

Métodos de modelado de cargas agregadas en un punto de acople común utilizando modelos en el dominio de la frecuencia frente al uso de modelos en el dominio del tiempo

Edinson Fabián Adarme López

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 Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mis padres, Edinson y Hemerita, y mis hermanos, Karen, Daniel, Camila, Nicolás y Sofia, quienes han sido mi apoyo incondicional a lo largo de mi vida y especialmente a lo largo de mi carrera. Gracias por su comprensión, paciencia y sobre todo su amor durante los momentos mas difíciles, sin su aliento y ayuda, no hubiera sido posible alcanzar este logro.

En especial quiero agradecerle y dedicarle este trabajo de grado a mis abuelos, Carmen, Eduardo, María Angelina y Pablo, quienes fueron mi fuente de inspiración, motivación y fuerza para completar este trabajo de grado.

Edinson Fabián Adarme López

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios por la fortaleza y el entendimiento, para poder terminar con éxito una de las mejores etapas de mi vida, agradezco a mis papas, a mi hermanos, a toda mi familia, a mi novia y a mis amigos por su apoyo incondicional, por siempre creer en mí y acompañarme durante todo el camino.

Deseo agradecer a mi codirector Gabriel Alexis Malagón, a mi director César Antonio Duarte y al profesor Gabriel Ordoñez, por su valiosa guía y su apoyo constante a lo largo de todo el proceso de investigación y mi carrera. Su conocimiento, orientación y paciencia han sido invaluable para el éxito de este proyecto de grado.

También quiero expresar mi gratitud a todas aquellas personas que, de una u otra manera, aportaron y contribuyeron en mi formación académica y personal.

A todos ustedes, y a los que me faltó, muchas gracias.

Tabla de Contenido

| | pág. |
|---|-----------|
| 1. Objetivos | 13 |
| 2. Ajuste de modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia | 14 |
| 2.1. Señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación | 21 |
| 2.1.1. Ajuste del modelo | 25 |
| 2.2. Señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente independientes | 25 |
| 2.2.1. Ajuste del modelo | 27 |
| 2.3. Señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente dependientes | 28 |
| 2.3.1. Ajuste del modelo | 32 |
| 3. Validación de los modelos | 34 |
| 3.1. Señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación | 36 |
| 3.2. Señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente independientes | 38 |
| 3.3. Señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente dependientes | 39 |
| 3.4. Evaluación del error | 40 |
| 4. Evaluación de ajuste y de desempeño del método | 43 |
| 4.1. Resultados señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación | 44 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2. Resultados señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente independientes | 45 |
| 4.3. Resultados señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente dependientes | 45 |
| 5. Análisis de resultados | 50 |
| 6. Conclusiones | 57 |
| 7. Recomendaciones y trabajos futuros | 60 |
| Referencias Bibliográficas | 62 |

Lista de Figuras

| | pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Modelo de circuital equivalente de cargas <i>SMPS</i> y <i>CFL</i> . | 14 |
| Figura 2. Evaluación del desempeño del método para los diferentes valores de λ_1 | 46 |
| Figura 3. Error $E[\%]$ para las señales a) de ajuste y b) de validación para cada experimento. | 49 |

Lista de Tablas

| | pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Distorsión máxima por orden armónico y total. | 16 |
| Tabla 2. Distribuciones de probabilidad para los parámetros del modelo circuital | 17 |
| Tabla 3. Resultados de las tres (3) soluciones para ajustar el <i>M2A3</i> . | 47 |
| Tabla 4. Síntesis de resultados de cada uno de los tres (3) experimentos de ajuste para el <i>M2A3</i> . | 56 |

Resumen

Título: Métodos de modelado de cargas agregadas en un punto de acople común utilizando modelos en el dominio de la frecuencia frente al uso de modelos en el dominio del tiempo. ¹

Autor: Edinson Fabián Adarme López ²

Palabras Clave: Modelo, punto de acople común (*PCC*), cargas agregadas, dominio, frecuencia, sobre-ajuste, tiempo.

Descripción: Este trabajo de grado busca diseñar e implementar un procedimiento para analizar las posibles soluciones a los problemas asociados con las matrices de medidas de tensión, como el mal condicionamiento de la matriz, el sobreajuste de los datos y problemas mal definidos o mal puestos, sobre las cuales se apoyan los métodos de ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia. Para esto se diseñan tres experimentos para obtener señales de tensión de alimentación con el fin de estudiar estos problemas, los cuales se pueden presentar en el ajuste de los modelos. El primer experimento simula el escenario donde se obtienen medidas de tensión en un laboratorio por medio de una fuente programable; el segundo, simula el escenario cuando se toman medidas en un *PCC* a lo largo de un intervalo de tiempo amplio, o durante diferentes horas del día donde es posible seleccionar señales linealmente independientes; y el tercero simula el escenario cuando se toman medidas en un *PCC* a lo largo de un intervalo de tiempo corto y hay probabilidad de que la tensión no varíe significativamente, y por tanto es posible que las señales sean linealmente dependientes. Finalmente, se realiza una evaluación del desempeño del método de ajuste y validar su aplicabilidad en escenarios reales de medición.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: César Antonio Duarte Gualdrón, PhD. Electrical and Computer Engineering. Codirector: Gabriel Alexis Malagón Carvajal, Doctor en Ingeniería.

Abstract

Title: Aggregate load modeling methods at a common coupling point using models in the frequency domain versus the use of models in the time domain³

Author: Edinson Fabián Adarme López⁴

Keywords: Model, common coupling point (PCC), aggregate loads, domain, frequency, time.

Description: This undergraduate research thesis aims to design and implement a procedure to analyze the possible solutions to problems associated with voltage measurement matrices, such as *ill-conditioned matrix problems*, *over-fitting problems* and *ill-posed problems*, which are the basis for model fitting methods in the frequency domain. For this purpose, three experiments are designed to obtain voltage signals measurements in order to study these problems that may appear in the model fit. The first experiment simulates the scenario where voltage measurements are obtained in a laboratory using a programmable source. The second experiment simulates the scenario where measurements are taken at a PCC (Point of Common Coupling) over an extended period of time or during different hours of the day, allowing the selection of linearly independent signals. The third experiment simulates the scenario where measurements are taken at a PCC over a short period of time, and there is a probability that the voltage does not vary significantly, thus making it possible for the signals to be linearly dependent. Finally, an evaluation of the performance of the fitting method is conducted to validate its applicability in real-world scenarios.

³ Undergraduate Research Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: César Antonio Duarte Gualdrón, PhD. Electrical and Computer Engineering. Codirector: Gabriel Alexis Malagón Carvajal, PhD. Electrical Engineering.

Introducción

La *Ley de Ohm* ($V = IR$) busca una relación entre la tensión y la corriente de un elemento que compone un circuito, lo cual tiene muchas implicaciones, desde obtener la respuesta en corriente de un elemento para una tensión dada, hasta poder determinar la relación que existe entre la tensión y la corriente mediante un modelo de carga.

Inicialmente, las cargas eléctricas eran de naturaleza resistiva, lineales e invariantes en el tiempo. Con el tiempo, aparecieron cargas inductivas y capacitivas, las cuales mantenían las mismas características. Sin embargo, en los últimos años han aparecido cargas que no tienen características lineales debido al avance de la tecnología basada en electrónica, los sistemas de control y los requisitos operativos en los sistemas eléctricos modernos; por lo tanto, hacen que no sea posible obtener una relación entre la tensión y la corriente a partir de la *Ley de Ohm*.

Esta no linealidad en las cargas plantea un gran desafío para los diseñadores y los operadores de los sistemas eléctricos, por lo que ha surgido un interés progresivo de parte de la academia y la industria en investigar y proponer mejores modelos para el análisis armónico, que involucren los cambios ocasionados por estos elementos, así como las fuentes de generación no convencionales.

En la práctica, muchas cargas tienen comportamientos no lineales, es decir, que la relación entre la tensión y la corriente no es siempre constante sino que puede variar en función de diversos parámetros como la frecuencia, la amplitud de la tensión de alimentación, la temperatura, entre otras; este tipo de cargas se conocen en la literatura como cargas no lineales. Debido a que éstas se han integrado al sistema eléctrico actual, se han presentado múltiples problemas entre los cuales

destacan las fallas en los equipos y procesos debido a la distorsión armónica, esto resulta en altos costos de operación y mantenimiento. Estas pérdidas, en general, se estiman analizando problemas relacionados con las características de la distorsión.

En este trabajo de grado se plantean tres diferentes experimentos para estudiar y analizar las posibles soluciones a los problemas de ajuste asociados con las matrices de medidas de tensión de alimentación, sobre las cuales se apoyan los métodos de ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia como el *Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas - M2A3* [Malagon-Carvajal et al. (2023)] para estimar corrientes agregadas en un punto de acople común. Estas soluciones se ponen a prueba evaluando su desempeño en la estimación de corrientes armónicas a partir del cálculo de un error de desempeño tomando como base los resultados obtenidos para un modelo en el dominio del tiempo.

El presente trabajo se estructura en los siguientes capítulos: en el Capítulo 2 se describe el modelo de carga en el dominio de la frecuencia así como el método de ajuste para cada experimento por medio de las señales de tensión y corriente de ajuste; en el Capítulo 3 se obtienen múltiples estados de operación para la evaluación de desempeño del método a través de las señales de tensión de validación presentando la figura de mérito del error; en el Capítulo 4 se hace la evaluación del error de ajuste y de desempeño del método usado para obtener el modelo en el dominio de la frecuencia; en el Capítulo 5 se discuten los resultados obtenidos; y finalmente, en el Capítulo 6 se exponen las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

De esta forma, se espera ampliar la visión sobre la relación entre la tensión de alimentación y la corriente agregada en cargas no lineales para la obtención de modelos de cargas en el dominio

de la frecuencia, lo que contribuye al avance del conocimiento en el campo de modelado de cargas permitiendo mejorar el diseño y rendimiento de los sistemas eléctricos.

1. Objetivos

A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo de grado.

Objetivo general

Implementar un método para la estimación de corrientes agregadas en un punto de acople común (*PCC*) teniendo en cuenta posibles problemas asociados con el ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia relacionados con las medidas de tensión en el *PCC*.

Objetivos específicos

1. Ajustar modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia para un conjunto de cargas modeladas en el dominio del tiempo.
2. Simular múltiples estados de operación en el dominio de la frecuencia del conjunto de cargas agregadas como señales de entrada de tensión y corriente para el ajuste de un modelo de carga agregada en el dominio de la frecuencia.
3. Ajustar un modelo en el dominio de la frecuencia para la carga agregada explorando un método de relajación del problema debido a posibles problemas de sobreajuste, matrices mal condicionadas o problemas mal puestos.

