

# Modelado en el dominio de la frecuencia de un variador trifásico de velocidad conectado a un motor a partir de un método de ajuste basado en medidas de corriente y tensión.

## Frequency domain modeling of a three-phase VSD connected to a motor using a tuning method based on current and voltage measurements.

(Elkin Julián Mateus Quintero\*, William Danilo Cala Balaguera \*\*), Estudiante de Ingeniería Eléctrica,  
Gabriel Alexis Malagón Carvajal, Profesor, César Antonio Duarte Gualdrón, Profesor,  
Gabriel Ordoñez Plata, Profesor.

Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL)  
Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Email: {\*elkin.mateus,\*\*william2174030,gabriel.malagon}@correo.uis.edu.co, cedagua@uis.edu.co,  
gaby@uis.edu.co

Recibido: 17/07/2023. Aceptado: 22/08/2023. Versión final: 14/09/2023

### Resumen

This paper assess the performance of a model fitting method in the frequency domain from voltage and current measurements. This method is presented as an option for modeling in the frequency domain and the subsequent estimation of the current distortion caused by a group of non-linear loads, compared to complex models in the time domain. In this way, it may be possible to implement distortion evaluation scenarios in MCCs (Motor Control Centers) with a lower computational cost than a time domain simulation.

### Abstract

This paper assess the performance of a model fitting method in the frequency domain from voltage and current measurements. This method is presented as an option for modeling in the frequency domain and the subsequent estimation of the current distortion caused by a group of non-linear loads, compared to complex models in the time domain. In this way, it may be possible to implement distortion evaluation scenarios in MCCs (Motor Control Centers) with a lower computational cost than a time domain simulation.

**Palabras Claves:** Modelado, optimización, cargas no lineales, error de ajuste, error de desempeño, álgebra matricial, distorsión.

### 1. Introducción

Los sistemas eléctricos de corriente alterna son diseñados para operar con tensiones y corrientes sinusoidales. Sin

embargo, cargas no lineales como los variadores de velocidad distorsionan las formas de onda en estado estable provocando problemas en la red. Para esto se busca ampliar el análisis sobre la distorsión en equipos

Como citar: E. Mateus, W. Cala, G. Malagón, C. Duarte, "Desarrollo en Python para la evaluación estocástica de armónicos en instalaciones fotovoltaicas," in XI Simposio Internacional de Calidad de la Energía Eléctrica, Valledupar: Universidad Nacional de Colombia, Nov. 2023. doi: <https://doi.org/10.15446/sicel.v11.110046>

electrónicos como en un conjunto variador-motor en un CCMs (Centros de Control de Motores), ya que tradicionalmente se realiza en el dominio del tiempo resultando más complejo evaluar múltiples cargas agregadas en un punto de acople común PCC.

Por lo tanto, la búsqueda de modelos eficientes para predecir el impacto armónico colectivo de estas cargas es actualmente un tema de investigación, donde se han propuesto modelos que pueden reemplazar el modelo clásico de fuente de corriente armónica [1].

Existen métodos que puede identificarse en la literatura para el cálculo de la matriz de admitancias, uno de estos, el método propuesto por Fauri en 1997 [2] el cual calcula un elemento a la vez de la matriz a partir de señales dos de tensión y dos de corriente.

Sin embargo, cuatro señales pueden no ser suficientes para estimar adecuadamente el comportamiento de la carga a modelar en el dominio de la frecuencia.

En [1] se propone una método para el modelado de cargas no lineales basado en álgebra de matrices el cual consiste en ajustar el modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas, sin embargo, los autores encuentran algunos problemas matemáticos relacionados con la falta de control de tensión de alimentación de la carga durante el experimento, por lo tanto es importante diseñar un experimento en el cual se pueda, garantizar la independencia lineal de cada una de las señales de tensión utilizadas durante el ajuste del modelo.

En [6] se presenta un método de ajuste para el modelado de cargadores de vehículos eléctricos, en el cual se propone generar índices de sensibilidad, linealidad y simetría que permitan caracterizar los elementos de una matriz de admitancias acopladas.

