

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Análisis de un método para el ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia utilizando medidas de corriente y tensión para un conjunto de cargas agregadas: caso de estudio luminarias tipo LED.

Brayam Steven Rubiano Hernández y Eduard Marulanda Montoya

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

César Antonio Duarte Gualdrón

PhD. en Ingeniería Eléctrica y Computación

Codirector

Gabriel Alexis Malagón Carvajal

Dr. en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2023

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Dedicatoria

Para nuestros padres, les agradecemos de todo corazón por su amor incondicional y por haber creído en nosotros desde el primer momento. Han sido una fuente constante de inspiración y motivación para nosotros. Su apoyo y confianza en nosotros nos han permitido alcanzar nuestras metas y soñar aún más grande. Este trabajo es una muestra del esfuerzo y dedicación que hemos puesto gracias a su constante apoyo.

A nuestro profesor guía, queremos expresar nuestro profundo agradecimiento por su sabiduría y paciencia en guiarnos a través de este proceso de investigación. Su dedicación y apoyo han sido inestimables para nosotros. Gracias a su ayuda, hemos sido capaces de convertir nuestras ideas en una realidad tangible. Su guía ha sido fundamental en el desarrollo de nuestras habilidades investigativas y nos ha ayudado a crecer como estudiantes y como personas.

Al equipo de trabajo y compañeros de clase, queremos expresar nuestro agradecimiento por su colaboración y amistad en este proceso. Esto no sería posible sin su ayuda y apoyo constante. Han sido una parte fundamental en nuestro crecimiento y desarrollo durante este proceso. Les agradecemos por su amabilidad, su apoyo y por haber hecho de esta carrera una experiencia inolvidable. Les agradecemos de todo corazón.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Resumen

Título: Análisis de un método para el ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia utilizando medidas de corriente y tensión para un conjunto de cargas agregadas: Caso de estudio luminarias tipo LED. *

Autor: Brayam Steven Rubiano Hernández, Eduard Marulanda Montoya. **

Palabras Clave: Cargas agregadas, Modelos de en el dominio de la frecuencia, Distorsión armónica, matriz de admitancias armónicamente acopladas, Modelo, Cargas no lineales, Calidad de la energía, Punto de acople común.

Descripción: Actualmente, la mayor parte de las cargas que conforman los sistemas eléctricos son de naturaleza no lineal, lo cual indica, una inyección constante de perturbaciones a las redes eléctricas, generando distorsión de las señales de tensión y corriente como en [1- 6]. Es importante evaluar el error de desempeño de los modelos de cargas no lineales y en especial del método para el ajuste de estos modelos. En el presente trabajo de grado se desea diseñar e implementar un proceso experimental para analizar el comportamiento de un conjunto de cargas agregadas conectadas al mismo punto de acople común o PCC. Para esto, se desea realizar medidas/simulaciones en el entorno de programación visual SIMULINK a agrupaciones de luminarias tipo LED en el que se modelan estados de operación de la tensión de alimentación y de igual manera, la desconexión y conexión de un grupo de cargas a lo largo de un intervalo de tiempo. En este sentido, el trabajo de grado busca estimar y evaluar el desempeño de este método y los modelos en el dominio de la frecuencia con respecto al conjunto de medidas/simulaciones realizadas para un conjunto de cargas de iluminación tipo LED agregadas.

*Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Fisicomecánicas, Escuela E3T. Director: PhD. Cesar Antonio Duarte Gualdrón, Codirector: Dr. Gabriel Alexis Malagón Carvajal.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Abstract

Title: Analysis of a method for the adjustment of models in the frequency domain using current and voltage measurements for a set of aggregate loads: Case study LED type luminaries. *

Author: Brayam Steven Rubiano Hernández, Eduard Marulanda Montoya. **

Keywords: Aggregate loads, Frequency domain models, Harmonic distortion, harmonically coupled admittance matrix, Model, Non-linear loads, Power quality, Common coupling point.

Description: Currently, most of the loads that make up electrical systems are of a nonlinear nature, which indicates a constant injection of disturbances into the electrical networks, generating distortion of voltage and current signals as in [1-6]. It is important to evaluate the performance error of nonlinear load models, especially the method for adjusting these models. In this thesis work, it is desired to design and implement an experimental process to analyze the behavior of a set of aggregated loads connected to the same point of common coupling or PCC. For this, measurements/simulations are desired to be carried out in the SIMULINK visual programming environment on LED luminaire groupings in which operating states of the supply voltage are modeled, as well as the disconnection and connection of a group of loads over a time interval. In this sense, the thesis work aims to estimate and evaluate the performance of this method and the models in the frequency domain with respect to the set of measurements/simulations carried out for a set of aggregated LED lighting loads.

*Thesis work

** Faculty of Physicomechanical Engineering, E3T School. Director: PhD. Cesar Antonio Duarte Gualdrón, Co-director: Dr. Gabriel Alexis Malagón Carvajal.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Tabla de Contenido.

| | |
|--|----|
| Introducción | 10 |
| 2 Objetivos..... | 12 |
| 3 Marco teórico..... | 14 |
| 3.1 Cargas no lineales | 14 |
| 3.2 Fuentes de alimentación conmutadas (SMPS)..... | 14 |
| 3.3 Normativa aplicada | 14 |
| 4 Diseño del experimento para la estimación de las señales de tensión y corriente | 18 |
| 4.1 Modelo de circuito equivalente de una luminaria LED | 18 |
| 4.2 Diseño de los escenarios de luminarias led agregadas en un PCC. | 20 |
| 4.3 Diseño del experimento de un armónico a la vez | 21 |
| 5 Metodología para el ajuste de los modelos en el dominio de la frecuencia | 23 |
| 5.1 Estructura matricial de las señales de tensión y corriente..... | 24 |
| 5.2 Método basado en algebra matricial | 26 |
| 5.2.1 Modelo equivalente de Norton (MEN) | 26 |
| 5.2.2 Ajuste del Modelo Equivalente de Norton (MEN) | 27 |
| 5.2.3 Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (M2A3) | 28 |

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

| | | |
|-------|---|----|
| 5.2.4 | Ajuste del Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (M2A3) ... | 29 |
| 5.2.5 | Estimación de señales de corriente para verificación de ajuste de los modelos (Entrenamiento) | 30 |
| 5.3 | Desempeño de los modelos (Validación)..... | 31 |
| 6 | Evaluación del error | 32 |
| 6.1 | Error de ajuste | 33 |
| 6.2 | Estimación del error de ajuste | 33 |
| 6.3 | Error de desempeño..... | 41 |
| 6.4 | Estimación del error de desempeño | 41 |
| 7 | Evaluación de resultados | 49 |
| 7.1 | Modelo M2A3 en los resultados del Error de Ajuste..... | 49 |
| 7.2 | Modelo M2A3 en los resultados del Error de Desempeño | 49 |
| 7.3 | Modelo MEN en los resultados del Error de Ajuste | 50 |
| 7.4 | Modelo MEN en los resultados del Error de Desempeño..... | 51 |
| 7.5 | Comparación entre los modelos M2A3 y MEN..... | 51 |
| 8 | Conclusiones..... | 52 |
| | Referencias..... | 55 |
| | Apéndices..... | 57 |

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Límites de distorsión armónica..... | 16 |
| Tabla 2. Parámetros de las luminarias led base | 19 |
| Tabla 3. Distribución de luminarias led y potencia activa individual y total. | 20 |
| Tabla 4. Carga en p.u. para cada estrato en horas críticas. | 21 |
| Tabla 5. Parámetros para el experimento de un armónico a la vez..... | 23 |
| Tabla 6. Dimensiones de las matrices I y V..... | 25 |
| Tabla 7. MSE totales de ajuste para cada porcentaje de carga, modelo (M2A3). | 37 |
| Tabla 8. MSE totales de ajuste para cada porcentaje de carga, modelo (MEN)..... | 40 |
| Tabla 9. MSE totales de desempeño para cada porcentaje de carga, modelo (M2A3)..... | 44 |
| Tabla 10. MSE totales de desempeño para cada porcentaje de carga, modelo (MEN). | 48 |

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Curva de carga diaria, estratos 1 y 2..... | 16 |
| Figura 2. Curva de carga diaria, estratos 3 y 4..... | 17 |
| Figura 3. Curva de carga diaria, estrato 5. | 17 |
| Figura 4. Modelo de circuito equivalente (MCE) de una luminaria tipo LED..... | 18 |
| Figura 5. Curvas de demanda por estrato..... | 21 |
| Figura 6. MSE [%] Ajuste Modelo M2A3 con el 25% de las Luminarias LED | 34 |
| Figura 7. MSE [%] Ajuste Modelo M2A3 con el 45% de las Luminarias LED | 35 |
| Figura 8. MSE [%] Ajuste Modelo M2A3 con el 60% de las Luminarias LED | 35 |
| Figura 9. MSE [%] Ajuste Modelo M2A3 con el 70% de las Luminarias LED | 36 |
| Figura 10. MSE [%] Ajuste Modelo M2A3 con el 100% de las Luminarias LED | 36 |
| Figura 11. MSE [%] Ajuste Modelo MEN con el 25% de las Luminarias LED..... | 38 |
| Figura 12. MSE [%] Ajuste Modelo MEN con el 45% de las Luminarias LED..... | 38 |
| Figura 13. MSE [%] Ajuste Modelo MEN con el 60% de las Luminarias LED..... | 39 |
| Figura 14. MSE [%] Ajuste Modelo MEN con el 70% de las Luminarias LED..... | 39 |
| Figura 15. MSE [%] Ajuste Modelo MEN con el 100% de las Luminarias LED..... | 40 |
| Figura 16. MSE [%] Desempeño Modelo M2A3 con el 25% de las Luminarias LED..... | 42 |

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

| | |
|--|----|
| Figura 17. MSE [%] Desempeño Modelo M2A3 con el 45% de las Luminarias LED | 42 |
| Figura 18. MSE [%] Desempeño Modelo M2A3 con el 60% de las Luminarias LED | 43 |
| Figura 19. MSE [%] Desempeño Modelo M2A3 con el 70% de las Luminarias LED | 43 |
| Figura 20. MSE [%] Desempeño Modelo M2A3 con el 100% de las Luminarias LED | 44 |
| Figura 21. MSE [%] Desempeño Modelo MEN con el 25% de las Luminarias LED | 45 |
| Figura 22. MSE [%] Desempeño Modelo MEN con el 45% de las Luminarias LED | 46 |
| Figura 23. MSE [%] Desempeño Modelo MEN con el 60% de las Luminarias LED | 46 |
| Figura 24. MSE [%] Desempeño Modelo MEN con el 70% de las Luminarias LED | 47 |
| Figura 25. MSE [%] Desempeño Modelo MEN con el 100% de las Luminarias LED | 47 |

Introducción

Este trabajo de grado se enfoca en analizar el comportamiento de un conjunto de cargas no lineales, conectadas a un mismo punto de acople común (PCC).

Debido a que la mayoría de las cargas actuales son no lineales y estas generan distorsión en las señales de tensión y corriente de las redes eléctricas, como se ha evidenciado en estudios anteriores como el de Wang et al. en [1], López-Martín et al. en [2], Matvoz et al. en [3] y [6], Hu et al. en [4], Watson et al. en [5], Nassif et al. en [8], Barros et al. en [9], Caicedo et al. en [10], Cunill Solá et al. en [11], Malagón Carvajal en [12], Molina et al. en [13].

Por lo tanto, se busca evaluar el desempeño de los modelos de cargas no lineales y del método de ajuste de estos modelos, es posible analizar escenarios con alta penetración de estas cargas.

Este trabajo de grado se centra en el estudio de cargas de iluminación tipo LED, ya que su uso es cada vez más común en hogares y edificios comerciales. Se utiliza un proceso experimental basado en medidas obtenidas mediante simulaciones en el entorno de programación visual SIMULINK, para analizar el comportamiento de un grupo de luminarias tipo LED.

En particular, se investiga el desempeño de los modelos equivalente de Norton y de matriz de admitancias armónicamente acopladas y se evalúa un método para el ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia, siguiendo el enfoque basado en medidas propuesto por Nassif et al. [8], para construir modelos en el dominio de la frecuencia para la estimación de armónicos de electrodomésticos electrónicos.

Los resultados obtenidos buscan verificar el desempeño de este método y los modelos en el dominio de la frecuencia con respecto al conjunto de medidas/simulaciones realizadas para un

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

conjunto de cargas de iluminación tipo LED agregadas, así se busca contribuir a un mejor entendimiento de los efectos de las cargas no lineales en la calidad de la energía en el sistema eléctrico, cumpliendo con los estándares aplicables al tema particular.

El objetivo general del trabajo es implementar un experimento que permita evaluar el error de desempeño de modelos en el dominio de la frecuencia utilizando un método basado en álgebra de matrices para el caso de un conjunto de luminarias agregadas tipo LED.

Los objetivos específicos incluyen diseñar los experimentos para la obtención de señales de tensión y corriente (Sección 3), ajustar los modelos en el dominio de frecuencia utilizando un método basado en álgebra de matrices (Sección 0), evaluar el desempeño de los modelos (Sección 4.3), evaluar el error y validar los resultados (Secciones 0 y 0).

En el marco teórico, se mencionan conceptos como cargas no lineales, fuentes de alimentación conmutadas (SMPS) y estándares y normativas aplicadas. El diseño del experimento incluye el modelo de circuito equivalente de una luminaria LED y el diseño de los escenarios de luminarias LED agregadas. La metodología de ajuste de los modelos incluye la estructura matricial de las señales de tensión y corriente, método basado en álgebra matricial y la estimación de las señales de corriente para la verificación del ajuste de los modelos.

La evaluación de los resultados incluye la evaluación del error de ajuste y el error de desempeño, y se realiza una validación de los resultados. Las conclusiones del trabajo se mencionan en la sección final (Sección 0).

