

Implementación de un modelo en el dominio de la frecuencia, para un variador de velocidad conectado a un motor a partir de un método de ajuste basado en medidas de corriente y tensión.

Elkin Julián Mateus Quintero y William Danilo Cala Balaguera

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

César Antonio Duarte Gualdrón

PhD. Electrical and Computer Engineering

Codirector

Gabriel Alexis Malagón Carvajal

Doctor en Ingeniería Área Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico este proyecto de grado a Dios por darme sabiduría y paciencia en los momentos más complejos de mi vida.

A mis padres, Misael Mateus Barragán y Trinidad Quintero Sierra, que con su amor, comprensión y esfuerzo incondicional siempre están presentes apoyándome en cada proceso de mi vida. Gracias a ellos hoy en día soy un ser humano lleno de principios y valores que me ayudarán a crecer en el futuro como persona y profesional.

A mi esposa Alba y mi hija Victoria, por estar siempre presente con su voz de aliento y esperanza. Gracias por llenar de amor y alegría cada momento en esta etapa de mi formación profesional.

Por último, expresar mi agradecimiento al Dr. Gabriel Malagón durante la realización de este trabajo de grado por su colaboración y enseñanza.

Elkin Julián Mateus Quintero

Este trabajo de grado está dedicado en primer lugar a Dios por darme la capacidad para afrontar cada decisión con sabiduría y fortaleza.

A mis padres, Luis Alberto Cala e Ignacia Balaguera que siempre estuvieron de pie apoyándome con todo el amor en cada adversidad que se presentó.

A esas personas especiales que estuvieron conmigo en los momentos más difíciles durante mi formación siempre con el apoyo incondicional.

Por último, está dedicado a cada uno de los profesionales que han orientado mi formación.

William Danilo Cala Balaguera

Contenido

	Pág.
Descripción general de la tesis.....	10
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Modelo en el dominio del tiempo y de la frecuencia para la carga variador-motor	14
2.1 Modelado en el dominio de la frecuencia	14
2.2 Modelado en el dominio del tiempo	14
2.3 Estándares para la forma de onda de la tensión de alimentación.....	20
3. Caracterización y modelado de la carga variador-motor	21
3.1 Procedimiento 1 (Fuente de tensión controlada)	21
3.2 Procedimiento 2 (Sin control sobre la fuente de tensión de alimentación).....	25
3.3 Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (MAAA)	26
3.4 Evaluación de error de ajuste y desempeño	28
4. Metodología	30
4.1 Adquisición de resultados (Procedimiento 1).....	30
4.2 Adquisición de resultados (Procedimiento 2).....	32
4.3 Reconstrucción de Matrices Armónicamente Acopladas (MMAA).....	33
4.4 Cálculos de errores cuadráticos	33
5. Resultados.....	34
5.1 Análisis de ajuste y desempeño	42

6. Conclusiones 45

Referencias Bibliográficas 47

Apéndices..... 49

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros del circuito	17
Tabla 2. Límites de distorsión superior individual, UNE-EN50160 del 2015.....	18
Tabla 3. Organización matricial para las señales de tensión.	20
Tabla 4. Organización matricial para las señales de corriente.....	20
Tabla 5. Escenarios de análisis para el barrido de frecuencia.....	20
Tabla 6. Organización matricial para las señales de tensión	20
Tabla 7. Organización matricial para las señales de corriente.....	27
Tabla 8. Errores de ajuste en el modelo de matrices armónicamente acopladas para conjunto variador-motor de la Fase r.	30
Tabla 9. Errores de ajuste en el modelo de matrices armónicamente acopladas para conjunto variador-motor de la Fase s.....	31
Tabla 10. Errores de ajuste en el modelo de matrices armónicamente acopladas para conjunto variador-motor de la Fase t.	31
Tabla 11. Errores de desempeño en el modelo de matrices armónicamente acopladas para conjunto variador-motor de la Fase r.	33
Tabla 12. Errores de desempeño en el modelo de matrices armónicamente acopladas para conjunto variador-motor de la Fase s.....	33
Tabla 13. Errores de desempeño en el modelo de matrices armónicamente acopladas para conjunto variador-motor de la Fase t.	34

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema motor-variador propuesto blog de Risoul.	16
Figura 2. Representación gráfica conjunto motor-variador. Simulink	16
Figura 3. Box-Plot para error de ajuste fase r, s y t en el método de matrices armónicamente acopladas para una carga conjunto variador-motor.	35
Figura 3. Box-Plot para error de ajuste fase r, s y t en el método de matrices armónicamente acopladas para una carga conjunto variador-motor.	37

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A: Barrido a través de cada uno de los códigos utilizados en este trabajo de investigación	39

Resumen

Título: Implementación de un modelo en el dominio de la frecuencia, para un variador de velocidad conectado a un motor a partir de un método de ajuste basado en medidas de corriente y tensión*.

Autores: Elkin Julián Mateus Quintero y William Danilo Cala Balaguera**

Palabras Clave: Modelado, optimización, cargas no lineales, error de ajuste, error de desempeño, algebra matricial, distorsión.

Descripción:

Con el presente trabajo de grado se busca evaluar el desempeño de un método de ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia. Estos se presentan como una opción para la estimación de la distorsión de corriente ocasionada por un grupo de cargas no lineales frente a los complejos modelos en el dominio del tiempo.

De esta forma puede ser posible implementar escenarios de evaluación de la distorsión en CCMs (Centros de Control de Motores) con un costo computacional más bajo que una simulación en el dominio del tiempo.

Para ello se utiliza un modelo en matriz de admitancias armónicamente acopladas utilizando un método basado en el algebra matricial publicado en el artículo: (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu) "Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances."

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica 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: Implementation of a model in the frequency domain, for a variable speed drive connected to a motor from an adjustment method based on current and voltage measurements*.

Authors: Elkin Julián Mateus Quintero y William Danilo Cala Balaguera**

Key Words: Modeling, optimization, nonlinear loads, fit error, performance error, matrix algebra, distortion.

Description:

With the present work of degree, we seek to evaluate the performance of a model adjustment method in the frequency domain. These are presented as an option for the estimation of the current distortion caused by a group of non-linear loads in front of the 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.

For this, a harmonically coupled admittance matrix model is used using a method based on matrix algebra published in the article: (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu) "Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances."

* Degree work

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

Descripción general del trabajo de grado

Este trabajo de grado es organizado de la siguiente forma:

El Capítulo 1 relaciona los conceptos de los procedimientos utilizados, donde se presenta una revisión de la literatura sobre el modelo de matrices armónicamente acopladas, así mismo se incluye los conceptos relacionados sobre cargas no lineales.

En el Capítulo 2 se establece una descripción del modelo en el dominio de la frecuencia ([Sección 2.1](#)) y se presenta un modelo circuital equivalente en el dominio del tiempo ([Sección 2.2](#)) para un conjunto variador- motor y definiendo los parámetros que componen el modelo circuital.

El Capítulo 3 se enfoca en el desarrollo de dos procedimientos; uno con tensión controlada y el otro en donde no se tiene control de la tensión de alimentación, así mismo el cumplimiento del primer objetivo, basado en el modelo de matrices armónicamente acopladas en el escenario en donde se realizan mediciones en un laboratorio bajo condiciones controladas ([Sección 3.1](#)) y el escenario que simula en una barra donde la carga está conectada durante un intervalo de tiempo y se toman medidas de corriente y tensión de acuerdo con las variaciones que se den por cuenta del sistema ([Sección 3.2](#)), además se presentan ecuaciones que permiten realizar la evaluación de error de ajuste y desempeño.