Sin embargo, en todos estos trabajos se abordan cargas monofásicas donde no se tiene un criterio para la definición de los límites de la zona de operación durante el experimento, así como no se tienen en cuenta variaciones en la fundamental y ordenes armónicos: regulación, ángulo de fase, distorsión individual y total, que permitan definir la zona de operación de la tensión de alimentación. De igual forma, no utilizan un método de evaluación que permita descomponer los errores, en errores de ajuste y de desempeño, y que estos a su vez en un error total que puede descomponerse en un error de magnitud y uno de ángulo de fase.

En este artículo se plantea una evaluación de desempeño de un modelo en el dominio de la frecuencia para un conjunto trifásico variador-motor; mediante el método de ajuste de modelos basado en álgebra matricial en [1], ajustando los parámetros del modelo equivalente de matriz de admitancias armónicamente acopladas a partir

de un experimento que permite variar la magnitud y el ángulo de fase de la tensión de alimentación.

En este artículo este experimento está compuesto por dos procedimientos para el ajuste de los parámetros del modelo:

El primer procedimiento con tensión controlada, el cual representa el escenario en el que se toman medidas de laboratorio con una fuente controlada, mediante un proceso sistemático para la variación de la tensión de alimentación.

El segundo, sin tensión controlada, el cual representa el escenario en el cual se tiene un equipo de medida durante un amplio intervalo de tiempo y en donde las variaciones de la tensión que alimenta la carga obedecen al comportamiento del sistema.

Estos procedimientos se realizan utilizando un modelo en el dominio del tiempo que incluye una fuente de tensión trifásica, un variador y motor.

El (modelo circuital equivalente) implementado en MATLAB/ Simulink, el cual proporciona una biblioteca de bloques para la implementación del modelo. Este modelo es compartido en el siguiente [link](#).

Este artículo presenta en la Sección 2 el modelado en el dominio de la frecuencia a partir de un experimento que permite obtener medidas de tensión linealmente independientes, en donde en la sección 2.1 y 2.2 se presentan el primer y segundo procedimiento, respectivamente, para el ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia.

En la sección 2.3 se establece el modelo circuital equivalente, definiendo los parámetros que componen el modelo. Este modelo en el dominio del tiempo permite obtener mediante simulaciones las señales o medidas que luego son llevadas al dominio de la frecuencia para el ajuste del modelo.

En el dominio de la frecuencia la sección 3, se presenta el modelo y método de ajuste del modelo en el dominio de la frecuencia. En la sección 4 la evaluación de error de ajuste y desempeño. En la sección 5, se presenta el análisis de resultados. Finalmente, en la sección 6 se describen las conclusiones de este trabajo.

## 2. Modelado en el dominio del tiempo y de la frecuencia para la carga variador-motor

En esta sección se presentan dos procedimientos: uno representa el escenario en donde se realizan mediciones en un laboratorio bajo condiciones controladas (Sección

2.1) y otro el escenario que representa la carga cuando está conectada a una barra durante un intervalo de tiempo tomando medidas de corriente y tensión de acuerdo con las variaciones que se den por cuenta del sistema (Sección 2.2). Finalmente se presenta el modelo circuital de la carga en el dominio del tiempo (sección 2.3), el cual mediante simulaciones permite representar los escenarios antes planteados mediante simulaciones.

## 2.1 Procedimiento 1 (Con control sobre fuente de alimentación)

El primer procedimiento se define a continuación:

1. Se fija la tensión fundamental de alimentación ( $V_r$ ,  $V_s$  y  $V_t$ ), con regulación 0 % y ángulo de fase ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$  y  $-120^\circ$ ). Despues, la regulación de tensión es gradualmente definida en pasos, para la regulación de tensión desde 0 % hasta el límite propuesto el Std ANSI C84.1, así se fija como límite superior el 5 %.

2. El fundamental de la tensión de alimentación es definido como referencia, seleccionando una amplitud nominal y ángulo de fase igual a  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  y  $-120^\circ$ , según corresponda. El tercer armónico es superpuesto a la tensión de referencia (en este trabajo, solo se consideran los armónicos impares) y se realizan gradualmente variaciones estableciendo previamente una serie de pasos para la magnitud (desde 0.1 % hasta el límite establecido Std UN50160:2015), los pasos definidos en magnitud son de 20 pasos y el ángulo de fase (desde  $0^\circ$  a  $360^\circ$ ), los pasos definidos en fase son de 72 pasos.