1 Objetivos

Objetivo general

Implementar un experimento que permita evaluar el error de desempeño de modelos en el dominio de la frecuencia utilizando un método basado en álgebra de matrices para el caso de un conjunto de luminarias agregadas tipo LED.

Objetivos específicos

Primer objetivo

Diseñar los experimentos a llevar a cabo para la obtención de las señales de tensión y corriente (medidas/simulaciones producidas mediante el software SIMULINK), como información de entrada en el método de ajuste de modelos.

Para el cumplimiento de este objetivo se escoge la cantidad de luminarias LED y los puntos de operación correspondientes a las variaciones de tensión de manera sistemática como se explica en la Sección 3. Diseño del experimento para la estimación de las señales de tensión y corriente. Esto conformará la zona de operación y permitirá determinar la cantidad de medidas, armónicos a revisar y el cumplimiento de los límites de distorsión establecidos por normas internacionales UNE-EN 60062:2016 y ANSI C84.11 – 2011. Además, se evaluará el impacto de la conexión/desconexión de cargas no lineales en diferentes zonas de operación, basadas en la demanda proporcionada por EBSA en diferentes horas.

Segundo objetivo

Ajustar los modelos en el dominio de la frecuencia mediante un método basado en álgebra de matrices utilizando las medidas/simulaciones creadas en SIMULINK.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Para el cumplimiento de este objetivo, se escoge la ventana de observación en el dominio del tiempo, correspondiente a la cantidad de ciclos de análisis que se extrae de las señales simuladas. Según el Teorema de muestreo de Nyquist-Shanno, depende del número de muestras por ciclo que se establezcan, es posible saber hasta que componente armónico de la señal se puede estimar. Posteriormente se procede a trasladar las señales al dominio de la frecuencia, estructurándolas de manera matricial (Sección 4.1), con la finalidad de introducirlas como información de entrada para el método de ajuste de modelos basado en álgebra de matrices (Sección 4).

Tercer objetivo

Establecer los escenarios de análisis donde se desea evaluar el desempeño del método de ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia, de forma que permita calcular su error de desempeño con respecto a las medidas/simulaciones generadas mediante la herramienta Matlab SIMULINK.

Para llevar a cabo este objetivo, se establecen escenario de análisis con el fin de evaluar el impacto en la eficiencia del método de ajuste, debido a la conexión y desconexión de cargas no lineales en un punto de acople común (Sección 3.2).

Se busca puntos de operación de luminarias led agregadas (porcentajes de carga agregada), tomando como referencia las gráficas de demanda diaria por estratos de la norma EBSA (Sección 2.3), en horas críticas del día. Por otra parte, se establecen escenarios con señales de ajuste (Sección 3.3) y señales de desempeño (Sección 4.3) y así evaluar los errores de ajuste y desempeño para cada porcentaje de carga agregada (Sección 0).

2 Marco teórico

2.1 Cargas no lineales

Las cargas no lineales son dispositivos electrónicos cuya corriente no se comporta de manera proporcional a la tensión aplicada. Estos dispositivos, como diodos y tiristores, tienen un comportamiento eléctrico que no sigue una relación lineal con la tensión o corriente debido a la presencia de componentes no lineales que responden de manera distinta a las características y forma de onda de la corriente suministrada por la fuente de alimentación.

En la actualidad, la masificación de la tecnología que abarcan las zonas residenciales, industriales y comerciales corresponde en su mayoría a elementos diseñados con fuentes de alimentación conmutadas (SMPS) como: luminarias tipo LED, CFL, televisores, electrodomésticos, computadores, etc. Estos dispositivos eléctricos tienen un impacto significativo en la calidad de la energía cuando se conectan a un punto de acople común causando distorsiones en [1-3], que afectan las características de la señal de alimentación debido a la naturaleza no lineal de estas cargas. por esto, el interés en modelar el comportamiento de este tipo de cargas en los sistemas eléctricos ha incrementado en [4-6].

2.2 Fuentes de alimentación conmutadas (SMPS)

Las SMPS son un conjunto de dispositivos electrónicos usados por diversas cargas no lineales (electrodomésticos, luminarias LED, computadores) para transformar la señal de alimentación de corriente alterna a corriente continua.

2.3 Normativa aplicada

El presente trabajo de grado está basado en las siguientes normas para los límites permitidos en la regulación de tensión y distorsiones armónicas.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Estándar internacional IEC 6062 (UNE-EN 60062:2016)

Código para el marcado de resistencias y de condensadores. Esta norma actualmente asigna los valores máximos de tolerancia para la resistencias y capacitores que se encuentran en el mercado; por tanto, la estimación de los parámetros seleccionados para los componentes R y C del modelo de circuito equivalente tendrán una tolerancia de $\pm 20\%$ partiendo de los 3 valores de referencias encontrados en [1] para cada uno de los componentes.

ANSI C84.11 – 2011

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.

Norma europea UNE-EN50160 del 2015 (Std UN50160:2015, tabla A. 1, IEEE5159:2014)

Indica los límites de distorsión individual de tensión por orden armónico, de igual modo estipula un límite máximo para la distorsión total de tensión del 3%.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

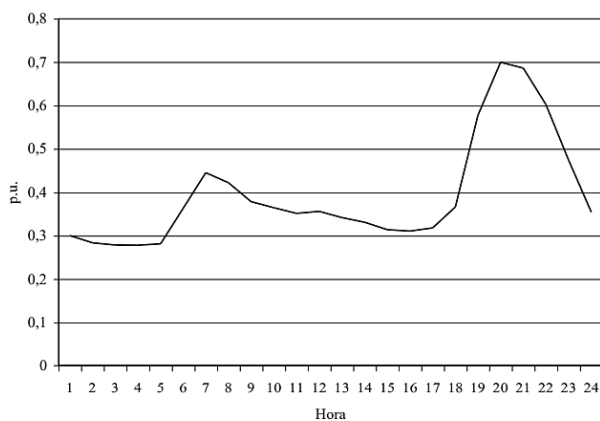
Tabla 1. Límites de distorsión armónica

| Armónicos impares | | | |
|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| Múltiplos de 3 | | No múltiplos de 3 | |
| Orden armónico H | Distorsión armónica Uh [%] | Orden armónico H | Distorsión armónica Uh [%] |
| 3 | 3 | 5 | 3 |
| 9 | 1.5 | 7, 11 | 2.5 |
| 15, 21 | 0.5 | 13, 17 | 2 |
| Mayores a 21 | 0.3 | 19, 23 | 1.5 |

Norma del Operador de red (EBSA)

La EBSA establecen las curvas de carga diaria para los estratos 1, 2, 3, 4 y 5, mostrando la carga en p.u. durante las 24 horas del día. Estas curvas nos permiten estimar los puntos de operación (porcentajes de carga) en horas críticas (Sección 3.2) para el presente trabajo de grado.

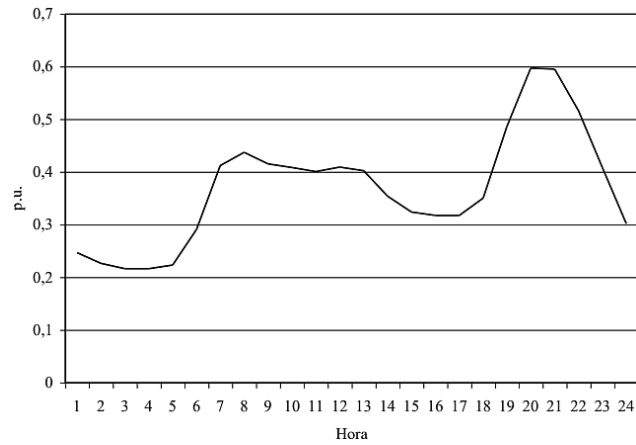
Figura 1. Curva de carga diaria, estratos 1 y 2.



Nota. Adaptado de Normas de diseño de redes de distribución de energía eléctrica (p. 29), por EBSA, 2014.

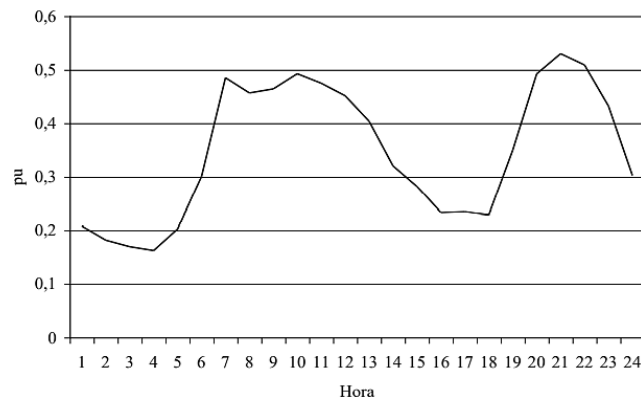
ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Figura 2. Curva de carga diaria, estratos 3 y 4.



Nota. Adaptado de Normas de diseño de redes de distribución de energía eléctrica (p. 30), por EBSA, 2014.

Figura 3. Curva de carga diaria, estrato 5.



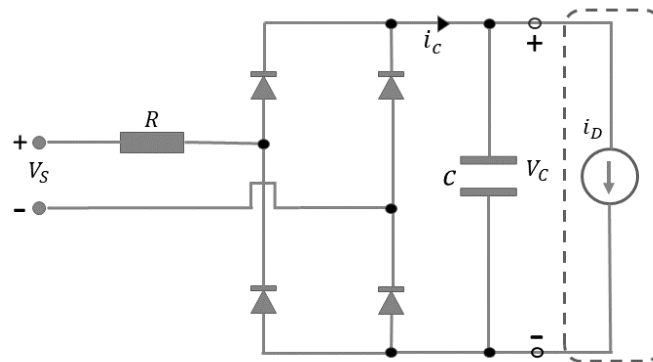
Nota. Adaptado de Normas de diseño de redes de distribución de energía eléctrica (p. 30), por EBSA, 2014.

3 Diseño del experimento para la estimación de las señales de tensión y corriente

3.1 Modelo de circuito equivalente de una luminaria LED

Para la ejecución de este trabajo de grado se hace uso del Modelo de Circuito Equivalente (MCE) para una luminaria tipo LED figura 1 implementado en [1].

Figura 4. Modelo de circuito equivalente (MCE) de una luminaria tipo LED



El MCE de la LED cuenta con tres parámetros principales de construcción los cuales son: resistencia (R), capacitor DC (C), la fuente de corriente continua (i_D).

La puesta en marcha del MCE de la LED se lleva a cabo mediante la herramienta Matlab, la cual ofrece un entorno de programación visual llamado SIMULINK en donde se dispone de los elementos necesarios para abordar el diseño del modelo de la lámpara, y así de esta manera ajustar de una forma más práctica los valores para los parámetros de su construcción i_D , R y C .

Los valores utilizados en [1] para el modelo de luminarias tipo LED se muestran en Tabla

2. Parámetros de las luminarias led base.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Tabla 2. Parámetros de las luminarias led base

| Lampara tipo LED | Tensión de alimentación | Parámetros de diseño de los componentes internos para el MCE de la luminaria tipo LED | | |
|------------------|-------------------------|---|-----------------------------|--|
| | | Resistencia (R) | Capacitancia DC (C) | Fuente de corriente continua (i_D) |
| #1 | 220 V | 20.20 $\Omega \pm 20\%$ | 8.63 $\mu\text{F} \pm 20\%$ | 23.9 mA |
| #2 | 220 V | 22.26 $\Omega \pm 20\%$ | 3.04 $\mu\text{F} \pm 20\%$ | 35.0 mA |
| #3 | 220 V | 36.04 $\Omega \pm 20\%$ | 3.01 $\mu\text{F} \pm 20\%$ | 26.4 mA |

Selección de los parámetros para el modelo de circuito equivalente de las luminarias led.

Para la selección de los parámetros para el modelo del circuito equivalente se hace uso los parámetros de tres luminarias led tomadas de [11] presentadas en la tabla 2 y el Estándar internacional IEC 6062 que establece los límites máximos que deben tener los parámetros de resistencia y capacitancia utilizados en el MCE de las luminarias LED con respecto del valor nominal.

Para generar estas luminarias se hace uso del script de MATLAB (Apéndice 1.1). Asumiendo como valor nominal los parámetros tomados de [11] y las fuentes de corriente continua con un valor constante, se generan 100 luminarias led aleatorias mediante una distribución uniforme.

Las 100 luminarias led generadas están distribuidas como se muestran en la Tabla 3. Distribución de luminarias led y potencia activa individual y total.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Tabla 3. Distribución de luminarias led y potencia activa individual y total.

| Lámparas tipo LED | Cantidad | Potencia [W] | Potencia total [W] |
|-------------------|----------|--------------|--------------------|
| #1 | 33 | 8 | 264 |
| #2 | 33 | 12 | 396 |
| #3 | 34 | 9 | 297 |

Una vez obtenidos los parámetros para las 100 luminarias led se emplea la distribución uniforme para organizar aleatoriamente cada tipo de luminaria led, es decir, se combinan al azar la cantidad total de luminarias y garantizar que para los porcentajes de carga seleccionados en la Sección 3.2 se analicen los tres tipos de luminarias LED.