En el Capítulo 4 se realiza la adquisición de medidas de corriente y tensión para el conjunto variador-motor mediante la simulación de un modelo en el dominio del tiempo, donde se evalúa el desempeño y ajuste de los métodos en el dominio de la frecuencia.

En el Capítulo 5, se presentan los resultados del trabajo de grado.

En el Capítulo 6, se presentan las conclusiones generales del trabajo de grado y análisis de los resultados obtenidos.

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 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 y puede resultar más complejo evaluar múltiples cargas agregadas en un punto de acople común PCC.

En este trabajo de grado se desarrolla una evaluación de desempeño de un conjunto variador-motor; mediante un método basado en algebra matricial, que permite ajustar la matriz de admitancias del modelo equivalente de matriz de admitancias armónicamente acopladas, este método es propuesto por (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010).

Mediante dos procedimientos de estudio, el modelo de tensión controlada ([Sección 3.1](#)) y uno sin tensión controlada utilizando una barra (punto de referencia) a lo largo de un intervalo de tiempo ([Sección 3.2](#)), así, se realiza la caracterización de la carga conjunto variador-motor obteniendo señales de tensión y corriente que luego son utilizadas para el ajuste de los modelos. Esta caracterización se realiza utilizando un modelo detallado de simulación en el dominio del tiempo que incluye una fuente de tensión, un convertidor de potencia, máquina eléctrica y sistema de control.

El diseño y la simulación requieren de MATLAB/ Simulink, que proporciona una biblioteca de bloques.

Por otra parte, para el modelado en el dominio de la frecuencia se utiliza un modelo de matrices de admitancias armónicamente acopladas (modelo en el dominio de la frecuencia), que permite estimar la corriente armónica, para las variaciones en tensión de la fuente de alimentación.

El barrido en frecuencia y/o proceso donde se varia sistemáticamente esta tensión de la fuente de alimentación, se realiza para cada procedimiento, el primer procedimiento mediante simulaciones a través de MATLAB/Simulink. Automatizando una fuente trifásica de forma contralada en la biblioteca de bloques que permita variar sistemáticamente la magnitud (distorsión y regulación) y ángulo de fase de la tensión alrededor de un punto de operación del conjunto variador-motor en un CCMs (Centros de Control de Motores), generalmente, sobre la tensión fundamental de manera que se almacene tanto la tensión como la respuesta de corriente para cada variación.

En el primer procedimiento se realiza la caracterización armónica para el conjunto variador-motor sobre cada orden armónico, iniciando con la componente fundamental, para luego ir añadiendo cada nuevo orden armónico de forma individual; sobrepuesto a la componente fundamental.

En el segundo procedimiento no se tiene control de la tensión de alimentación, para esto, se generan señales de corriente para tensiones de operación típicas, en una red de baja tensión asumiendo que las tensiones nos sobrepasen los límites de regulación de la ANSI C84.1-2012 (Standards, 2012) y total propuestos en la UNE-EN50160-2015 (UNE-EN50160, 2015).

1. Objetivos

Los objetivos planteados en este trabajo de grado se concretaron con una simulación en la herramienta Matlab; esto debido a la crisis de salud presentada en el año 2020.

1.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un procedimiento que permita estimar el error de desempeño de un método de ajuste para un modelo en el dominio de la frecuencia tomando como punto de partida simulaciones de un modelo en el dominio del tiempo o mediciones en laboratorio.

1.2 Objetivos específicos

Diseñar dos procedimientos para el desarrollo de los experimentos y posterior ajuste de los modelos, uno de ellos se basa en una fuente de tensión controlada y el otro utilizando tensiones típicas a lo largo de un intervalo de tiempo.

Realizar las medidas de laboratorio o simulaciones para la obtención de las medidas de corriente y tensión como la información de entrada para el ajuste de un modelo en matriz de admitancias armónicamente acopladas del conjunto motor-variador.

Estimar los errores de ajuste con las señales utilizadas para el ajuste y de desempeño con señales diferentes a las utilizadas en el ajuste del modelo, frente a los resultados obtenidos en simulaciones obtenidas de un modelo en el tiempo o medidas de laboratorio

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

Este capítulo describe el modelo en el dominio de la frecuencia de los dos procedimientos ([Sección 2.1](#)) y se presenta un modelo circuital equivalente en el dominio del tiempo ([Sección 2.2](#)) para un conjunto variador- motor, para el barrido en frecuencia y fijando límites de los estándares propuestos por los operadores de red, para la regulación de tensión del fundamental y para los órdenes armónicos ([Sección 2.3](#)).

2.1 Modelo en el dominio de la frecuencia

La implementación de los dos procedimientos ([Capítulo 3](#)), el primero; con tensión controlada que simula el escenario en donde se realizan mediciones en un laboratorio bajo condiciones controladas y el segundo en donde no se tiene control de la tensión de alimentación, el cual simula el escenario en una barra donde la carga está conectada durante un intervalo de tiempo y se toman medidas de corriente y tensión de acuerdo con las variaciones que se den por cuenta del sistema.

Luego se estima el error de ajuste y posterior error de desempeño del modelo en el dominio de la frecuencia, comparando los resultados obtenidos con los modelos en el dominio de la frecuencia con los resultados obtenidos de las simulaciones de un modelo en el tiempo ([Sección 2.2](#)).

Así, sustituyendo los cálculos en el dominio del tiempo por operaciones en el dominio de la frecuencia fácilmente implementables en un algoritmo y con menos costo computacional que una compleja simulación en el dominio del tiempo.

En 2010 (Nassif, Yong, & Xu, 2010) propone una metodología para un modelado de cargas no lineales en el dominio de la frecuencia basada en mediciones, la cual consiste en ajustar el modelo de Norton a una matriz de admitancia.

(Müller, Meyer, Schegner, & Djokic, 2015), presenta un trabajo de investigación basado en un ajuste para el modelado de cargadores de vehículos eléctricos, propone generar índices de sensibilidad, linealidad y simetría que permitan caracterizar los elementos de una matriz de admitancias acopladas.

En (Bello, Malagon, Ordóñez, & Duarte, 2017) proponen una metodología para el modelado de luminarias tipo CFL basada en simulación en el dominio del tiempo empleando la plataforma MATLAB/Simulink; a través de una fuente de tensión programable y una SMPS (Switch Mode Power Source) en Simulink, se realiza múltiples simulaciones que son llevadas a cabo siguiendo una metodología específica para luego construir un modelo en el dominio de la frecuencia usando gráficos polares tipo “Fingerprint” de los cuales se construye la matriz de admitancias.

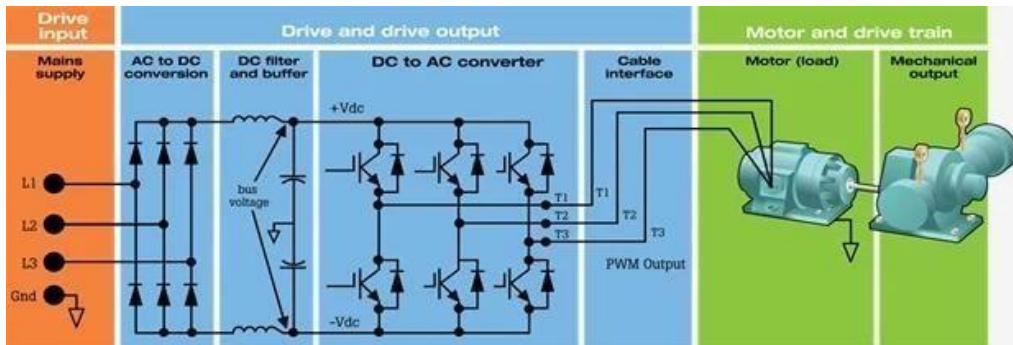
En este trabajo de grado se realizan simulaciones para el experimento 1 con tensión controlada y una fuente de tensión programable con un equipo de medida donde no se presenta interacción de otras cargas para el experimento 2 sin tensión controlada donde se toman medidas de corriente y tensión de acuerdo con las variaciones que se den por cuenta del sistema (variaciones en la demanda por entrada y salida de equipos).

