

Estimación del estado armónico en sistemas de distribución utilizando métodos de regularización

Ana Elvira Delgado Camacho y Luis Felipe Castilla Osorio

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera e Ingeniero Electricista

Director:

César Antonio Duarte Gualdrón

PhD. in Electrical and Computer Engineering

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado a:

A Dios por toda la fortaleza, sabiduría y discernimiento que nos dio para llegar hasta aquí.

Nuestros padres que con su infinito amor y paciencia nos ayudaron a recorrer este hermoso viaje.

Agradecimientos

Agradecemos de manera especial a Dios, nuestras familias, maestros y amigos, por el tiempo y apoyo incondicional que nos ofrecieron para poder consolidar este trabajo de grado.

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Teórico.....	17
2.1 Precedentes	17
2.2 Descripción del problema	18
2.3 Motivación	20
3. Métodos de estimación de estado armónico	20
3.1 Introducción a la Estimación de Estado Armonico (HSE)	21
3.2 Descomposición de Valores Singulares (SVD)	22
3.3 Descomposición en Valores Singulares Truncado (TSVD)	23
3.4 Ridge Regression	27
3.4.1 Validación y validación cruzada	28
3.5 Conclusiones de los métodos estudiados	30
4. Aplicación de los métodos propuestos.....	31
4.1 Descripción del sistema de distribución utilizado	32
4.2 Procedimiento experimental	37
4.3 Aplicación de la descomposición en valores singulares truncados	44

4.4 Aplicación de ridge regression.....	47
4.5 Análisis de resultados	50
4.6 Resultados del método descomposición en valores singulares truncados (SVDT)	52
4.7 Resultados del método Ridge Regression.....	66
4.8 Comparación de los métodos propuestos.....	84
5. Conclusiones	85
6. Recomendaciones	86
Referencias Bibliográficas	88
Apéndices.....	91

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Logaritmo de valores singulares.....	24
Figura 2. Logaritmo de valores singulares.....	25
Figura 3. Esquema validación cruzada	30
Figura 4. Topología del Sistema de Distribución	32
Figura 5. Parámetros del Sistema de Distribución.....	33
Figura 6. Linea de comando OpenDss.....	35
Figura 7. Linea de comando OpenDss.....	35
Figura 8. Linea de comando OpenDss.....	36
Figura 9. Linea de comando OpenDss.....	36
Figura 10. Linea de comando OpenDss.....	37
Figura 11. Linea de comando OpenDss.....	37
Figura 12. Sistema de distribución con 3 puntos de medición, primera posición.	39
Figura 13. Sistema de distribución con 3 puntos de medición, segunda posición.....	40
Figura 14. Sistema de distribución con 5 puntos de medición, primera posición.	41
Figura 15. Sistema de distribución con 5 puntos de medición, segunda posición.....	42
Figura 16. Sistema de distribución con 10 puntos de medición, primera posición.	43
Figura 17. Sistema de distribución con 10 puntos de medición, segunda posición.....	44
Figura 18. Truncamiento óptimo desviación de -5%. Para 3 medias tomadas.	45
Figura 19. Truncamiento óptimo desviación de -2.18%. Para 5 medidas tomadas.....	46

Figura 20. Truncamiento óptimo, desviación de 2.50%. Para 10 medidas tomadas.	46
Figura 21. Truncamiento óptimo para desviación de 5%. Para 3 medidas tomadas.	47
Figura 22. Barrido lambda para cada una de las desviaciones.	48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Conjunto de datos	29
Tabla 2. Datos de Cargas	33
Tabla 3. Rango de búsqueda y Lambda seleccionado para desviaciones de -5 y -2.18.....	49
Tabla 4. Rango de búsqueda y Lambda seleccionado para desviaciones de 5 y 2.50	49
Tabla 5. Errores totales para desviación de -5% con monitores en los nodos 4, 27 y 29.	53
Tabla 6. Errores totales para desviación de -5% con medidas tomadas en los nodos 10, 18 y 30.....	54
Tabla 7. Errores totales para desviación de -5% con medidores en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23	55
Tabla 8. Errores totales para desviación de -5% con medidas en los nodos 6, 9, 20, 30 y 32.....	56
Tabla 9. Errores totales para desviación de -5 con medidores en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23, 31 y 33.....	57
Tabla 10. Errores para una desviación de -5 con medidores en los nodos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27 y 30.....	58
Tabla 11. Errores para desviación de 5% con medidores en los nodos 4, 27 y 29	59
Tabla 12. Errores totales para una desviación de 5% con monitores en los nodos 10, 18 y 30....	61
Tabla 13. Errores totales para desviación del 5% con medición en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23	62
Tabla 14. Errores totales para la desviación de 5% con medición en los nodos 6, 9, 20, 30 y 32	63
Tabla 15. Errores totales para la desviación de 5% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23, 31 y 33.....	64