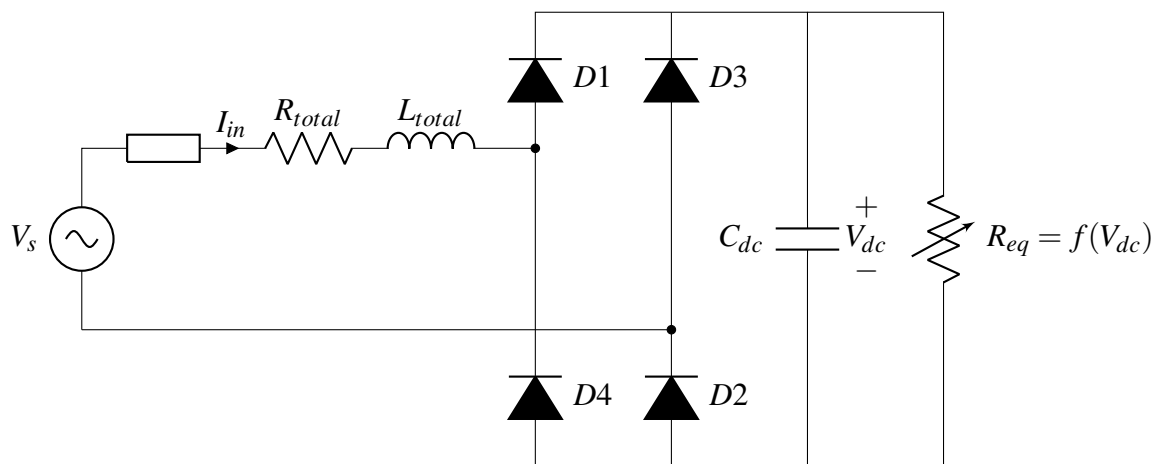
2. Ajuste de modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia

En este capítulo se ajustan modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia para un conjunto de cargas modeladas en el dominio del tiempo. En donde se implementan los tres experimentos en condiciones de simulación haciendo uso de modelos de carga. Estas cargas son obtenidas a partir de la variación de los parámetros que conforman su respectivo modelo equivalente circuital (*Figura 1*) o modelo individual en el dominio del tiempo.

Se usan tres tipos de cargas basadas en fuentes conmutadas (*SMPS*), con compensación del factor de potencia de tipo pasivo (*SMPS p-FP*), sin compensación (*SMPS no-FP*) y lámparas fluorescentes compactas (*CFL*), esto permite generar una muestra de cargas diferentes conectadas al mismo punto de acople común (*PCC*). Este conjunto de cargas es modelada mediante un modelo de carga individual en el dominio de la frecuencia a partir de los diferentes puntos de operación de la tensión de alimentación y la corriente de carga agregada en el dominio del tiempo.

Figura 1

Modelo de circuital equivalente de cargas *SMPS* y *CFL*.



Cuando se habla de modelos de carga individual en el dominio del tiempo se hace referencia al modelo circuital de cada tipo de carga presentado en Djokic and Collin (2014) y la implementación de las ecuaciones solución presentadas en Malagon-Carvajal et al. (2021) y Malagon-Carvajal et al. (2023) del modelo. A partir de cada uno de estos modelos se obtienen las respuestas en corriente del modelo de cada carga y partir de la suma de estas corrientes se obtiene la respuesta en corriente agregada del modelo de carga agregada.

El modelo de carga individual en el dominio de la frecuencia es un modelo de carga agregada el cual es ajustado a partir de las señales de corriente agregada y la tensión de alimentación en el *PCC* utilizando el Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (*M2A3*). En este trabajo de grado se plantean tres experimentos para la obtención de las señales de tensión de alimentación y corriente agregada para el ajuste del *M2A3*, estas señales son denominadas como señales de ajuste:

1. Mediante señales obtenidas de la variación sistemática de la magnitud y ángulo de fase en donde se tiene control de la tensión de alimentación, cumpliendo los límites de regulación y distorsión individual y total (ver Tabla 1), e.g., como se hace en un laboratorio con una fuente programable.
2. A través de señales aleatorias en donde no se tiene control de la tensión de alimentación pero las señales son linealmente independientes entre sí, cumpliendo los límites de regulación y distorsión individual y total (ver Tabla 1), e.g., como se hace para cuando se toman medidas en un *PCC* a lo largo de un intervalo de tiempo amplio, o durante diferentes horas del día

donde es posible seleccionar señales linealmente independientes.

3. Por medio de señales aleatorias en donde no se tiene control de la tensión de alimentación pero las señales son linealmente dependientes, cumpliendo los límites de regulación y distorsión individual y total (ver Tabla 1), e.g., como se hace para cuando se toman medidas en un PCC a lo largo de un intervalo de tiempo corto y hay probabilidad de que la tensión no varíe significativamente, y por tanto es posible que las señales sean linealmente dependientes.

Tabla 1

Distorsión máxima por orden armónico y total.

| Armónicos impares | | | | Componente fundamental |
|---------------------|--------|---------------------|--------|------------------------|
| No múltiplos de 3 | | Múltiplos de 3 | | |
| Armónico de orden h | Uh [%] | Armónico de orden h | Uh [%] | Uh [%] |
| 5 | 3.0 | 3 | 3.0 | 5 |
| 7, 11 | 2.5 | 9 | 1.5 | |
| 13, 17 | 2.0 | 15, 21 | 0.5 | |
| 19, 23 | 1.5 | >21 | 0.3 | |
| 25 | 1.0 | | | |
| >25 | 0.5 | | | |

La distribución de los parámetros RLC , que conforman el modelo de carga individual en el dominio del tiempo es tomada de Djokic and Collin (2014), en donde también se explica el procedimiento para determinar cada parámetro para cada tipo de carga, usando distribuciones de probabilidad normal y uniforme. Estas distribuciones de probabilidad se muestran en la Tabla 2. De esta manera, se obtienen los parámetros de R_{total} , L_{total} , C_{dc} y R_{eq} necesarios para cada modelo de carga de tipo $SMPS$ *no-FP*, $SMPS$ *p-FP* o CFL .

Tabla 2

Distribuciones de probabilidad para los parámetros del modelo circuital

| Tipo | Carga | Parámetros | Distribución | Valores(p.u) |
|------|----------------|--------------|------------------|--|
| 1 | no-PFC SMPS | X_{Cdc} | <i>Normal</i> | $\mu = 0.036, \sigma = 0.54$ |
| | | R_{total} | <i>Uniforme</i> | [0.0015, 0.0019] |
| | | X_{Ltotal} | <i>Uniforme</i> | $[2.97 \times 10^{-6}, 8.91 \times 10^{-6}]$ |
| | | P_{dc} | <i>Normal</i> | $\mu = 0.5, \sigma = 0.16$ |
| 2 | p-PFC SMPS | X_{Cdc} | <i>Normal</i> | $\mu = 0.036, \sigma = 0.54$ |
| | | R_{total} | <i>Uniforme</i> | [0.0077, 0.0094] |
| | | X_{Ltotal} | <i>Normal</i> | $\mu = 0.0371, \sigma = 0.019$ |
| | | P_{dc} | <i>Normal</i> | $\mu = 0.5, \sigma = 0.16$ |
| 3 | CFL | X_{Cdc} | <i>Normal</i> | $\mu = 0.25, \sigma = 3.75$ |
| | | R_{total} | <i>Uniforme</i> | [0.9, 1.1] |
| | | X_{Ltotal} | <i>Constante</i> | 3.92×10^{-5} |
| | | P_{dc} | <i>Uniforme</i> | [0.87, 1.02] |

Una vez se obtienen los parámetros, se emplean modelos de carga individual en el dominio del tiempo para obtener la respuesta en corriente del modelo de cada carga y posteriormente la respuesta en corriente agregada de las cargas conectadas al mismo PCC para una misma tensión de alimentación. Para considerar diferentes tipos de carga se toman doscientas (200) cargas conectadas al mismo PCC, las cuales son de diferente tipo y tienen diferentes parámetros entre sí. El número de cargas se establece en doscientas (200) porque en Djokic and Collin (2014) se demuestra que el valor asintótico se alcanza para cargas agregadas de este tamaño.

Luego se ajusta el modelo de carga individual en el dominio de la frecuencia a partir de las señales de ajuste en la metodología descrita en las subsecciones (2.1.1, 2.2.1 y 2.3.1). El modelo de carga individual en el dominio de la frecuencia ajustado es el *Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas - M2A3*, presentado en Malagon-Carvajal et al. (2023). El cual está

compuesto por una corriente de corte, $I_{c(n)}$, tensión de alimentación $V_{(n)}$ y su conjugada $V_{(n)}^*$ y dos matrices de admitancias armónicamente acopladas $Y_{(n \times n)}^+$ y $Y_{(n \times n)}^-$, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$I_{(n)} = I_{c(n)} + Y_{(n \times n)}^+ V_{(n)} + Y_{(n \times n)}^- V_{(n)}^* \quad (1)$$

Donde $I_{(n)}$ es la respuesta en corriente agregada del modelo de carga para una tensión de alimentación $V_{(n)}$ dada y n es el número de armónicos impares.

Para ajustar el modelo individual en el dominio de la frecuencia *M2A3* se deben generar estados de operación de la carga o señales de ajuste (tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga) por medio de modelos de carga individual en el dominio del tiempo. Sin embargo, en la ecuación 1 existen parámetros desconocidos como la corriente de corte $I_{c(n)}$, y las dos matrices de admitancias $Y_{(n \times n)}^+$ y $Y_{(n \times n)}^-$, por tanto, se busca un método de ajuste para el modelo y así obtener estos parámetros desconocidos.

Para los experimentos uno (1) y dos (2), se usa el método de ajuste basado en Álgebra Matricial para el Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas con Corriente de corte Desconocida (*Método AM-M2A3CD*) propuesto en A.B. Nassif (2010). En donde a partir de la ecuación 1 y el procedimiento planteado en Malagón Carvajal (2020) se obtiene la siguiente expresión:

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

Donde: I_c es la corriente de corte, Y^+ y Y^- son las matrices de admitancias, I es la respuesta

en corriente agregada del modelo de carga, I es un vector de unos, V^T es la transpuesta de la tensión de alimentación y V^H es la transpuesta conjugada (operación *Hermitian*) de la tensión de alimentación. Con la ecuación (2) se pueden obtener los parámetros desconocidos del modelo individual en el dominio de la frecuencia.

Para el experimento tres (3), debido a los problemas que existen asociados con la independencia lineal de las señales de ajuste, el método de ajuste es un *método basado en la norma- l_2 regularizada o Ridge Regression problem (Método RR)*. La regularización de Tikhonov para la norma- l_2 es conocida comúnmente como *Ridge Regression problem* presentado en Hastie et al. (2009). En las aplicaciones de este método se encuentran los problemas mal puestos *ill-posed problems*, es comúnmente usado en problemas de mal condicionamiento de la matriz (*ill-conditioned matrix problems*) y sobre-ajuste (*overfitting problems*).

Una vez se obtienen las señales de tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga a partir de los modelos en el dominio del tiempo, se calcula el espectro y se organiza en matrices como se propone en Malagón Carvajal (2020). De tal manera que en las matrices, las señales (tensión y corriente) en el dominio de la frecuencia se ubiquen como vectores columna con el fin que los órdenes armónicos estén organizados por fila. Al tener la señales organizadas de esta manera y dependiendo de los experimentos empleados 2.1, 2.2 y 2.3, se obtiene el respectivo modelo individual en el dominio de la frecuencia.

La manera de organizar el espectro en el dominio de la frecuencia es en vectores columna con el fin que los órdenes armónicos estén organizados por fila. En las ecuaciones (3) y (4) se presenta la forma matricial expuesta en Malagón Carvajal (2020), en la cual cada elemento de

tensión y corriente se puede representar de la forma Y_{hs}^{kj} . Donde: Y representa el elemento de la matriz de tensión o corriente, k representa el número de la variación en la magnitud. En este caso $k=1,2,3,\dots,k$, j representa el número de la variación en el ángulo. En este caso $j=1,2,3,\dots,j$, h representa el orden armónico. En este caso $h=1,2,3,\dots,11$ y s representa la señal o el número de la variación de la tensión. En este caso $s=1,2,3,\dots,15840$.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan las matrices de tensión y corriente.