2.2 Modelo en el dominio del tiempo

En la Figura 1 se representa el diagrama de bloques para el conjunto motor - variador propuesto en el blog de Risoul, el cual en este trabajo de grado es implementado en Matlab/simulink.

Figura 1.

Esquema motor-variador propuesto blog de Risoul.

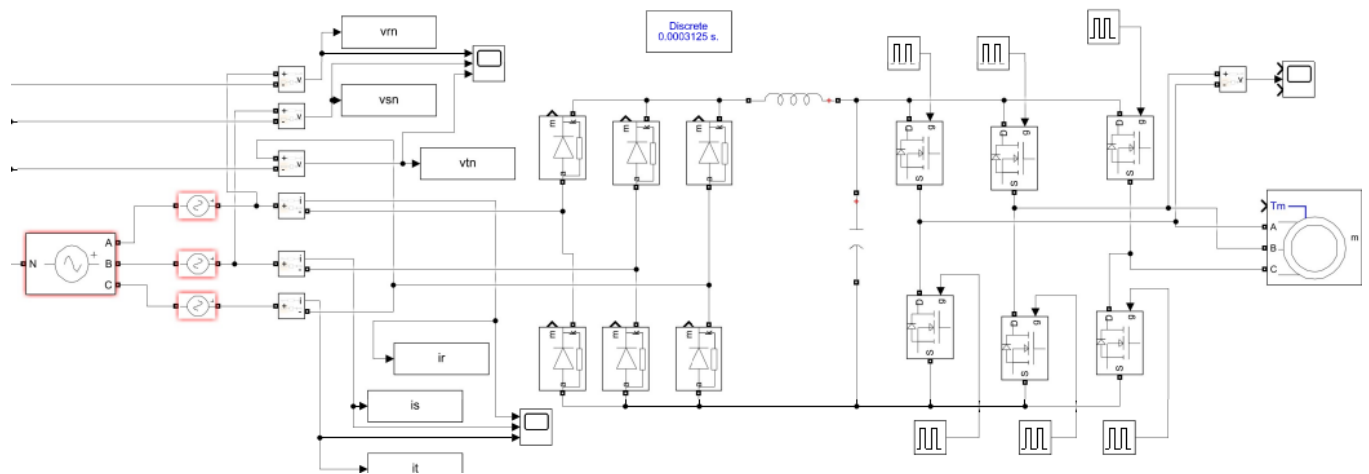


El modelo circuital equivalente de conjunto variador-motor se lleva a cabo mediante software Matlab/SIMULINK, en donde se dispone de los elementos necesarios para abordar el modelo.

El circuito presentado en la Figura 2 es la representación gráfica realizada en el software de simulación Simulink.

Figura 2.

Representación gráfica conjunto motor-variador. Simulink



Para determinar la (Tabla 1) los parámetros del esquema motor- variador se verifica el esquema propuesto (Sun, Dai, Li, & Yong, 2016) donde se empleó una fuente de alimentación programable para generar el suministro de tensión.

Tabla 1.

Parámetros del circuito

Fuente de tensión programable	Capacitancia	Inductancia
220 (V rms)	2100 [μ F]	0.5 mH

2.3 Limites normativos de regulación y distorsión de tensión

Luego de implementar el modelo en el software Simulink conjunto motor-variador y mediante mediciones o simulaciones de un modelo en el dominio del tiempo de la carga con tensión controlada, se realiza mediciones (bajo condiciones controladas) donde se adquieren señales en el dominio del tiempo de las tensiones de fase y las corrientes de línea; se realiza la caracterización de la carga y se obtiene las componentes armónicas de las señales de tensión de alimentación y corriente de la carga.

A esta caracterización se le denomina barrido en frecuencia consiste en definir diferentes puntos de operación para la tensión de alimentación, donde se debe realizar variaciones en la magnitud y ángulo de fase de los armónicos, a medida que se desee generar medidas se debe agregar un nuevo orden armónico de forma individual (3,5,7...15 armónico) pero siempre tomando como referencia la tensión fundamental, la cual esta fija en el experimento.

Se define el punto inicial de partida para la adquisición de cada una de las muestras, se establece igualmente un límite final; este punto se fija tomando como límites los estándares

propuestos por los operadores de red, para la regulación de tensión del fundamental el estándar ANSI C84.1-2012 (Standards, 2012) y para los órdenes armónicos la norma europea UNE-EN50160-2015 (UNE-EN50160, 2015).

En el caso del estándar ANSI C84.1-2012 (Standards, 2012) se establece las variaciones permitidas de tensión nominal y las respectivas tolerancias de operación de energía eléctrica en estado estacionario estableciendo límites de tensión de servicio y utilización, tomando como un máximo de $\pm 5\%$ de regulación de tensión.

La norma europea UNE-EN50160-2015 (UNE-EN50160, 2015) establece unos límites de distorsión individual para el caso de cada armónico como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.

Límites de distorsión superior individual, UNE-EN50160 del 2015

Ords	5	7,11	13,17	19,23	25	>25
Uh [%]	3	2.5	2	1.5	1.0	0.5
Ords	3	9	15,21	>21	-----	-----
Uh[%]	3	1.5	0.5	0.3	-----	-----

3. Caracterización y modelado de la carga variador-motor

Este capítulo se ha organizado en cuatro secciones. La ([Sección 3.1](#)) describe la forma en que se realizan las mediciones en un laboratorio bajo condiciones controladas; la ([Sección 3.2](#)) muestra el escenario donde se simula una barra con la carga conectada durante un intervalo de tiempo, se toman medidas de corriente y tensión de acuerdo con las variaciones que se den por cuenta del sistema además en la ([Sección 3.3](#)) se muestra el modelo implementado para la caracterización de la carga. Por último en la sección ([Sección 3.4](#)) se presentan ecuaciones que permiten realizar la evaluación de error de ajuste y desempeño.

3.1 Procedimiento 1 (fuente de alimentación controlada)

Para el manejo de la información y buscando una estrategia útil para el uso de estos datos se utiliza la organización matricial propuestas para las señales de tensión y corriente en el dominio de la frecuencia obtenidas del barrido en frecuencia; esta propuesta de organización de datos en la frecuencia es similar a la realizada por (Malagón Carvajal, 2019) (Bello, Malagón, Ordóñez, & Duarte, 2017)

Inicialmente se establece una variación solo con la componente fundamental sin distorsión con un límite normativo donde la variación no debe exceder el 5% de la fundamental sin distorsión e iniciando en 0.1%; para esto y según lo que propone (Malagón-Carvajal et al 2020) se realiza 20 variaciones en magnitud y 72 variaciones de ángulo de fase en la zona de operación.

Para el ajuste del modelo en el dominio de la frecuencia se utiliza el método propuesto por (Nassif, Yong, & Xu, 2010) y (Malagón Carvajal, 2019) se propone crear una matriz de dimensiones $(h) \times (p \times o)$; donde las filas son los órdenes armónicos impares tomando desde el orden armónico 3 hasta el orden armónico h ; y el número de columnas son las señales generadas por la variación de ángulo de fase, magnitud y orden armónico. Donde las variaciones en magnitud son $k=1,2, 3 \dots p$, las variaciones en el ángulo de fase $j=1,2, 3 \dots o$ y las variaciones de orden armónico $v=1,2,3 \dots h$.