3. El procedimiento anterior se repite para cada orden armónico (3er, 5th, . . . , 11th, . . . , 31th), superponiendo a la componente fundamental solo un armónico a la vez. Nuevamente, la magnitud y el ángulo de fase del orden armónico agregado se varía gradualmente en pasos, cuya cantidad de pasos y límites son definidos previamente.

4. Esta selección de señales se realiza inicialmente para la fase r y luego se corrigen de acuerdo con la secuencia para las diferentes fases, de forma que la carga vea la misma señal de tensión (distorsión y regulación) en cada fase.

5. Luego basado en la forma de onda que consiste en expresiones matemáticas que se describe a través de parámetros eléctricos, las señales de corriente o de tensión son transformadas al dominio de la frecuencia a través de la transformada de Fourier ajustando un modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas.

## 2.2 Procedimiento 2 (Sin control sobre la fuente de tensión de alimentación)

En el segundo procedimiento se define a continuación:

1. Se escogen de forma aleatoria la misma cantidad señales de tensión del procedimiento 1, las cuales se les asigna una distribución uniforme para la magnitud y el ángulo de fase, estas señales cumplen con el Std ANSI C84.1 para la regulación y los límites de distorsión individual y total el Std UNE-EN50160-2015.

2. El procedimiento anterior se define para todos los órdenes armónico (3er, 11th, . . . h), superponiendo a la componente fundamental cada uno de estos, el ángulo de fase de los órdenes armónicos de las señales de tensión se selecciona aleatoriamente puesto que no se cuenta con límites normativos para el ángulo de fase entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ .

3. Esta selección de señales se realiza inicialmente para la fase r y luego se corrigen de acuerdo con la secuencia para las diferentes fases, de forma que la carga vea la misma señal de tensión (distorsión y regulación) en cada fase.

4. Posteriormente usando el modelo de circuito equivalente del variador trifásico conectado al motor se obtienen las corrientes de respuesta para las señales de tensión de ajuste del procedimiento 2.

5. Luego basado en la forma de onda que consiste en expresiones matemáticas que se describe a través de parámetros eléctricos, las señales de corriente o de tensión son transformadas al dominio de la frecuencia a través de la transformada de Fourier ajustando un modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas.

## 2.3 Modelo en el dominio del tiempo y la frecuencia

El modelo circuital equivalente de conjunto variador-motor se implementa en Matlab/SIMULINK, en la Figura 1 se dispone de los elementos o bloques necesarios para armar el modelo.

Este modelo puede ser descargado en el siguiente [link](#), en donde los parámetros del modelo y la arquitectura del esquema motor- variador se observan Tabla 1.

**Tabla 1. Parámetros del circuito**

Fuente de tensión programable	Capacitancia	Inductancia
220 (V rms)	2100 [ $\mu$ F]	0.5 mH
Frecuencia del sistema	Frecuencia de muestreo	
50 (Hz)	(50*64)	

A través de MATLAB se ajusta el modelo en el dominio de la frecuencia (cálculo de matrices de admittance armónicamente acopladas y corriente de corte), de acuerdo con el método basado en álgebra de matrices propuesto en [1].

Posteriormente se implementa el modelo de la ecuación (1) para la evaluación de error de ajuste (señales de ajuste) y error de desempeño (señales de desempeño) presentado a continuación.

A partir de [1] y [5] el modelo de matrices de admitancias armónicamente acopladas (MAAA) es definido como:

$$Iac = I_c + Y^+ Vac + Y^- Vac^* \quad (1)$$

Donde  $I_c$  corresponde a la corriente de corte,  $Y^+$  y  $Y^-$  son matrices de admitancias armónicamente acopladas, las cuales relacionan la tensión con la corriente obtenidas en las simulaciones de cada uno de los procedimientos,  $Vac$  y  $Vac^*$  son tensión de alimentación del modelo y su conjugada respectivamente.

