de grado se propone modelar en el dominio de la frecuencia el cargador tomado de la librería de simulink (ee\_dc\_fast\_charger\_2021), utilizando un modelo tensorial y el método parametrización de tensores, presentado por (J. E. Caicedo, A. A. Romero, H. C. Zini 2017). Para la parametrización del modelo en el dominio de la frecuencia, se toman señales de ajuste, esto es: señales de tensión de alimentación y corriente de carga obtenidas del modelo en el

dominio del tiempo. Estas señales de tensión de alimentación son generadas a partir de una variación sistemática tanto de la magnitud siguiendo los límites de distorsión individual de la Norma UNE EN 50160:2015 como del ángulo de fase de 0 a 360 grados.

## **1. Generalidades del Proyecto.**

Se da a conocer los objetivos planteados para el trabajo de grado, con su respectiva descripción de los alcances.

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar el error del desempeño de un modelo en el dominio de la frecuencia, utilizando un método de ajuste de modelos basado en la parametrización de tensores, tomando como caso de estudio un cargador de vehículo eléctrico.

### **1.2 Objetivos específicos.**

Objetivo 1: Simular un modelo en el dominio del tiempo, para la obtención de diferentes medidas sintéticas de tensión y corriente de carga, para el ajuste de un modelo de cargador de vehículo eléctrico en el dominio de la frecuencia.

Para dar cumplimiento al objetivo específico 1, se establece un modelo en el dominio del tiempo seleccionando los elementos no lineales, que cumplan con las especificaciones de parámetros eléctricos y que tengan en cuenta las pérdidas de potencia en los modelos de cargadores de vehículos eléctricos. Se selecciona una tensión de referencia manteniendo un armónico a la vez con el ángulo y la magnitud fijos, obteniendo así las medidas de corriente distorsionada, teniendo como referencia de trabajo los armónicos impares que contengan mayor energía.

Objetivo 2: Ajustar un modelo en el dominio de la frecuencia del cargador de vehículo eléctrico a partir de las medidas sintéticas de tensión y corriente.

Para dar cumplimiento al objetivo 2, una vez obtenidas las medidas se ajusta un modelo en el dominio de la frecuencia, a partir del método de parametrización de tensores, en donde se varía sistemáticamente la tensión de operación para obtener la señal de corriente, realizando un barrido en frecuencia seleccionando un armónico a la vez, iniciando con el armónico fundamental y la magnitud hasta un límite superior, variando así todo el ángulo de fase. Con este procedimiento obtenemos las formas de onda de las señales de tensión y corriente, se llevan al dominio de la frecuencia y se calcula la admitancia. La admitancia nos permite estimar algunos parámetros presentados en un método de ajuste basado en parametrización de tensores, los cuales permiten a su vez establecer el modelo en el dominio de la frecuencia.

Objetivo 3: Estimar el error de desempeño del modelo en el dominio de la frecuencia para un cargador de vehículo eléctrico, comparando los resultados obtenidos con un modelo en el dominio del tiempo.

Para este último objetivo, al obtener los resultados de las simulaciones en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, se estima el error del modelo en el dominio de la frecuencia, comparándolo con el modelo en el dominio del tiempo.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Modelo en el dominio del tiempo.

Los modelos en el dominio del tiempo están basados en un patrón matemático que representa el cambio de variables respecto a un método a lo largo del tiempo y busca predecir cómo evoluciona un sistema con respecto al futuro. En el área de la ingeniería eléctrica existen dos enfoques: los modelos basados en forma de onda (Waveform-based) y los modelos basados en circuitos (Circuit based).

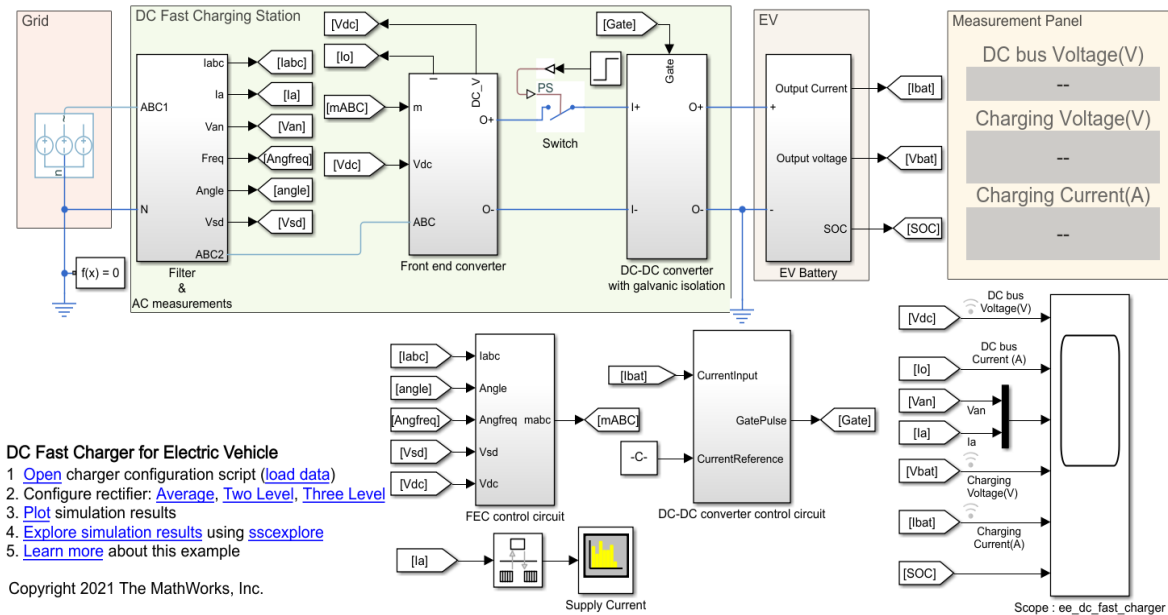
Los modelos basados en forma de onda, se refieren a representaciones matemáticas que utilizan parámetros de forma de onda y parámetros eléctricos, para describir las señales de corriente o de tensión; Estas expresiones son posteriormente convertidas al dominio de la frecuencia.

Los modelos basados en circuitos, son sistemas matemáticos que muestran el comportamiento de circuitos eléctricos, por lo tanto, estos sistemas están basados en las leyes de Kirchhoff, como un modelo circuital equivalente.

En este trabajo se toma como referencia un modelo en el dominio del tiempo del tipo circuital o basado en circuitos, el cual es tomado de la librería de Simulink del programa de Matlab llamado (ee\_dc\_fast\_charger\_2021). A continuación, se muestra el modelo utilizado del cargador de vehículo eléctrico, en el programa Matlab/Simulink (Figura 1).

**Figura 1.**

*DC Fast Charger for Electric Vehicle (Model - Simulink/Matlab)*



Se toma una frecuencia de 50 Hz y una tensión nominal de 400 V, de acuerdo con la norma UNE-EN IEC 61851-1:2020.

## 2.2 Experimento de un armónico a la vez.

El experimento de un armónico a la vez se realiza en base al artículo (Fauri M. 1997), tomando como referencia la Norma UNE EN 50160:2015, en donde se especifica los límites de distorsión individuales permitidos para cada armónico de tensión y los límites de distorsión total (THD) que no deben superar el 3%, a continuación, se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Desviación de tensión*

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				

*Nota.* Tomado de la norma UNE-EN-50160:2015

La tabla 1 presenta los porcentajes máximos permitidos para los armónicos de tensión, de acuerdo con su orden armónico.