■ Matriz de tensiones.

$$V = \begin{bmatrix} V_{1\ 1}^{1\ 1} & V_{1\ 2}^{1\ 2} & \dots & V_{1\ s}^{k\ j} \\ V_{3\ 1}^{1\ 1} & V_{3\ 2}^{1\ 2} & \dots & V_{3\ s}^{k\ j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{h\ 1}^{1\ 1} & V_{h\ 2}^{1\ 2} & \dots & V_{h\ s}^{k\ j} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Donde el elemento de la matriz $V_{1\ 1}^{1\ 1}$ representa la primera variación en magnitud ($k = 1$) y ángulo de fase ($j = 1$) del fundamental ($h = 1$) en la primera señal ($s = 1$) de la tensión de alimentación y el elemento V_{hs}^{kj} representa la última variación en magnitud (k) y ángulo de fase (j) del onceavo armónico impar ($h = 11$) en la última señal ($s = 15840$) de la tensión de alimentación.

■ Matriz de corrientes

$$I = \begin{bmatrix} I_{1\ 1}^{1\ 1} & I_{1\ 2}^{1\ 1} & \cdots & I_{1\ s}^{k\ j} \\ I_{3\ 1}^{1\ 1} & I_{3\ 2}^{1\ 1} & \cdots & I_{3\ s}^{k\ j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{h\ 1}^{1\ 1} & I_{h\ 2}^{1\ 1} & \cdots & I_{h\ s}^{k\ j} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde el elemento de la matriz $I_{1\ 1}^{1\ 1}$ representa la respuesta en corriente agregada del modelo de carga ante la primera variación en magnitud ($k = 1$) y ángulo de fase ($j = 1$) del fundamental ($h = 1$) en la primera señal ($s = 1$) de la tensión alimentación y el elemento I_{hs}^{kj} representa la respuesta en corriente agregada del modelo de carga ante la última variación en magnitud (k) y ángulo de fase (j) del onceavo armónico impar ($h = 11$) en la última señal ($s = 15840$) de la tensión de alimentación.

2.1. Señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación

El primer experimento puede describirse, de forma general como un barrido en frecuencia o *Frequency Sweep* (FS), es un experimento basado en una variación sistemática en pasos iguales de la magnitud de la tensión de alimentación y su ángulo de fase, tanto para la componente fundamental como para todos los órdenes armónicos. Este representa un experimento típico en un laboratorio en donde se tienen condiciones controladas de la tensión de alimentación variando la magnitud y el ángulo de fase en pasos iguales.

A través de esta variación sistemática de la tensión de alimentación y los modelos individuales en el dominio del tiempo empleados para diferentes tipos de cargas basadas en fuentes

conmutadas (*SMPS no-FP*, *SMPS p-FP* y *CFL*) se obtiene la respuesta en corriente del modelo de cada carga y posteriormente la respuesta en corriente agregada, como la suma de aportes individuales de corriente de cada carga, despreciando la impedancia equivalente de Thévenin en el *PCC*.

Posteriormente se calcula su espectro y se ajusta el modelo de carga individual en el dominio de la frecuencia. Este modelo de carga individual es ajustado mediante la ecuación (2) a partir de los diferentes estados de operación del conjunto de cargas reflejados en las señales de ajuste, es decir la tensión de alimentación en el *PCC* y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga en el dominio del tiempo. El control sobre de la tensión de operación en el *PCC* durante la variación sistemática de la tensión de alimentación garantiza la independencia lineal de las medidas y por tanto que la matriz $(A * A^H)$ sea invertible, entonces se puede decir que mediante una variación sistemática de la tensión se pueden diseñar las matrices de tensión, para el ajuste de la matriz de admitancia, además, se pueden ver los efectos del desacople de las tensiones, es decir los aportes de cada armónico en corriente.

Para hacer una variación sistemática de la tensión de alimentación primero se necesitan definir los siguientes parámetros básicos: número de armónicos impares deseados (h), tensión nominal, frecuencia de la red (f), variaciones del ángulo de fase, variaciones de la distorsión, variaciones de la regulación para el fundamental según la norma ANSI C84.1-Standard (2012) y distorsión individual por orden armónico según la norma UNE-EN50160:2011/A1 (2015).

La variación sistemática de la tensión de alimentación en este trabajo de grado tiene once (11) armónicos impares (veintiuno (21) en total), una tensión nominal de doscientos veinte *Volts*

(220 [V]) , frecuencia de cincuenta *Hertz* (50 [H]), setenta y dos (72) variaciones del ángulo de fase, veinte (20) variaciones en la distorsión y veinte (20) variaciones en la regulación.

Con los datos expuestos anteriormente y haciendo una variación sistemática de la magnitud, ángulo de fase y la regulación en la componente fundamental y la distorsión individual de cada armónico cumpliendo con los límites normativos presentados en la Tabla 1 se obtiene la respuesta en corriente del modelo individual de cada carga y posteriormente la respuesta en corriente agregada del modelo de carga.

El tamaño de las matrices de la tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga es de 121×1440 , donde el 121 de las filas resulta de multiplicar el número armónico por el número armónico ($11 * 11$) y el 1440 de las columnas es igual a multiplicar el número de variaciones del ángulo por el número de variaciones en la magnitud ($72 * 20$).

Después de conseguir las señales de la tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga en el dominio del tiempo se obtiene el espectro y se organiza en matrices como se propone en las ecuaciones (3) y (4). En donde hay setenta y dos (72) variaciones del ángulo de fase ($j = 72$) y veinte (20) variaciones en la magnitud ($k = 20$). La información obtenida en la variación sistemática de la tensión se organiza en forma matricial, con las señales (tensión y corriente) en el dominio de la frecuencia como vectores columna con el fin que los órdenes armónicos estén organizados por fila.

Una vez organizadas las matrices de la tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga, se puede ajustar el modelo individual en el dominio de la frecuencia $M2A3$ usando el método de ajuste $AM-M2A3CD$, el cual se presenta en la ecuación (2). A conti-

nuación, se realiza una evaluación del método con las señales de ajuste (tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga), a partir de la Ecuación (1), ingresando las 15840 variaciones de la tensión de alimentación en el dominio de la frecuencia una a una y comparando la corriente de la carga agregada obtenida con el modelo individual en el dominio de la frecuencia (corriente estimada) y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga al hacer la variación sistemática de la tensión (corriente de ajuste), obtenida a partir de los modelos en el dominio del tiempo.

Por otro lado, para la validación de desempeño de los modelos, en el Capítulo 3 se presenta el procedimiento para la obtención de diez (10) mil señales aleatorias de tensión de alimentación cumpliendo los límites normativos de regulación, distorsión individual y total de la norma ANSI C84.1-Standard (2012) y UNE-EN50160:2011/A1 (2015), respectivamente. Estas señales que no están dentro de la variación sistemática diseñada (señales de ajuste), y presentada en esta sección, permiten hacer la evaluación del desempeño del método. Estas tensiones se ingresan una a una, inicialmente, al modelo en el dominio del tiempo, obteniendo la respuesta en corriente para el conjunto de cargas agregadas. Luego del ajuste entran nuevamente una a una al Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (*M2A3*) para hallar la corriente agregada obtenida con el modelo individual en el dominio de la frecuencia (corriente estimada) y finalmente se compara con la respuesta en corriente agregada del modelo de carga para la misma tensión de alimentación (corriente de validación). Es decir la corriente agregada en la carga obtenida con el modelo en el dominio de la frecuencia *M2A3* es comparada con la respuesta en corriente agregada del modelo en el dominio del tiempo para la misma tensión de alimentación.

La evaluación de ajuste y de desempeño del método se hace mediante el error presentado en Malagon-Carvajal et al. (2023) (Sección 3.4) y cuyos resultados se presentan en el Capítulo 4.

2.1.1. Ajuste del modelo

En esta subsección se explica el método de ajuste para el *Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (M2A3)* a través del primer experimento.

Las señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga se transforman al dominio de la frecuencia y se obtienen cuatro matrices, dos (2) para tensión de alimentación (magnitud y ángulo de fase) y dos (2) para la respuesta en corriente agregada del modelo de carga (magnitud y ángulo de fase), en este caso las matrices tienen una dimensión de 121 filas por 1440 columnas, estas dimensiones se obtienen porque están desagregados los aportes de cada componente armónica.

Con estas matrices se crean dos (2) nuevas matrices pero esta vez de fasores V_{A1} y I_{A1} (el número uno (1) en el índice indica que es el primer experimento), luego se organizan para obtener las dimensiones presentadas en las ecuaciones (3) y (4), las cuales son 11 filas por 15840 columnas. Después, usando el método de ajuste (Ecuación (2)) se determinan los parámetros desconocidos del M2A3, los cuales son $I_{c(11 \times 1)}$, $Y_{(11 \times 11)}^+$ e $Y_{(11 \times 11)}^-$.

2.2. Señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente independientes

A continuación se presenta el experimento en donde se generan señales aleatorias de tensión de alimentación garantizando que sean linealmente independientes con los límites normativos propuestos en UNE-EN50160:2011/A1 (2015) y ANSI C84.1-Standard (2012) y presentados en la Tabla 1. Este experimento simula el escenario cuando se toman medidas en un PCC a lo largo

de un intervalo de tiempo amplio o corto pero con variaciones significativas en la tensión de alimentación, o durante diferentes horas del día donde es posible seleccionar señales linealmente independientes.

Se generan *15840* señales para tener el mismo número de señales que en el primer experimento (la variación sistemática de la tensión de alimentación). Una vez obtenidas las señales de tensión de alimentación se usan los modelos de carga individual en el dominio del tiempo de las cargas basadas en fuentes conmutadas (*SMPS*) para obtener la respuesta en corriente del modelo de cada carga y luego la respuesta en corriente agregada del modelo de carga en el *PCC*.

Al conseguir las señales de tensión y corriente en el dominio del tiempo se calcula el espectro y se organiza en matrices como se muestra al inicio del Capítulo 2. El espectro de la tensión y corriente se organiza en forma matricial como vectores columna con el fin que los órdenes armónicos estén organizados por fila. Luego se ajusta el modelo, es decir se obtienen los parámetros desconocidos, I_c , Y^+ e Y^- con la ayuda del método de ajuste, conociendo la tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga en el *PCC*.

En seguida se realiza una evaluación del método con las señales de ajuste (tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga). A partir de la Ecuación (1), se ingresan las *15840* señales de tensión de alimentación en el dominio de la frecuencia una a una y comparando la corriente obtenida con el modelo individual en el dominio de la frecuencia (corriente estimada) y la respuesta en corriente del modelo en el dominio del tiempo para cada señal de tensión de alimentación (corriente de ajuste).

Por otra parte, para la validación de desempeño de los modelos, en el Capítulo 3 se obtie-

nen diez (10) mil señales aleatorias de tensión de alimentación que no están dentro de los tres (3) experimentos diseñados para el ajuste, las cuales fueron usadas para la evaluación del desempeño del método para todos los modelo individuales en el dominio de la frecuencia (2.1, 2.2 y 2.3). Estas tensiones se ingresan una a una, inicialmente, al modelo en el dominio del tiempo, obteniendo la respuesta en corriente para el conjunto de cargas agregadas. Después del ajuste entran nuevamente una a una al *M2A3* para hallar la corriente agregada obtenida con el modelo individual en el dominio de la frecuencia de este experimento (corriente estimada) y finalmente se compara con la respuesta en corriente agregada del modelo de carga para la misma de tensión de alimentación (corriente de validación). Es decir la corriente agregada en la carga obtenida con el modelo en el dominio de la frecuencia *M2A3* comparada con la respuesta en corriente agregada del modelo en el dominio del tiempo para la misma tensión de alimentación.

La evaluación de ajuste y de desempeño del método se hace mediante el error presentado en Malagon-Carvajal et al. (2023) (Sección 3.4) y cuyos resultados se presentan en el Capítulo 4.