Para cuantificar las señales se propone un indicador de columna s que indica el número de la señal $s=1,2,3 \dots s$. En la organización matricial para las señales de tensión (Tabla 3) se observa la contribución de cada una de las variaciones de magnitud, ángulo de fase y su respectivo orden armónico. La organización matricial de las señales de tensión queda representada como se muestra en la Tabla 3 donde cada elemento se representa por la forma V_{hs}^{kj}

Tabla 3.

Organización matricial para las señales de tensión.

$$V = \begin{bmatrix} V_{1_1}^{1_1} & V_{1_2}^{1_2} & \dots & V_{1_{72}}^{1_j} & \dots & V_{1_{73}}^{2_1} & \dots & V_{1_{10000}}^{k_2} & \dots & V_{1_s}^{k_j} \\ V_{3_1}^{1_1} & V_{3_2}^{1_2} & \dots & V_{3_{72}}^{1_j} & \dots & V_{3_{73}}^{2_1} & \dots & V_{3_{10000}}^{k_2} & \dots & V_{3_s}^{k_j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ V_{25_1}^{1_1} & V_{25_2}^{1_2} & \dots & V_{25_{72}}^{1_j} & \dots & V_{25_{73}}^{2_1} & \dots & V_{25_{10000}}^{k_2} & \dots & V_{25_s}^{k_j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ V_{h_1}^{1_1} & V_{h_2}^{1_2} & \dots & V_{h_{72}}^{1_j} & \dots & V_{h_{73}}^{2_1} & \dots & V_{h_{10000}}^{k_2} & \dots & V_{h_s}^{k_j} \end{bmatrix}$$

Nota. Tomado de: (Malagón Carvajal, 2019)

Para la construcción de organización matricial para las señales de corriente (Tabla 4) se construye de la misma forma que la organización matricial para las señales de tensión, donde cada nueva señal de la corriente es generada por cada una de las variaciones de la magnitud, ángulo de fase y orden armónico según (Malagón Carvajal, 2019).

A diferencia de la matriz de tensiones, en la matriz de corrientes cada nueva señal s es conformada por la señal de tensión de alimentación distorsionada. Cada elemento se representa de la forma I_{hs}^{kj} donde cada variación se realiza de igual manera a la matriz.

Tabla 4.

Organización matricial para las señales de corriente

$$I = \begin{bmatrix} I_{1_1}^{1_1} & I_{1_2}^{1_2} & \dots & I_{1_{72}}^{1_j} & \dots & I_{1_{73}}^{2_1} & \dots & I_{1_{10000}}^{k_2} & \dots & I_{1_s}^{k_j} \\ I_{3_1}^{1_1} & I_{3_2}^{1_2} & \dots & I_{3_{72}}^{1_j} & \dots & I_{3_{73}}^{2_1} & \dots & I_{3_{10000}}^{k_2} & \dots & I_{3_s}^{k_j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_{25_1}^{1_1} & I_{25_2}^{1_2} & \dots & I_{25_{72}}^{1_j} & \dots & I_{25_{73}}^{2_1} & \dots & I_{25_{10000}}^{k_2} & \dots & I_{25_s}^{k_j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_{h_1}^{1_1} & I_{h_2}^{1_2} & \dots & I_{h_{72}}^{1_j} & \dots & I_{h_{73}}^{2_1} & \dots & I_{h_{10000}}^{k_2} & \dots & I_{h_s}^{k_j} \end{bmatrix}$$

Nota. Tomado de: (Malagón Carvajal, 2019)

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

Se simula el escenario en una barra donde la carga está conectada durante un intervalo de tiempo y se toman medidas de corriente y tensión de acuerdo con las variaciones que se den por cuenta del sistema.

(Malagón Carvajal, 2019) propone crear una matriz de forma aleatoria que cuente con 10000 señales de tensión que cumplan los límites de distorsión individual y total, como de regulación de tensión a partir de un estándar internacional (Standards, 2012) y (UNE-EN50160, 2015). Así mismo cada nueva señal de tensión originada, es una combinación de fundamental y todos los órdenes armónicos (v), se representa por

- $v=1, 3, 5, 7, \dots, 31$ orden armónico

De esta forma construye la matriz de tensiones V . La construcción de la matriz de corriente I se realiza de una forma similar a la matriz de tensiones V , donde cada señal de corriente es generada por la respuesta a cada señal de la matriz de tensiones, según (Malagón Carvajal, 2019) cada señal es ubicada como un vector columna dentro de la matriz.

3.3 Método para el ajuste del modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (MAAA)

El método se basa en lo propuesto en (Nassif, Yong, & Xu, 2010) donde los autores proponen un método para el ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia ecuación (4) y así definir la corriente I_{ac} .

$$I_{ac} = IC + Y^+Vac + Y^-Vac \quad (4)$$

Se define I_{ac} a la corriente de la carga no lineal, Y_+ y Y_- son matrices de admitancias acopladas, las cuales relacionan la tensión con la corriente obtenidas en las simulaciones, V_a y V_a^* son tensión por orden armónico y su tensión conjugada respectivamente (Nassif, Yong, & Xu, 2010).

Tomando lo anterior el autor (Nassif, Yong, & Xu, 2010) presento el método NYX (full model). En el cual se puede observar en la ecuación (5) para el ajuste de matrices de admitancias y corriente de corte:

$$[\tilde{I}_c \ Y^+ \ Y^-] = (I_{NYX} [1 \ V_{NYX}^T \ V_{NYX}^H]) \left(\begin{bmatrix} 1^T \\ V_{NYX} \\ V_{NYX}^* \end{bmatrix} [1 \ V_{NYX}^T \ V_{NYX}^H] \right)^{-1} \quad (5)$$

A través del software MATLAB/Simulink se ajusta el modelo en el dominio de la frecuencia (cálculo de matrices de admitancia y corriente de corte) y posteriormente se implementa el modelo para la evaluación de error de ajuste y desempeño presentado a continuación.

3.4 Evaluación de error de ajuste y desempeño

Luego de la adquisición de las señales aleatorias y de establecer 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, 2019) el cual se basa en vincular la fase y la magnitud en el dominio del tiempo (9) y la señal obtenida en la reconstrucción en el dominio de la frecuencia (10). Se observa a continuación MSE de la señal estimada en el dominio del tiempo:

$$I_\mu = \frac{I_{original}^2}{2} \quad (6)$$

El MSE de la señal estimada en el dominio de la frecuencia:

$$I_{\mu} = \frac{I_{reconstruccion}^2}{2} \quad (7)$$

Con el propósito de cumplir los objetivos propuestos, se procede a la evaluación del error de desempeño, para esto se diseñó un archivo .m que genera 10000 señales de forma aleatoria que contiene cada uno de los armónicos (15 armónicos), las cuales deben cumplir los límites de distorsión individual dados por (Standards, 2012) y (D. Committee of the IEEE Power and E. Society, 2014). Para la evaluación de este método este trabajo de grado se basa en el estudio realizado por (Malagón Carvajal, 2019) para el cálculo de los errores (total, magnitud, ángulo) y que se puede observar en las siguientes ecuaciones (11) (12) (13).