A partir de la norma mencionada se plantea el experimento de un armónico a la vez propuesto por (Fauri M. 1997). Este experimento se fundamenta en variar sistemáticamente la magnitud y el ángulo de fase de la tensión de alimentación. De esta forma, se realizan variaciones en magnitud y ángulo de fase de cada uno de los armónicos impares utilizados, con 64 muestras por ciclo para las simulaciones. El objetivo de este experimento es obtener la respuesta de corriente correspondiente a cada variación realizada; a este experimento también se le conoce en este trabajo de grado como barrido en frecuencia:

1. Se fija la tensión fundamental con una regulación de 0% y ángulo de fase 0°. Posteriormente, se definen los pasos de regulación de magnitud para la tensión; para este trabajo de grado se utilizan 20 pasos de regulación, iniciando desde 0% hasta un 5%, límite propuesto en la norma Std ANSI C84.1:2020. Luego se utilizan 72 pasos de ángulo de fase, desde 5° hasta 360°.

2. Se toma la tensión fundamental con un ángulo de referencia de  $0^\circ$  en la fase R,  $-120^\circ$  en la fase S y  $120^\circ$  en la fase T. En este procedimiento solo se tiene en cuenta los armónicos impares; para iniciar se superpone el  $3^{er}$  armónico a la frecuencia fundamental, para cada una de las variaciones, hasta completar las 72 variaciones en ángulo y 20 en magnitud.

3. Se repite el procedimiento anterior nuevamente para cada orden armónico ( $3^{er}, 5^o, \dots, 31^o$ ) superponiendo un armónico a la vez a la frecuencia fundamental, variando la magnitud y ángulo. Este proceso se hace simultáneamente para cada una de las fases manteniendo constante el fundamental.

4. Por último, cada vez que se hace una variación, se almacena la señal de tensión y la respuesta en corriente, para posteriormente transformarlas al dominio de la frecuencia las cuales son utilizadas por el método de ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia.

### **2.3 Modelo en el dominio de la frecuencia.**

El modelo tensorial permite estimar las corrientes del cargador en el dominio de la frecuencia, mediante un conjunto de vectores y matrices, los cuales se definen por un vector de corriente de entrada  $I$  (corriente del modelo), un vector de corriente de corte  $I_c$ , una matriz de admitancias  $Y$  y una tensión de entrada  $V$ , donde las dimensiones ( $2n$ ) depende del orden armónico  $n$  (armónicos totales) de las señales de tensión y corriente que se hayan tomado, como se muestra en la siguiente ecuación.

Ecuación 1

$$I_{(2n)} = I_{c(2n)} + Y_{(2n \times 2n)} V_{(2n)}$$

En la ecuación 1 , cada elemento de la matriz de admitancias Y, puede ser reescrito en forma de cuatro elementos de tensor  $y_{11\mu\nu}, y_{12\mu\nu}, y_{21\mu\nu}, y_{22\mu\nu}$ . En esta representación,  $\mu$  corresponden a los armónicos de corriente y  $\nu$  a los armónicos de tensión. Asimismo, las corrientes de corte y de entrada junto a la tensión de entrada pueden descomponerse en su parte real e imaginaria, es decir  $I_{cr}, I_{ci}, I_r, I_i$  y  $V_r, V_i$  respectivamente, como se observa en la siguiente ecuación.

Ecuación 2

$$\begin{bmatrix} I_{r1} \\ I_{i1} \\ I_{r3} \\ I_{i3} \\ I_{r\mu} \\ I_{i\mu} \\ I_{rh} \\ I_{ih} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{cr1} \\ I_{ci1} \\ I_{cr3} \\ I_{ci3} \\ I_{cr\mu} \\ I_{ci\mu} \\ I_{crh} \\ I_{cih} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{11} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{13} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{1v} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{1h} \\ \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{31} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{33} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{3v} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{3h} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{\mu 1} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{\mu 3} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{\mu v} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{\mu h} \\ \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{h1} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{h3} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{hv} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{i1} \\ V_{r3} \\ V_{i3} \\ V_{rv} \\ V_{iv} \\ V_{rh} \\ V_{ih} \end{bmatrix}$$

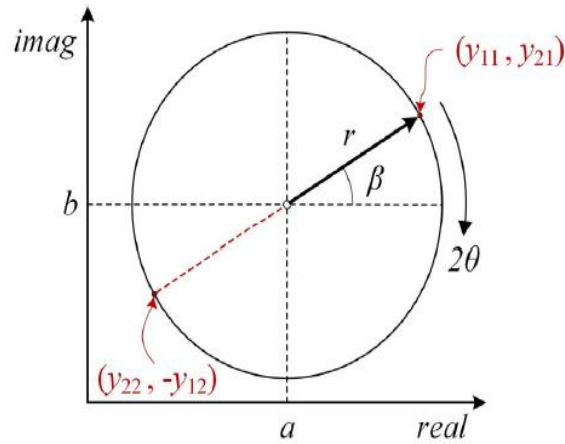
A continuación, se presenta el método parametrización de tensores (Método TP), el cual utiliza las señales de tensión y corriente en el dominio de la frecuencia obtenidas mediante el experimento de un armónico a la vez.

### 2.4 Método parametrización de tensores

El método TP, se utiliza para calcular los parámetros del modelo tensorial. De esta manera, la parametrización tensorial se puede visualizar como un círculo que describe la variación de la admitancia en función de la magnitud y el ángulo de fase por orden armónico para la tensión aplicada a la carga, como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 2.**

*Parametrización de un punto de admitancia armónica dependiente de fase.*



*Nota Tomado de: J. E. Caicedo, A. A. Romero H. C. Zini en 2017)*

Asimismo, cada tensor está representado en el plano complejo  $a+jb$ , donde su radio  $r$ , y su ángulo  $\beta$ , indican la admitancia ( $Y$ ) calculada, con un ángulo de fase de la tensión armónica igual a cero. A medida que el ángulo de fase de la tensión armónica aplicada varía, la admitancia ( $Y$ ) cambia en sentido horario con una tasa de  $2\theta$ . Por lo tanto, la admitancia describe un círculo doble que abarca la variación del ángulo de fase de la tensión armónica desde  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$ .

Los parámetros mencionados anteriormente,  $a$ ,  $b$ ,  $r$  y  $\beta$ , se calculan de forma independiente utilizando sus respectivas ecuaciones, donde  $k$  representa los pasos en magnitud,  $j$  representa los pasos en ángulo de fase, y  $o$  es el número total de variaciones de ángulo de fase.

Ecuación 3

$$a_{\mu\nu}^k = \frac{1}{o} \sum_{j=1}^o \text{Re}\{y_{\mu\nu}^j\}$$

Ecuación 4

$$b_{\mu\nu}^k = \frac{1}{o} \sum_{j=1}^o \text{Im}\{y_{\mu\nu}^j\}$$

Ecuación 5

$$r_{\mu\nu}^k = \frac{1}{o} \sum_{j=1}^o |y_{\mu\nu}^j - (a_{\mu\nu}^k + b_{\mu\nu}^k)|$$

Ecuación 6

$$\beta_{\mu\nu}^k = \frac{1}{o} \sum_{j=1}^o \angle(y_{\mu\nu}^j - (a_{\mu\nu}^k + b_{\mu\nu}^k)) + 2\theta_v^j$$

Por ende, los elementos  $y_{11\mu\nu}$ ,  $y_{12\mu\nu}$ ,  $y_{21\mu\nu}$ ,  $y_{22\mu\nu}$ , son calculados a partir de las matrices formadas por los elementos a,b,r,  $\beta$ , y se definen en las ecuaciones (7),(8),(9) y (10). En donde p corresponde al total de variaciones en magnitud.