2.2.1. Ajuste del modelo

En esta subsección se explica el método de ajuste para el *Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (M2A3)* a través del segundo experimento, el cual esta basado en señales de tensión de alimentación linealmente independientes.

Las señales de la tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga para estas señales de tensión, se transforman al dominio de la frecuencia y se obtienen cuatro matrices, dos (2) para tensión de alimentación (magnitud y ángulo de fase) y dos (2) para la respuesta en corriente agregada del modelo de carga (magnitud y ángulo de fase), en este caso las

matrices tienen las mismas dimensiones de 11×15840 , por lo que no se deben organizar porque ya se tienen las dimensiones presentadas en las ecuaciones (3) y (4).

Con estas matrices se crean dos (2) nuevas matrices pero esta vez de fasores V_{A2} y I_{A2} (el número dos (2) en el índice indica que es el segundo experimento). Después, usando el método de ajuste (Ecuación 2) se determinan los parámetros desconocidos del $M2A3$, $I_{C(11 \times 1)}$, $Y_{(11 \times 11)}^+$ e $Y_{(11 \times 11)}^-$.

2.3. Señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente dependientes

A continuación se diseña un experimento en donde se generan señales aleatorias de tensión de alimentación garantizando que sean linealmente dependientes con los límites normativos propuestos en UNE-EN50160:2011/A1 (2015) y ANSI C84.1-Standard (2012) y presentados en la Tabla 1. Este experimento representa el escenario en el que se toman medidas en un *PCC* a lo largo de un intervalo de tiempo corto y hay probabilidad de que la tensión no varíe significativamente, y por tanto es posible que las señales sean linealmente dependientes.

Se generan *15840* señales para tener el mismo número de señales que en el primer y segundo experimento. La forma de hacerlo es teniendo en cuenta lo que ocurre comúnmente cuando se toman medidas en un *PCC*. Esto es, que se encuentran diferentes valores en la componente fundamental, diferentes valores en cada orden armónico pero con el mismo porcentaje de distorsión con respecto al fundamental y con diferentes ángulos de fase.

Una vez obtenidas las señales de tensión de alimentación se usan los modelos de carga individual en el dominio del tiempo de las cargas basadas en fuentes conmutadas (*SMPS*) para obtener la respuesta en corriente del modelo de cada carga y luego la respuesta en corriente agregada del

modelo de carga en el PCC.

Al conseguir las señales de tensión y corriente en el dominio del tiempo se calcula el espectro y se organiza en matrices como se muestra al inicio del Capítulo 2. El espectro de la tensión y corriente se organiza en forma matricial como vectores columna con el fin que los órdenes armónicos estén organizados por fila.

Para ajustar el *Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas - M2A3* de la Ecuación (1) no se puede usar el método de ajuste basado en Álgebra Matricial para el Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas con Corriente de corte Desconocida (*Método AM-M2A3CD*) de la Ecuación (2) debido a que las señales de la tensión de alimentación son linealmente dependientes, esto hace que la matriz $([1 \ V^T \ V^H]^T [1 \ V^T \ V^H]^*)^{-1}$ compuesta por estas tensiones quede mal condicionada (*ill-conditioned matrix problems*) y su determinante sea igual a cero y por tanto no sea posible obtener su inversa.

Por esta razón se busca otro método para el ajuste del modelo por medio de estas señales de ajuste, el método usado es un *método basado en la norma- l_2 regularizada o Rigde Regression problem (Método RR)*. Para usar este método se plantea el siguiente problema de optimización:

$$X = \arg_x \min \frac{1}{2} \|XAA^H - BA^H\|_F^2 + \lambda_1 \|X\|_F^2 \quad (5)$$

Donde: $B = I$, $A = [1 \ V^T \ V^H]^T$, $A^H = [1 \ V^T \ V^H]^*$, $X = [Ic \ Y^+ \ Y^-]$ y λ_1 es un coeficiente de relajación de *Tikhonov* y debe ser mayor que cero.

Para dar solución al problema de optimización en la literatura se encontraron tres (3) formas

de hacerlo, dos (2) de las cuales son basadas en optimización convexa por medio de la librería *CVX*, la cual esta diseñada para resolver este tipo de problemas y la otra es una solución analítica como se presenta en Malagón Carvajal (2020).

Las tres (3) posibles formas de ajustar el modelo son:

- Primera: Usando el *CVX*, minimizando:

$$\|XAA^H - BA^H\|_2 + \lambda_1 \|X\|_2 \quad (6)$$

- Segunda: Usando el *CVX*, minimizando:

$$\|XA - B\|_2 + \lambda_1 \|X\|_2 \quad (7)$$

- Tercera: Usando la solución analítica, la cual se obtiene a partir de la Ecuación (5)

$$X = BA^H(AA^H + \lambda_1 I_D)^{-1} \quad (8)$$

Donde I_D es la matriz identidad.

Luego se ajusta el modelo usando cada una de las tres (3) posibles formas, es decir se obtienen los parámetros desconocidos, (I_C , Y^+ e Y^-) con el ajuste, hay que tener en cuenta que estos parámetros se tienen que hallar cada vez que se varié el valor de λ_1 . El valor de este coeficiente se varia hasta encontrar el valor más adecuado para el conjunto de datos, i.e., obtener la

mejor evaluación de ajuste y de desempeño del método, en este caso el valor se varia entre 0,0001 y $3,3 * 10^5$ ($0,0001 \leq \lambda_1 \leq 3,3 * 10^5$).

Para cada valor de λ_1 se realiza una evaluación del método con las señales de ajuste (tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga), a partir de la Ecuación (1), ingresando las 15840 señales de tensión de alimentación en el dominio de la frecuencia una a una y comparando la corriente en la carga agregada obtenida con el modelo en el dominio de la frecuencia (corriente estimada) y la respuesta en corriente del modelo de carga para cada señal de tensión de alimentación del experimento (corriente de ajuste), obtenida a partir de los modelos en el dominio del tiempo.

Por otro lado, para la validación de desempeño los modelos, en el Capítulo 3 obtienen diez (10) mil señales aleatorias de tensión de alimentación que no están dentro de los tres (3) experimentos diseñados para el ajuste, las cuales fueron usadas para la evaluación del desempeño del método para todos los modelo individuales en el dominio de la frecuencia (2.1, 2.2 y 2.3). Esta evaluación se hace las veces que se varié el valor de λ_1 y para cada uno de los posibles métodos de ajuste con el fin de comparar los resultados. Estas tensiones se ingresan una a una, inicialmente, al modelo en el dominio del tiempo, obteniendo la respuesta en corriente para el conjunto de cargas agregadas. Luego del ajuste entran nuevamente una a una al *M2A3* para hallar la corriente agregada obtenida con el modelo individual en el dominio de la frecuencia de este experimento (corriente estimada) y finalmente se compara con la respuesta en corriente agregada del modelo de carga para la misma de tensión de alimentación (corriente de validación). Es decir la corriente agregada en la carga obtenida con el modelo en el dominio de la frecuencia *M2A3* comparada con la respuesta en

corriente agregada del modelo en el dominio del tiempo para la misma tensión de alimentación.

La evaluación de ajuste y de desempeño del método se hace mediante el error presentado en Malagon-Carvajal et al. (2023) (Sección 3.4) y cuyos resultados se presentan en el Capítulo 4.

2.3.1. Ajuste del modelo

En esta subsección se explica el método de ajuste para el *Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (M2A3)* a través del tercer experimento, el cual está basado en señales de tensión de alimentación linealmente dependientes.

Las señales de la tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga para estas señales de tensión, se transforman al dominio de la frecuencia y se obtienen cuatro matrices, dos (2) para tensión de alimentación (magnitud y ángulo de fase) y dos (2) para la respuesta en corriente agregada del modelo de carga (magnitud y ángulo de fase), en este caso las matrices tienen las mismas dimensiones de 11 X 15840, por lo que no se deben organizar porque ya se tienen las dimensiones presentadas en las ecuaciones (3) y (4).

Con estas matrices se crean dos (2) nuevas matrices pero esta vez de fasores V_{A3} y I_{A3} (el número tres (3) en el índice indica que es el tercer experimento). Hasta este punto no se diferencia de los dos (2) experimentos anteriores. Sin embargo, ya no se puede hacer el ajuste como para estos.

Para ajustar el *M2A3* por medio del método *RR-M2A3*, se debe tener en cuenta que en el problema de optimización planteado anteriormente en la Ecuación (5) aparece el parámetro λ_1 . La matriz compuesta por las tensiones de ajuste es constante al igual que la corriente, entonces el desempeño del método solo va a depender del valor de λ_1 , por esta razón para el ajuste del método

lo que se hace es variar el valor de λ_1 hasta obtener el mejor desempeño posible del método, cada vez que se varia este valor se determinan los parámetros desconocidos del *M2A3* ($Ic_{(11x1)}$, $Y_{(11x11)}^+$ e $Y_{(11x11)}^-$). Después de variar el λ_1 más de cien (100) veces se encontró que para este conjunto de datos, la relación que hay entre los datos de ajuste y la estabilidad del modelo, los valores pequeños de λ_1 ofrecen una buena solución como se muestra en los resultados, de esta manera, tanto para la evaluación de ajuste y del desempeño del método se usan los valores de $Ic_{(11x1)}$, $Y_{(11x11)}^+$ e $Y_{(11x11)}^-$ determinados para un valor del coeficiente de relajación de *Tikhonov* pequeño, es este caso $\lambda_1 = 0,1$ porque tiene el mismo desempeño para ese valor que para valores más pequeños.

3. Validación de los modelos

En este capítulo se busca obtener múltiples estados de operación para la evaluación de desempeño de los modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia ajustados mediante los tres experimento antes expuestos y el conjunto de señales de tensión y corriente, proporcionada por estos experimentos, los cuales modelan el conjunto de cargas en el dominio del tiempo.

Para esto se generan diez (10) mil señales aleatorias de tensión de alimentación cumpliendo con los límites normativos para la regulación de acuerdo con la norma (ANSI C84.1-Standard (2012)) y para distorsión individual por orden armónico de acuerdo con la norma UNE-EN50160:2011/A1 (2015), los cuales se muestran en la Tabla (1) y así obtener múltiples estados de operación. A estas señales de tensión se les denomina señales de validación de desempeño.

Por medio de los modelos de carga individual en el dominio del tiempo se obtiene la respuesta en corriente del modelo de cada carga para cada señal de tensión de validación, estas señales de corriente se suman y se obtiene la respuesta en corriente agregada del modelo de carga. Estas señales se usan para la evaluación de desempeño de los tres (3) escenarios de ajuste del modelo del Capítulo 2, entonces se compara la corriente agregada con cada modelo en el dominio del tiempo, con la corriente estimada con el modelo en el dominio de la frecuencia.

Para hacer esta evaluación primero se halla su respectivo espectro y se organizan teniendo en cuenta lo expuesto en el Capítulo 2. Para este caso las matrices quedan organizadas como se muestra en las ecuaciones (9) y (10) en donde cada elemento de tensión y corriente se puede representar de la forma $Y_{h,s}$, donde:

Y representa el elemento de la matriz de tensión o corriente, h representa el orden armónico. En este caso $h=1,2,3,\dots,11$ y s representa la señal de tensión de validación. En este caso $s=1,2,3,\dots,10000$.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan las matrices de tensión y corriente.

■ Matriz de tensiones.

$$V = \begin{bmatrix} V_{1\ 1} & V_{1\ 2} & \cdots & V_{1\ s} \\ V_{3\ 1} & V_{3\ 2} & \cdots & V_{3\ s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{h\ 1} & V_{h\ 2} & \cdots & V_{h\ s} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde el elemento de la matriz $V_{1\ 1}$ representa el primer armónico (fundamental $h = 1$) en la primera señal ($s = 1$) de tensión de validación y el elemento $V_{h\ s}$ representa el onceavo armónico impar ($h = 11$) en la última señal ($s = 10000$) de tensión de validación.