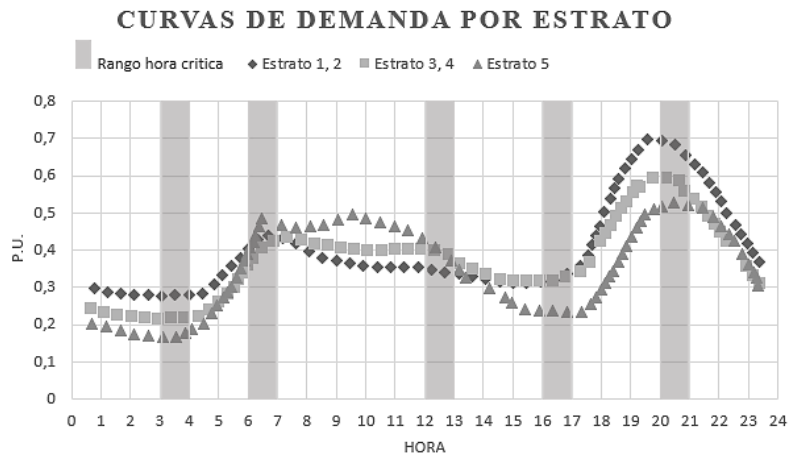
3.2 Diseño de los escenarios de luminarias led agregadas en un PCC.

Cantidad de cargas agregadas: la carga total para las 100 luminarias es de 957 W equivalente 1.196 kVA a un factor de potencia de 0.8. Una casa tipo ubicada en el municipio de Moniquirá-Boyacá cuenta con una demanda máxima de 3.707 kVA de las cuales 0.34 kVA (9.17% \approx 10%) son destinados a iluminación, esta casa está alimentada por un transformador de 30 kVA con una cargabilidad de 90%, este transformador suministra 27 kVA en sus tres fases o 9 kVA por fase asumiendo un balance ideal en su carga de los cuales 0.9 kVA (10%) pueden estar destinados a iluminación.

Se seleccionaron 100 luminarias LED debido a que su carga total es similar a la que suministra el transformador en el secundario en una de sus fases, se asume que el secundario es un PCC al que se encuentran conectas todas las luminarias LED y se desprecia la regulación de tensión en los circuitos ramales.

Porcentaje de cargas agregadas en cada escenario

Figura 5. Curvas de demanda por estrato



Basados en las curvas de carga diaria para los estratos 1, 2, 3, 4, 5 y analizando horas críticas se creó la siguiente tabla.

Tabla 4. Carga en p.u. para cada estrato en horas críticas.

| Estratos | Hora | | | | |
|----------|-------|-------|---------|---------|---------|
| | 3 - 4 | 6 - 7 | 12 - 13 | 16 - 17 | 21 - 22 |
| 1 y 2 | 0.28 | 0.45 | 0.35 | 0.31 | 0.71 |
| 3 y 4 | 0.21 | 0.43 | 0.4 | 0.32 | 0.6 |
| 5 | 0.17 | 0.49 | 0.45 | 0.23 | 0.52 |

Se toma como escenarios de carga el 25%, 45%, 60% 70% y 100% para un total de 5 escenarios con diferentes porcentajes de cargas agregadas.

3.3 Diseño del experimento de un armónico a la vez

Para este trabajo se plantea un barrido en frecuencia con enfoque determinista, debido a que se siguen pasos específicos para llevar a cabo el análisis de las cargas eléctricas. Este procedimiento, descrito por Fauri en 1997, implica la asignación de límites para la distorsión

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

individual y total y la regulación de la fuente de alimentación, este barrido se llama "experimento de un armónico a la vez". Estos límites se establecen con los estándares internacionales UNE-EN 60062:2016 y ANSI C84.11 – 2011.

El enfoque determinista se utiliza en este proceso porque se cree que los resultados pueden predecirse con certeza si se conocen las condiciones iniciales. En otras palabras, este enfoque asume que no hay azar o incertidumbre en los resultados y que los mismos están determinados mediante normativas (sección 2.3). Este enfoque ha sido utilizado exitosamente en el modelado de cargas con comportamientos no lineales en [10, 12].

El diseño del experimento de un armónico a la vez se puede dividir en los siguientes pasos:

1. Se toma como base la tensión del fundamental o tensión nominal de alimentación (V_n) sin ninguna distorsión, de manera que, su regulación este en 0% y el ángulo de fase este en 0° , para que posteriormente se definan los pasos con los que se va a ir aumentando de forma escalonada la tensión nominal escogida, por ejemplo, si se toman 25 pasos de regulación de tensión partiendo desde 0% como referencia y tomando como límite superior 5%, dicho límite establecido por el estándar ANSI C84.11 – 2011, la variación en la magnitud del fundamental empezara aumentado de a 0,2% hasta llegar a un máximo de 5%.

2. Se selecciona la tensión de alimentación como referencia, estableciendo una amplitud nominal y un ángulo de fase de 0° . Se agrega gradualmente un tercer armónico a la tensión de referencia, variando tanto su magnitud como su ángulo de fase.

3. Se repite este proceso para cada orden armónico (3, 5, 7, 9, 11, etc.), superponiendo un armónico a la vez a la componente fundamental.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

4. Se registran la forma de onda de la tensión de alimentación y la respuesta de corriente en cada iteración.

5. Finalmente, se transforman las señales a través del cálculo de los espectros de corriente y tensión en el dominio de frecuencia.

En los ensayos presentados en [12] para el barrido en frecuencia se pudo concluir que con los parámetros presentados en la tabla 5 se obtiene resultados en el ajuste con respecto de otros parámetros estudiados.

Tabla 5. Parámetros para el experimento de un armónico a la vez.

| | |
|---|---|
| Norma para los límites de distorsión | Norma europea UNE-EN50160 del 2015 |
| Cantidad de armónicos impares | 11 (hasta el armónico #21) |
| Cantidad de variaciones en ángulo de fase | 72 (pasos de 5°) |
| Cantidad de variaciones en distorsión | 20 (hasta el límite establecido por la norma) |

Se selecciona esta cantidad de armónicos debido a que el aporte en distorsión después del armónico #21 no debe exceder el 0.5% de distorsión armónica individual según la norma europea UNE-EN50160 del 2015, capítulos 4.2.5 y 5.2.5.

4 Metodología para el ajuste de los modelos en el dominio de la frecuencia

El objetivo es ajustar los modelos en el dominio de la frecuencia utilizando un método basado en álgebra de matrices. Para ello, se escoge la ventana de observación en el dominio del tiempo, el número de muestras por ciclo para determinar el ancho de banda, siguiendo el Teorema de Nyquist-Shanno.

4.1 Estructura matricial de las señales de tensión y corriente.

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones y sus respectivas respuestas en el dominio de la frecuencia, se organizan en una matriz V de dimensiones $[(h \times h) \times (p \times o)]$, en donde h es la cantidad de armónicos obtenidos en cada simulación, p la cantidad de variaciones en magnitud y o la cantidad de variaciones en ángulo de fase.

Cada señal seleccionada para el experimento de un armónico a la vez, se escribe en un vector columna con sus componentes armónicas en el dominio de la frecuencia de la siguiente manera:

$$v_n^{jk} = \begin{bmatrix} v_{n1}^{jk} \\ v_{n3}^{jk} \\ \vdots \\ v_{nh}^{jk} \end{bmatrix}$$

Para cada armónico $n = 1, 3 \dots h$ seleccionado para el experimento de un armónico a la vez y cada variación en ángulo de fase $j = 1, 2, 3 \dots o$, existen p variaciones en magnitud $k = 1, 2, 3 \dots p$. Dichas variaciones en ángulo de fase y magnitud jk de las señales de tensión se organizan en las columnas de la matriz V Manteniendo fija cada variación en ángulo de fase j y recorriendo cada una de las variaciones en magnitud k obteniendo $[p \times o]$ columnas.

Las señales para cada variación jk se organizan en columna de manera ascendente por orden armónico n obteniendo $[h \times h]$ filas.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Cada señal v_n^{jk} se organiza en la matriz V así:

$$V = \begin{bmatrix} v_1^{11} & \dots & v_1^{1k} & \dots & v_1^{1p} & \dots & v_1^{j1} & \dots & v_1^{jk} & \dots & v_1^{jp} & \dots & v_1^{op} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_n^{11} & \dots & v_n^{1k} & \dots & v_n^{1p} & \dots & v_n^{j1} & \dots & v_n^{jk} & \dots & v_n^{jp} & \dots & v_n^{op} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_h^{11} & \dots & v_h^{1k} & \dots & v_h^{1p} & \dots & v_h^{j1} & \dots & v_h^{jk} & \dots & v_h^{jp} & \dots & v_h^{op} \end{bmatrix}$$

La matriz I de corrientes contiene cada una de las señales de corriente i_n^{jk} correspondientes a la respuesta a cada una de las señales de tensión v_n^{jk} .

$$I = \begin{bmatrix} i_1^{11} & \dots & i_1^{1k} & \dots & i_1^{1p} & \dots & i_1^{j1} & \dots & i_1^{jk} & \dots & i_1^{jp} & \dots & i_1^{op} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_n^{11} & \dots & i_n^{1k} & \dots & i_n^{1p} & \dots & i_n^{j1} & \dots & i_n^{jk} & \dots & i_n^{jp} & \dots & i_n^{op} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_h^{11} & \dots & i_h^{1k} & \dots & i_h^{1p} & \dots & i_h^{j1} & \dots & i_h^{jk} & \dots & i_h^{jp} & \dots & i_h^{op} \end{bmatrix}$$

Una vez obtenidas las matrices I y V se organizan dejando en las filas cada una de las 11 componentes armónicas y todas las variaciones en regulación (20), Angulo de fase (75) y en componente armónica (11) se obtienen las nuevas matrices I y V que se usan como información de entrada para los modelos basados en algebra de matrices (MEN) Y (M2A3).

Las dimensiones de las nuevas matrices I y V son:

Tabla 6. Dimensiones de las matrices I y V

| Matriz | Filas | Columnas |
|--------|-------|----------------------|
| V | 11 | 20 x 75 x 11 = 16500 |
| I | 11 | 20 x 75 x 11 = 16500 |

4.2 Método basado en algebra matricial

El método propuesto en el artículo A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu, 2010 [8], plantea modelar cargas no lineales mediante algebra matricial. Malagon Carvajal, G. A, 2020 [12], propone la modificación del método debido a una inconsistencia en el álgebra de matrices para números complejos; la ecuación (1) corresponde con la propuesta de la modificación del método basados en algebra matricial.

$$X = BA^H(AA^H)^{-1} \quad (1)$$

4.2.1 Modelo equivalente de Norton (MEN)

En este modelo se contemplan dos formulaciones matemáticas para cuando se tiene corriente de corte conocida y desconocida, en este trabajo de grado se implementa la formulación para corriente de corte desconocida (2) y la ecuación del modelo equivalente de Norton (3). Reemplazando $X = [IcY]$, $A = [1V^T]^T$ y $B = I$ en la ecuación (1) se tiene:

$$[Ic Y] = [I][1V^T]^*([1V^T]^T[1V^T]^*)^{-1} \quad (2)$$

En donde Ic es un vector columna que contiene las componentes armónicas de la corriente de corte, Y la matriz de admitancias, V una matriz que contiene las señales de tensión de entrada establecidas para el experimento de un armónico a la vez, organizadas a lo largo de las columnas y sus componentes armónicos en las filas e I una matriz que contiene las señales respuesta del sistema a cada una de las señales de tensión de la matriz V .

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Una vez caracterizado el sistema obteniendo la matriz de admitancias Y y la corriente de corte Ic , es posible implementar la ecuación equivalente de Norton para estimar la corriente respuesta del sistema I ante una tensión de entrada V .

$$[I] = [Ic] + [Y][V] \quad (3)$$

4.2.2 Ajuste del Modelo Equivalente de Norton (MEN)

Con las matrices $V_{(11 \times 16500)}$ e $I_{(11 \times 16500)}$ como información de entrada para la ecuación (2) se tiene:

$V^T_{(16500 \times 11)}$, $1V^T_{(16500 \times 12)}$ en donde se adiciona una columna de números uno (1) a la matriz $V^T_{(16500 \times 11)}$.

Para implementar la ecuación (1) se obtiene la matriz $A_{(12 \times 16500)} = [1V^T_{(16500 \times 12)}]^T$ y la matriz $B_{(11 \times 16500)} = I_{(11 \times 16500)}$.

Con la ecuación (1) se tiene

$$X_{(11 \times 12)} = B_{(11 \times 16500)} A^H_{(16500 \times 12)} (A A^H)^{-1}_{(12 \times 12)}$$

Donde $X_{(11 \times 12)}$ es la concatenación de la corriente de corte $Ic_{(11 \times 1)}$ y la matriz de admitancias $Y_{(11 \times 11)}$.

Con la versión extendida de la ecuación (1), ecuación (2) se obtienen los mismos resultados, ya que son equivalentes.

$$[Ic_{(11 \times 1)} \ Y_{(11 \times 11)}] = [I]_{(11 \times 16500)} [1V^T]_{(16500 \times 12)}^* ([1V^T]^T [1V^T]^*)^{-1}_{(12 \times 12)}$$

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Este procedimiento se realiza implementando el script de MATLAB (Apéndice 1.9) arrojando como resultado un archivo “n_Models_Ic_Y.mat” en (Apéndice 4.5) que contiene la corriente de corte I_c y la matriz de admitancias Y para n cantidad de cargas agregadas (25, 45, 60, 70 y 100) correspondientes a los porcentajes de carga en los escenarios seleccionados en la sección 4.2.

4.2.3 Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (M2A3)

Este Modelo también presenta dos formulaciones matemáticas para corriente de corte conocida y corriente de corte desconocida (4), Reemplazando $X = [IcY^+Y^-]$, $A = [1V^TV^H]^T$ y $B = I$ en la ecuación (1) se obtiene el Modelo (M2A3):

$$[IcY^+Y^-] = [I][1V^TV^H]^*([1V^TV^H]^T[1V^TV^H]^*)^{-1} \quad (4)$$

En donde Ic es un vector columna que contiene las componentes armónicas de la corriente de corte, Y^+ y Y^- las matrices de admitancias acopladas, V una matriz que contiene las señales de tensión de entrada establecidas para el experimento de un armónico a la vez organizadas a lo largo de las columnas y sus componentes armónicos en las filas e I una matriz que contiene las señales respuesta del sistema a cada una de las señales de tensión de la matriz V .