Ecuación 7

$$y_{11\mu\nu} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (r_{\mu\nu}^k \cos(\beta_{\mu\nu}^k) + a_{\mu\nu}^k)$$

Ecuación 8

$$y_{12\mu\nu} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (r_{\mu\nu}^k \sin(\beta_{\mu\nu}^k) - b_{\mu\nu}^k)$$

Ecuación 9

$$y_{21\mu\nu} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (r_{\mu\nu}^k \sin(\beta_{\mu\nu}^k) + b_{\mu\nu}^k)$$

Ecuación 10

$$y_{22_{\mu v}} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (-r_{\mu v}^k \cos(\beta_{\mu v}^k) + a_{\mu v}^k)$$

A continuación, se presenta la evaluación de errores en donde evidencia el error de ajuste y de desempeño.

## 2.5 Evaluación de errores

En esta sección se evalúa el método utilizando el error de ajuste y de desempeño. En la ecuación (11) se presenta la variación que hay entre las corrientes obtenidas por el modelo en el dominio del tiempo ( $I_{\mu}$ ) y el modelo tensorial ( $I_{F\mu}$ ). Para las señales de tensión de alimentación del experimento de un armónico a la vez. Por otro lado, el error de desempeño nos muestra como su nombre lo dice el desempeño del modelo tensorial, utilizando las señales de tensión de alimentación.

El método para el cálculo de los errores es tomado de (Malagón 2023), donde se indican tres ecuaciones para el cálculo de los errores de ajuste y de desempeño, estos errores a su vez están divididos en error de fase, magnitud y total.

Ecuación 11

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

La ecuación 11 se utiliza para calcular el error total, donde  $\mu=1,3\dots h$  por orden armónico,  $I_{\mu}$  es la respuesta de la corriente del modelo en el dominio del tiempo llevadas a la frecuencia y  $I_{F\mu}$  es la respuesta de la corriente en el dominio de frecuencia estimadas por el modelo tensorial.

Ecuación 12

$$E_{\mu}^{mag}[\%] = \frac{[|I_{\mu}| - |I_{F\mu}|]^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \times 100\%$$

Ecuación 13

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

Ecuación 14

$$E_{\mu}^{ang}[\%] = E_{\mu}[\%] - E_{\mu}^{mag}[\%]$$

Las ecuaciones (12), (13) y (14) se utilizan para calcular el error de magnitud y fase respectivamente. los diagramas Box-Plot, nos permiten visualizar la información que se obtiene de los errores mencionados anteriormente. Incluyendo los valores mínimos y máximos. Además, las figuras se dividen en 5 secciones, valor mínimo, primer cuartil Q1, segundo cuartil Q2, tercer cuartil Q3 y el valor máximo.

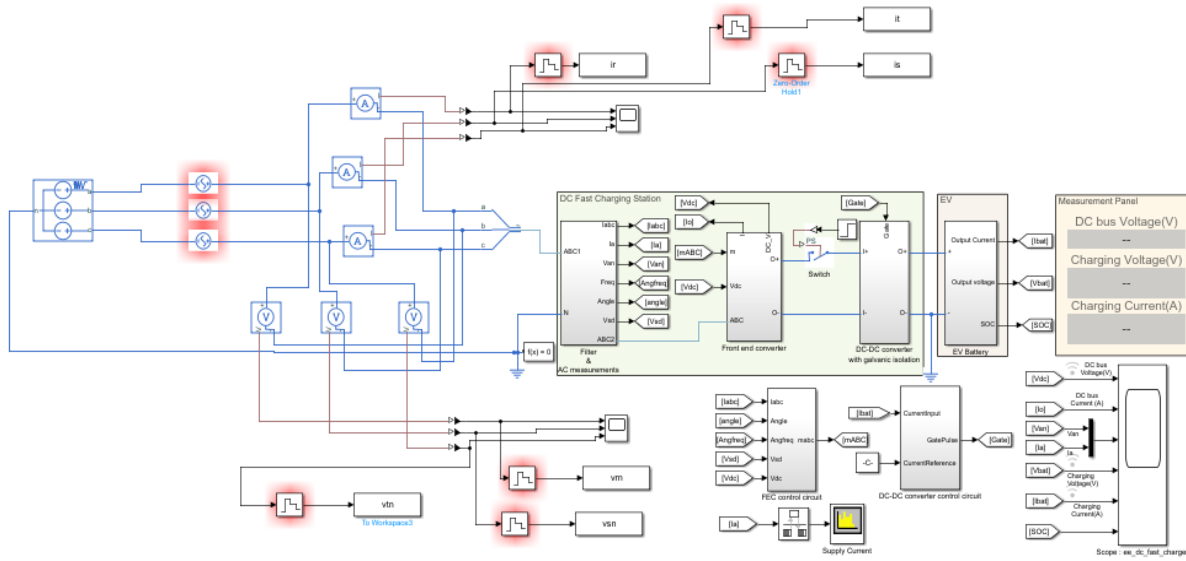
### **3. Procedimiento para la evaluación del error de ajuste y de desempeño del modelo tensorial**

A continuación, se describen las modificaciones realizadas al modelo del cargador del vehículo eléctrico en el dominio del tiempo. Asimismo, se explica cómo se organiza la información obtenida por el experimento de un armónico a la vez, la estimación de la corriente del modelo y por último, se aborda el cálculo de los errores de ajuste y desempeño.

3.1 Modificación del modelo de Simulink

Figura 3.

DC Fast Charger for Electric Vehicle (Model - Simulink/Matlab) modificado



En la figura 3 se observa la modificación del modelo base de la librería de Simulink. El objetivo de esta modificación es introducir las tensiones distorsionadas que se utilizan, tanto para las señales de ajuste en el experimento de un armónico a la vez como las señales de validación de desempeño. Por lo tanto, se agrega una fuente trifásica para variar la tensión de la frecuencia fundamental. Además, se incorporan tres fuentes monofásicas, una para cada fase, con el fin de ejecutar variaciones en magnitud y ángulo de las tensiones para cada uno de los armónicos dentro del experimento de un armónico a la vez, Sección 2.2.

### 3.2 Organización de datos del experimento

Posteriormente, al realizar las variaciones de magnitud y ángulo, en el experimento de un armónico a la vez, se utilizan los valores obtenidos de corriente en el método; se recolectan los datos de los 16 armónicos impares. Esto da como resultado una matriz de 16 filas y 1440 columnas, donde cada fila contiene la información de los armónicos. Asimismo, las columnas representan la combinación de 20 variaciones de magnitud y 72 variaciones de ángulo.

No obstante, al organizar los resultados de la simulación, se llevan las señales que se obtienen en el dominio del tiempo a el dominio de la frecuencia.