Error total (MSE Total):

$$E[\%] = \frac{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu} - I_{F\mu}|^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \times 100\% \quad (8)$$

Errores por órdenes armónicos:

$$E_{\mu}[\%] = \frac{|I_{\mu} - I_{F\mu}|^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \times 100\% \quad (9)$$

Error total de magnitud (MSE Total de magnitud):

$$E_{\mu}^{mag}[\%] = \sum_{\mu=1}^h \left(\frac{[|I_{\mu}| - |I_{F\mu}|]^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \right) \times 100\% \quad (10)$$

Error Total de fase(MSE Total de fase) :

$$E_{\mu}^{\Delta\theta} [\%] = E_{\mu} [\%] - E_{\mu}^{mag} [\%] \quad (11)$$

Los resultados se expresan de una forma gráfica, la cual permite la comparación y comprensión de los errores de ajuste y desempeño. Para esto se construyen unos diagramas de cajas (Box-Plot) que permiten visualizar los datos en rangos más concluyentes y se establecen de la siguiente forma:

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

4. Metodología

En el Capítulo 4 se realiza la adquisición de medidas de corriente y tensión para el conjunto variador-motor mediante la simulación de un modelo en el dominio del tiempo, donde se evalúa el desempeño y ajuste de los métodos en el dominio de la frecuencia, para cada uno de los procedimientos.

4.1 Adquisición de resultados (Procedimiento 1)

Para el proceso de la adquisición de datos se construye un modelo (variador_simulink.slx) en el tiempo con ayuda de software simulink y se establece una interconexión con el script(variador.m) que se realizó en Matlab todo esto en busca de realizar un enfoque determinista para el barrido en frecuencia, el cual consiste en la caracterización del conjunto variador-motor y encontrar una zona de operación ideal para la tensión de alimentación.

Se establecen unas cajas de medida que permitan la adquisición de las tensiones de fase (v_{rn} , v_{sn} y v_{tn}) y corriente de línea (i_r , i_s y i_t) en el modelo del tiempo, tomando como punto inicial el estándar ANSI C84.1-2012 (Standards, 2012) y la norma europea (D. Committee of the IEEE Power and E. Society, 2014) (Norma Española UNE-EN 50160, 2001) para los órdenes armónicos. Basados en estos límites se realizan las variaciones en la magnitud y el ángulo de fase, las cuales se llevan a cabo en el dominio del tiempo a través de una fuente trifásica AC programable.

Inicialmente se designa un punto de operación para la tensión fundamental y se define en el script como v_1 , y se considera sin ningún tipo de distorsión y con ángulo de fase $\text{angle}_1 = 0^\circ$, frecuencia $f_1 = 50$ Hz y amplitud el valor rms de la tensión fundamental.

La tensión fundamental es definida como referencia o punto de operación, a esta tensión se le superpone la primera variación de la componente armónica de tensión, después de esto se establece una serie de pasos para la magnitud y el ángulo de fase. Posteriormente se realizan variaciones de una componente armónico a la vez y este proceso se repite para cada orden armónico impar, desde el tercero hasta la 31ava componente armónica (3rd, 5th, ..., 31st) teniendo en cuenta el estándar ANSI C84.1-2012 (Standards, 2012) y la norma europea (Norma Española

UNE-EN 50160, 2001). Para cada procedimiento realizado, las señales de tensión de alimentación y corriente de respuesta son almacenadas.

Este proceso se realiza sistemáticamente aumentando de forma proporcional la magnitud de tensión según el número de variaciones implementadas. Al realizar la primera variación en magnitud esta se deja fija y se varía el ángulo 72 veces, desde 0° hasta 355°, al final se obtiene un vector inicial de muestras de señales y según el periodo de muestreo que se estableció cada señal tendrá sus respectivas muestras y para este modelo conjunto variador-motor se implementó en 64 muestras por cuestiones de tiempo computacional. En la Tabla 5 se muestran los escenarios utilizados para el barrido de frecuencia.

Tabla 5.

Escenarios de análisis para el barrido de frecuencia.

Escenario	Variaciones magnitud y fase
Escenario 1	<ul style="list-style-type: none"> • 20 variaciones de magnitud • 72 de ángulo de fase

Se obtiene un total de 23.040 señales en el software Simulink e interpretadas con el código establecido en Matlab, estas se producen de 20 variaciones en magnitud, 72 variaciones en ángulo, 16 armónicos impares.

De esta forma se obtiene matrices de 16x23040, con 15 armónicos impares para las señales de tensión y corriente con el experimento de un armónico a la vez, donde se puede observar la caracterización de conjunto variador-motor y así mismo puede ser posible garantizar que las medidas son linealmente independientes (Universidad de los Andes, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Colombia Section, IEEE Industry Applications Society, IEEE Industry Applications Society. Colombia Chapter, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017).

A continuación, en la Tabla 6 se puede observar la matriz concatenada de tensión, con sus respectivos subíndices de variaciones.

Tabla 6.

Organización matricial para las señales de tensión

$$V = \begin{bmatrix} V_{1_1}^{1_1} & V_{1_2}^{1_2} & \dots V_{1_72}^{1_72} & \dots V_{1_73}^{2_1} & \dots V_{1_10000}^{20_2} & \dots V_{1_23040}^{20_72} \\ V_{3_1}^{1_1} & V_{3_2}^{1_2} & \dots V_{3_72}^{1_72} & \dots V_{3_73}^{2_1} & \dots V_{3_10000}^{20_2} & \dots V_{3_23040}^{20_72} \\ \vdots & \vdots & \dots \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{25_1}^{1_1} & V_{25_2}^{1_2} & \dots V_{25_72}^{1_72} & \dots V_{25_73}^{2_1} & \dots V_{25_10000}^{20_2} & \dots V_{25_23040}^{20_72} \\ \vdots & \vdots & \dots \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{31_1}^{1_1} & V_{31_2}^{1_2} & \dots V_{31_72}^{1_72} & \dots V_{31_73}^{2_1} & \dots V_{31_10000}^{20_2} & \dots V_{31_23040}^{20_72} \end{bmatrix}$$

Nota. Tomado de: (Blanco Moreno, 2022)

De igual manera se obtiene la organización matricial de las señales de corriente como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7.

Organización matricial para las señales de corriente

$$I = \begin{bmatrix} I_{1_1}^{1_1} & I_{1_2}^{1_2} & \dots I_{1_72}^{1_72} & \dots I_{1_73}^{2_1} & \dots I_{1_10000}^{20_2} & \dots I_{1_23040}^{20_72} \\ I_{3_1}^{1_1} & I_{3_2}^{1_2} & \dots I_{3_72}^{1_72} & \dots I_{3_73}^{2_1} & \dots I_{3_10000}^{20_2} & \dots I_{3_23040}^{20_72} \\ \vdots & \vdots & \dots \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{25_1}^{1_1} & I_{25_2}^{1_2} & \dots I_{25_72}^{1_72} & \dots I_{25_73}^{2_1} & \dots I_{25_10000}^{20_2} & \dots I_{25_23040}^{20_72} \\ \vdots & \vdots & \dots \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{31_1}^{1_1} & I_{31_2}^{1_2} & \dots I_{31_72}^{1_72} & \dots I_{31_73}^{2_1} & \dots I_{31_10000}^{20_2} & \dots I_{31_23030}^{20_72} \end{bmatrix}$$

Nota. Tomado de: (Blanco Moreno, 2022)

4.2 Adquisición de resultados (Procedimiento 2)

La adquisición de datos para el procedimiento de tensiones no controladas se construye a través de un script (señales_típicas.m) que genera de forma automática y aleatoria 10000 señales que cumplan la norma europea (D. Committee of the IEEE Power and E. Society, 2014) (Norma Española UNE-EN 50160, 2001) para los órdenes de componentes armónicas establecidos. El resultado se almacena en un .mat (ALEATORIAS_NUEVO) las cuales con ayuda de software simulink se establece una interconexión con el script y se realiza una caracterización del conjunto variador-motor y obtener la respuesta en corriente.