Una vez caracterizado el sistema obteniendo las matrices de admitancias Y^+ y Y^- y la corriente de corte Ic es posible implementar la ecuación (5).

$$I = Ic + Y^+V + Y^-V^* \quad (5)$$

4.2.4 Ajuste del Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (M2A3)

De manera análoga al modelo (MEN) con las matrices $V_{(11 \times 16500)}$ e $I_{(11 \times 16500)}$ como información de entrada para la ecuación (4) se tiene:

$V^T_{(16500 \times 11)}$, $1V^T_{(16500 \times 12)}$ en donde se adiciona una columna de números uno (1) a la matriz $V^T_{(16500 \times 11)}$, $V^H_{(16500 \times 11)}$ matriz hermitiana (transpuesta – conjugada) de la matriz V .

Para implementar la ecuación (1) se obtiene la matriz

$$A_{(23 \times 16500)} = [1V^T_{(16500 \times 12)} V^H_{(11 \times 16500)}]^T \text{ y la matriz } B_{(11 \times 16500)} = I_{(11 \times 16500)}.$$

Con la ecuación (1) se tiene

$$X_{(11 \times 23)} = B_{(11 \times 16500)} A^H_{(16500 \times 23)} (A A^H)^{-1}_{(23 \times 23)}$$

Donde $X_{(11 \times 23)}$ es la concatenación de la corriente de corte $Ic_{(11 \times 1)}$ y las matrices de admitancias $Y^+_{(11 \times 11)}$ y $Y^-_{(11 \times 11)}$.

Con la versión extendida de la ecuación (1), ecuación (4) se obtienen los mismos resultados, ya que son equivalentes.

$$\begin{aligned} & [Ic_{(11 \times 1)} Y^+_{(11 \times 11)} Y^-_{(11 \times 11)}] \\ & = [I]_{(11 \times 16500)} [1V^T V^H]_{(16500 \times 23)}^* ([1V^T V^H]^T [1V^T V^H]^*)^{-1}_{(23 \times 23)} \end{aligned}$$

Este procedimiento se realiza implementando el script de MATLAB (Apéndice 1.5) arrojando como resultado un archivo “n_Models_Ic_Yp_Yn.mat” que contiene la corriente de corte Ic y las matrices de admitancias Y^+ y Y^- para n cantidad de cargas agregadas (25, 45, 60, 70 y 100) correspondientes a los porcentajes de carga en los escenarios seleccionados en la sección 4.2.

4.2.5 Estimación de señales de corriente para verificación de ajuste de los modelos (Entrenamiento)

Una vez caracterizado cada una de las condiciones de carga con los modelos (MEN) y (M2A3), las 16500 señales de tensión llamadas señales de ajuste, diseñadas en el experimento de un armónico a la vez y empleadas en la caracterización de los modelos, se utilizan como información de entrada junto con las corrientes de corte y las matrices de admitancias en las ecuaciones (3) y (5), para los dos modelos respectivamente para estimar las señales 16500 de corriente I_{mod} respuesta a cada uno de los porcentajes de carga.

Modelo (MEN)

$$\left[I_{mod(11 \times 1)} \right] = \left[I_{c(11 \times 1)} \right] + \left[Y_{(11 \times 11)} \right] \left[V_{(11 \times 1)} \right]$$

Modelo (M2A3)

$$\left[I_{mod(11 \times 1)} \right] = \left[I_{c(11 \times 1)} \right] + \left[Y^+_{(11 \times 11)} \right] \left[V_{(11 \times 1)} \right] + \left[Y^-_{(11 \times 11)} \right] \left[V^*_{(11 \times 1)} \right]$$

Los scripts de Matlab (Apéndice 1.5) y (Apéndice 1.9) tienen incorporada la etapa del entrenamiento en sus líneas de código, una vez realizada la etapa del entrenamiento se obtienen dos archivos por cada modelo con los nombres de “n_Angles_Results_Training_EN.mat” y “n_Magnitudes_Results_Training_EN” en (Apéndice 4.4) en donde n corresponde a la cantidad de cargas agregadas para cada condición de operación en estudio y contienen las señales de corriente I_{mod} respuesta del respectivo modelo ante las 16500 señales de ajuste y a su vez las señales de corriente I obtenidas mediante el modelo de circuito equivalente.

4.3 Desempeño de los modelos (Validación)

En la validación se busca estimar el desempeño de los modelos obtenidos con el método basado en algebra de matrices empleando 10.000 señales de tensión aleatorias que cumplen con el estándar UNE-EN5016 denominadas señales de desempeño tomadas de [12]. Mediante las ecuaciones (3) y (5), suministrándoles como información de entrada los modelos obtenidos en el ajuste de los modelos (sección 5.2) y las 10.000 señales de tensión aleatorias, se estiman las corrientes respuesta del sistema ante las señales de desempeño.

Posteriormente usando el modelo de circuito equivalente de la luminaria LED se obtienen las corrientes respuesta ante las mismas 10.000 señales de tensión de desempeño empleadas anteriormente.

Para realizar este procedimiento se emplea el script de MATLAB (Apéndice 1.6) para el caso del modelo (M2A3) y el script (Apéndice 1.10) para el caso del modelo (MEN). Cada uno de estos algoritmos está diseñado para estimar la corriente ante cada una de las 10.000 señales de tensión de entrada y guardarlas junto con las señales de corriente estimadas con el modelo de circuito equivalente para su posterior evaluación.

5 Evaluación del error

En [12] se plantean cinco ecuaciones dentro de las que destacan tres tipos de error MSE “Mean Squared Error”:

MSE Total

$$MSE[\%] = \frac{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu} - I_{F\mu}|^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \times 100\% \quad (6)$$

MSE Individual de Magnitud

$$MSE_{\mu}^m[\%] = \frac{\sum_{\mu=1}^h |I_{F\mu}|^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \times 100\% \quad (7)$$

MSE de desajuste individual debido al error de fase

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

En donde I_{μ} es el MSE de la señal estimada con el modelo de circuito equivalente:

$$I_{\mu} = \frac{I_{(MCE)}^2}{2} \quad (9)$$

$I_{F\mu}$ es el MSE de la señal estimada mediante los modelos basados en algebra marcial:

$$I_{F\mu} = \frac{I_{(MBAM)}^2}{2} \quad (10)$$

Mediante las cuales se busca estimar los errores de magnitud, fase y totales entre las corrientes obtenidas en el Ajuste y desempeño de los modelos.

5.1 Error de ajuste

El error de ajuste es una métrica para estimar la diferencia entre los resultados obtenidos mediante un método basado en álgebra de matrices y los resultados obtenidos en un experimento o simulación de un circuito equivalente.

La metodología incluye muestrear la información de las señales en el tiempo, transformarlas al dominio de la frecuencia, organizar las señales de tensión y corriente en matrices y usarlas como entrada para los modelos basados en álgebra matricial (MEN y M2A3). La finalidad es estimar la corriente respuesta del sistema ante las señales de tensión de ajuste utilizadas para crear el modelo matricial del sistema.

5.2 Estimación del error de ajuste

La estimación del error de ajuste se realiza comparando las señales de corriente obtenidas del "Modelo de circuito equivalente" (Señal original) con las señales de corriente obtenidas a través de los modelos basados en álgebra matricial en la sección 5.2.5 (Señal reconstruida).

Las ecuaciones (6-9) presentadas en la sección 6 permiten estimar los errores total e individual en magnitud y ángulo de fase basados en "Mean squared Error-MSE" y el teorema de Parseval [12]. Con esto, se verifica el desempeño de los modelos obtenidos previamente para los porcentajes y modelos seleccionados.

Las figuras Box-Plot para el MSE total, MSE total de magnitud y MSE de ajuste debido al error de fase se dividen en 4 secciones (Cuartiles) que representan de manera ascendente los porcentajes de los datos de error:

- 25% (1er Cuartil Q1)
- 50% (Mediana Q2)
- 75% (3er Cuartil Q3)

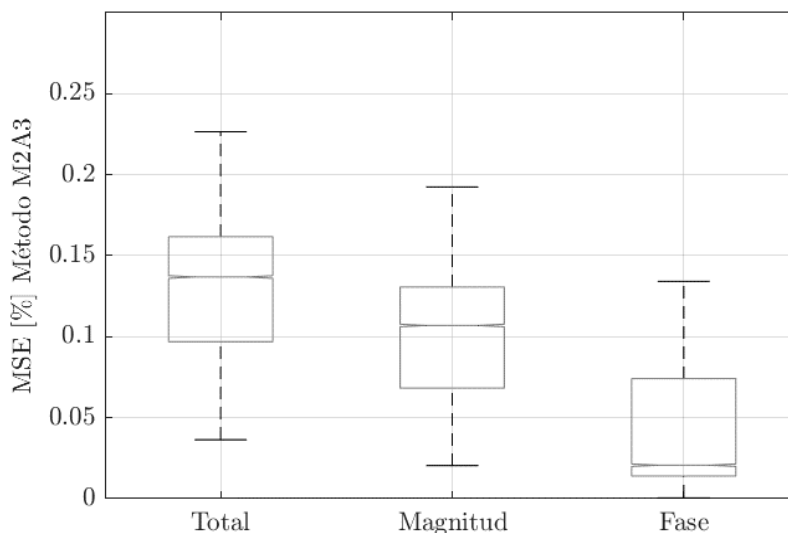
ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

- 100% (Máximo)

También se presenta el valor de error más pequeño obtenido (Mínimo) y el rango inter-cuartil (IQR) que representa la diferencia entre Q3 y Q1.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada escenario planteado: Modelo M2A3

Figura 6. MSE [%] Ajuste Modelo M2A3 con el 25% de las Luminarias LED



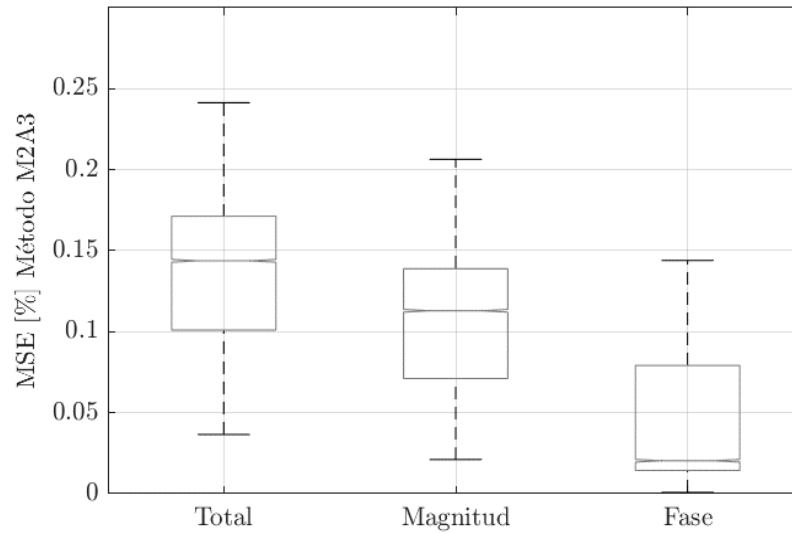
El MSE total se encuentra en un rango de 0.0364 a 0.2266, un IQR de 0.0648; El MSE de magnitud tiene un rango de 0.0205 a 0.1924, un IQR de 0.0623; El MSE de fase tiene un rango de 0.0004 a 0.1342 y un IQR de 0.0602.

Estos resultados indican que los modelos basados en álgebra matricial son eficaces en la estimación de la respuesta del sistema ante señales de tensión de ajuste. La figura Box-Plot muestra que el 75% de los datos del MSE total y de magnitud tienen un valor menor que 0.1617 y 0.1306 respectivamente, mientras que el 75% de los datos del MSE de fase tienen un valor menor que 0.0742. Además, la mediana (Q2) del MSE total y de magnitud es 0.1369 y 0.1061 respectivamente, mientras que la mediana del MSE de fase es 0.0207. Esto sugiere que el modelo

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

de circuito equivalente y los modelos basados en álgebra matricial proporcionan resultados precisos.

Figura 7. MSE [%] Ajuste Modelo M2A3 con el 45% de las Luminarias LED



El MSE total y el MSE de magnitud tienen un rango de 0.0365 a 0.2414 y de 0.0211 a 0.2065, respectivamente. El MSE de fase tiene un rango más estrecho, desde 0.0007 hasta 0.1440.