En la siguiente sección se explica cómo se utilizan las señales en el dominio de la frecuencia, en el método TP y posteriormente, como se estiman las corrientes para evaluar los errores de ajuste y de desempeño del modelo.

### 3.3 Corriente estimada con el modelo.

Para estimar la corriente del modelo tensorial, se utiliza la ecuación (1) que se encuentra en la Sección 2.3, donde  $V_{(2n)}$  representa la tensión de entrada y  $I_{C(2n)}$  es la respuesta en corriente a esta tensión, asimismo,  $Y_{(2nx2n)}$  es la matriz de admitancias calculada con el método.

### 3.4 Error de ajuste

Para evaluar el error de ajuste, se utilizan las señales de ajuste descritas en la Sección 2.2, estas señales se usan como tensión de alimentación en el modelo en el dominio del tiempo y el modelo tensorial (modelo en el dominio de la frecuencia), obteniendo así las corrientes.

Se calcula el error de ajuste utilizando las ecuaciones establecidas en la Sección 2.5. Para ello, se compara la corriente del modelo en el dominio del tiempo y la corriente del modelo tensorial (modelo en el dominio de la frecuencia). El error total es descompuesto en error de magnitud y error de ángulo de fase. Asimismo, para representar los resultados de los errores se utiliza el diagrama Box-Plot.

### 3.5 Error de desempeño

Para estimar el desempeño del modelo, se crean 10.000 señales aleatorias de tensión, en donde estas señales poseen valores aleatorios de fase y magnitud para los armónicos, manteniendo la secuencia positiva (ángulos de fase) en el fundamental, asimismo, cada una de estas señales cumple con los límites de distorsión armónica individual y total establecidos por la norma UNE EN 50160:2015 descrita en la Tabla 1 en la Sección 2.2, estas señales de tensión son llamadas señales de evaluación de desempeño y se utilizan como tensión de alimentación para el modelo en el dominio del tiempo del cargador y el modelo tensorial (modelo en el dominio de la frecuencia). A partir de estas señales, se obtiene la respuesta en corriente del modelo en el dominio del tiempo del cargador del vehículo eléctrico y del modelo tensorial (modelo en el dominio de la frecuencia).

Por ultimo las corrientes obtenidas son comparadas utilizando las ecuaciones (11), (12), (13) y (14).

Por otro lado, el error de desempeño en donde se utiliza otro punto de operación para analizar el método tensorial se basa en lo descrito anteriormente. Sin embargo, se utiliza el estándar IEEE 519:2014 para ajustar los límites de distorsión individual y total, esto se hace con el fin de revisar el comportamiento del modelo ampliando la zona de operación. Es importante mencionar que el ajuste del modelo se hace con la norma UNE EN 50160:2015.

A continuación, se presentan los límites de distorsión para los diferentes niveles de tensión del estándar IEEE 519:2014.

**Tabla 2.**

*Límites de distorsión de tensión*

<b>Bus voltage V at PCC</b>	<b>Individual harmonic (%)</b>	<b>Total harmonic distortion THD (%)</b>
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

*Nota.* Tomado de la estandar IEEE 519:2014, sección 5.1

Donde la distorsión armónica total de tensión permitido es de 8% y el límite de distorsión permitido para cada armónico es del 5%.

En la siguiente sección se presentan los resultados de los errores de ajuste y desempeño del modelo tensorial.

## 4. Resultados

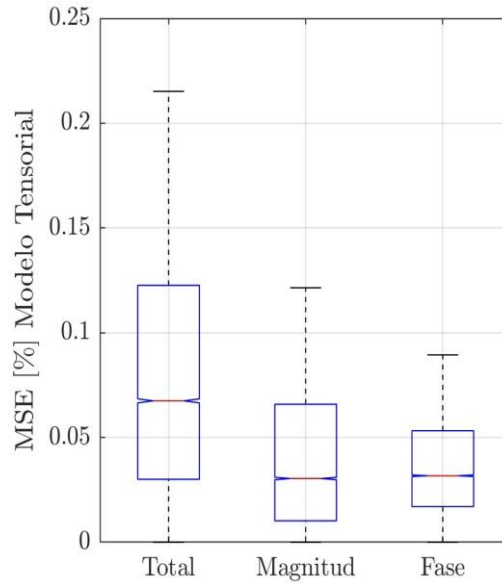
En esta sección se presentan los resultados de los errores de ajuste y de desempeño para la corriente obtenida de cada una de las fases, los resultados obtenidos se muestran mediante el diagrama de Box-Plot que se dividen en cuatro partes: el primer cuartil Q1 corresponde a los valores que son iguales o inferiores al 25% de los valores, la media o segundo cuartil Q2 corresponde a los valores que son iguales o inferiores al 50% de los valores, el tercer cuartil Q3 corresponde a los valores que son iguales o inferiores al 75% de los valores, y finalmente, el rango intercuartílico IQR es la diferencia entre el tercer cuartil y el primer cuartil. Además, se presentan los valores máximos y mínimos de cada gráfico.

### 4.1 Error de Ajuste Modelo Tensorial Fase R.

La siguiente figura ilustra los escenarios mencionados previamente para la fase R. Estos datos corresponden al procedimiento descrito en la Sección 2.5, el cual involucra las ecuaciones (11), (12), (13) y (14).

**Figura 4.**

*Error de ajuste - fase R*



En la figura 4 se observa que el error total tiene el valor de Q3 de 0,1226% y un valor mínimo de 8,15E-22%.

**Tabla 3.**

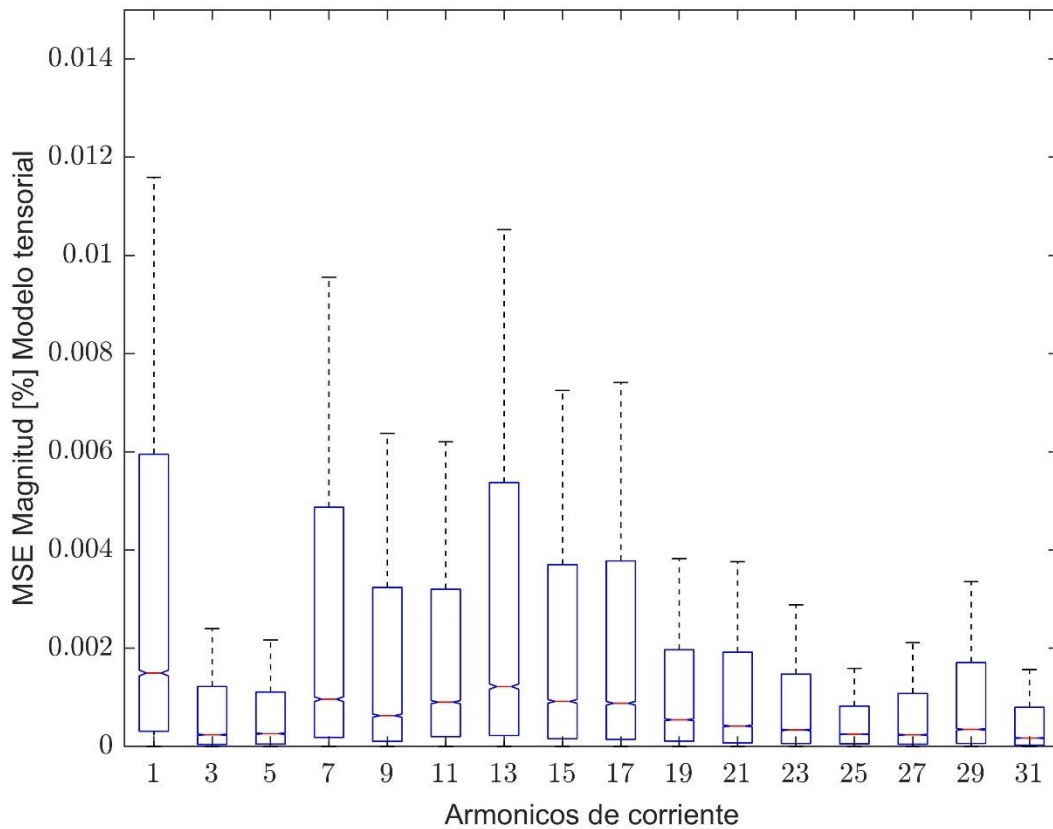
*Evaluación del Error de ajuste - fase R*