■ Matriz de corrientes

$$I = \begin{bmatrix} I_{1\ 1} & I_{1\ 2} & \cdots & I_{1\ s} \\ I_{3\ 1} & I_{3\ 2} & \cdots & I_{3\ s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{h\ 1} & I_{h\ 2} & \cdots & I_{h\ s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde el elemento de la matriz $I_{1\ 1}$ representa el primer armónico (fundamental $h = 1$)

en la primera señal ($s = 1$) de la respuesta en corriente del modelo de carga ante el primer armónico de la tensión de validación y el elemento $I_{h s}$ representa el onceavo armónico impar ($h = 11$) en la última señal ($s = 10000$) de la respuesta en corriente del modelo de carga para la última señal de la tensión de validación.

Al obtener las señales de tensión de validación en el dominio de la frecuencia organizadas se ingresan una a una a cada uno de los $M2A3$ obtenidos con los tres (3) experimentos para el ajuste de carga de las secciones 2.1, 2.2 y 2.3, y así hallar la corriente agregada con el modelo individual en el dominio de la frecuencia (corriente estimada). Finalmente se compara con la respuesta de corriente agregada de los modelos en el dominio del tiempo (corriente de validación). Es decir la corriente obtenida con el modelo individual en el dominio de la frecuencia ($M2A3$) es comparada con la respuesta en corriente agregada del modelo de carga individual en el dominio del tiempo para la misma tensión de alimentación. Esto se presenta en detalle en las secciones 3.1, 3.2 y 3.3.

La evaluación del desempeño del método se hace mediante el error presentado en Malagon-Carvajal et al. (2023) y se presenta en la Sección 3.4.

3.1. Señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación

Después de obtener las variables desconocidas que componen al modelo individual en el dominio de la frecuencia $M2A3$ (I_c , Y^+ e Y^-), con el ajuste hecho en la Subsección 2.1.1 por medio del método de ajuste basado en Álgebra Matricial para el Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas con Corriente de corte Desconocida ($AM-M2A3CD$) presentado en la Ecuación (2).

En esta sección, se desea evaluar el desempeño del método con señales de tensión que sean

diferentes de las señales con las que se ajusto el modelo individual en el dominio de la frecuencia. Se generan diez (10) mil señales de tensión aleatorias con el mismo número de armónicos impares (h), tensión nominal (V_{in}), frecuencia de la red (f), máxima regulación para el fundamental según la norma (ANSI C84.1-Standard (2012)) y máxima distorsión individual por orden armónico según la norma UNE-EN50160:2011/A1 (2015).

Por medio de los modelos de carga individual en el dominio del tiempo se obtiene la respuesta en corriente de la carga para cada señal de tensión de validación. Luego se halla su respectivo espectro y se organizan teniendo en cuenta la ecuaciones (9) y (10).

Se tienen cuatro matrices, dos (2) para tensión de validación (magnitud y ángulo de fase) y dos (2) para la corriente agregada (magnitud y ángulo de fase), en este caso las matrices tienen una dimensión de once (11) filas por diez (10) mil columnas. Con estas matrices se crean dos (2) nuevas matrices de fasores V_V para la tensión de validación e I_V para la respuesta en corriente agregada.

Después se obtiene la matriz de las corriente agregadas a través del modelo individual en el dominio de la frecuencia ($I_{M2A3 V1}$) ajustado en la Subsección 2.1.1, es decir se obtiene la corriente estimada con el modelo. Luego la matriz $I_{M2A3 V1}$ (el número uno (1) en el índice indica que esas corrientes se obtienen con el modelo individual en el dominio de la frecuencia del primer experimento) se compara con las corrientes de la matriz I_V . Para obtener $I_{M2A3 V1}$ se ingresa una a una las columnas de la matriz de tensión V_V al $M2A3$ de este experimento y se guarda cada corriente agregada obtenida con el modelo en la matriz de corrientes $I_{M2A3 V1}$, esta matriz tiene unas dimensiones de 11×10000 , las mismas dimensiones de I_V .

3.2. Señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente independientes

Luego de obtener las variables desconocidas que componen al modelo individual en el dominio de la frecuencia $M2A3$ (I_c , Y^+ e Y^-), con el ajuste hecho en la Subsección 2.2.1 por medio del método de ajuste basado en Álgebra Matricial para el Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas con Corriente de corte Desconocida ($AM-M2A3CD$) presentado en la Ecuación (2).

En esta sección, se desea evaluar el desempeño del método en señales de tensión que sean diferentes de las señales con las que se ajustó el modelo individual en el dominio de la frecuencia. Para esto se usan las mismas diez (10) mil señales de tensión aleatorias diseñadas en la Sección 3.1, las cuales son usadas para la validación de todos los métodos de ajuste (subsecciones 2.1.1, 2.2.1 y 2.3.1).

Como son las mismas señales de tensión de validación para la evaluación de todos los experimentos, entonces la respuesta en corriente agregada del modelo será la misma. Entonces se tienen las mismas matrices que en la Sección 3.1.

Después se obtiene la matriz de las corriente agregadas obtenidas con el modelo individual en el dominio de la frecuencia ($I_{M2A3 V2}$) ajustado en la Subsección 2.2.1, es decir se obtiene la corriente estimada con el modelo. Luego la matriz $I_{M2A3 V2}$ (el número dos (2) en el índice indica que esas corrientes se obtienen con el modelo individual en el dominio de la frecuencia del segundo experimento) se compara con las corrientes de la matriz I_V . Para obtener $I_{M2A3 V2}$ se ingresa una a una las columnas de la matriz de tensión V_V al $M2A3$ de este experimento y se guarda cada

corriente agregada obtenida con el modelo en la matriz de corrientes $I_{M2A3 V2}$, esta matriz tiene unas dimensiones de 11×10000 , las mismas dimensiones de I_V .

3.3. Señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente dependientes

Después de obtener las variables desconocidas que componen al modelo individual en el dominio de la frecuencia $M2A3 (I_c, Y^+ e Y^-)$, con el ajuste hecho en la Subsección 2.3.1 por medio del *Método basado en la norma $-l_2$ regularizada o Ridge Regression problem (Método RR)* presentado en la Sección (2.1) para el valor más adecuado para el conjunto de datos encontrado de λ_1 .

En esta sección, se desea evaluar el desempeño del método en señales de tensión diferentes a las usadas en el ajuste del modelo individual en el dominio de la frecuencia. Para esto se usan las mismas diez (10) mil señales de tensión aleatorias diseñadas en la Sección 3.1, las cuales son usadas para la validación de todos los métodos de ajuste (subsecciones 2.1.1, 2.2.1 y 2.3.1), que son linealmente dependientes entre sí pero son totalmente diferentes a las señales usadas para el ajuste del modelo en la Sección 2.3.

Como son las mismas señales de tensión de validación que para todos los experimentos, entonces la respuesta en corriente agregada del modelo en el dominio del tiempo será la misma. Entonces se tienen las mismas matrices que en las secciones 3.1 y 3.2.

Después se obtiene la matriz de las corriente agregadas obtenidas con el modelo individual en el dominio de la frecuencia ($I_{M2A3 V3}$) ajustado en la Subsección 2.3.1, es decir se obtiene la corriente estimada con el modelo. Luego la matriz $I_{M2A3 V3}$ (el número tres (3) en el índice indica que esas corrientes se obtienen con el modelo individual en el dominio de la frecuencia del tercer experimento) se compara con las corrientes de la matriz I_V . Para obtener $I_{M2A3 V3}$ se ingresa una

a una las columnas de la matriz de tensión V_V al $M2A3$ de este experimento y se guarda cada corriente agregada obtenida con el modelo en la matriz de corrientes $I_{M2A3 V3}$, esta matriz tiene unas dimensiones de 11×10000 , las mismas dimensiones de I_V .

3.4. Evaluación del error

De manera general, se debe tener la matriz de las respuestas en corriente agregada del modelo de carga obtenidas en el ajuste I_A (I_A puede ser I_{A1} o I_{A2} o I_{A3}) o en la validación I_V (I_V puede ser I_{V1} o I_{V2} o I_{V3}), también la matriz de corrientes agregadas obtenidas con el modelo para las mismas señales de tensión de alimentación usadas en cada ajuste $I_{M2A3 A}$ ($I_{M2A3 A}$ puede ser $I_{M2A3 A1}$ o $I_{M2A3 A2}$ o $I_{M2A3 A3}$) o en la validación $I_{M2A3 V}$ ($I_{M2A3 V}$ puede ser $I_{M2A3 V1}$ o $I_{M2A3 V2}$ o $I_{M2A3 V3}$) obtenidas a través del $M2A3$, respectivo de cada experimento. Se puede hacer la evaluación del método de ajuste para las señales de ajuste o validación, por medio de la evaluación del error ($E[\%]$) presentada en Malagon-Carvajal et al. (2023). El cual consiste en relacionar las magnitudes y los ángulos de fase de las respuestas en corriente agregada del modelo de carga guardadas en I_A o I_V con las corrientes agregadas obtenidas con el modelo y almacenadas en $I_{M2A3 A}$ o $I_{M2A3 V}$, respectivamente. Es decir, si se va hacer la evaluación del método de ajuste para las señales de ajuste se toman las matrices I_A e $I_{M2A3 A}$, en cambio para la evaluación de desempeño del método de ajuste para las señales de validación de desempeño se toman las matrices I_V e $I_{M2A3 V}$.

Para el $E[\%]$ se usan las siguientes ecuaciones:

- $E[\%]$ para la respuesta en corriente agregada del modelo de carga I (corriente de ajuste o validación) ante una tensión de alimentación dada V (tensión de ajuste o validación).

$$I_{\mu} = \frac{I^2}{2} \quad (11)$$

Donde μ es el orden armónico, para todos los casos $\mu = 1, \dots, h$ donde $h = 11$.

- $E[\%]$ para la corrientes agregada obtenida con el modelo I_{M2A3} (corriente estimada) para la misma tensión V .

$$I_{F\mu} = \frac{I_{M2A3}^2}{2} \quad (12)$$

A partir de las ecuaciones (11) y (12) se halla el error total $E[\%]$ (Ecuación 13). Cada error se puede descomponer en un error en la magnitud $E^{mag}[\%]$ (Ecuación 14) y el error en el ángulo de fase $E^{ang}[\%]$ (Ecuación 15).

- Error total $E[\%]$.

$$E[\%] = \frac{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu} - I_{F\mu}|^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} * 100 \quad (13)$$

- Error en la magnitud $E^{mag}[\%]$.

$$E^{mag}[\%] = \sum_{\mu=1}^h \frac{(|I_{\mu}| - |I_{F\mu}|)^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} * 100 \quad (14)$$

- Error en el ángulo de fase $E^{ang}[\%]$.

$$E^{ang}[\%] = \sum_{\mu=1}^h \frac{|I_{\mu} - I_{F\mu}|^2 - (|I_{\mu}| - |I_{F\mu}|)^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} * 100 \quad (15)$$

Se calcula el $E[\%]$ tanto para las señales de ajuste como para las de validación, como se muestra en las ecuaciones 13, 14 y 15. Esta información es almacenada y presentada en la Tabla 4.

Luego, se hace una representación gráfica de los errores por medio de un *Diagrama de Caja y Bigotes* y así se presentan los resultados del Capítulo 4.

El *Diagrama de Caja y Bigotes* o *Blox-Plot* es un método estandarizado para representar gráficamente una serie de datos numéricos a través de sus cuartiles. Además, estos diagramas dividen los datos en secciones, cada una de las cuales contiene el 25% de los datos. Los diagramas son útiles porque brindan un resumen gráfico de los datos que permiten identificar rápidamente el valor medio o mediana, la dispersión del conjunto de datos, entre otras cosas.