Figura 8. MSE [%] Ajuste Modelo M2A3 con el 60% de las Luminarias LED

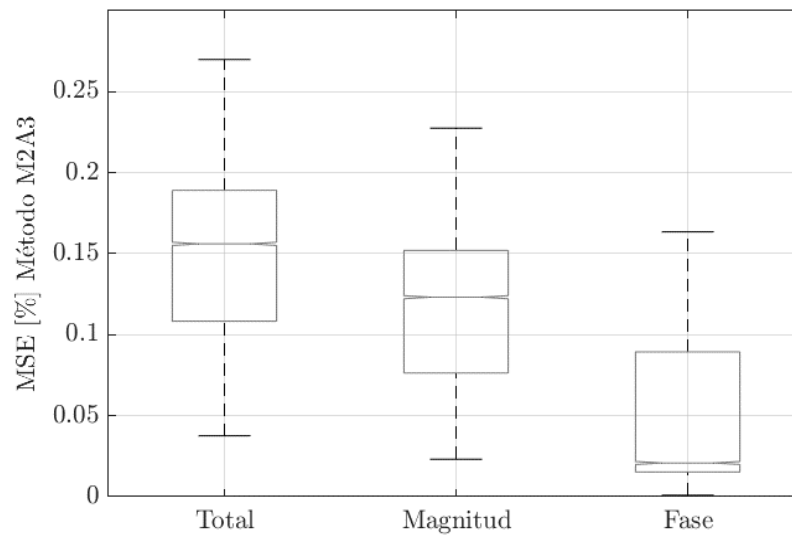


Figura 9. MSE [%] Ajuste Modelo M2A3 con el 70% de las Luminarias LED

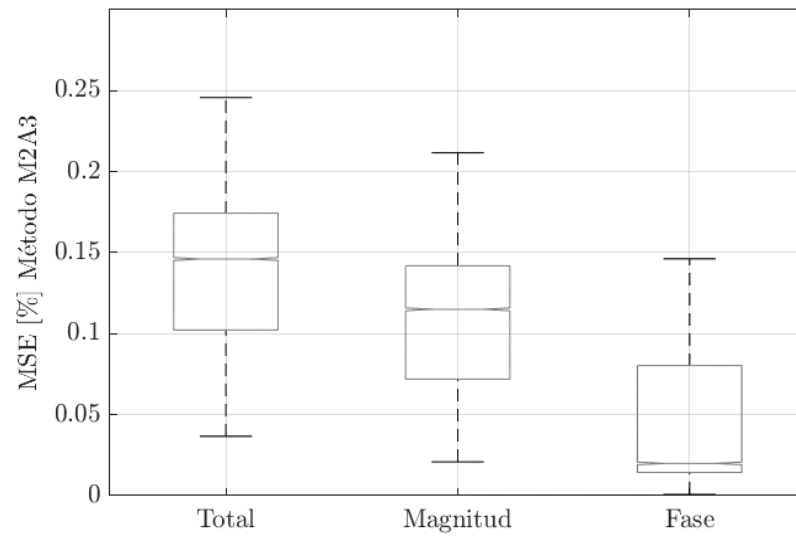
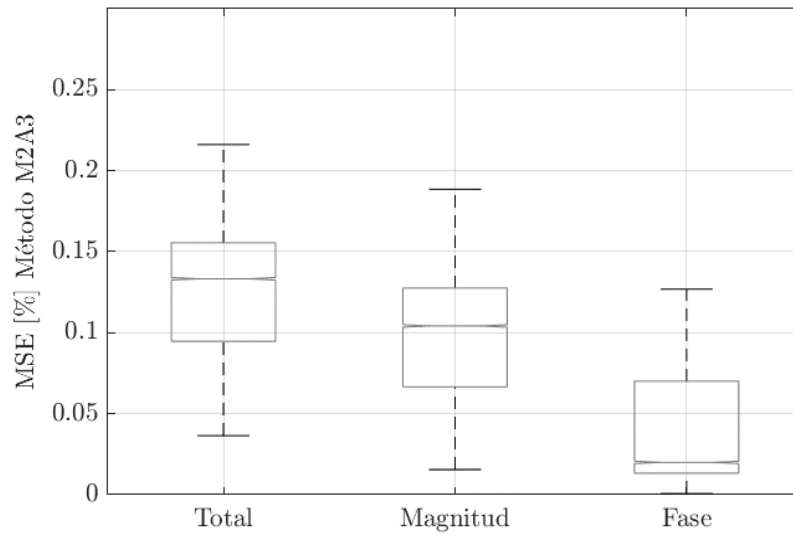


Figura 10. MSE [%] Ajuste Modelo M2A3 con el 100% de las Luminarias LED



ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Tabla 7. MSE totales de ajuste para cada porcentaje de carga, modelo (M2A3).

| Porcentaje de carga | Tipo de Error | Mínimo | Q1 | Q2 | Q3 | Máximo | IQR |
|---------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 25% | MSE Total | 0.0364 | 0.0969 | 0.1369 | 0.1617 | 0.2266 | 0.0648 |
| | MSE magnitud | 0.0205 | 0.0683 | 0.1061 | 0.1306 | 0.1924 | 0.0623 |
| | MSE Fase | 0.0004 | 0.0140 | 0.0207 | 0.0742 | 0.1342 | 0.0602 |
| 45% | MSE Total | 0.0365 | 0.1010 | 0.1438 | 0.1713 | 0.2414 | 0.0703 |
| | MSE magnitud | 0.0211 | 0.0711 | 0.1121 | 0.1389 | 0.2065 | 0.0678 |
| | MSE Fase | 0.0007 | 0.0144 | 0.0203 | 0.0792 | 0.1440 | 0.0548 |
| 60% | MSE Total | 0.0376 | 0.1084 | 0.1561 | 0.1892 | 0.2699 | 0.0811 |
| | MSE magnitud | 0.0231 | 0.0764 | 0.1222 | 0.1520 | 0.2275 | 0.0756 |
| | MSE Fase | 0.0008 | 0.0152 | 0.0199 | 0.0894 | 0.1635 | 0.0742 |
| 70% | MSE Total | 0.0367 | 0.1023 | 0.1461 | 0.1744 | 0.2458 | 0.0721 |
| | MSE magnitud | 0.0209 | 0.0720 | 0.1151 | 0.1419 | 0.2117 | 0.0699 |
| | MSE Fase | 0.0008 | 0.0144 | 0.0110 | 0.0803 | 0.1463 | 0.0659 |
| 100% | MSE Total | 0.0364 | 0.0947 | 0.1333 | 0.1556 | 0.2162 | 0.0609 |
| | MSE magnitud | 0.0155 | 0.0666 | 0.1034 | 0.1276 | 0.1886 | 0.0610 |
| | MSE Fase | 0.0007 | 0.0133 | 0.0110 | 0.0701 | 0.1269 | 0.0568 |

Se observa un incremento del error entre los porcentajes de carga del 25% al 60% y un decrecimiento del error entre los porcentajes de carga del 60% al 100%. Sin embargo, los porcentajes de error de ajuste MSE [%] para el modelo M2A3 No superan el 0.3% indicando que el método de ajuste para el modelo M2A3 tiene un rendimiento aceptable ante las señales de tensión empleadas para el ajuste del modelo.

El porcentaje de error debido al Angulo de fase es aproximadamente 50 o más veces más pequeño que el error total y su mediana Q2 se encuentra muy cercana al 0%

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Modelo MEN

Figura 11. MSE [%] Ajuste Modelo MEN con el 25% de las Luminarias LED.

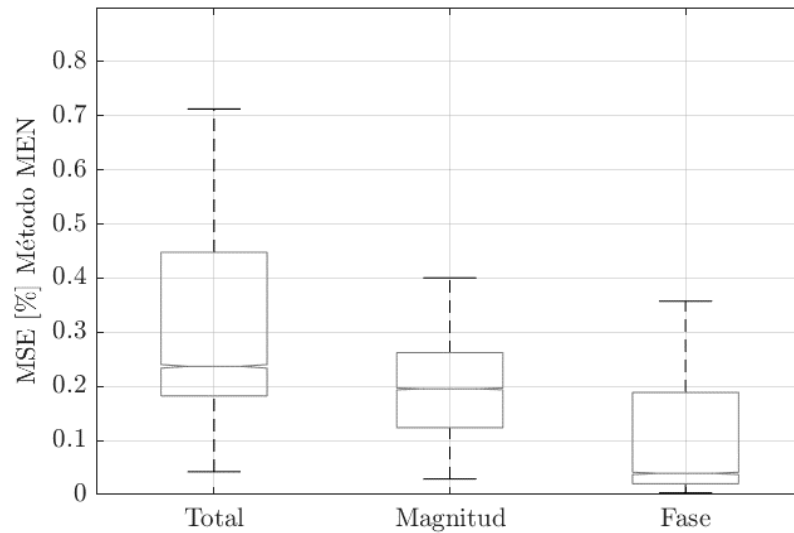
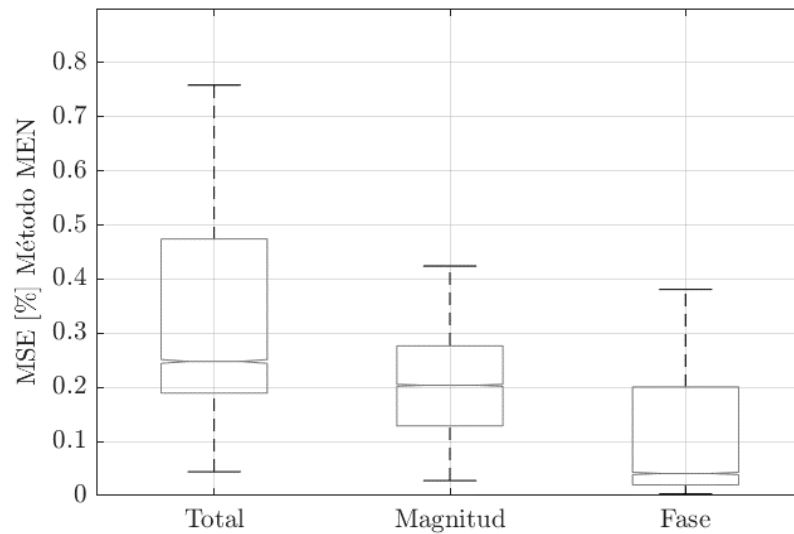


Figura 12. MSE [%] Ajuste Modelo MEN con el 45% de las Luminarias LED



ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Figura 13. MSE [%] Ajuste Modelo MEN con el 60% de las Luminarias LED

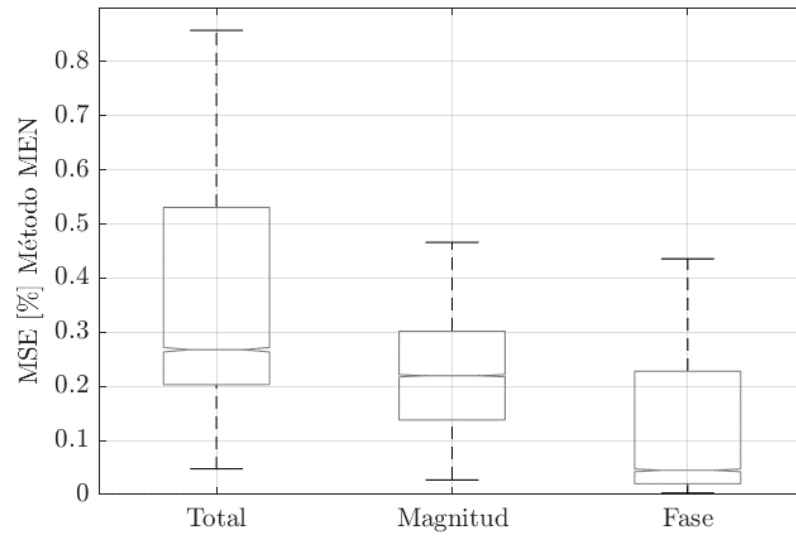
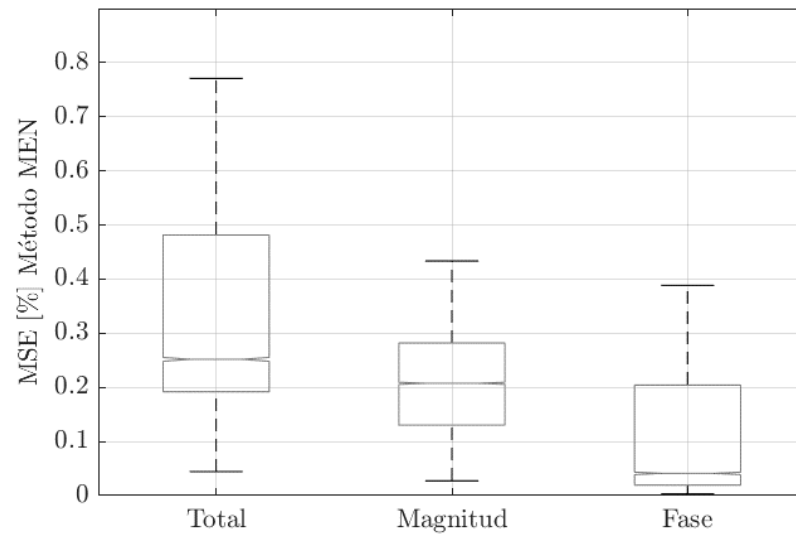


Figura 14. MSE [%] Ajuste Modelo MEN con el 70% de las Luminarias LED



ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Figura 15. MSE [%] Ajuste Modelo MEN con el 100% de las Luminarias LED

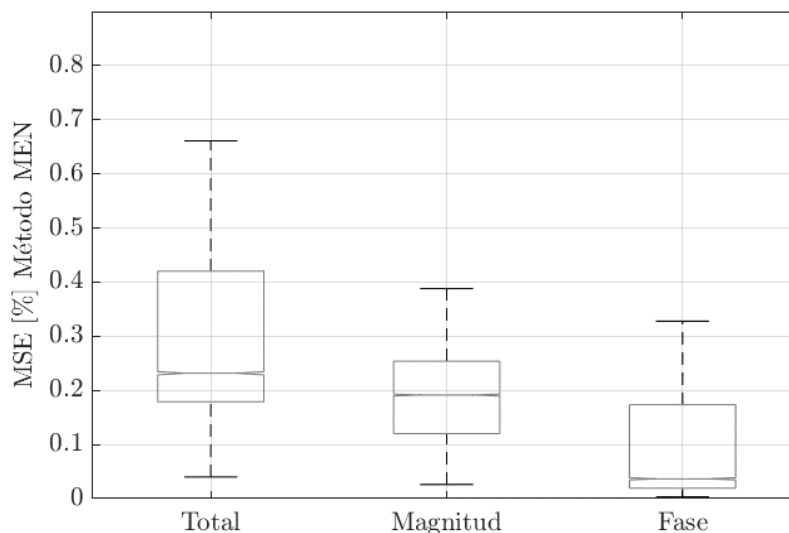


Tabla 8. MSE totales de ajuste para cada porcentaje de carga, modelo (MEN).