ERROR DE AJUSTE TOTAL [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	8,15E-22	0,030044	0,066525	0,122630	0,885890	0,092586
ERROR DE AJUSTE EN MAGNITUD [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	3,18E-22	0,010241	0,029838	0,065858	0,502790	0,055617
ERROR DE AJUSTE EN FASE [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	4,97E-22	0,017987	0,031369	0,053219	0,513010	0,035232

En la tabla 3 se observa que los valores de Q3 para el error total es de 0,122630%, es más alto que el error de magnitud 0,065858% y el error de ángulo de fase con 0,053219%.

**Figura 5.**

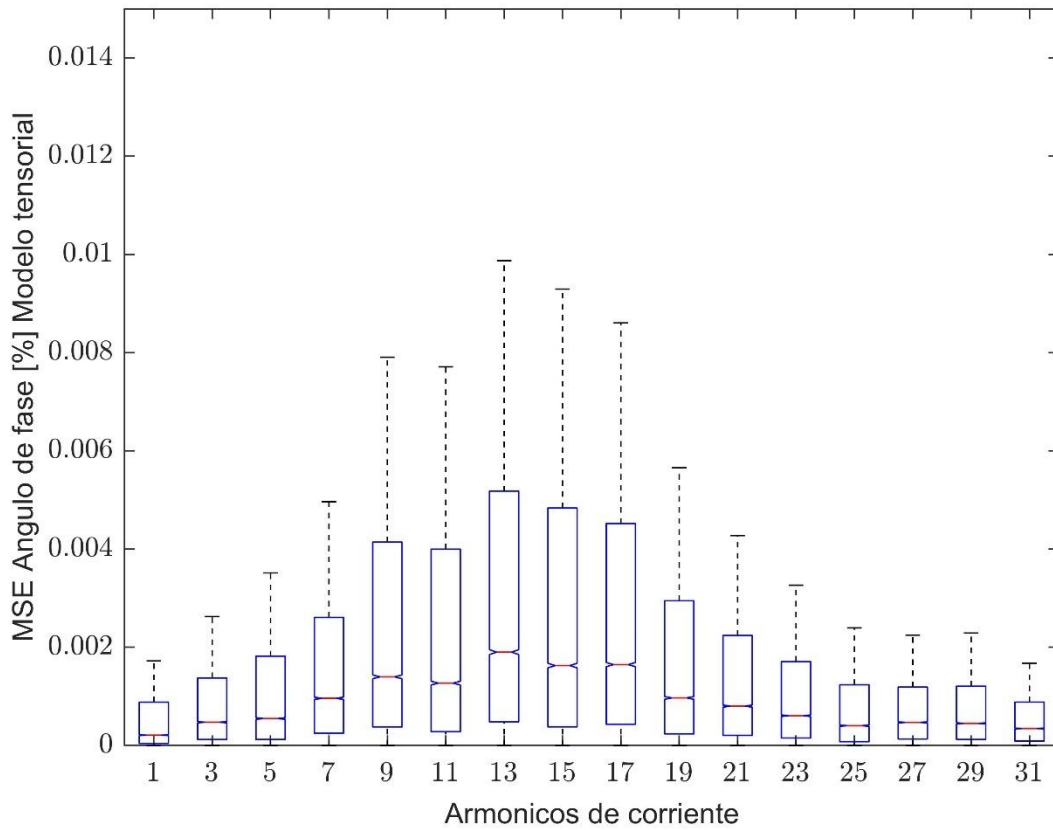
*Error de magnitud por armónicos - fase R*



En la figura 5 se observa los aportes individuales de cada armónico para el error de magnitud total, en donde se destaca la frecuencia fundamental con un aporte de 0,005950%, seguido del armónico 13 con un error de 0,005373%. Asimismo, el armónico 31 presenta el error de magnitud más bajo con un valor de 0,000796%.

**Figura 6.**

*Error de ángulo de fase por armónicos - fase R*

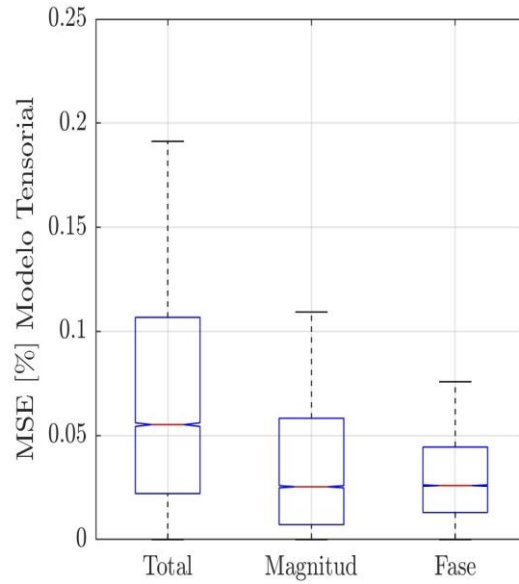


En la figura 6 se muestran los aportes individuales de cada armónico para el error de ángulo de fase total, en donde se destaca el armónico 13 con un aporte de 0,005178%, seguido del armónico 15 con un error de 0,004836%. Asimismo, la frecuencia fundamental presenta el error más bajo con un valor de 0,000881%.

**4.2 Error de Ajuste Modelo Tensorial Fase S**

**Figura 7.**

*Error de ajuste - fase S*



En la figura 5, se observa que la mayoría de los datos del error total están concentrados entre los valores de Q1 con 0,2221% y Q3 con 0,1067%. En base a la figura anterior, se muestran los valores obtenidos en la tabla 4.