4. Evaluación de ajuste y de desempeño del método

En este capítulo se hace la evaluación de ajuste y del desempeño del método usado para obtener el modelo en el dominio de la frecuencia presentado en el Capítulo 2 a través del error presentado en Malagon-Carvajal et al. (2023) explicado en la Sección 3.4 y representado gráficamente en un diagrama de caja y bigotes de las secciones 4.1, 4.2 y 4.3.

Esta evaluación se divide en dos partes. En la primera parte se hace una evaluación del método para las señales de ajuste, esto es para señales de tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada del modelo de carga. Para hacer la evaluación se necesitan las matrices en donde están guardados los espectros de las respuestas en corriente agregada del modelo de carga I_{A1} , I_{A2} e I_{A3} , además, la corriente agregada obtenida al ingresar cada señal de la tensión de alimentación V_{A1} , V_{A2} y V_{A3} en el Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas $M2A3$ obtenido en el Capítulo 2, para cada experimento respectivamente $I_{M2A3 A1}$, $I_{M2A3 A2}$ e $I_{M2A3 A3}$ (en todos los casos el índice A representa ajuste).

En la segunda parte se hace una evaluación del desempeño del método, i.e., para señales de tensión de alimentación diferentes a las señales con las que se ajusta cada uno de los tres (3) modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia pero cumpliendo los límites normativos presentados en el documento (ver Tabla 1). Estas señales son las obtenidas en el Capítulo 3, en donde se obtiene la respuesta corriente agregada del modelo de carga para las tensiones de alimentación (señales de validación de desempeño).

Para hacer esta evaluación se necesita la matriz en donde está el espectro de la respuesta en

corriente agregada del modelo de carga I_V (en todos los casos el índice V representa validación) para las señales de tensión de validación V_V , además, la corriente agregada obtenida al ingresar cada señal de la tensión de validación en el Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente ($M2A3$) obtenido en el Capítulo 2, para cada experimento respectivamente $I_{M2A3 V1}$, $I_{M2A3 V2}$, e $I_{M2A3 V3}$. Como se dijo anteriormente, sólo se calcula una respuesta en corriente agregada del modelo de carga para las señales de tensión de validación porque para la validación de todos los modelos se usan las mismas señales de tensión de alimentación. Los resultados para el primer experimento se presentan gráficamente por medio de un *Diagrama de Caja y Bigotes o Blox-Plot*. Con el fin de representar gráficamente los errores totales $E[\%]$, errores en la magnitud $E^{mag}[\%]$ y errores en el ángulo de fase $E^{ang}[\%]$ a través de sus cuartiles. En la Figura 3 se muestran seis (6) diagramas para representar gráficamente los datos del $E[\%]$, $E^{mag}[\%]$ y $E^{ang}[\%]$ en las señales de ajuste y validación del primer, segundo y tercer experimento. En la parte superior se presentan los errores en las señales de ajuste para cada experimento y en la parte inferior se presentan los errores en las señales de validación de desempeño para cada experimento.

4.1. Resultados señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación

Los resultados para este experimento y al igual que para todos, se presentan gráficamente por medio de un *Diagrama de Caja y Bigotes o Blox-Plot*. Con el fin de representar gráficamente los errores totales $E[\%]$, errores en la magnitud $E^{mag}[\%]$ y errores en el ángulo de fase $E^{ang}[\%]$ a través de sus cuartiles.

En la Figura 3 se muestran dos (2) diagramas para representar gráficamente los datos del $E[\%]$, $E^{mag}[\%]$ y $E^{ang}[\%]$ en las señales de ajuste y validación. En la parte superior de la columna

izquierda (parte 1a) se presentan los errores en las señales de ajuste y en la parte inferior de la columna izquierda (parte 1b) se presentan los errores en las señales de validación de desempeño.

4.2. Resultados señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente independientes

Los resultados se presentan igual para todos los experimentos, en este caso se hace para la señales aleatorias de tensión linealmente independientes, el cual es el segundo experimento. Los resultados se presentan gráficamente por medio de un *Diagrama de Caja y Bigotes o Blox-Plot*, con el fin de representar gráficamente los $E[\%]$, $E^{mag}[\%]$ y $E^{ang}[\%]$ a través de sus cuartiles.

A continuación, en la Figura 3 se muestran dos (2) diagramas para representar gráficamente los datos del $E[\%]$, $E^{mag}[\%]$ y $E^{ang}[\%]$ en las señales de ajuste y validación. En la parte superior de la columna central (parte 2a) se presentan los errores en las señales de ajuste y en la parte inferior de la columna central (parte 2b) se presentan los errores en las señales de validación de desempeño.

4.3. Resultados señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente dependientes

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el tercer experimento, primero se va a presentar los resultados obtenidos cuando se exploran las tres (3) posibles soluciones al problema de optimización para ajustar el modelo a través del *método basado en la norma- l_2 regularizada o Ridge Regression problem (Método RR)* presentado en la Sección 4.1, donde se plantea el problema de optimización (Ecuación 5) y sus posibles soluciones (ecuaciones 6), (7) y (8).

Como se plantea en la Subsección 2.3.1, para este conjunto de datos, los valores pequeños de λ_1 ofrecen una buena solución. De esta manera, en la Figura 2, se presenta el error total $E[\%]$ en el tercer cuartil para los valores más pequeños de λ_1 .

En la Figura 2, se presentan gráficamente los resultados para las tres (3) diferentes solucio-

Figura 2

Evaluación del desempeño del método para los diferentes valores de λ_1

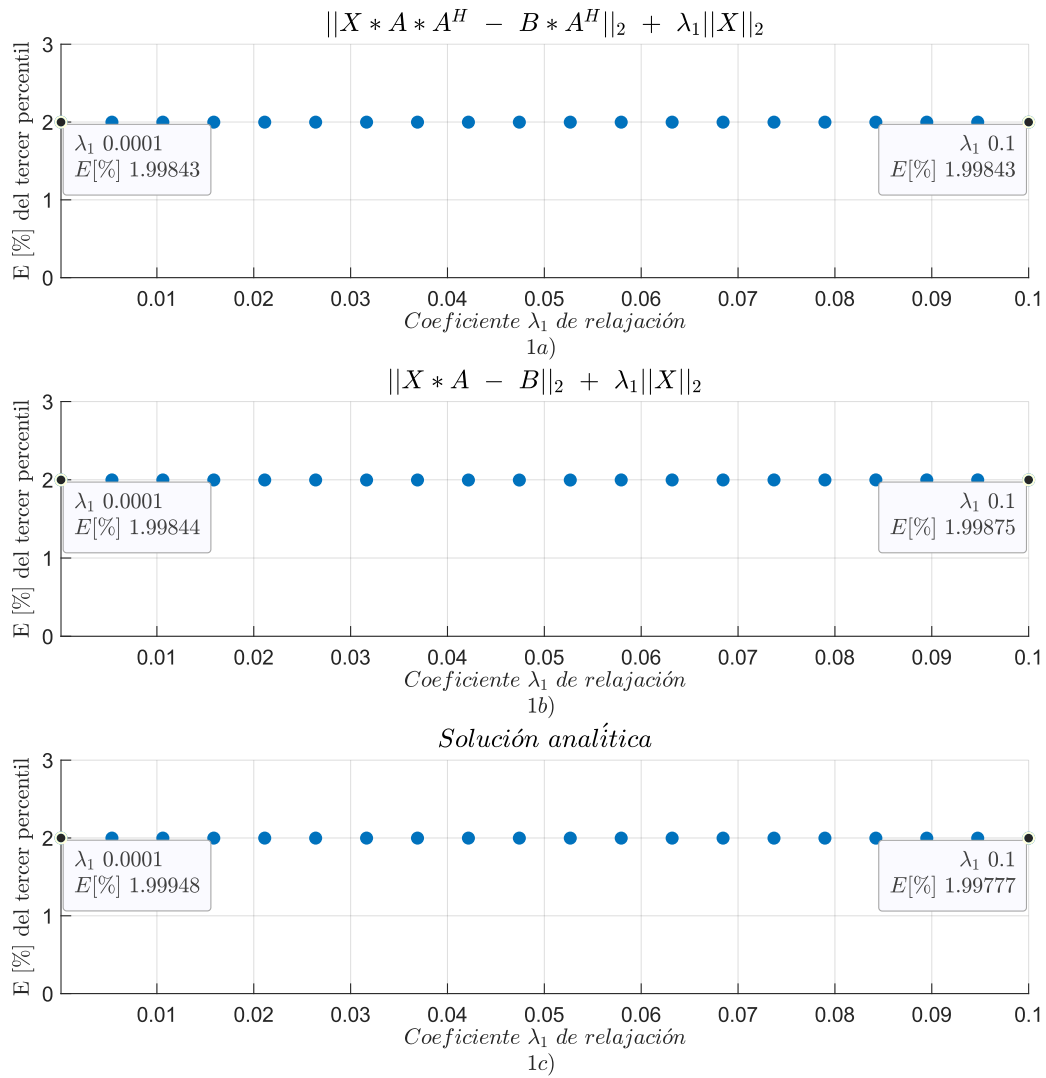


Tabla 3

Resultados de las tres (3) soluciones para ajustar el M2A3.

| λ_1 | <i>E</i> [%] para el tercer cuartil | | |
|-------------|-------------------------------------|------------|------------|
| | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 |
| 0,0001 | 1,9984 | 1,9984 | 1,9995 |
| 0,0053 | 1,9984 | 1,9984 | 1,9985 |
| 0,0106 | 1,9984 | 1,9980 | 1,9985 |
| 0,0158 | 1,9984 | 1,9978 | 1,9984 |
| 0,0211 | 1,9984 | 1,9977 | 1,9985 |
| 0,0263 | 1,9984 | 1,9976 | 1,9984 |
| 0,0316 | 1,9984 | 1,9973 | 1,9984 |
| 0,0369 | 1,9984 | 1,9974 | 1,9984 |
| 0,0421 | 1,9984 | 1,9970 | 1,9984 |
| 0,0474 | 1,9984 | 1,9966 | 1,9983 |
| 0,0526 | 1,9984 | 1,9968 | 1,9982 |
| 0,0579 | 1,9984 | 1,9979 | 1,9982 |
| 0,0631 | 1,9984 | 1,9979 | 1,9981 |
| 0,0684 | 1,9984 | 1,9978 | 1,9981 |
| 0,0737 | 1,9984 | 1,9981 | 1,9980 |
| 0,0789 | 1,9984 | 1,9982 | 1,9980 |
| 0,0842 | 1,9984 | 1,9985 | 1,9979 |
| 0,0894 | 1,9984 | 1,9986 | 1,9979 |
| 0,0947 | 1,9984 | 1,9989 | 1,9978 |
| 0,1 | 1,9984 | 1,9987 | 1,9978 |

nes al problema de optimización, como se puede observar los resultados son los mismos, para ver mejor los valores se muestran en la Tabla 3. Los resultados son iguales para los diferentes valores de λ_1 y para las diferentes soluciones, por esta razón se toma una un método de solución y un valor de λ_1 para continuar con la evaluación del ajuste y de desempeño del método.