4.3 Ajuste del modelo de Matrices Armónicamente Acopladas (MMAA)

Se tiene la corriente de corte, la matriz Y_+ y la matriz Y_- como incógnitas, con el método basado en el algebra de matrices y la modificación propuesta por (Malagón Carvajal, 2019).

Este método es presentado a través de las ecuaciones 14 y 15 en donde la matriz A está compuesta por una fila de 1, la matriz de respuesta en tensión y la transpuesta de esta y se puede representar de la siguiente manera:

$$A = \begin{bmatrix} 1_{1xm} \\ V_{nxm} \\ V_{nxm}^* \end{bmatrix}_{2n+1xm} \quad (12)$$

De igual manera se define la matriz D que es igual a la A transpuesta. Considerando esta información y complementado con la matriz concatenada de corriente correspondiente a la caracterización de la carga, se define los datos adicionales para el cálculo de la reconstrucción de la señal y se define la siguiente ecuación (15):

$$I_{nxm} * D = [I_{cnx1} \quad Y_{nxn}^+ \quad Y_{nxn}^-]_{nx2n+1} * A * D \quad (13)$$

4.4 Cálculos de errores cuadráticos

Luego de obtener las medidas realizando el barrido en frecuencia de la carga variador-motor se realiza la evaluación del error donde se seleccionaron 10000 señales (Malagón Carvajal, 2019), las cuales cumplen con los límites de distorsión individual dados por (Standards, 2012) y (D. Committee of the IEEE Power and E. Society, 2014), (Norma Española UNE-EN 50160, 2001).

A partir de estos dos conjuntos de mediciones se realiza la diferencia entre las señales.

El análisis de los diferentes escenarios propuestos en este trabajo se fundamentan a través de un grupo de indicadores de estudio con respecto a los errores, que definen el coeficiente de variación; el cual se representa en base a cada una de las corrientes de línea obtenidas del modelo variador- motor y al ser caracterizada por el método de matrices armónicamente acopladas se observa la tendencia definida en cada uno de los cuartiles, en los cuales se clasifican de menor a mayor cada uno de los errores tanto de ajuste como de desempeño y observá la dispersión de los datos con respecto al valor promedio.

Donde el Q1 y Q4 definen el valor mínimo y máximo de los datos respectivamente, Q2 la mediana de los errores y Q3 equivale al 75%; el rango inter-cuartil es la diferencia entre el tercer cuartil y el primero.

Con este orden de ideas y con en el software de simulación Matlab se establece un script que describe lo anteriormente mencionado en forma de esquema; para esto se utiliza diagramas de cajas “box plot” que representan gráficamente los datos numéricos de los cuartiles calculados.

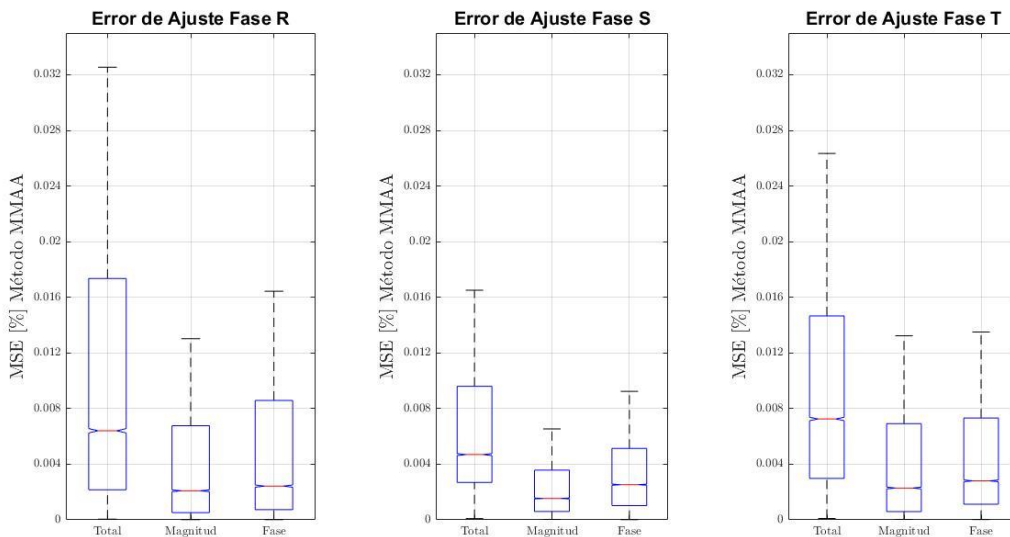
5. Resultados

En este capítulo se exponen los datos obtenidos de errores de desempeño y ajuste, calculados para la caracterización de la carga a través del método propuestos por (Nassif, Yong, & Xu, 2010) y (Caicedo, Romero, Zini, Langella, & Meyer, 2018) junto con las modificaciones propuestas por (Malagón Carvajal, 2019).

En la Figura 3, se presentan los datos estadísticos con los errores de ajuste para la caracterización de la carga por cada una de las fases del sistema, según datos numéricos y de forma gráfica por medio de “box plot”.

Figura 3.

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



Por otra parte, en las tablas 8 a 10 se presentan los datos estadísticos con los errores de ajuste para la caracterización de la carga por cada una de las fases del sistema

Tabla 8.

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

Modelo de matrices armónicamente acopladas	Errores	Errores de ajuste Fase r (%)					
		Mínimo	Q1 (Primer Cuartil)	Q2 (Mediana)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
	MSE Total	$0,05337 \times 10^{-3}$	$2,162 \times 10^{-3}$	$6,404 \times 10^{-3}$	0,017350	2,76471	0,015188
	MSE Total Magnitud	$0,01722 \times 10^{-3}$	$0,5207 \times 10^{-3}$	$2,090 \times 10^{-3}$	0,006772	0,79315	0,006251
	MSE Total Fase	$0,01723 \times 10^{-3}$	$0,7362 \times 10^{-3}$	$2,468 \times 10^{-3}$	0,008588	2,25263	0,0078519

Tabla 9.

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

Modelo de Matrices armónicamente acopladas	Errores	Errores de ajuste Fase s (%)					
		Mínimo	Q1(Primer Cuartil)	Q2 (Mediana)	Q3(Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
	MSE Total	$0,086 \times 10^{-3}$	$2,693 \times 10^{-3}$	$4,694 \times 10^{-3}$	0,009601	2,82802	0,006907
	MSE Total Magnitud	$0,029 \times 10^{-3}$	$0,602 \times 10^{-3}$	$1,538 \times 10^{-3}$	0,003571	0,73037	0,002968
	MSE Total Fase	$0,02 \times 10^{-3}$	$1,021 \times 10^{-3}$	$2,529 \times 10^{-3}$	0,005132	2,09764	0,004111

Tabla 10.

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

Modelo de Matrices armónica-mente acopladas	Errores de Ajuste Fase t (%)						
	Errores	Mínimo	Q1(Primer Cuartil)	Q2 (Mediana)	Q3 (Tercer Cuartil)	Máximo	IQR
MSE Total	$0,099 \times 10^{-3}$	$2,976 \times 10^{-3}$	$7,252 \times 10^{-3}$	$0,014661$	$3,22370$	$0,01168$	
MSE Total Magnitud	$0,032 \times 10^{-3}$	$0,594 \times 10^{-3}$	$2,289 \times 10^{-3}$	$0,006915$	$0,683762$	$0,006320$	
MSE Total Fase	$0,021 \times 10^{-3}$	$1,122 \times 10^{-3}$	$2,805 \times 10^{-3}$	$0,007319$	$2,53994$	$0,006196$	

A continuación, se presentan los datos estadísticos con los errores de desempeño para la caracterización de la carga por cada una de las fases del sistema, según datos numéricos en las tablas 11 a 13 y de forma gráfica en la Figura 6 por medio de “box plot”.