### 3. Error de ajuste y desempeño

El error de ajuste es calculado a partir de la estimación de la corriente para las señales de tensión seleccionadas para el ajuste. Por ejemplo, durante el barrido en frecuencia, se define un número de señales de tensión a partir de los pasos o variaciones en la magnitud y ángulo de fase y número de armónicos, esta cantidad de señales dependen de cada procedimiento realizado.

Para la evaluación del error de desempeño se generan 10000 señales nuevas de forma similar al procedimiento 2 (señales de desempeño) que contiene cada uno de los armónicos (15 armónicos impares), los cuales deben cumplir los límites de regulación, distorsión individual y total propuestos por el StdANSI C84.1-2012 y el Std UNE-EN50160-2015, respectivamente.

Posteriormente usando el modelo se obtienen las corrientes para cada fase en el dominio del tiempo, estas son llevadas al dominio de la frecuencia y finalmente almacenadas para la evaluación del error de desempeño, comparando los resultados obtenidos con el dominio de la frecuencia con los obtenidos con el modelo del tiempo.

### 4. Evaluación de errores

Los resultados se expresan a través de diagramas de cajas (Box-Plot) que permiten visualizar los datos de la siguiente forma:

- 25th percentile (Primer cuartil Q1).
- Mediana (Segundo Cuartil Q2).
- 75th percentile (tercer cuartil Q3).
- Valores mínimos y máximos de la serie de datos

Para el análisis de resultados presentado a continuación se seleccionó el tercer cuartil como figura de mérito. Luego de la adquisición de las señales de ajuste y de desempeño y de establecer los tres conjuntos de señales: dos de señales de ajuste (escenario 1 y 2) y uno de desempeño, se usa el método para la evaluación del error presentado en [7].

Este error compara las corrientes estimadas por el Modelo de Matrices de Admitancias Armónicamente Acopladas (modelo en el dominio de la frecuencia), con la corriente medida o simulada por el modelo circuital equivalente (modelo en el dominio del tiempo)

La desviación entre los conjuntos se evalúa por orden armónico mediante dos tipos de señales: errores de magnitud y errores de ángulo de fase.

A continuación, se presentan estos errores de ajuste del procedimiento 1 en las tablas 2, 3 y 4.

Por otra parte, se presentan los errores de ajuste del procedimiento 2 en las tablas 4, 5 y 6.

Los errores de desempeño para el procedimiento se observan en las tablas 7, 8 y 9.

### 5. Análisis de los resultados

A continuación, en las tablas 2, 3 y 4, se expresan los resultados a través de diagramas de cajas (Box-Plot) que permiten visualizar los resultados mediante los siguientes datos estadísticos: los errores de ajuste del procedimiento 1 para cada una de las fases de la carga.

**Tabla 2.** Errores de ajuste de la Fase r en el modelo de matrices armónicamente acopladas para el conjunto variador-motor.

Modelo de MAAA	Errores	Errores de ajuste Fase r (%)					
		Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Median)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
	E [%]	0,053x10-3	2,162x10-3	6,404x10-3	0,017	2,764	0,015
	$E^{mag}$ [%]	0,017x10-3	0,520x10-3	2,090x10-3	0,006	0,793	0,006
	$E^{ang}$ [%]	0,017x10-3	0,736x10-3	2,468x10-3	0,008	2,252	0,007

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 3.** Errores de ajuste de la Fase s en el modelo de matrices armónicamente acopladas para el conjunto variador-motor

Modelo de MAAA	Errores	Errores de ajuste Fase s (%)					
		Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Medianas)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
		E [%]	2,693x10-3	4,694x10-3	0,009	2,828	0,006
	$E^{mag}$ [%]	0,029x10-3	0,602x10-3	1,538x10-3	0,003	0,730	0,002
	$E^{ang}$ [%]	0,020x10-3	1,021x10-3	2,529x10-3	0,005	2,097	0,004

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 4.** Errores de ajuste de la Fase t en el modelo de matrices armónicamente acopladas para el conjunto variador-motor