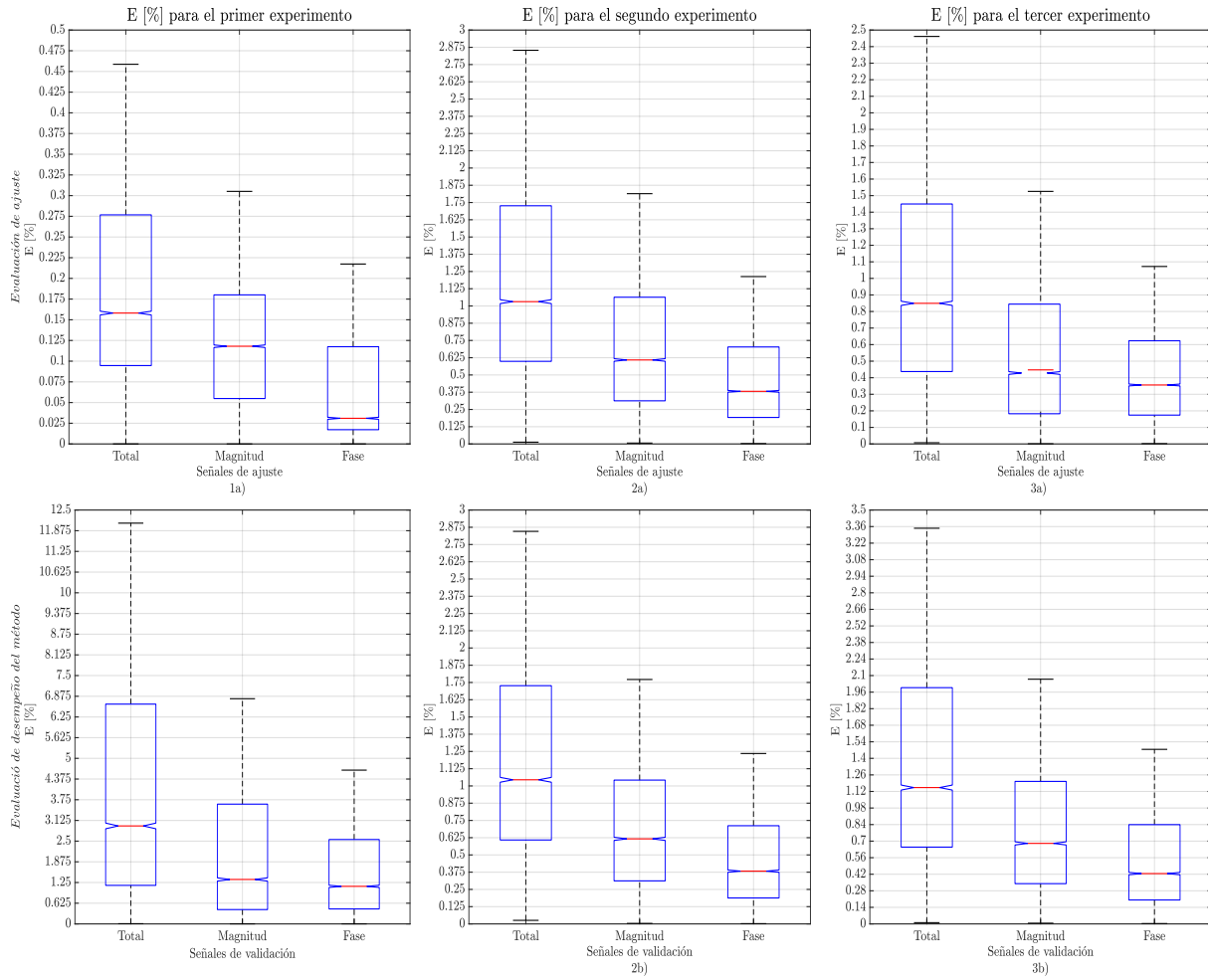
De la misma forma que se presentan los resultados para el primer y segundo experimento

experimento. Se hace para la señales aleatorias de tensión linealmente dependientes, el cual es el tercer experimento. Los resultados se presentan gráficamente por medio de un *Diagrama de Caja y Bigotes o Blox-Plot*, con el fin de representar gráficamente los $E[\%]$, $E^{mag}[\%]$ y $E^{ang}[\%]$ a través de sus cuartiles.

A continuación, en la Figura 3 se muestran dos (2) diagramas para representar gráficamente los datos del $E[\%]$, $E^{mag}[\%]$ y $E^{ang}[\%]$ en las señales de ajuste y validación. En la parte superior de la columna derecha (parte 3a) se presentan los errores en las señales de ajuste y en la parte inferior de la columna derecha (parte 3b) se presentan los errores en las señales de validación de desempeño.

Figura 3

Error E [%] para las señales a) de ajuste y b) de validación para cada experimento.



5. Análisis de resultados

En la parte superior de la Figura 3 se observa para el Error de Ajuste el primer, el segundo (la mediana), el tercer cuartil y el valor máximo del error total $E_A[\%]$, de magnitud $E_A^{mag}[\%]$ y del ángulo de fase $E_A^{ang}[\%]$ para las señales de ajuste usando el Modelo de Matriz Admitancias Armónicamente acopladas (*M2A3*) presentado en la Ecuación (1) y ajustado con el método de ajuste basado en Álgebra Matricial para el *M2A3* con Corriente de corte Desconocida (*AM-M2A3CD*) presentando en la Ecuación (2) para las señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación, i.e., el primer experimento, para las señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente independientes, el segundo experimento y para las señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente dependientes, el tercer experimento.

- Para el primer experimento: el valor que tiene el $E_A[\%]$ en el 75% de los datos (tercer cuartil) es de aproximadamente 0,275%, estadísticamente no es recomendable tomar el valor máximo del error a la hora de hacer análisis porque generalmente se produce por datos atípicos. Así, se puede decir que para señales que están dentro del rango de la variación sistemática de la tensión de alimentación, el método *AM-M2A3CD* se ajusta correctamente al modelo de carga individual en la frecuencia *M2A3* para los tipos de cargas propuestos *SMPS no-FP*, *SMPS p-FP* y *CFL* conectados al mismo *PCC*.
- Para el segundo experimento: el valor que tiene el $E_A[\%]$ en el 75% de los datos (tercer cuartil) es de aproximadamente 1,7%. Así, se puede decir que para señales que están dentro

de las señales de tensión de alimentación linealmente independientes del experimento usadas para ajustar el modelo individual en el dominio de la frecuencia, el método *AM-M2A3CD* se ajusta muy bien al modelo de carga individual en la frecuencia *M2A3* para los tipos de cargas propuestos *SMPS no-FP*, *SMPS p-FP* y *CFL* conectados al mismo *PCC*.

- Para el tercer experimento: el valor que tiene el $E_A[\%]$ en el 75 % de los datos (tercer cuartil) es de aproximadamente 1,57 %. Así, se puede decir que para señales que están dentro de las señales de tensión de alimentación linealmente dependientes del experimento usadas para ajustar el modelo individual en el dominio de la frecuencia, el método *RR-M2A3* se ajusta muy bien al modelo de carga individual en la frecuencia *M2A3* para los tipos de cargas propuestos *SMPS no-FP*, *SMPS p-FP* y *CFL* conectados al mismo *PCC*.

Ahora bien, en la parte inferior de la Figura 3, también se observa para el Error de Validación de desempeño el primer, el segundo (la mediana), el tercer cuartil y el valor máximo del error total $E_V[\%]$, de magnitud $E_V^{mag}[\%]$ y del ángulo de fase $E_V^{ang}[\%]$ para las señales de validación de desempeño usando el modelo individual en el dominio de la frecuencia *M2A3* ajustado en la Sección 2.1 con las señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación o ajustado en Sección 2.2 para las señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente independientes o ajustado en la Sección 2.3 para las señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente dependientes.

- Para el primer experimento: el valor que tiene el $E_V[\%]$ en el 75 % de los datos (tercer cuartil) es de aproximadamente 6,5 %. Se esperaba que los valores de los $E_V[\%]$ sean mayores

comparados con los valores de los E_A [%] debido a que las señales de validación de desempeño no se usaron para obtener los parámetros faltantes del $M2A3$, i.e., no están dentro del grupo de las señales del experimento. Sin embargo, se puede decir que para estas señales de la tensión de alimentación, el método $AM-M2A3CD$ se ajusta bien al modelo de carga individual en la frecuencia $M2A3$ para los tipos de cargas propuestos $SMPS$ *no-FP*, $SMPS$ *p-FP* y CFL conectados al mismo PCC .

- Para el segundo experimento: el valor que tiene el E_V [%] en el 75 % de los datos (tercer cuartil) es de aproximadamente 1,7 %. A diferencia del primer experimento, este valor del E_V [%] es aproximadamente igual al del E_A [%]. Aunque las señales de validación de desempeño no fueron usadas para ajustar el $M2A3$, el método $AM-M2A3CD$ se ajusta de igual manera al $M2A3$ para los tipos de cargas propuestos $SMPS$ *no-FP*, $SMPS$ *p-FP* y CFL conectados al mismo PCC , que para las señales de ajuste. Este hecho es muy importante porque el rango de señales en donde el método de ajuste tiene un muy buen desempeño es mucho mayor que para el primer experimento, porque mientras que para el primer experimento el modelo de carga individual en el dominio de la frecuencia se ajusta muy bien a las señales de ajuste, en este experimento se ajusta muy bien a las señales de ajuste y validación.
- Para el tercer experimento: el valor que tiene el E_V [%] en el 75 % de los datos (tercer cuartil) es de aproximadamente 1,99 %. Este valor del E_V [%] es cercano al del E_A [%], a diferencia de lo que pasa en el primer experimento. Aunque las señales de validación de desempeño no fueron usadas para ajustar el $M2A3$, el método $RR-M2A3$ se tiene un buen desempeño

para los tipos de cargas propuestos *SMPS no-FP*, *SMPS p-FP* y *CFL* conectados al mismo *PCC*. Este hecho es muy importante porque el rango de señales en donde el método de ajuste tiene un buen desempeño es mucho mayor que para el primer experimento, porque mientras que para el primer experimento el modelo de carga individual en el dominio de la frecuencia se ajusta muy bien a las señales de ajuste, en este experimento se ajusta bien a las señales de ajuste y validación. Este es un resultado interesante porque a diferencia del primer experimento, este experimento se puede aplicar para una situación en donde no se tiene control de la tensión de alimentación.

Para sintetizar los resultados obtenidos en los tres experimentos, se crea una Tabla que contiene toda la información de la Figura 3. Estos datos se presentan en la Tabla 4.

En donde en las columnas de izquierda a derecha se ubican: Mínimo, el cual representa el valor mínimo de los datos; el cuartil uno ($Q1$), que representa el 25 % de los datos; el dos ($Q2$) o mediana, que representa el valor medio de los datos; el tres ($Q3$), que representa el 75 % de los datos; Máximo, el cual representa el valor máximo de los datos y el rango intercuartílico (IQR), que representa el rango entre los cuartiles $Q3$ y $Q1$.

Si se comparan los resultados obtenidos en el primer modelo de carga individual en el dominio de la frecuencia para las señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación (primer experimento), se observa lo siguiente: Para el error total, el cuartil tres ($Q3$) es 24 veces mayor y el rango intercuartílico (IQR) es 30 veces mayor en las señales de validación de desempeño comparadas con las de ajuste. En el caso del segundo modelo de carga individual en el dominio de la frecuencia para las señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente independientes

(segundo experimento), se observa lo siguiente: Para el error total, el cuartil tres (Q_3) es aproximadamente 0,2% mayor y el rango intercuartílico (IQR) es aproximadamente 1% menor en las señales de validación de desempeño comparadas con las de ajuste.

Para el tercer modelo de carga individual en el dominio de la frecuencia ajustado con las señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente dependientes (tercer experimento), se observa lo siguiente: Para el error total, el cuartil tres (Q_3) es aproximadamente 1,2% mayor y el rango intercuartílico (IQR) es aproximadamente 1% mayor en las señales de validación de desempeño comparadas con las de ajuste.