Figura 4.

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

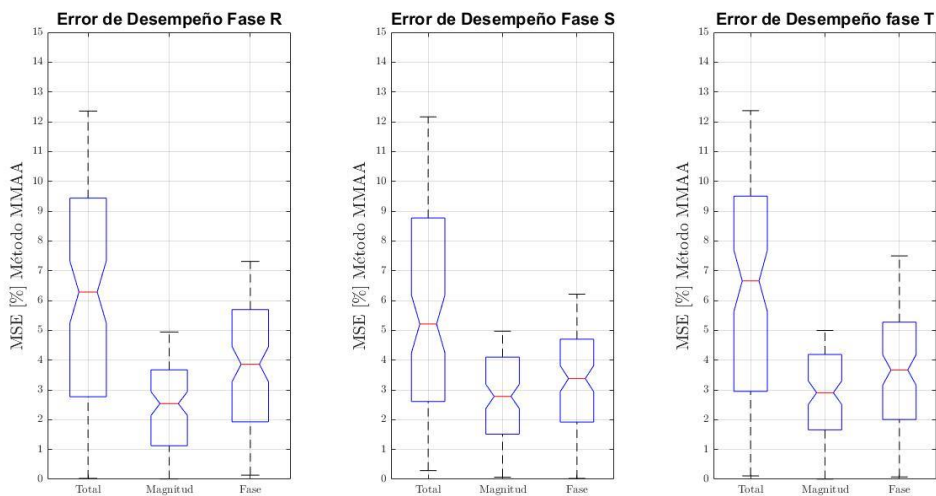


Tabla 11.

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

		<i>Errores de ajuste Fase r (%)</i>					
<i>Errores</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Q1(Primer Cuartil)</i>	<i>Q2 (Mediana)</i>	<i>Q3 (Tercer Cuartil)</i>	<i>Máximo</i>	<i>IQR</i>	
<i>Modelo de Matrices armónicamente acopladas</i>	<i>MSE Total</i>	0,0294	2,770	6,284	9,435	12,355	6,664
	<i>MSE Total Magnitud</i>	0,0108	1,125	2,540	3,673	4,942	2,547
	<i>MSE Total Fase</i>	0,136	51,928	3,861	5,695	7,312	93,766

Tabla 12.

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

		<i>Errores de ajuste Fase s (%)</i>					
<i>Errores</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Q1(Primer Cuartil)</i>	<i>Q2 (Mediana)</i>	<i>Q3 (Tercer Cuartil)</i>	<i>Máximo</i>	<i>IQR</i>	
<i>Modelo de Matrices armónicamente acopladas</i>	<i>MSE Total</i>	0,294	2,609	5,211	8,770	12,162	6,161
	<i>MSE Total Magnitud</i>	0,072	1,513	2,780	4,099	4,971	2,585
	<i>MSE Total Fase</i>	0,026	1,922	3,378	4,700	6,212	2,778

Tabla 13.

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

<i>Modelo de</i>	<i>Errores</i>	<i>Errores de ajuste Fase t (%)</i>					
		<i>Mínimo</i>	<i>Q1(Primer Cuartil)</i>	<i>Q2 (Mediana)</i>	<i>Q3 (Tercer Cuartil)</i>	<i>Máximo</i>	<i>IQR</i>
<i>Matrices armónicamente acopladas</i>	<i>MSE Total</i>	0,112	2,951	6,657	9,503	12,371	6,552
	<i>MSE Total Magnitud</i>	0,008	1,659	2,905	4,187	4,996	2,527
	<i>MSE Total Fase</i>	0,078	2,006	3,668	5,275	7,495	3,268

5.1 Análisis de ajuste y desempeño

Para cada uno de los casos se compara los resultados de la corriente de cada una de las fases, con respecto a la corriente de entrada medida cuando realizan variaciones de la distorsión y regulación de la tensión de alimentación por cada una de las fases del sistema y se implementa a través de software Matlab Simulink.

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 MSE o Error Total de las figuras se puede evidenciar que el error del método de MMAA es similar para cada una de las fases, ya que 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. 5 y del análisis del MSE^m [%] o Error Total de Magnitud, un error superior para fase r y t. Para el caso del $MSE^{\Delta\theta}$ [%] o MSE mismatch Total debido al error de Fase, también se evidencia un error de ajuste superior para la fase r y t. Por ejemplo, el MSE_Total 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 %. En comparación con la fase r es 1,807 veces menor el valor y con la fase t es 1,527 veces menor el valor de la MSE_Final.

- Frente al análisis de los resultados del MSE o Error Total de las figuras se puede evidenciar que el error del método de MMAA es similar para cada una de las fases, ya que difieren la fase r y s en un 0,665% y las fases t y s en un 0,733%. Para los errores de ajuste en la Fig. 5 y del análisis del $MSE^m[\%]$ o Error Total de Magnitud, un error superior para fase r y t. Para el caso del $MSE^{\Delta\theta}[\%]$ o MSE mismatch Total debido al error de Fase, también se evidencia un error de ajuste superior para la fase r y t. Por ejemplo, el MSE_Total evidencia unas variaciones en el Q3(Tercer cuartil) de cada una de las fases; para la fase r siendo de 9,435%, para la fase s de 8,770% y la fase t de 9,503%. En comparación con la fase r es 1,075 veces menor el valor y con la fase t es 1,083 veces menor el valor de la MSE_Total.

- El primer caso, el cual se implementó a la fase r, se observan los errores en las tablas 8 y 11, donde en Q3(Tercer cuartil) presenta una tasa de incremento en 543,804 veces el valor de (MSE_Total%) del error de ajuste en comparación con el error de desempeño, así mismo para el rango Inter cuartil en los errores de (MSE_Total%) la medida de dispersión de los datos entre el desempeño y el ajuste es 438,767 veces mayor el error de desempeño.

6. Conclusiones

Este trabajo de grado usó el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA), en la aplicación de los métodos propuestos en (A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010) y (Malagón Carvajal, 2020). 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 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 para 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 observó 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 con confianza para predecir el comportamiento del motor-variador, de igual manera se considera que un valor entre el 8% y 10% del error de desempeño; es bajo, esto indica que el modelo es un buen predictor para el comportamiento del motor.

Se considera una serie de hipótesis para la diferencia presentada por el error de ajuste y desempeño de la fase s con respecto a la fase r y t, una de éstas es por los parámetros del variador (capacitancia e inductancia), ya que estos parámetros pueden influir directamente en el comportamiento del modelo.

Sin embargo, la hipótesis que el software MATLAB tenga una aproximación es otra opción a analizar ya que las diferencias de los errores de la fase s resultan ser mínimas. Con respecto a la fase r el MSE Total es de 0,008% y la fase t el MSE Total 0,005%; Entre otras posibles situaciones que puedan afectar el comportamiento de la simulación.

Referencias Bibliográficas

- 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.*
- Blanco Moreno, I. J. (2022). *Modelado de una luminaria tipo LED mediante un método basado en álgebra matricia).*
- 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
- D. Committee of the IEEE Power and E. Society. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems Sponsored by the Transmission and Distribution Committee IEEE Power and Energy Society.* New York.
- Malagón Carvajal, G. A. (2019). *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. [Tesis de Doctorado, Universidad Industrial de Santander, Director: Ordóñez, G., & Duarte, C.].*
- 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
- 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

Norma Española UNE-EN 50160. (2001). *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. Madrid.

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

Universidad de los Andes, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Colombia Section, IEEE Industry Applications Society, IEEE Industry Applications Society. Colombia Chapter, and Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2017). *IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA) : proceedings* . Bogotá.