| Porcentaje de carga | Tipo de Error | Mínimo | Q1 | Q2 | Q3 | Máximo | IQR |
|---------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 25% | MSE Total | 0.0423 | 0.1823 | 0.2337 | 0.4476 | 0.7125 | 0.2653 |
| | MSE magnitud | 0.0288 | 0.1238 | 0.1937 | 0.2622 | 0.4005 | 0.1384 |
| | MSE Fase | 0.0032 | 0.0110 | 0.0371 | 0.1887 | 0.3573 | 0.1777 |
| 45% | MSE Total | 0.0439 | 0.1895 | 0.2479 | 0.4742 | 0.7585 | 0.2847 |
| | MSE magnitud | 0.0278 | 0.1288 | 0.2038 | 0.2766 | 0.4242 | 0.1478 |
| | MSE Fase | 0.0032 | 0.0198 | 0.0409 | 0.2006 | 0.3809 | 0.1808 |
| 60% | MSE Total | 0.0476 | 0.2032 | 0.2636 | 0.5306 | 0.8577 | 0.3274 |
| | MSE magnitud | 0.0271 | 0.1378 | 0.2176 | 0.3020 | 0.4661 | 0.1642 |
| | MSE Fase | 0.0029 | 0.0201 | 0.0449 | 0.2279 | 0.4356 | 0.2078 |
| 70% | MSE Total | 0.0444 | 0.1919 | 0.2518 | 0.4816 | 0.7708 | 0.2897 |
| | MSE magnitud | 0.0273 | 0.1303 | 0.2056 | 0.2820 | 0.4335 | 0.1517 |
| | MSE Fase | 0.0030 | 0.0194 | 0.0411 | 0.2041 | 0.3886 | 0.1847 |
| 100% | MSE Total | 0.0310 | 0.1789 | 0.2286 | 0.4203 | 0.6611 | 0.2414 |
| | MSE magnitud | 0.0261 | 0.1110 | 0.1914 | 0.2539 | 0.3879 | 0.1429 |
| | MSE Fase | 0.0031 | 0.0192 | 0.0346 | 0.1735 | 0.3277 | 0.1543 |

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

En el error de ajuste de para el modelo equivalente de Norton, se puede evidenciar que este error incrementa con la cantidad de carga entre el 25% y el 60% de la carga total y disminuye para cargas entre el 60% y el 100%.

De manera similar al modelo M2A3, el MSE debido al ángulo de fase es de alrededor de 15 veces el MSE Total y se puede observar que la mediana de estos resultados es cercana al valor de 0.

5.3 Error de desempeño

El error de desempeño busca calcular la eficiencia de un método basado en álgebra de matrices, ante medidas tomadas en laboratorio o simulaciones resultantes del modelo de circuito equivalente para estimar la corriente respuesta de un sistema ante las señales de desempeño.

5.4 Estimación del error de desempeño

La finalidad de estimar el error de desempeño es establecer el rendimiento de los modelos no solo en los puntos de operación establecidos en el experimento de un armónico a la vez sino en toda la región de operación que cumple con el estándar **ANSI C84.11 – 2011**.

Empleando las ecuaciones (6-9) de la sección 6 del mismo modo que el procedimiento para el error de ajuste, se pueden estimar los errores total e individual en magnitud y ángulo de fase basados en “Mean squared Error-MSE” y el teorema de Parseval [12], para cada modelo y cada uno de los porcentajes de carga establecidos.

Para la estimación del error de desempeño se emplean los scripts de MATLAB (Apéndice 1.6) para el caso del modelo (M2A3) y (Apéndice 1.12) para el caso del modelo (MEN).

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Modelo M2A3

Figura 16. MSE [%] Desempeño Modelo M2A3 con el 25% de las Luminarias LED

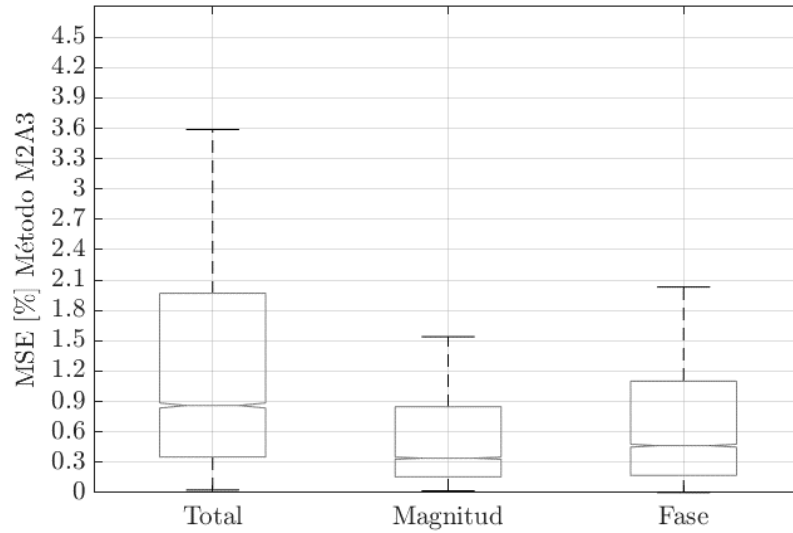
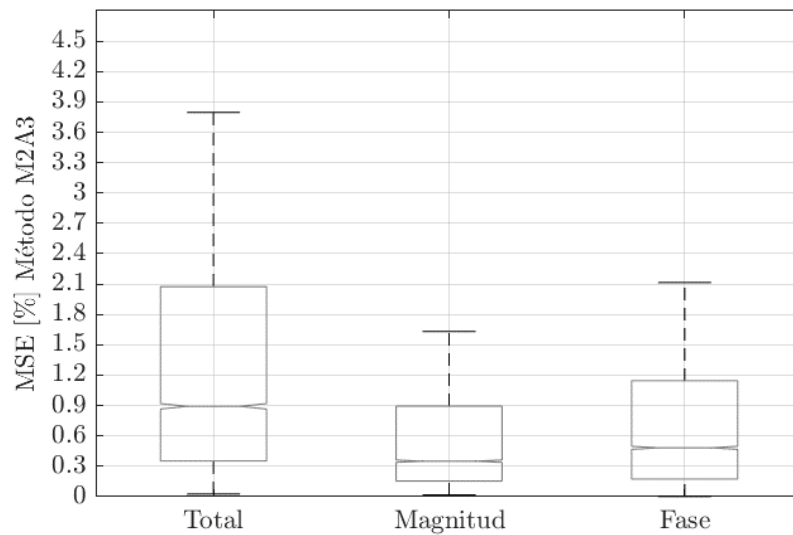


Figura 17. MSE [%] Desempeño Modelo M2A3 con el 45% de las Luminarias LED



ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Figura 18. MSE [%] Desempeño Modelo M2A3 con el 60% de las Luminarias LED

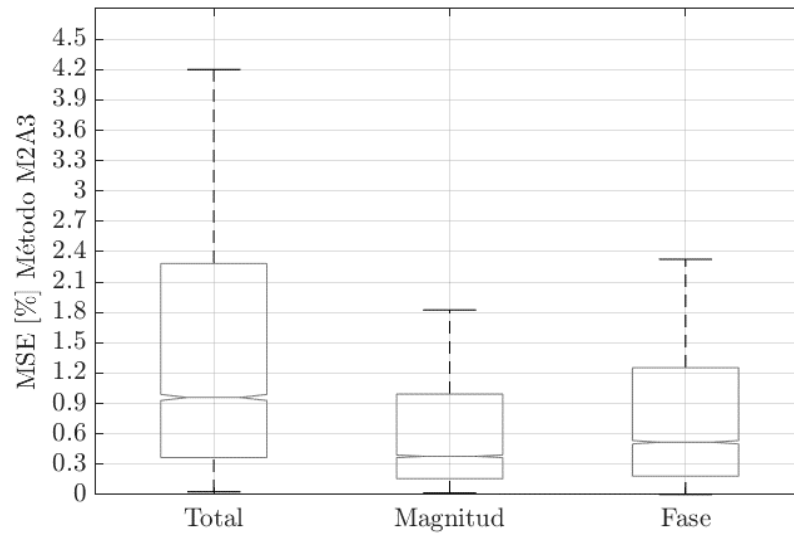
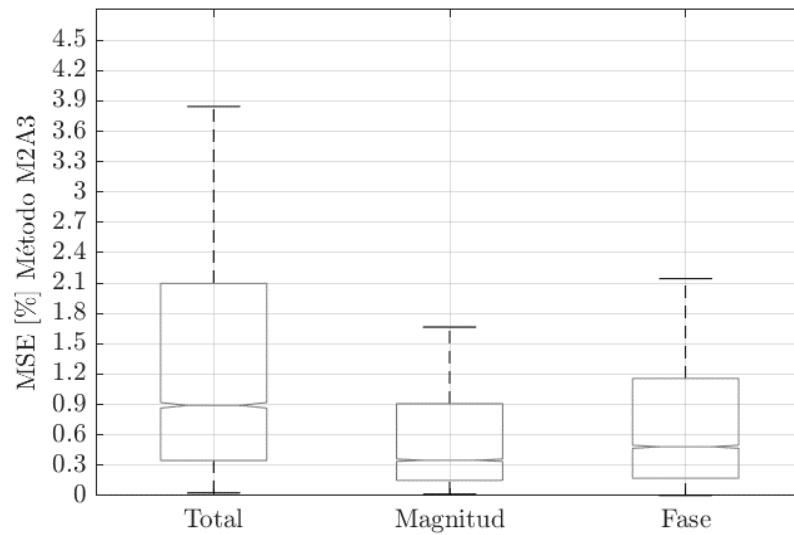


Figura 19. MSE [%] Desempeño Modelo M2A3 con el 70% de las Luminarias LED



ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Figura 20. MSE [%] Desempeño Modelo M2A3 con el 100% de las Luminarias LED

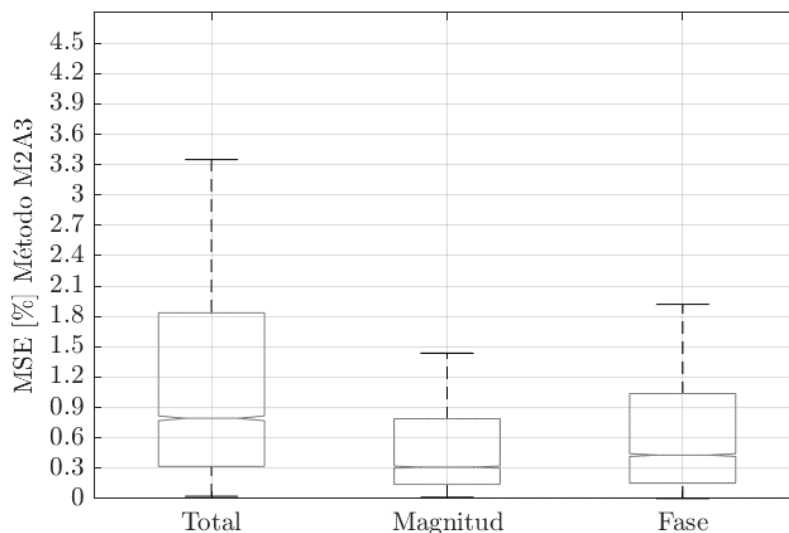


Tabla 9. MSE totales de desempeño para cada porcentaje de carga, modelo (M2A3).

| Porcentaje de carga | Tipo de Error | Mínimo | Q1 | Q2 | Q3 | Máximo | IQR |
|---------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 25% | MSE Total | 0.0263 | 0.3526 | 0.8358 | 1.9703 | 3.5875 | 1.6177 |
| | MSE magnitud | 0.0182 | 0.1565 | 0.3407 | 0.8488 | 1.5404 | 0.6923 |
| | MSE Fase | 0.0015 | 0.1710 | 0.4498 | 1.1015 | 2.0312 | 0.9305 |
| 45% | MSE Total | 0.0269 | 0.3527 | 0.8927 | 2.0744 | 3.7955 | 1.7217 |
| | MSE magnitud | 0.0164 | 0.1545 | 0.3389 | 0.8943 | 1.6324 | 0.7398 |
| | MSE Fase | 0.0016 | 0.1744 | 0.4828 | 1.1452 | 2.1157 | 0.9708 |
| 60% | MSE Total | 0.0290 | 0.3668 | 0.9601 | 2.2833 | 4.1993 | 1.9165 |
| | MSE magnitud | 0.0172 | 0.1589 | 0.3659 | 0.9939 | 1.8247 | 0.8350 |
| | MSE Fase | 0.0017 | 0.1832 | 0.5015 | 1.2545 | 2.3253 | 1.0713 |
| 70% | MSE Total | 0.0274 | 0.3473 | 0.8923 | 2.0969 | 3.8443 | 1.7496 |
| | MSE magnitud | 0.0146 | 0.1511 | 0.3383 | 0.9086 | 1.6657 | 0.7575 |
| | MSE Fase | 0.0018 | 0.1721 | 0.4833 | 1.1578 | 2.1432 | 0.9857 |
| 100% | MSE Total | 0.0233 | 0.3190 | 0.7699 | 1.8354 | 3.3498 | 1.5164 |
| | MSE magnitud | 0.0142 | 0.1413 | 0.3116 | 0.7895 | 1.4372 | 0.6482 |
| | MSE Fase | 0.0017 | 0.1542 | 0.4168 | 1.0380 | 1.9228 | 0.8838 |

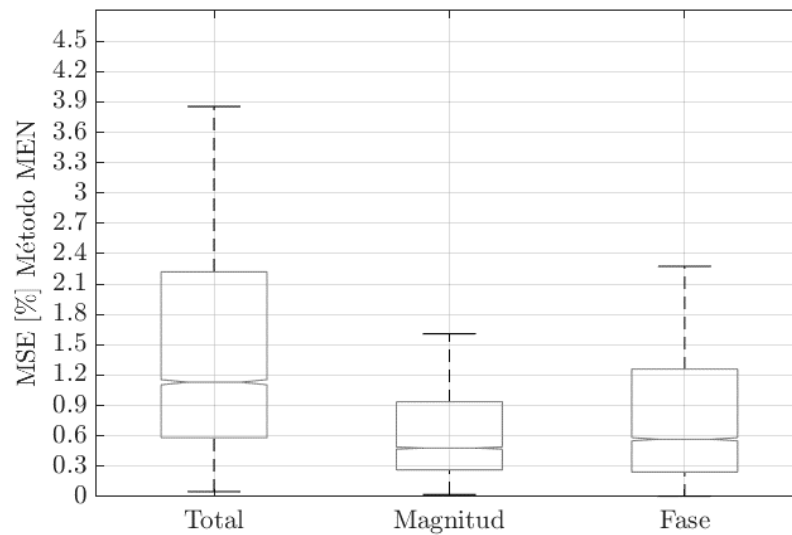
ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Verificando los resultados de los errores de desempeño del modelo M2A3 se observa una tendencia creciente en el MSE para porcentajes de carga entre el 25% y 60% y una tendencia decreciente entre el 60 y el 100%.