Esto quiere decir que para el primer modelo individual en el dominio de la frecuencia $M2A3-1$ (Sección 2.1), el desempeño del método no es bueno para señales diferentes de las señales de ajuste (señales de validación de desempeño). En cambio para el segundo $M2A3-2$ (Sección 2.2) y tercer modelo $M2A3-3$ (Sección 2.3), la evaluación de ajuste y de desempeño del método tienen un buen rendimiento, i.e., el valor del error tiene valores pequeños, para las señales de ajuste y para las que son diferentes de las señales usadas en el ajuste (señales de validación de desempeño). Sin embargo, en el caso del segundo experimento en la práctica es difícil ajustar el modelo con el método de ajuste, porque este tipo de señales no son fáciles de obtener, ya que se tendrían que tomar medidas en un PCC a lo largo de un intervalo de tiempo amplio, o durante diferentes horas del día. Pero para en el caso del tercer experimento sí se podría ajustar el método, porque estas señales se podrían obtener cuando se toman medidas en un PCC a lo largo de un intervalo de tiempo corto, debido a que la tensión no varía significativamente.

De forma general:

- El método *AM-M2A3CD* se ajusta muy bien para las señales de ajuste en el primer modelo (primer experimento), i.e., tiene una buena evaluación de ajuste pero no tiene un buen desempeño del método y la dispersión en los valores de los errores son más dispersos en las señales de validación de desempeño que en el segundo y tercer modelo.
- El método *AM-M2A3CD* se ajusta de la misma manera en el segundo modelo (segundo experimento) para las señales de ajuste y validación. Así, el método de ajuste basado en *AM-M2A3CD* tiene un mejor desempeño para el segundo modelo individual en el dominio de la frecuencia, ya que ofrece un menor error en las señales de validación de desempeño que modelan los posibles estados que puede tener la tensión de alimentación.
- El método *RR-M2A3* presenta una buena evaluación de ajuste para el tercer experimento y un buen desempeño del método. Esto es algo muy importante porque por medio del procedimiento planteado en la Sección 2.1 y con medidas hechas en un punto de acople común se puede caracterizar las cargas conectadas a este *PCC* por medio de un modelo individual en el dominio de la frecuencia.

Tabla 4

Síntesis de resultados de cada uno de los tres (3) experimentos de ajuste para el M2A3.

| Señales de la variación sistemática de la tensión de alimentación | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|----------|--------|
| Error | Mínimo | Q1 | Q2 | Q3 | Máximo | IQR |
| E_A [%] | 0 | 0,0947 | 0,1581 | 0,2767 | 4,7025 | 0,1821 |
| E_A^{mag} [%] | 0 | 0,0548 | 0,1180 | 0,1801 | 2,1609 | 0,1252 |
| E_A^{ang} [%] | 0 | 0,0172 | 0,0310 | 0,1175 | 4,2057 | 0,1002 |
| E_V [%] | 0,0062 | 1,1640 | 2,9589 | 6,6381 | 84,9934 | 5,4742 |
| E_V^{mag} [%] | 0,0017 | 0,4325 | 1,3423 | 3,6169 | 76,6336 | 3,1844 |
| E_V^{ang} [%] | 0,0015 | 0,4519 | 1,1346 | 2,5484 | 21,3783 | 2,0966 |
| Señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente independientes | | | | | | |
| Error | Mínimo | Q1 | Q2 | Q3 | Máximo | IQR |
| E_A [%] | 0,0129 | 0,5988 | 1,0314 | 1,7265 | 16,6716 | 1,1277 |
| E_A^{mag} [%] | 0,0064 | 0,3126 | 0,6087 | 1,0635 | 8,0810 | 0,7509 |
| E_A^{ang} [%] | 0,0027 | 0,1920 | 0,3814 | 0,7029 | 15,5712 | 0,5109 |
| E_V [%] | 0,0257 | 0,6082 | 1,0445 | 1,7268 | 14,7416 | 1,1186 |
| E_V^{mag} [%] | 0,0037 | 0,3119 | 0,6165 | 1,0423 | 11,2853 | 0,7304 |
| E_V^{ang} [%] | 0,0018 | 0,1880 | 0,3825 | 0,7116 | 10,2572 | 0,5236 |
| Señales aleatorias de tensión de alimentación linealmente dependientes | | | | | | |
| Error | Mínimo | Q1 | Q2 | Q3 | Máximo | IQR |
| E_A [%] | 0,0272 | 0,5166 | 0,9343 | 1,5684 | 13,4777 | 1,0519 |
| E_A^{mag} [%] | 0,0068 | 0,2654 | 0,5120 | 0,9523 | 8,2568 | 0,6869 |
| E_A^{ang} [%] | 0,0030 | 0,1874 | 0,3740 | 0,6511 | 10,8009 | 0,4637 |
| E_V [%] | 0,0104 | 0,6494 | 1,1529 | 1,9978 | 18,3403 | 1,3484 |
| E_V^{mag} [%] | 0,0060 | 0,3404 | 0,6809 | 1,2050 | 10,5111 | 0,8646 |
| E_V^{ang} [%] | 0,0028 | 0,2023 | 0,4256 | 0,8394 | 11,81380 | 0,6371 |

6. Conclusiones

A partir de los modelos individuales en el dominio de la frecuencia y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, se puede presentar la siguiente conclusión general:

Se analizan diferentes escenarios de operación a partir de tres (3) experimentos y una evaluación de desempeño hechos para un conjunto de cargas individuales conectadas al mismo punto de acople común *PCC*. Los tres (3) experimentos se llevan a cabo con el objetivo de obtener señales de tensión de alimentación y la respuesta en corriente agregada a través de un modelo de carga individual en el dominio del tiempo, con el fin de obtener la tensión y corriente necesarias para realizar el ajuste del modelo individual en el dominio de la frecuencia. La evaluación de desempeño se realiza con el propósito de obtener señales de validación de desempeño diferentes a las obtenidas en los primeros tres (3) experimentos utilizados para el ajuste, con el objetivo de evaluar el desempeño del método.

Al obtener los modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia, se comprueba que el método de ajuste basado en Álgebra Matricial para el Modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas con Corriente de corte Desconocida *AM-M2A3CD* presenta una buena evaluación de ajuste en el primer y segundo experimento. Para el segundo experimento, también muestra una buena evaluación del desempeño del método. En cuanto al tercer experimento, el método de ajuste basado en *la norma- l_2 regularizada o Rigde Regression problem* para el *M2A3*, fue adecuado tanto en el ajuste como en el desempeño del método.

De manera más puntual:

Es importante tener en cuenta que, para ajustar los modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia de una manera sencilla, se debe asegurar que las señales de tensión de alimentación sean linealmente independientes. De lo contrario, surgen problemas de mal condicionamiento de la matriz de tensión ocasionando que la matriz no sea invertible.

Al simular múltiples estados de operación en la tensión de alimentación, que sean diferentes a las usadas para el ajuste en el conjunto de cargas conectadas al mismo *PCC*, se observa que el valor del error (*E %*) aumenta para estas condiciones de operación. En el primer experimento, se obtiene una buena la evaluación de ajuste, pero no un desempeño del método, lo cual puede indicar un problema de sobreajuste en los datos. Para el segundo y tercer experimento, aunque en general el (*E %*) es mayor en comparación con el primer experimento, se logra un mejor desempeño del método para las múltiples condiciones de operación.

La variación sistemática de la tensión diseñada, garantiza la independencia lineal, lo que asegura que la matriz $([1 \ V^T \ V^H]^T [1 \ V^T \ V^H]^*)^{-1}$ sea invertible. Esta variación permite diseñar la matriz de tensiones para el ajuste de la matriz de admitancias y se observar los efectos del desacople de las tensiones en la respuesta en corriente agregada del modelo de carga.

Estos hallazgos demuestran la utilidad de los métodos de ajuste empleados y resaltan la importancia de obtener modelos de carga individual precisos en el dominio de la frecuencia. Los resultados obtenidos brindan información valiosa para el diseño y la operación eficiente

de sistemas de energía.

En cuanto a las simulaciones realizadas para la obtención de los modelos individuales en el dominio de la frecuencia, se observa que a medida que el número de cargas conectadas al mismo *PCC* se acerca a su valor asintótico, el valor del *E %* disminuye.

Finalmente, estos resultados respaldan la eficacia y la aplicabilidad de los métodos utilizados, y sirven para investigaciones futuras en el área de modelado y ajuste de cargas individuales en sistemas eléctricos.

En conjunto, estas conclusiones resaltan la importancia de considerar la dependencia lineal de las señales de tensión de alimentación, así como la influencia de las condiciones de operación en el ajuste y desempeño del método. También se destaca la utilidad de la variación sistemática de la tensión diseñada para analizar el desacople de las tensiones en el modelo de carga. Estos resultados proporcionan información valiosa para mejorar la precisión y eficiencia en el ajuste de modelos de carga individual en sistemas eléctricos.

7. Recomendaciones y trabajos futuros

Como recomendación se sugiere continuar con este trabajo de grado y centrarse en las siguientes áreas:

Diseñar un algoritmo para determinar de manera óptima el valor del coeficiente de Tikhonov (λ_1). Esto permitiría mejorar el ajuste de los modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia y optimizar la precisión de los resultados obtenidos.

Explorar el uso de otros modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia. Existen diversos modelos y enfoques que podrían ser aplicados en este contexto. Comparar y evaluar diferentes modelos podría brindar una perspectiva más completa y permitir identificar cuál es el más adecuado para las condiciones específicas de estudio.

Realizar una evaluación exhaustiva del desempeño del método propuesto en una variedad más amplia de escenarios y condiciones de operación. Esto ayudaría a validar la aplicabilidad y robustez del método en situaciones más complejas y diversificadas.

Considerar la implementación práctica del método propuesto en un entorno real. Esto implicaría la aplicación del método en puntos de acople común de sistemas eléctricos actuales y la evaluación de su rendimiento en condiciones de operación reales. Además, se podrían identificar posibles desafíos y oportunidades para optimizar el método en un entorno práctico.

En general, estas recomendaciones y trabajos futuros permitirán ampliar el conocimiento y la aplicación de los modelos de carga individual en el dominio de la frecuencia, así como mejorar la precisión y eficiencia de los métodos de ajuste utilizados.

Referencias Bibliográficas

- A.B. Nassif, J. Yong, W. X. (2010). Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances. In *IET Gener. Transm. Distrib*, volume 4, pages 363–375.
- ANSI C84.1-Standard, a. n. (2012). Electric power systems and equipment voltage ratings 60 (hz). In *National Electrical Manufacturers Association*.
- Djokic, S. Z. and Collin, A. J. (2014). Cancellation and attenuation of harmonics in low voltage networks. In *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pages 137–141.
- Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. Springer New York.
- Malagon-Carvajal, G., Almeida, C., Duarte, C., Ordonez-Plata, G., and Kagan, N. (2021). Nonintrusive optimal parameters estimation for a switch mode power supply equivalent circuit model: 120 v 60 hz cfls case study. *Energy and Buildings*, 253:111488.
- Malagon-Carvajal, G., Ordonez-Plata, G., and Duarte, C. (2023). A method to compute frequency domain models based on direction-dependent derivative of the variation of voltage and current phasors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, pages 1–8.
- Malagón Carvajal, G. A. (2020). Métodos de modelado y simulación para la evaluación de la

distorsión de cargas basadas en fuentes conmutadas considerando los fenómenos de diversidad y atenuación-amplificación. In *Bucaramanga, Santander, Colombia*, pages 379–385.

UNE-EN50160:2011/A1 (2015). Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución. In *Asociación Española de Normalización y Certificación*.