Apéndices

Apéndice A: Barrido a través de cada uno de los códigos utilizados en este trabajo de grado

A continuación, se realiza un barrido a través de cada uno de los códigos utilizados en este trabajo de investigación, donde se presentan 13 scripts con la programación para analizar el modelo de matrices armónicamente acopladas y la caracterización de la carga conjunto motor-variador, así mismo se incluyen las matrices donde se almacenaron cada una de las muestras tanto en el tiempo como en la frecuencia 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 conjunto motor-variador en la herramienta Matlab-Simulink.

El modelo del circuito en el dominio del tiempo que se diseñó para la obtención de las muestras se denominó `variador_simulink.slx`, donde está integrado por un conjunto motor-variador, esta configuración está asociado con el software de Matlab y su principal función es generar las muestras, este código es la base para realizar la caracterización de la carga.

La cantidad de scripts y el orden para ejecutar se observan a continuación:

- `variador.m`
- `modelo_armonicas fase r.m`
- `modelo_armonicas fase s.m`
- `modelo_armonicas fase t.m`
- `calculos_errores fase r.m`
- `calculos_errores fase s.m`
- `calculos_errores fase t.m`

- box_plot fase r.m
- box_plot fase s.m
- box_plot fase t.m

A partir de la ejecución de los scripts anteriores se generan unos datos adicionales tipo Matlab Data, cada archivo adicional se genera y se cargan de manera automática al siguiente script siempre y cuando se maneje el orden mencionado anteriormente. Los nombres de los archivos adicionales son:

- medidas_variador_simulink
- calculos corrientes fase r
- calculos corrientes fase s
- calculos corrientes fase t
- errores_de_ajuste fase r
- errores_de_ajuste fase s
- errores_de_ajuste fase t

Recopilación de datos

En el código variador.m se presenta una serie de parámetros que identifica al número de pasos en magnitud y puede variar según el orden armónico, el numero_de_pasos_angulo , porcentaje_de_inicio, número_de_armonicossimplementados , estos parámetros se trasladan al modelo en el tiempo variador_simulink el cual se implementa para la caracterización de la carga variador-motor y realizar la recolección de las señales de tensión y su respuesta en corriente del circuito en el dominio del tiempo.

Los parámetros tienen un rango de variación previamente establecidos, el cual para magnitud se define en 20, el número de variaciones en ángulo el cual es de 72, porcentaje_de_inicio para la magnitud de la tensión se define en un valor mínimo que sea mayor a 0, en este caso la

definimos en 0,1%, la variable. `numero_de_armonicos_implementados`, indica hasta qué orden de armónicos impares se implementó para la toma de datos.

Para el caso de la obtención de datos se manejan 5 ciclos en el tiempo y se establece el límite de tiempo donde se estabiliza la corriente consumida por el motor, después de definir las variables, el código realiza una serie de variación que para la carga en estudio se define en 31 el orden armónico.

Realizada la recopilación de las muestras en el dominio del tiempo, se realiza la respectiva FFT (Fast Fourier Transform) y se almacenan las 23040 señales generadas en el dominio de la frecuencia en el primer archivo de datos Matlab Data `medidas_variador_simulink`.

Aplicación de los modelos

En los scripts `modelo_armonicas fase r.m`, `modelo_armonicas fase s.m`, `modelo_armonicas fase t.m` de Matlab se utilizan para recopilar la información y aplicar el modelo de matrices armónicamente acopladas (MMAA), estos códigos recopila la información de archivo Matlab Data `medidas_variador_simulink` para realizar la estimación de las señales mediante la matriz concatenada por cada una de las fases r,s,t del modelo anteriormente mencionado, el script maneja igualmente una serie de parámetros, inicialmente se debe definir el renglón `reconstruccion` la cual se utiliza para generar una gráfica en el dominio del tiempo de la señal de corriente y la señal de corriente luego de aplicar el modelo de matrices armónicamente acoplado (MMAA).

Cálculos de errores

Para el cálculo de los errores se implementa dos procedimientos en cual se observan gráfica o numéricamente, para el desarrollo previamente se recopila la información que se guardó en el archivo de Matlab Data `cálculo de corriente fase r`, `cálculo de corriente fase s`, `cálculo de corriente`

fase t y se realizan los respectivos cálculos de error correspondientes a las ecuaciones (11), (12), (13).

El script almacena estos errores en los siguientes archivos errores_de_ajuste fase r, errores_de_ajuste fase s, errores_de_ajuste fase t para el modelo de matrices armónicamente (MMAA) acopladas y adicionalmente se generan unos diagramas de cajas la cual se identifica de forma gráfica y almacena los valores de: mínimo, primer cuartil, mediana, tercer cuartil, máximo y el rango Inter cuartil en la matriz TMSE para los errores de ajuste, estos datos se establecen por cada una de las fases.

Para la adquisición de los errores de desempeño, se realiza un barrido a través de cada uno de los códigos utilizados, donde se presentan 11 scripts con la programación para analizar el modelo de matrices armónicamente acopladas y la caracterización de la carga conjunto motor-variador, así mismo se incluyen las matrices donde se almacenaron cada una de las muestras tanto en el tiempo como las señales en la frecuencia 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 conjunto motor-variador en la herramienta Matlab-Simulink.

El modelo del circuito en el dominio del tiempo que se implementó para la generación de las 10000 señales aleatorias se denominó variador_simulink_señales_típicas.slx, donde está integrado por un conjunto motor-variador, esta configuración está asociado con el software de Matlab y su principal función es permitir que cada una de las señales generadas en el script señales_típicas ingresen y almacenar la respuesta de cada una de las tensiones típicas.

La cantidad de scripts y el orden para ejecutar se observan a continuación:

- señales_típicas.m

- variador_señales_tipicas.m
- modelo_armonicas_Ir.m
- modelo_armonicas_Is.m
- modelo_armonicas_It.m
- calculos_errores_desempeño_Ir.m
- calculos_errores_desempeño_Is.m
- calculos_errores_desempeño_It.m
- box_plot_Ir.m
- box_plot_Is.m
- box_plot_It.m

A partir de la ejecución de los scripts anteriores se generan unos datos adicionales tipo Matlab Data, cada archivo adicional se genera y se cargan de manera automática al siguiente script siempre y cuando se maneje el orden mencionado anteriormente. Los nombres de los archivos adicionales son:

- ALEATORIASNUEVO
- medidas_variador_simulink
- calculos corrientes_aleatorias_Ir
- calculos corrientes_aleatorias_It
- calculos corrientes_aleatorias_Is
- errores_de_desempeño_Ir
- errores_de_desempeño_Is
- errores_de_desempeño_It

Recopilación de datos

En el código `variador_señales_tpicas.m` se presenta una serie de parámetros que identifica la magnitud y la fase; estos datos se obtuvieron de forma aleatoria y contiene cada uno de los armónicos (15), estos parámetros se trasladan al modelo en el tiempo `variador_simulink` el cual se implementa para la caracterización de la carga variador-motor y realizar la recolección de las señales de tensión y su respuesta en corriente del circuito en el dominio del tiempo.

Para el caso de la obtención de datos se manejan 5 ciclos en el tiempo y se establece el límite de tiempo donde se estabiliza la corriente consumida por el motor, después de definir las variables, se realiza la recopilación de las muestras en el dominio del tiempo, se realiza la respectiva FFT (Fast Fourier Transform) y se almacenan las 10000 señales generadas en el dominio de la frecuencia en el primer archivo de datos Matlab `Data medidas_variador_simulink.`, el proceso de recopilación de datos, cálculos de errores se realiza de igual manera para el error de desempeño y el de ajuste.