La mediana más baja se obtiene esta vez con el MSE de magnitud y se puede apreciar errores que no superan el 5% obteniendo su resultado más alto con el 60% de la carga.

Modelo MEN

Figura 21. MSE [%] Desempeño Modelo MEN con el 25% de las Luminarias LED



ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Figura 22. MSE [%] Desempeño Modelo MEN con el 45% de las Luminarias LED

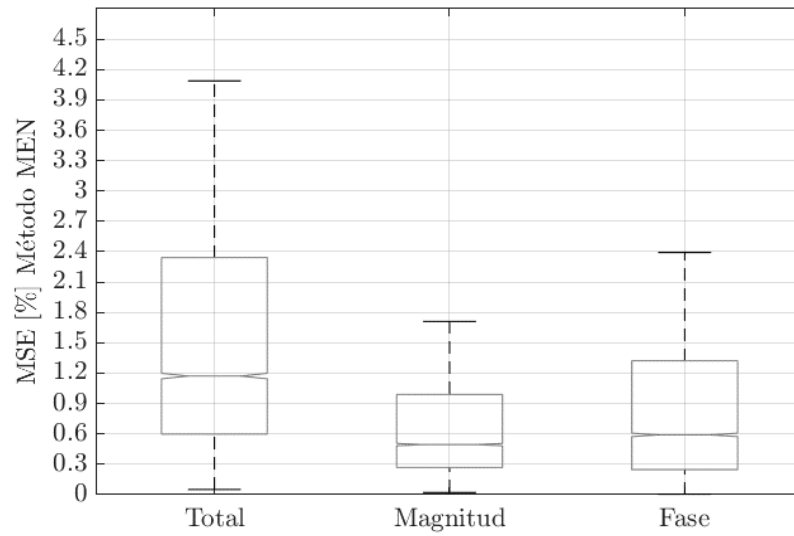
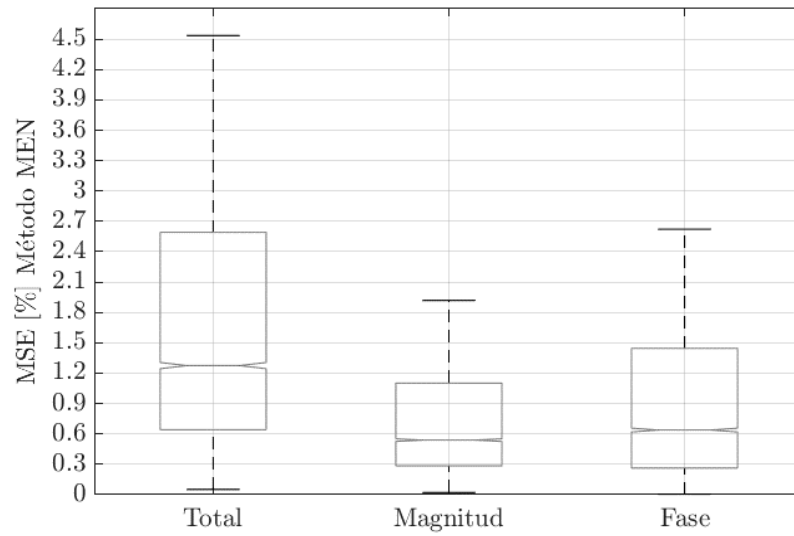


Figura 23. MSE [%] Desempeño Modelo MEN con el 60% de las Luminarias LED



ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Figura 24. MSE [%] Desempeño Modelo MEN con el 70% de las Luminarias LED

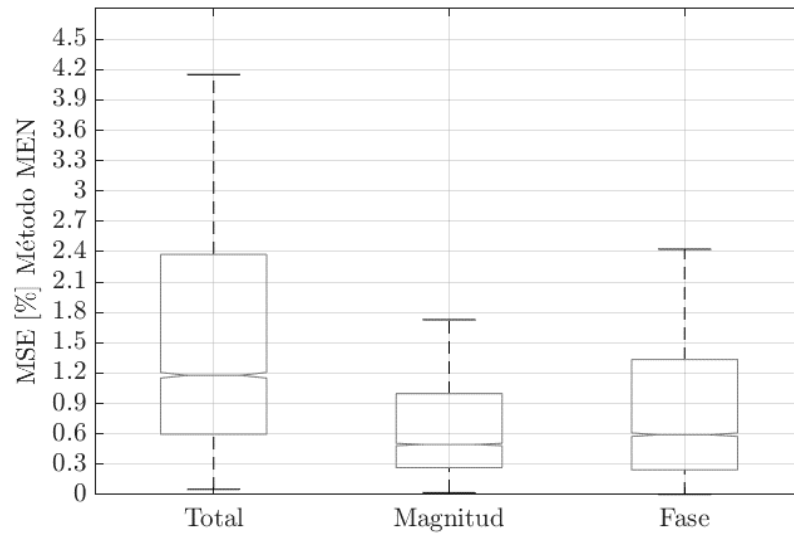
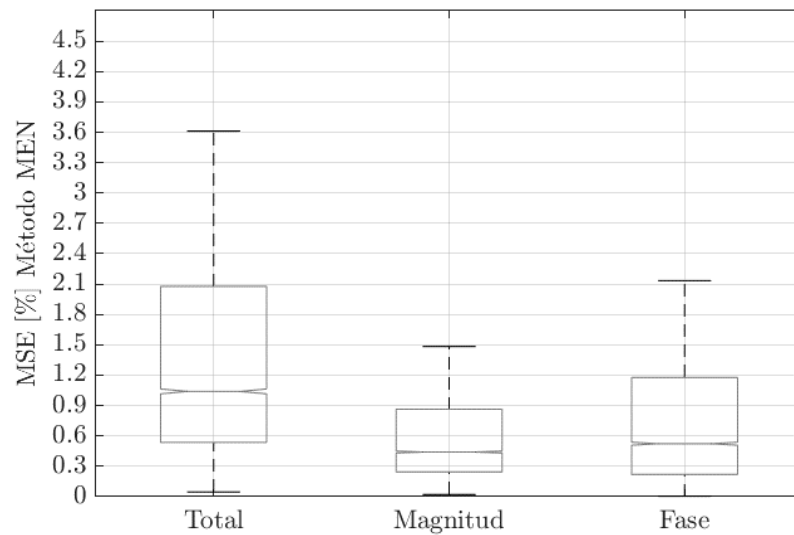


Figura 25. MSE [%] Desempeño Modelo MEN con el 100% de las Luminarias LED



ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Tabla 10. MSE totales de desempeño para cada porcentaje de carga, modelo (MEN).

| Porcentaje de carga | Tipo de Error | Mínimo | Q1 | Q2 | Q3 | Máximo | IQR |
|---------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 25% | MSE Total | 0.0495 | 0.5832 | 1.1309 | 2.2203 | 3.8542 | 1.6371 |
| | MSE magnitud | 0.0211 | 0.2649 | 0.4698 | 0.9372 | 1.6094 | 0.6678 |
| | MSE Fase | 0.0050 | 0.2433 | 0.5515 | 1.2601 | 2.2753 | 1.0168 |
| 45% | MSE Total | 0.0508 | 0.5981 | 1.1720 | 2.3428 | 4.0875 | 1.7447 |
| | MSE magnitud | 0.0211 | 0.2694 | 0.4949 | 0.9905 | 1.7112 | 0.7211 |
| | MSE Fase | 0.0049 | 0.2479 | 0.5740 | 1.3224 | 2.3931 | 1.0745 |
| 60% | MSE Total | 0.0519 | 0.6423 | 1.2753 | 2.5917 | 4.5350 | 1.9494 |
| | MSE magnitud | 0.0210 | 0.2851 | 0.5263 | 1.1025 | 1.9190 | 0.8174 |
| | MSE Fase | 0.0051 | 0.2635 | 0.6386 | 1.4452 | 2.6227 | 1.1817 |
| 70% | MSE Total | 0.0532 | 0.5968 | 1.1792 | 2.3734 | 4.1497 | 1.7766 |
| | MSE magnitud | 0.0206 | 0.2669 | 0.4959 | 0.9985 | 1.7287 | 0.7316 |
| | MSE Fase | 0.0038 | 0.2460 | 0.5925 | 1.3354 | 2.4248 | 1.0894 |
| 100% | MSE Total | 0.0461 | 0.5360 | 1.0399 | 2.0772 | 3.6116 | 1.5412 |
| | MSE magnitud | 0.0210 | 0.2449 | 0.4314 | 0.8642 | 1.4835 | 0.6148 |
| | MSE Fase | 0.0047 | 0.2110 | 0.5232 | 1.1773 | 2.1341 | 0.9663 |

Los errores MSE de desempeño para el Modelo MEN presentan del mismo modo que en el Modelo M2A3 un incremento entre el 25% y el 60% de la carga y un decrecimiento entre el 60% y el 100%.

De igual modo que en el Modelo M2A3 no se obtuvo errores mayores al 5% sin embargo en el Modelo MEN el error más grande obtenido en el 60% de la carga es de 4.4350%, siendo mayor que el 4.1993% del Modelo M2A3.

6 Evaluación de resultados

6.1 Modelo M2A3 en los resultados del Error de Ajuste

A medida que aumenta el porcentaje de carga, se observa un aumento en los valores de los tres tipos de MSE en porcentajes de carga desde el 25% al 60%. Mientras que para porcentajes de carga superiores al 60%, los MSE tiene un comportamiento inversamente proporcional. Este patrón de comportamiento se puede evidenciar en todos escenarios de evaluación planteados con los diversos porcentajes de carga agregada. Indicando que existe variación del error en escenarios con conexión y desconexión de luminarias led, sin embargo, no se detecta una tendencia marcada al incremento del MSE.

Para el porcentaje de carga del 25%, el valor mínimo de MSE Total es 0.0364 y el valor máximo es 0.2266, con un IQR de 0.0173. Para el porcentaje de carga del 45%, el valor mínimo de MSE Total es 0.0498 y el valor máximo es 0.2862, con un IQR de 0.0398. Para el porcentaje de carga del 60%, el valor mínimo de MSE Total es 0.0571 y el valor máximo es 0.3186, con un IQR de 0.0447. Para el porcentaje de carga del 70%, el valor mínimo de MSE Total es 0.0604 y el valor máximo es 0.3199, con un IQR de 0.0354. Para el porcentaje de carga del 100%, el valor mínimo de MSE Total es 0.0660 y el valor máximo es 0.3520, con un IQR de 0.0397.

El MSE Total es el tipo de error más alto en todos los porcentajes de carga, seguido por el MSE Magnitud y el MSE Fase, que es el tipo de error más bajo en todos los casos.

6.2 Modelo M2A3 en los resultados del Error de Desempeño

Los resultados de los cálculos MSE Total, MSE Magnitud y MSE Fase muestran una tendencia general de aumento entre el 25% y el 60% de carga y una tendencia a la baja para porcentajes de carga mayores al 60% de la carga. Para el MSE Total, el valor mínimo se encuentra

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

para una carga del 100% con un valor de 0.0233 y el máximo para una carga del 45% con un valor de 3.7955.

Para el MSE Magnitud, el valor mínimo se encuentra para una carga del 100% con un valor de 0.0142 y el máximo para una carga del 70% con un valor de 1.6657. Para el MSE Fase, el valor mínimo se encuentra para una carga del 25% con un valor de 0.0015 y el máximo para una carga del 60% con un valor de 2.3253.

6.3 Modelo MEN en los resultados del Error de Ajuste

Para porcentajes de carga entre el 25% y el 60% se observa una tendencia al incremento de los MSE y para porcentajes superiores al 60% de la carga, los MSE disminuyen.

Los resultados de la estimación del error de ajuste varían en términos de magnitud y distribución para diferentes porcentajes de carga. En el porcentaje de carga del 25%, se encontró un valor mínimo de 0.0423 en el MSE Total y un valor máximo de 0.7125, con un rango intercuartílico de 0.2653. El MSE Magnitud también mostró una menor magnitud en comparación con el MSE Total y el MSE Fase.

En el porcentaje de carga del 45%, los valores del MSE Total y MSE Magnitud fueron similares, con un rango intercuartílico de 0.2847 y 0.1478 respectivamente. Sin embargo, el MSE Fase mostró una mayor dispersión. En el porcentaje de carga del 60%, se encontró un aumento en el valor mínimo y máximo del MSE Total y MSE Magnitud, con un rango intercuartílico de 0.3274 y 0.1642 respectivamente. Además, el MSE Fase mostró una mayor dispersión en comparación con el porcentaje de carga anterior.