Modelo de MAAA	Errores	Errores de Ajuste Fase t (%)					
		Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Medianas)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
		E [%]	2,976x10-3	7,252x10-3	0,014	3,223	0,011
	$E^{mag}$ [%]	0,032x10-3	0,594x10-3	2,289x10-3	0,006	0,683	0,006
	$E^{ang}$ [%]	0,021x10-3	1,122x10-3	2,805x10-3	0,007	2,539	0,006

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en las tablas 5 ,6 y 7, se expresan los resultados a través de diagramas de cajas (Box-Plot) que permiten visualizar los resultados mediante los

siguientes datos estadísticos: los errores de ajuste del procedimiento 2 para cada una de las fases de la carga.

**Tabla 5.** Errores de ajuste de la Fase r en el modelo de matrices armónicamente acopladas para el conjunto variador-motor

Modelo de MAAA	Errores	Errores de ajuste Fase r (%)					
		Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Medianas)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
		E [%]	1,407	2,301	3,959	4,953	3,285
	$E^{mag}$ [%]	0,007	0,407	1,036	1,562	2,189	1,512
	$E^{ang}$ [%]	0,087	0,837	1,862	2,370	3,233	1,822

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** Errores de ajuste de la Fase s en el modelo de matrices armónicamente acopladas para el conjunto variador-motor

Modelo de MAAA	Errores	Errores de ajuste Fase s (%)					
		Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Medianas)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
		E [%]	1,483	2,687	3,789	4,924	3,665
	$E^{mag}$ [%]	0,006	0,444	0,904	1,416	1,739	1,445
	$E^{ang}$ [%]	0,002	0,543	1,686	2,406	3,112	2,306

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 7.** Errores de ajuste de la Fase t en el modelo de matrices armónicamente acopladas para el conjunto variador-motor

Errores de ajuste Fase t (%)

Modelo de MAAA	Errores	Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Median)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
	E [%]	0, 072	1,694	2,878	3,913	5,272	3,875
	$E^{mag}$ [%]	0,003	0,434	1,033	1,506	2,064	1,478
	$E^{ang}$ [%]	0,022	0,804	1,553	2,379	2,976	2,223

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en las tablas 8, 9 y 10, se expresan los resultados a través de diagramas de cajas (Box-Plot) que permiten visualizar los resultados mediante los

siguientes datos estadísticos: los errores de desempeño del procedimiento 1 para cada una de las fases de la carga.

**Tabla 8.** Errores de desempeño de la Fase r en el modelo de matrices armónicamente acopladas para el conjunto variador-motor.

Modelo de MAAA	Errores de Desempeño Fase r (%)						
	Errores	Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Median)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
		0,0020	0,053	0,102	0,163	0,213	0,145
		$E^{mag}$ [%]	0,0001	0,014	0,033	0,052	0,079
		$E^{ang}$ [%]	0,0019	0,033	0,078	0,110	0,148

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 9.** Errores de desempeño de la Fase s en el modelo de matrices armónicamente acopladas para el conjunto variador-motor.

Modelo de MAAA	Errores de Desempeño Fase s (%)						
	Errores	Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Median)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
		0,0002	0,054	0,085	0,117	0,162	0,119
		$E^{mag}$ [%]	0,0001	0,019	0,038	0,058	0,074
		$E^{ang}$ [%]	0,0001	0,025	0,053	0,076	0,098

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 10.** Errores de desempeño en el modelo de matrices armónicamente acopladas para conjunto variador-motor de la Fase r.

Modelo de MAAA	Errores de Desempeño Fase t (%)						
	Errores	Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Median)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
		0,0002	0,043	0,094	0,119	0,184	0,159
		$E^{mag}$ [%]	0,0001	0,018	0,035	0,055	0,074
		$E^{ang}$ [%]	0,0001	0,023	0,068	0,079	0,129

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en las tablas 11, 12 y 13, se expresan los resultados a través de diagramas de cajas (Box-Plot) que permiten visualizar los resultados mediante los siguientes datos estadísticos: los errores de desempeño del procedimiento 2 para cada una de las fases de la carga.