Tabla 16. Errores totales para desviación de 5% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27 y 30.....	65
Tabla 17. Errores totales para desviación de -5% con monitores en los nodos 4, 27 y 29	67
Tabla 18. Errores totales para desviación de -5% con medidores en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23.....	68
Tabla 19. Errores totales para la desviación de -5% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23, 31 y 33.....	69
Tabla 20. Errores totales para desviación de -5% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27 y 30.....	70
Tabla 21. Errores totales para desviación de -2.18% con monitores en los nodos 4, 27 y 29.	71
Tabla 22. Errores totales para desviación de -2.18% con medidores en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23.....	72
Tabla 23. Errores totales para la desviación de -2.18% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23, 31 y 33.....	73
Tabla 24. Errores totales para desviación de -2.18% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27 y 30.....	74
Tabla 25. Errores totales para desviación de 2.50% con monitores en los nodos 4, 27 y 29.	75
Tabla 26. Errores totales para desviación de 2.50% con medidores en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23	76
Tabla 27. Errores totales para la desviación de 2.50% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23, 31 y 33.....	78
Tabla 28. Errores totales para desviación de 2.50% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27 y 30.....	79

Tabla 29. Errores totales para desviación de 5% con monitores en los nodos 4, 27 y 29.	80
Tabla 30. Errores totales para desviación de 5% con medidores en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23	81
Tabla 31. Errores totales para la desviación de 5% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23, 31 y 33.....	82
Tabla 32. Errores totales para desviación de 5% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27 y 30.....	83

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Errores del método descomposición en valores singulares truncados.....	91
Apéndice B. Truncamiento óptimo.....	104
Apéndice C. Selección de rangos.....	119
Apéndice D. Errores obtenidos con el método Ridge Regression	134
Apéndice E. Codigos	143

Resumen

Título: Estimación del estado armónico en sistemas de distribución utilizando métodos de regularización*

Autores: Ana Elvira Delgado Camacho y Luis Felipe Castilla Osorio**.

Palabras Claves: Sistema de distribución, cargas no lineales, distorsión armónica, estimación de estado, variables de estado, SVD truncado, Ridge Regression.

Descripción:

A medida que los sistemas eléctricos de potencia se han ido haciendo más complejos debido a que cada vez más se integran elementos que describen comportamientos no lineales, los métodos de estimación de estado armónico han ido evolucionando para reducir el error en la estimación.

Este trabajo se enfoca en la aplicación de dos métodos matemáticos TSVD (descomposición en valores singulares truncado) y Ridge Regression (Regresión de cresta), orientados hacia la estimación del estado armónico en tensión a partir de corrientes obtenidas por ejemplo de un pronóstico en donde se presenta desviación del estado de un sistema de distribución de energía eléctrica y el cual se ha acotado a un sistema completamente determinado.

El objetivo de este documento es ofrecer una descripción clara, lógica, coherente y veraz del proceso analítico por medio del cual podemos estimar el estado armónico en tensión a partir de corrientes obtenidas de un pronóstico en donde se presenta desviación del estado de las corrientes de una pequeña red de distribución utilizando dos métodos de regularización. De igual manera se adjuntan imágenes y tablas que ayudan a mostrar de manera gráfica y ordenada los resultados obtenidos, así como la comparación de resultados entre los métodos implementados.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director: César Antonio Duarte Gualdrón PhD. in Electrical and Computer Engineering

Abstract

Título: Estimation of the harmonic state in distribution systems using regularization methods*

Authors: Ana Elvira Delgado Camacho y Luis Felipe Castilla Osorio**.