**Tabla 4.**

*Evaluación del Error de ajuste - fase S*

ERROR DE AJUSTE TOTAL [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	6,49E-22	0,022105	0,054343	0,106720	0,896890	0,084615
ERROR DE AJUSTE EN MAGNITUD [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	3,72E-22	0,007192	0,024848	0,058269	0,596810	0,051076

ERROR DE AJUSTE EN FASE [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	2,78E-22	0,013040	0,025621	0,044431	0,443370	0,031391

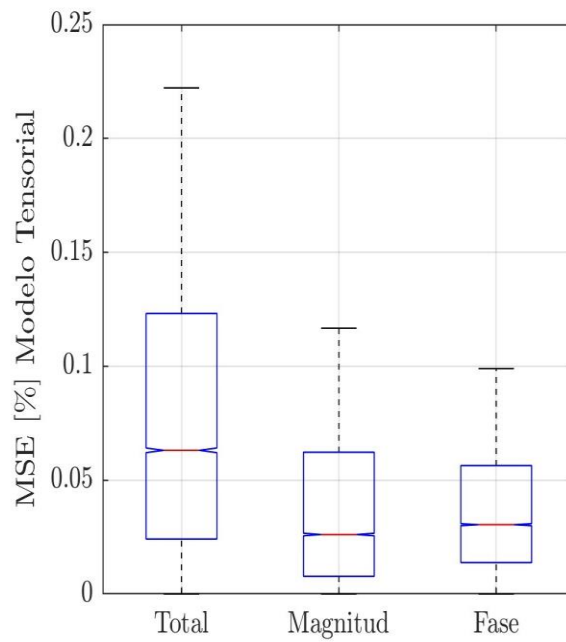
En la tabla 4 se evidencia que el error de magnitud y el error de ángulo de fase en el Q3 es de 0,0582% y 0,0444% son errores muy cercanos.

### 4.3 Error de Ajuste Modelo Tensorial Fase T.

A continuación, se observa los errores calculados para la fase T.

**Figura 8.**

*Error de ajuste - fase T*



De acuerdo con la figura anterior, se observa que los valores de los errores de magnitud, ángulo de fase y el error total no superan el 0,25%.

**Tabla 5.**

*Evaluación del Error de ajuste - fase T*

ERROR DE AJUSTE TOTAL [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	1,77E-22	0,024121	0,062043	0,123160	0,760790	0,099039
ERROR DE AJUSTE EN MAGNITUD [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	9,69E-22	0,007734	0,025555	0,062222	0,424830	0,054487
ERROR DE AJUSTE EN FASE [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	7,99E-22	0,013808	0,029977	0,056391	0,580540	0,042583

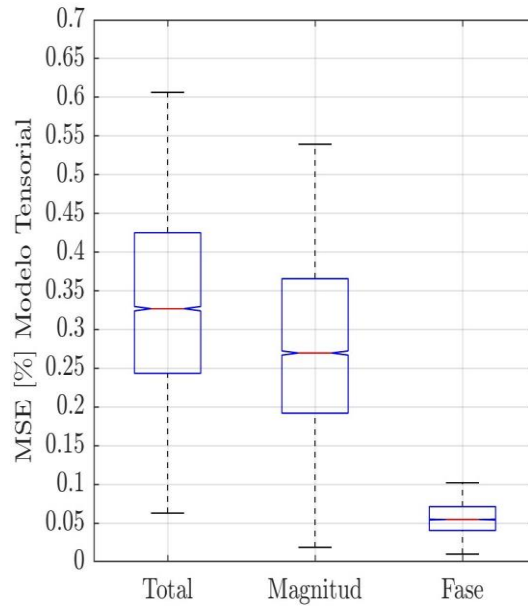
Al observar los diagramas y tablas presentadas para cada fase del sistema, se destaca que el error de magnitud según el tercer cuartil para las fases R con 0,06585%, S con 0,0582% y T con 0,06222% es mayor que el error de ángulo de fase R con 0,0532%, S con 0,0444% y T con 0,0563%. Además, en los tres escenarios se determina que los valores mínimos, independientemente de la fase, varían en el rango del orden de  $\times 10^{-22}$ , mientras que el valor del Q3 de todas las fases no supera el 0,13%.

**4.4 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase R, Norma UNE EN 50160:2015**

Una vez obtenidos los parámetros del modelo Tensorial para cada una de las fases, se procede a evaluar el desempeño del modelo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

**Figura 9.**

*Error de desempeño del modelo Tensorial Norma UNE EN 50160:2015 - fase R*



En base a la figura anterior fase R, se observa que los valores de los errores de magnitud, ángulo de fase y el error total no superan el 0,61%.

**Tabla 6.**

*Evaluación del Error de desempeño Norma UNE EN 50160:2015 - fase R*

ERROR DE DESEMPEÑO TOTAL [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,029118	0,243390	0,324060	0,424980	0,728370	0,181590
ERROR DE DESEMPEÑO EN MAGNITUD [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,018613	0,191890	0,266870	0,365650	0,620170	0,173760
ERROR DE DESEMPEÑO EN FASE [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,005747	0,040391	0,054897	0,071223	0,152820	0,030832

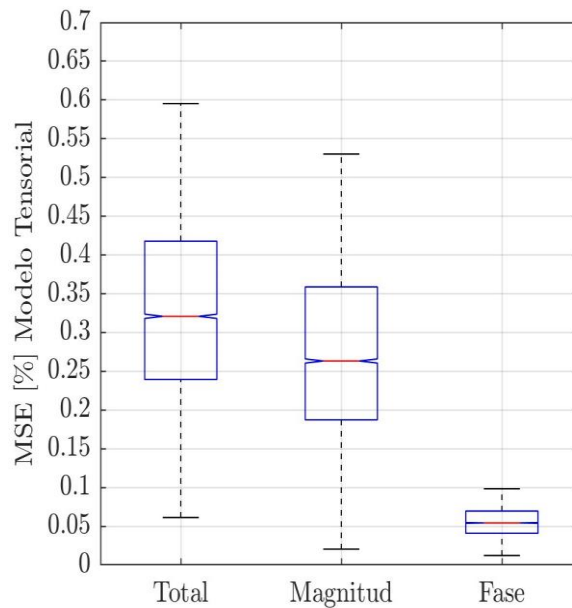
Para la tabla anterior se observa que los valores de Q3 para el error total es de 0,424980%, es más alto que el error de magnitud 0,36465% y el error de ángulo de fase con 0,07122%.

**4.5 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase S, Norma UNE EN 50160:2015**

A continuación, se observa los errores calculados para la fase S.

**Figura 10.**

*Error de desempeño del modelo Tensorial Norma UNE EN 50160:2015 - fase S*



En la figura 8, se observa que la mayoría de los datos del error total están concentrados entre los valores de Q1 con 0,2393% y Q3 con 0,417850%. A continuación, se muestran los valores obtenidos en la tabla 7.

**Tabla 7.**

*Evaluación del Error de desempeño Norma UNE EN 50160:2015- fase S*

ERROR DE DESEMPEÑO TOTAL [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,034802	0,239300	0,318070	0,417850	0,745270	0,178550
ERROR DE DESEMPEÑO EN MAGNITUD [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,020467	0,187270	0,260510	0,358830	0,623580	0,171560
ERROR DE DESEMPEÑO EN FASE [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,006656	0,040862	0,053797	0,069575	0,151890	0,028713

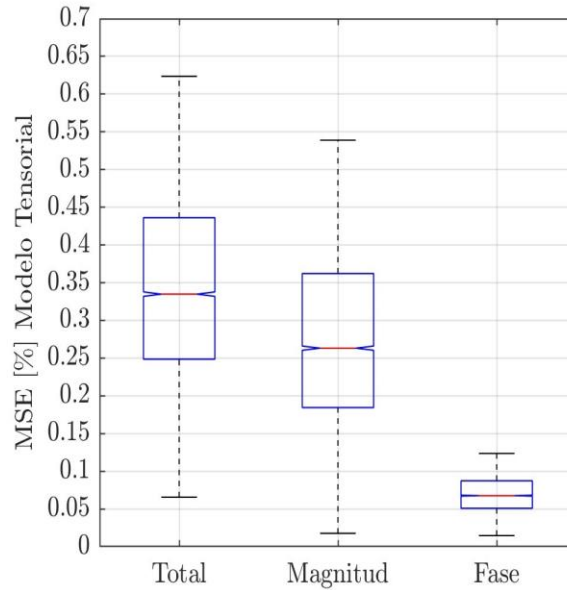
En la tabla 7 se observa según el tercer cuartil para el error total, error de magnitud y error de ángulo de fase valores de 0,417850%, 0,358830% y 0,069575%.