**Tabla 11.** Errores de desempeño en el modelo de matrices armónicamente acopladas para conjunto variador-motor de la Fase r.

Modelo de MAAA	Errores	Errores de Desempeño Fase r (%)				
		Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Mediana)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo
	E [%]	0,029	2,770	6,284	9,435	12,355
	$E^{mag}$ [%]	0,010	1,125	2,540	3,673	4,942
	$E^{ang}$ [%]	0,136	1,928	3,861	5,695	7,312

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 12.** Errores de desempeño en el modelo de matrices armónicamente acopladas para conjunto variador-motor de la Fase s.

Modelo de MAAA	Errores	Errores de Desempeño Fase s (%)				
		Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Mediana)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo
	E [%]	0,294	2,609	5,211	8,770	12,162
	$E^{mag}$ [%]	0,072	1,513	2,780	4,099	4,971
	$E^{ang}$ [%]	0,026	1,922	3,378	4,700	6,212

Fuente: elaboración propia.

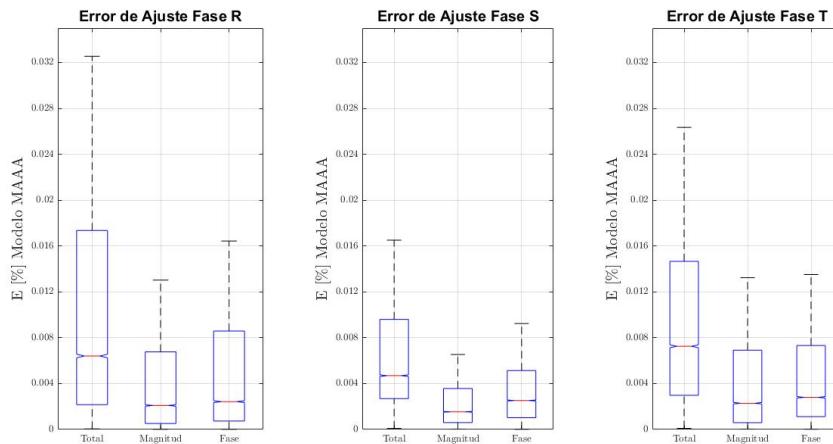
**Tabla 13.** Errores de desempeño en el modelo de matrices armónicamente acopladas para conjunto variador-motor de la Fase t.

Modelo de MAAA	Errores	Errores de Desempeño Fase t (%)				
		Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Mediana)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo
	E [%]	0,112	2,951	6,657	9,503	12,371
	$E^{mag}$ [%]	0,008	1,659	2,905	4,187	4,996
	$E^{ang}$ [%]	0,078	2,006	3,668	5,275	7,495

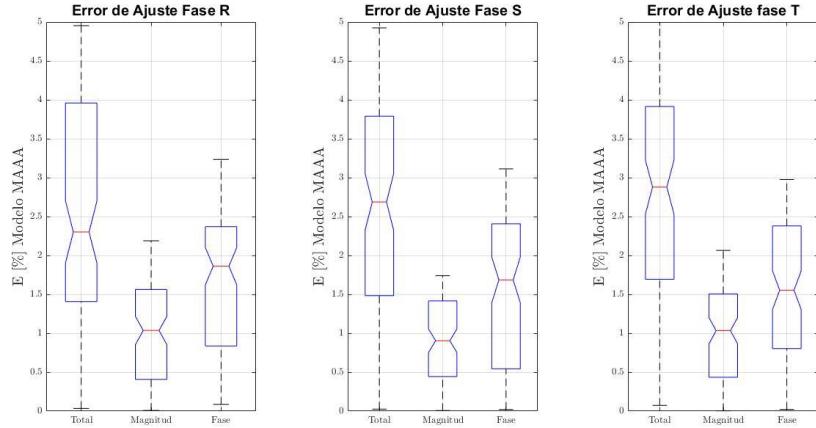
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 2,3 y 4, se presentan los datos estadísticos con los errores de ajuste y desempeño para la caracterización de la carga por cada una de las fases

del sistema, según datos de forma gráfica por medio de “box plot”.