Para el porcentaje de carga del 70%, se encontraron valores similares en el MSE Total y MSE Magnitud, con un rango intercuartílico de 0.2897 y 0.1517 respectivamente. Sin embargo, el

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

MSE Fase mostró una menor dispersión en comparación con el porcentaje de carga anterior. Finalmente, en el porcentaje de carga del 100%, se encontró un valor mínimo de 0.0310 en el MSE Total y un valor máximo de 0.6611, con un rango intercuartílico de 0.2414. El MSE Magnitud también mostró una menor magnitud en comparación con el MSE Total y el MSE Fase.

6.4 Modelo MEN en los resultados del Error de Desempeño

Se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de carga para porcentajes de carga entre el 25% y el 60%, mientras que para porcentajes de carga superiores a 60%, los MSE tienden a disminuir y alcanzan su máximo valor en 60% de carga con un MSE Total de 4.5350. Por otro lado.

En cuanto a los errores en la fase, se puede ver que su MSE es más bajo a 25% y 100% de carga en comparación con otros porcentajes de carga, con un MSE Fase mínimo de 0.0038 en 70% de carga y un MSE Fase máximo de 0.0051 en 60% de carga.

En general, estos resultados sugieren que el modelo evaluado tiene un buen desempeño.

6.5 Comparación entre los modelos M2A3 y MEN

En general, los dos modelos tienen tendencias similares de los MSE con la variación de carga, sin embargo, se puede observar valores de MSE más bajos para el modelo M2A3 que para el modelo MEN, indicando que el rendimiento del modelo M2A3 es superior al rendimiento del modelo MEN.

Por otra parte, en los dos modelos se observa que los errores de desempeño son mayores a los errores de ajuste, esto debido a que los modelos fueron creados teniendo como información de entrada las señales de ajuste. Observando las gráficas, se puede concluir que para el modelo M2A3

el MSE debido al ángulo de fase es inferior al MSE de magnitud caso contrario al modelo MEN en donde se observa que el MSE de magnitud es inferior al MSE de ángulo de fase.

7 Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo de grado es evaluar la eficiencia modelando un conjunto de luminarias led de los modelos basados en algebra de matrices (MEN) y (M2A3) implementando la corrección del Modelo propuesta por (Malagon Carvajal, 2020) [12], para esto fue necesario recopilar información que nos permitió conocer los antecedentes y la base sobre la que se fundamentan estos Modelos para el modelamiento de cargas no lineales. Información dentro de la que destacan los artículos [4-12] donde se presenta el experimento de un armónico a la vez y el método basado en algebra de matrices para el ajuste de los modelos.

Previo al ajuste de los modelos, fue necesario realizar el diseño del experimento (Simulaciones). Para ello, se define la cantidad de luminarias tipo LED que conforman la carga agregada total para tomar porcentajes de esta como escenarios de análisis. Los diferentes puntos de operación correspondientes a cada variación de la tensión de alimentación para el experimento de un armónico a la vez. Esto permitiría obtener las señales medidas a través de la respuesta en corriente, formando en conjunto la zona de operación.

En el diseño del experimento se especifican parámetros importantes, como el número de medidas, el número de armónicos de interés y los límites de distorsión individual justificados y asignados por estándares y normas internacionales. Además, se desea evaluar la incidencia de la conexión y desconexión de cargas con naturaleza no lineal, partiendo de diferentes zonas de operación (porcentajes de carga agregada). La cantidad de cargas conectadas en el punto de acople

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

en común tendría un comportamiento en base a las curvas de demanda diaria proporcionada por el operador de red EBSA.

En cuanto a los procedimientos técnicos, se especificó que se tomarían 2560 muestras por ciclo. Sin embargo, debido al tamaño de las variables, fue necesaria una decimación para obtener 256 muestras por ciclo para los casos de 70% y 100% de la carga total.

A pesar de haber reducido el número de muestras mediante una decimación, se respetó el principio de Nyquist al considerar que de la transformada de Fourier se obtendría hasta el armónico 21.

Además, se consideraron 10 ciclos para el periodo de estabilización del modelo de circuito equivalente. Esto es necesario para asegurar que el modelo esté estabilizado antes de comenzar a tomar las mediciones y finalmente tomar como ventana de observación el último ciclo.

En cuanto a la selección de la carga, se seleccionaron 100 luminarias LED producto de una estimación del porcentaje de carga entregada en el secundario de un transformador de 30kVA. Los porcentajes del valor total de luminarias para analizar se establecieron en 25%, 45%, 60%, 70% y 100%, de acuerdo con las gráficas de demanda diaria por estratos de la norma EBSA. Se consideraron 72 ángulos de fase y 20 variaciones de distorsión aplicadas a los primeros 11 armónicos impares (hasta el 21) de la tensión de alimentación durante la obtención de las señales para cada escenario de carga agregada planteado.

En general los resultados de los MSE totales, de magnitud y debidos al ángulo de fase para los modelos M2A3 y MEN indican buen rendimiento en la estimación de la corriente de todos los escenarios de carga agregada planteados sin superar el 1% en el MSE para el ajuste y 5% en el

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

MSE de desempeño. Sin embargo, se observa un mejor rendimiento en el modelo M2A3 en todos los casos.

Se observa que a pesar de que existe variación en los MSE dependiendo de la cantidad de carga agregada, no hay una tendencia al incremento del error tomando como base las 100 luminarias led ya que los MSE incrementan hasta los escenarios con 60% de la carga agregada, pero con porcentajes de carga superiores el MSE disminuye hasta obtener resultados similares con el 100% de la carga que con el 25% de la carga.

En el modelo M2A3 se observa que el MSE debido al ángulo de fase es inferior al MSE de magnitud, contrario al modelo MEN donde el MSE de magnitud es inferior al MSE debido al ángulo de fase.

Referencias

- [1] Wang, Y. -J., O'Connell, R. M., & Brownfield, G. (2001). Modeling and prediction of distribution system voltage distortion caused by nonlinear residential loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(4), 744-751. <https://doi.org/10.1109/61.956765>
- [2] López-Martín, V. M., Azcondo, F. J., & Pigazo, A. (2018). Power Quality Enhancement in Residential Smart Grids Through Power Factor Correction Stages. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(11), 8553-8564. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2813965>
- [3] Matvoz, D., & Maksic, M. (2008). Impact of compact fluorescent lamps on the electric power network. In *Harmonics and Quality of Power* (pp. 1-6). <https://ieeexplore.org/abstract/document/4633297>
- [4] Hu, H., He, Z., Li, X., Wang, K., & Gao, S. (2016). Power-Quality Impact Assessment for High-Speed Railway Associated with High-Speed Trains Using Train Timetable—Part I: Methodology and Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(2), 693-703. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2472994>
- [5] Watson, N., Scott, T., & Hirsch, S. (2009). Implications for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps. *IEEE Trans. Power Delivery*, 24(3), 1521-1528.
- [6] Matvoz, D., & Maksic, M. (2012). Comparison of LED and CFL lamps and their impact on electric power network. In *Harmonics and Quality of Power* (pp. 320-327). <https://ieeexplore.org/abstract/document/6290682>
- [7] da Silva, R. P. B., Brito, V. H. F., de Carvalho, E. O. P., David, M. M., Quinalia, M. S., & da Silva, L. C. P. (n.d.). The influence of compact fluorescent lamps in power measurement and billing. *IEEE Latin America Trans.*

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

[8] Nassif, A. B., Yong, J., & Xu, W. (2010). Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 4(3), 363-375. <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2010.0409>

[9] Barros, J., Diego, R. I., & De Apraz, M. (2013). A discussion of new requirements for measurement of harmonic distortion in modern power supply systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1-2. <https://ieeexplore.org/abstract/document/6516375>

[10] Caicedo, J. E., Romero, A. A., Zini, H. C., Langella, R., Meyer, J., & Watson, N. R. (2018). Impact of reference conditions on the frequency coupling matrix of a plug-in electric vehicle charge. *IEEE*, 2-6. <https://ieeexplore.org/abstract/document/8428>

[11] Molina, J., Mesas, J., Mesbahi, N., & Sainz, L. (2016). LED lamp modelling for harmonic studies in distribution systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(18), 4237-4244. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1696>

[12] Malagon Carvajal, G. A. (2020, December). Métodos de modelado y simulación para la evaluación de la distorsión de cargas basadas en fuentes conmutadas considerando los fenómenos de diversidad y atenuación-amplificación. Bucaramanga, Santander, Colombia

Apéndices

Informe de Códigos y Circuito para Trabajo de Grado

I. Circuito en Dominio del Tiempo

Nombre: Modelo_Led_V1.slx

Función: Generación de señales de tensión y corriente para carga no lineal LED usando Matlab-Simulink.

II. Scripts

Cantidad: 12

Nombres:

Apéndice_1_1_cod01_gen_100_Lum_led_parameters.m

Apéndice_1_2_cod02_Run_Simulation_V1.m

Apéndice_1_3_cod03_Run_Simulation_Validation_V1.m

Apéndice_1_4_cod04_Frequency_Sweep_Standard_Led_V2.m

Apéndice_1_5_cod05_Metodo_BAM_M2A3.m

Apéndice_1_6_cod06_Compute_Validation_M2A3.m

Apéndice_1_7_cod07_Plot_Power_Error_Training_M2A3.m

Apéndice_1_8_cod08_Plot_power_Error_Validation_M2A3.m

Apéndice_1_9_cod09_Metodo_BAM_MEN.m

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Apéndice_1_10_cod10_Compute_Validation_MEN.m

Apéndice_1_11_cod11_Plot_Power_Error_Training_MEN.m

Apéndice_1_12_cod12_Plot_power_Error_Validation_MEN.m

Funciones utilizadas (Apéndice_4_1)

harmonic_optimize_sin.m

Int_sim_Led.m

angled.m

Orden de Ejecución: 1-12

III. Archivos Adicionales

Cantidad: 12

Nombres:

Signals_For_Led_01.mat

01_Signals_FD_Training_01.mat

25_Angles_Results_Training_EN.mat

25_Angles_Results_Validation_EN.mat

25_Error_Results_Training_EN.mat

25_Error_Results_Validation_EN.mat

25_Magnitudes_Results_Training_EN.mat

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

25_Magnitudes_Results_Validation_EN.mat

25_Models_Ic_Yp_Yn.mat

25_Models_Ic_Y.mat

100_Lum_led_parameters.mat

Signals_Validation_EN.mat

Nota: Los archivos adicionales se generan automáticamente después de la ejecución de cada script siguiendo el orden indicado.

Apéndice_1: Todos los scripts de Matlab que se emplean para ejecutar el procedimiento planteado en este trabajo de grado.

Apéndice_2: Archivo de datos de Matlab que almacena los parámetros de las luminarias led empleadas en este trabajo de grado.

Apéndice_3: Archivo Simulink Model que contiene el modelo de luminaria led empleado en este trabajo de grado.

Apéndice_4: Carpetas donde se almacenan los resultados de scripts del Apéndice_1 y funciones empleadas por scripts del Apéndice_1.

El archivo Apéndice_1_2 y Apéndice_1_3 son los encargados de realizar la recolección de datos del circuito en el dominio del tiempo. La recolección se realiza mediante la implementación del archivo de Simulink Apéndice_3_1.

El archivo Apéndice_1_2 y Apéndice_1_3 incluyen variables importantes como: número de pasos: 20, representa el número de variaciones en magnitud de la tensión de alimentación,

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

numero de pasos ángulo: 72, representa el número de variaciones en ángulo de la tensión de alimentación, porcentaje de inicio: 0,1%, representa el porcentaje desde donde se inicia la primera variación en magnitud, numero de armónicos implementados: hasta qué orden de armónicos impares se implementaron para la recolección de datos.

Después de definir estas variables, se realiza un ciclo for en el cual se distorsiona la tensión de alimentación según los estándares UNE-EN50160, explicados en la sección 2.2. La señal resultante se almacena en el dominio del tiempo en Apéndice_4_3 y se realiza una FFT (Fast Fourier Transform) para transformarla al dominio de frecuencia en Apéndice_1_4. Todas las señales en el dominio de frecuencia se almacenan en Apéndice_4_3.

En los scripts de Matlab, Apéndice_1_9 y Apéndice_1_5, se aplican los modelos de matrices armónicamente acopladas (MMAA), el modelo MEN (M-MEN) y su variación, respectivamente, para estimar las señales de corriente. Estos modelos fueron propuestos en este trabajo de grado en la sección 5.

Los scripts utilizan los datos del archivo Apéndice_2_1 para estimar las señales mediante la matriz concatenada correspondiente a cada modelo.

Los códigos implementan la organización matricial propuesta por (Malagón Carvajal, 2020) y realizan el cálculo de la matriz concatenada. Al ejecutar cada script, se guarda un archivo de datos de Matlab en Apéndice_4_5.

Los scripts Apéndice_1_6 y Apéndice_1_10 permiten estimar las corrientes de cada modelo usando como tensión de alimentación las 10.000 señales desempeño tomadas de (Malagón Carvajal, 2020) y guardarlas en Apéndice_4_2.

ANÁLISIS DE UN MÉTODO PARA AJUSTE DE MODELOS EN LA FRECUENCIA

Los scripts Apéndice_1_7 y Apéndice_1_11 estiman los errores MSE de ajuste para cada modelo, los grafican y los guardan en archivo de datos de Matlab en Apéndice_4_4, mientras que los scripts Apéndice_1_8 y Apéndice_1_12 estiman los errores MSE de desempeño y los guardan en archivo de datos de Matlab en Apéndice_4_4.

Apéndice 5. Se presentan algunas formas de onda de las corrientes estimadas mediante los modelos de matrices armónicamente acopladas y equivalente de Norton junto con las formas de onda de la corriente obtenida mediante el modelo de circuito equivalente.