#### **4.6 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase T, Norma UNE EN 50160:2015**

Por último, en la figura 9, se observa los errores calculados para la fase T.

**Figura 11.**

*Error de desempeño del modelo Tensorial Norma UNE EN 50160:2015 - fase T*



En la anterior figura observamos que el error de magnitud de la corriente para la fase T no supera el 0,55%.

**Tabla 8.**

*Evaluación del Error de desempeño Norma UNE EN 50160:2015– fase T*

ERROR DE DESEMPEÑO TOTAL [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,033638	0,248570	0,331840	0,436210	0,762810	0,187640
ERROR DE DESEMPEÑO EN MAGNITUD [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,017597	0,184410	0,263160	0,362110	0,618830	0,177700
ERROR DE DESEMPEÑO EN FASE [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,009116	0,050770	0,068134	0,087179	0,186470	0,036409

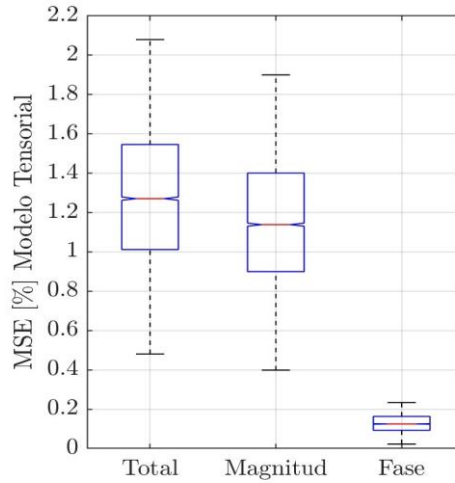
Al analizar el error de desempeño en las tres fases R, S y T, se observa un incremento significativo en el error de magnitud  $R=0,3656\%$ ,  $S=0,3588\%$  y  $T=0,3621\%$ , el error de ángulo de fase  $R=0,0712\%$ ,  $S=0,0695\%$  y  $T=0,0871\%$ , en comparación con los errores de ajuste  $R=0,06585\%$ ,  $S=0,0582\%$  y  $T=0,06222\%$  y error de ángulo de fase R con  $0,0532\%$ , S con  $0,0444\%$  y T con  $0,0563\%$ . Se puede observar que el error en magnitud para las fases R, S y T es mayor que el error en fase. Además, en los tres errores se evidencia que los valores mínimos, sin importar la fase, variaron en el rango de magnitud del orden de  $\times 10^{-3}$ , mientras que el valor del Q3 de todas las fases no supera el  $0,45\%$ .

#### **4.7 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase R, Estándar IEEE 519:2014**

En esta sección se expande el espectro de operación con el objetivo de examinar el comportamiento del modelo en otro punto de operación, específicamente utilizando el estándar IEEE 519:2014. Además, los cálculos de los errores total, magnitud y fase se realizan utilizando las ecuaciones (11), (12) y (13).

**Figura 12.**

*Error de desempeño del modelo Tensorial Estándar IEEE 519:2014 - fase R*



En la figura 12 en comparación con los resultados obtenidos para la fase R con la norma UNE EN 50160:2015, los resultados aumentaron mostrándonos valores de error total cercanos al 2,3%.

**Tabla 9.**

*Evaluación del Error de desempeño Estándar IEEE 519:2014 - fase R*

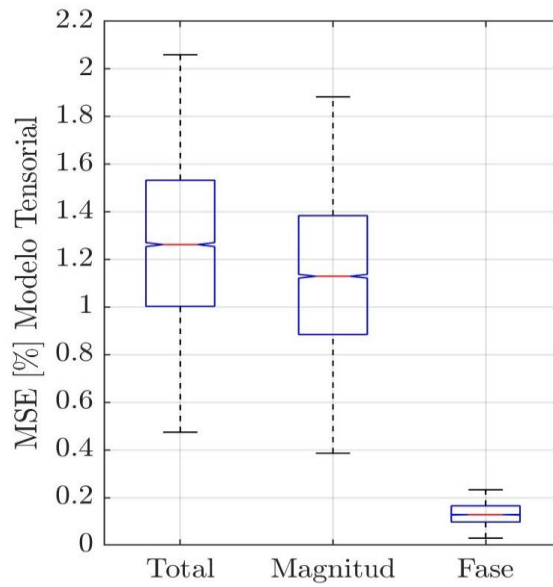
ERROR DE DESEMPEÑO TOTAL [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,213320	1,011800	1,279200	1,546100	2,732700	0,532800
ERROR DE DESEMPEÑO EN MAGNITUD [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,171980	0,899500	1,146400	1,400800	2,500400	0,501300
ERROR DE DESEMPEÑO EN FASE [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,014108	0,092593	0,124740	0,163040	0,376750	0,070447

En la tabla 9 se evidencia que el valor máximo de error para la fase R según el Q3 es de 1,546100%.

**4.8 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase S, estándar IEEE 519:2014**

**Figura 13.**

*Error de desempeño del modelo Tensorial Estándar IEEE 519:2014 - fase S*



En base a la figura anterior, se muestran los valores obtenidos en la tabla 10.

**Tabla 10.**

*Evaluación del Error de desempeño Estándar IEEE 519:2014 - fase S*

ERROR DE DESEMPEÑO TOTAL [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,212920	1,003110	1,254000	1,532600	2,656400	0,529500

ERROR DE DESEMPEÑO EN MAGNITUD [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,161940	0,884910	1,137200	1,384200	2,468500	0,499290
ERROR DE DESEMPEÑO EN FASE [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,014249	0,097246	0,126880	0,164910	0,382780	0,067664

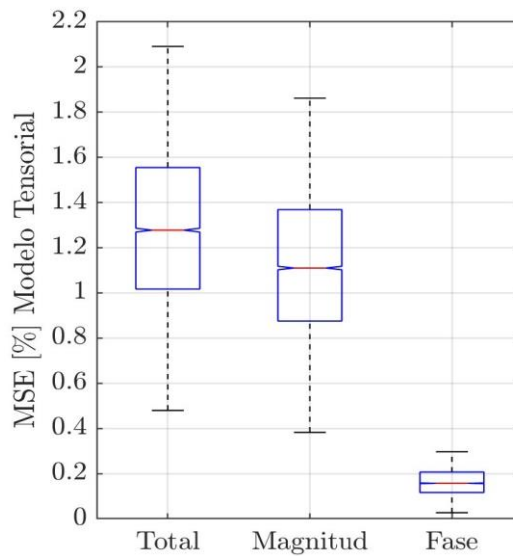
En la tabla anterior se evidencia que en el tercer cuartil para los errores de ángulo de fase, magnitud y total no supera el 1,54%

#### 4.9 Error de Desempeño Modelo Tensorial Fase T, Estándar IEEE 519:2014

A continuación, se observa los errores calculados para la fase T.