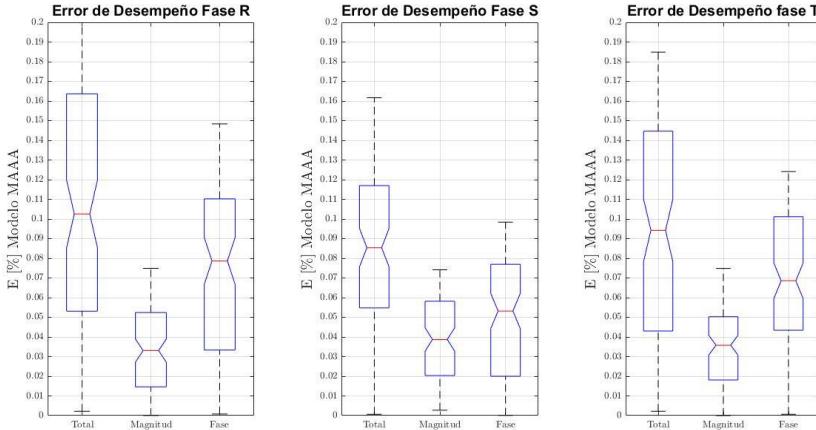
**Figura 1.** Box-Plot para error de ajuste procedimiento 1 fase r, s y t en el método de matrices armónicamente acopladas para una carga conjunto variador-motor

Fuente: elaboración propia.



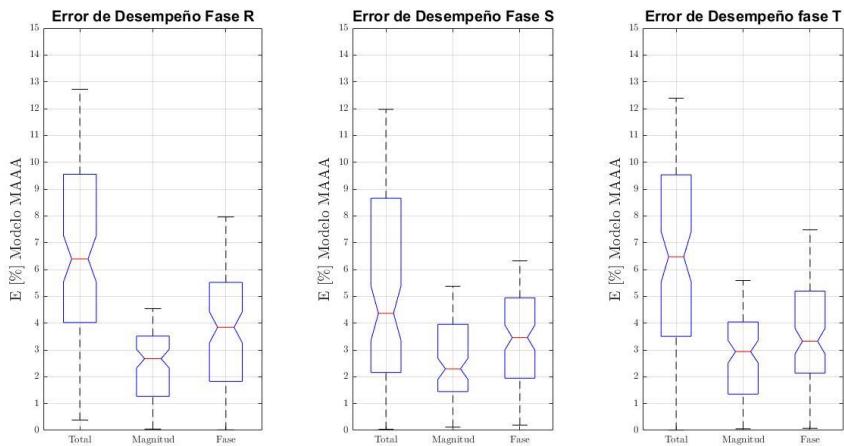
**Figura 2.** Box-Plot para error de ajuste procedimiento 2 fase r, s y t en el método de matrices armónicamente acopladas para una carga conjunto variador-motor.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.** Box-Plot para error de Desempeño procedimiento 1 fase r, s y t en el método de matrices armónicamente acopladas para una carga conjunto variador-motor.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 4.** Box-Plot para error de desempeño procedimiento 2 fase r, s y t en el método de matrices armónicamente acopladas para una carga conjunto variador-motor

Fuente: elaboración propia.

Cada una de estas medidas se realizaron individualmente para cada fase y obteniendo los errores determinados para cada caso.

- Frente al análisis de los resultados del  $E[\%]$  de las figuras se puede evidenciar que el error del modelo de MAAA es similar para cada una de las fases.

En el procedimiento 1 para el error de ajuste difieren la fase r y s en un 0,008% y las fases t y s en un 0,005%. Para los errores de ajuste en la Fig. 2, el análisis del  $E^{mag}[\%]$  o error de magnitud, observamos un error superior para fase r y t. Para el caso del  $E^{ang}[\%]$  o error de fase, también se evidencia un error de ajuste superior para la fase r y t. Por ejemplo, el  $E[\%]$  evidencia unas variaciones en el Q3 (Tercer cuartil) de cada una de las fases; para la fase r siendo de 0,017%, para la fase s de 0,009% y la fase t de 0,014 %.