**Figura 14.**

*Error de desempeño del modelo Tensorial Estándar IEEE 519:2014 - fase T*



Con base en la figura anterior, se presentan los valores obtenidos en la tabla 11 para cada uno de los errores.

**Tabla 11.**

*Evaluación del Error de desempeño Estándar IEEE 519:2014 - fase T*

ERROR DE DESEMPEÑO TOTAL [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,231890	1,017000	1,269500	1,555000	2,775700	0,538000
ERROR DE DESEMPEÑO EN MAGNITUD [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,165950	0,875490	1,110200	1,368900	2,442000	0,493410
ERROR DE DESEMPEÑO EN FASE [%]						
	MIN	Q1	Q2	Q3	MAX	IQR
TP	0,021412	0,116470	0,155730	0,206770	0,492840	0,090300

Se puede observar que el error de desempeño, según el estándar IEEE 519:2014 comparado con el error de la norma UNE 50160:2015, es mayor en los tres escenarios analizados. Específicamente, el error en magnitud es más pronunciado en la fase R=1,4008% a diferencia de las otras fases S=1,3842% y T=1,3689%. En cuanto al error de ángulo de fase, se encontró que el valor máximo se registra en la fase T=0,2067%, en comparación con las fases R=0,1630% y S=0,1649%. En general, los valores mínimos para cada error se encuentran en el rango del orden de  $\times 10^{-2}$ , mientras que el valor del Q3 de todas las fases no supera el 1,57%.

## 5. Conclusiones.

En este trabajo de grado, se compara el error entre la señal de corriente obtenida del modelo tensorial con la corriente suministrada por el modelo en el dominio del tiempo del cargador. También se analiza el desempeño del modelo y el método en otro escenario, donde las señales generadas cumplen con los límites normativos de una norma diferente, en este caso, la estándar IEEE 519:2014.

Al analizar las tablas de datos y los gráficos de Box Plot, se observa que en el error de ajuste total según el tercer cuartil para la fase T es de 0,1231 %, para la fase R es 0,1226 % y para la fase S es 0,1067 %.

En el error de desempeño total, según los resultados obtenidos utilizando la norma UNE EN 50160:2015 el error para la fase R, S y T en el tercer cuartil no se supera el 0,4363 %. Por otro lado, en el caso del estándar IEEE 519:2014 el error de desempeño total del tercer cuartil para cada una de las fases no supera el 1,5641%.

Al utilizar el estándar IEEE 519:2014 se observa que el error de magnitud en la fase R con 1,4008 %, fase S con 1,3842 % y la fase T con 1,3689 % es mayor que los errores de magnitud con respecto a la norma UNE EN 50160:2015 de la fase R con 0,3656 %, fase S con 0,3588 %, y la fase T con 0,3621 %.

## **6. Recomendaciones.**

A través de este trabajo se identifica la necesidad de investigaciones futuras que amplíen el estudio del modelo tensorial, en donde se considere analizar el cargador de vehículo eléctrico en conjunto con múltiples cargas.

Se recomienda que, para futuros trabajos de simulación, se utilicen computadoras de alto rendimiento, debido a los largos tiempos de simulación que se presentan, especialmente en la parte del experimento de un armónico a la vez. Estos tiempos prolongados pueden limitar la eficiencia y la capacidad de realizar un mayor número de simulaciones en un tiempo razonable.

### Referencias Bibliográficas

- Caicedo, J. E., Romero, A. A. y Zini, H. C., (2017) “Frequency domain modeling of nonlinear loads, considering harmonic interaction.” *2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, pp. 1-6. Doi: 10.1109/PEPQA.2017.7981641
- En, Norma Europea, and Norma Une-en. 2015. “Características de La Tensión Suministrada Por Las Redes Generales de Distribución.” AENOR 2011/A1: 8.
- IEEE, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (2014) Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control In Electric Power Systema. *IEEE Std 519<sup>TM</sup>-1014*. 1:29
- Malagón, G. (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 Distorsión de Cargas Basadas En Fuentes Conmutadas*. Universidad Industrial de Santander.
- Malagon-Carvajal, G., Ordonez-Plata, G. y Duarte, C. (2023) “A Method to compute Frequency Domain Models based on Direction-Dependent Derivative of the Variation of Voltage and Current Phasors.” *Transacciones IEEE en suministro de energía*, pp. 1-8. Doi: 10.1109/TPWRD.2023.3272877
- Nassif, A. B.; Yong, J. y Xu, W. (2010) “Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 4, no. 3, pp. 363–375, doi: 10.1049/iet-gtd.2009.0240.

Romero-L, M. F.; Gallego, L. E.; Müller, S. y Meyer, J. (2015) Characterization of non-linear household loads for frequency domain modeling. *Ingeniería e Investigación*, vol. 35, no. 1, pp. 65–72. doi: 10.15446/ing.investig.v35n1Sup.53895.

UNE-EN IEC 61851-1, Norma Española, (2020). Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos Parte 1: Requisitos generales. *CTN 203 Equipo eléctrico y sistemas automáticos para la industria. SERCOBE*. 1:177

## Apéndices

**Apéndice A. Los códigos de programación que se utilizan en Matlab, para la ejecución de este trabajo de grado se encuentran en el siguiente hipervínculo.**

[https://drive.google.com/drive/folders/1LXr3fjJ4KYuWu\\_f5TmXsN4q-JqVDhuyV?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1LXr3fjJ4KYuWu_f5TmXsN4q-JqVDhuyV?usp=sharing)

Los archivos se encuentran en 2 carpetas principales y algunas subcarpetas:

En la carpeta Error de Desempeño IEEE 519:2014 - UNE EN 50160:2015, se encuentran los archivos y códigos relacionados con la creación de las 10000 señales que se crearon con cada una de las normas IEEE 519:2014 y EN 50160:2015, para analizar el desempeño del modelo tensorial.

Dentro de la carpeta Error de Desempeño IEEE 519:2014 - UNE EN 50160:2015 se encuentra una subcarpeta llamada Error\_IEEE\_10k que contiene los archivos de errores y las simulaciones que se crearon con la Norma IEEE 519:2014.

En la carpeta Experimento de un armónico a la vez se encuentran 3 subcarpetas, una de ellas es la carpeta llamada Archivos\_Tensor que contiene los archivos de las simulaciones del barrido en frecuencia de los armónicos, el código del método (TP) y los archivos de las matrices de admitancias con sus parámetros para cada una de las fases.

Así mismo en la carpeta Simulacion\_armonicos se encuentran los resultados del barrido en frecuencia para cada uno de los armónicos, el archivo de Simulink del cargador que se utilizó para correr las simulaciones de los armónicos que se llama ee\_dc\_fast\_charger\_prueba3 y el código que se utilizó para hacer el barrido y que alimentaba al archivo de Simulink. Por último, se encuentra la carpeta llamada Simulación Fundamental que contiene los mismos archivos

mencionados anteriormente, pero modificados para las simulaciones del armónico fundamental, el archivo llamado ee\_dc\_fast\_charger\_2\_fund, es el archivo de Simulink que se utiliza para correr las simulaciones en el tiempo para el armónico fundamental de tensión.