- Frente al análisis de los resultados del  $E [\%]$  de las figuras se puede evidenciar que el error del modelo de MAAA es similar para cada una de las fases.

En el procedimiento 2 para el error de ajuste difieren la fase r y s en un 0,170 % y las fases t y s en un 0,124 %. Para los errores de ajuste en la Fig. 3 y del análisis del  $E^{mag}[\%]$  o error de magnitud, un error superior para fase r y t. Para el caso del  $E^{ang}[\%]$  o error de fase, también se evidencia un error de ajuste superior para la fase r y t. Por ejemplo, el  $E [\%]$  evidencia unas variaciones en el Q3 (Tercer cuartil) de cada una de las fases; para la fase r siendo de 3,959 %, para la fase s de 3,789 % y la fase t de 3,913 %.

- Para el comportamiento del error de desempeño en cada uno de los procedimientos, la tendencia es muy similar por cada una de las fases con respecto al error de ajuste.

En la Fig. 4 se aprecia un desempeño inferior para el procedimiento 1 frente a los resultados obtenidos del procedimiento 2, los cuales tienen un desempeño superior en cuanto a cada una de las fases.

De acuerdo con los resultados del error de ajuste y desempeño para el procedimiento 1, para los errores se puede concluir:

Por un lado, analizando la desviación de los resultados en fase r, el  $E[\%]$  del error de desempeño es 9,588 veces mayor al error de ajuste.

Realizando el mismo análisis para el procedimiento 2, el  $E[\%]$  del error de desempeño es 2,383 veces mayor al error de ajuste.

## 6. Conclusiones

Este artículo utiliza el modelo de matrices armónicamente acopladas (MAAA), en la aplicación de los métodos propuestos [1]. La implementación de este modelo se hizo con señales que consideran los límites de distorsión establecidos en las normas; para el fundamental el estándar ANSI C84.1-2012 (Standards, 2012) y para las componentes armónicas la norma europea UNE-EN50160-2015 (UNE-EN50160, 2015) para las componentes armónicas.

Todo esto se ejecuta usando modelos en el dominio de la frecuencia comparando los resultados con el modelo en el dominio del tiempo, con el fin de realizar una evaluación de los errores de ajuste y desempeño al estimar la señal de corriente.

Se observa que el error de ajuste es bajo, esto indica que el modelo es un buen ajuste para los datos de entrada y puede ser utilizado para predecir el comportamiento del motor-variador, de igual manera se considera que un error de desempeño entre el 8% y 10% es bajo, esto indica que el modelo es un buen predictor para el comportamiento del motor.

Del análisis de los box-plots y los datos estadísticos, se puede apreciar que los resultados que proporcionan el mejor indicador de desempeño es el procedimiento 2, ya que presenta una relación entre 15% a 25% veces menor en comparación al procedimiento 1.

## 7. Referencias

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

[2] M. Fauri, “Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, pp. 1632–1638, Nov1997.

[3]. Bello, J., Malagon, G., Ordóñez, G., & Duarte, C. (2017). Performance of Norton model in estimating the

current of a Compact Fluorescent Lamp using different number of measurements.

[4]. Caicedo, J. E., Romero, A. A., Zini, H. C., Langella, R., & Meyer, J. W. (2018). Impact of reference conditions on the frequency coupling matrix of a plug-in electric vehicle charger. Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 1-6. doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378898.

[5]. Sun, Y., Dai, C., Li, J., & Yong, J. (2016). Frequency-domain harmonic matrix model for three-phase diode-bridge rectifier. *IET Generation, Transmission and Distribution* 10 (7), 1605–1614. doi:10.1049/iet-gtd.2015.0871

[6]. Müller, S., Meyer, J., Schegner, P., & Djokic, S. (2015). Harmonic modeling of electric vehicle chargers in frequency domain. *Renewable Energy and Power Quality Journal* 1 (13), 396–401. doi:10.24084/repqj13.337

[7] G. Malagon-Carvajal, J., G. Ordóñez-Plata, and C. Duarte, “A Method to compute Frequency Domain Models based on Direction-Dependent Derivative of the Variation of Voltage and Current Phasors,” *ieee transactions on power delivery*), Mar 2023.