Keywords: Distribution system, nonlinear loads, harmonic distortion, state estimation, state variables, truncated SVD, Ridge regression.

Description:

As electrical power systems have become more complex due to the fact that elements that describe non-linear behaviors are increasingly integrated, harmonic state estimation methods have evolved to reduce the error in the estimation.

This work focuses on the application of two mathematical methods TSVD (truncated singular value decomposition) and Ridge Regression, oriented towards the estimation of the harmonic state in voltage from currents obtained, for example, from a forecast where presents deviation of the state of an electrical energy distribution system and which has been limited to a completely determined system.

The objective of this document is to offer a clear, logical, coherent and truthful description of the analytical process by means of which we can estimate the harmonic state in voltage from currents obtained from a forecast where there is a deviation in the state of the currents of a small distribution network using two regularization methods. In the same way, images and tables are attached that help to show the results obtained graphically and in an orderly manner, as well as the comparison of results between the implemented methods.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director: César Antonio Duarte Gualdrón PhD. in Electrical and Computer Engineering

Introducción

El uso del análisis armónico en los sistemas eléctricos se remonta al año 1893, en ese momento ingenieros de los Estados Unidos luchaban para encontrar las causas que producían un calentamiento inesperado en los motores que operaban. Para identificar la fuente del problema realizaron un análisis de componentes armónicos de varias formas de onda al que el motor fue conectado (Owen, 1998). Los sistemas de corriente alterna eran la novedad tecnológica en 1893 y esta fue la primera vez que se usó el análisis armónico para abordar problemas relacionados con este tipo de sistemas. Este hecho generalizó la preocupación entre los ingenieros por tales problemas térmicos y por la distorsión armónica.

En la actualidad el uso de esta herramienta matemática es más frecuente en el análisis de sistemas eléctricos, teniendo en cuenta que a medida que las redes se han ido expandiendo en diversos espacios geográficos, la aparición de los semiconductores y la integración de sistemas electrónicos han aumentado la aparición de tensiones y corrientes con distorsión armónica. La distorsión armónica causa pérdidas de energía por el efecto piel, así como sobre calentamiento del neutro por la circulación de armónicos triples para conexiones delta-estrella, disminución del par en los motores, torques pulsantes y menor eficiencia del sistema.

La distorsión armónica está presente en mayor medida en el sistema de distribución, el cual es monitoreado por los operadores de red (OR). En Colombia los operadores de red (OR) están obligados a instalar sistemas de medida, esto con el propósito de garantizar la confiabilidad y la calidad de la energía. Además dado el cumplimiento de la resolución CREG 025/95 los operadores de red son responsables del pronóstico de demanda, también elaboran y envían al centro nacional

de despacho (CND) el pronóstico horario correspondiente para ser utilizado en el despacho económico, atendiendo lo establecido en la resolución CREG 094 de 2012 , cada mercado de comercialización (MC) conectado al sistema de distribución, deberá tener un pronóstico horario individual , sin considerar la demanda relacionada con los usuarios conectados directamente al sistema de transmisión nacional (STN) .

A partir de lo antes descrito, se proponen los métodos matemáticos, descomposición en valores singulares truncados y Ridge Regression para la estimación del estado armónico en tensión a partir de corrientes obtenidas de un pronóstico de demanda en donde se presenta desviación del estado en un sistema de distribución. Por consiguiente, se evidencia la importancia que la estimación puede tener para los operadores de red en Colombia, ya que, en calidad de responsables del pronóstico de la demanda, puedan ganar precisión en el cálculo del estado de un sistema de distribución a frecuencia fundamental y armónicas, además cumplir con los requisitos normativos para el pronóstico.

1. Objetivos

A continuación, se desglosa los objetivos del trabajo de grado definiendo: objetivos generales y específicos:

1.1 Objetivo General

Implementar, analizar y comparar metodologías para la estimación del estado armónico.

1.2 Objetivos Específicos

Revisar las diferentes fuentes bibliográficas que propongan métodos sobre la estimación de estado de las componentes armónicas en sistemas de distribución.

Revisar las diferentes fuentes bibliográficas sobre los métodos SVD truncado y regularización de Tikhonov (Ridge Regression norma 2).

Implementar los métodos para la estimación del estado armónico de sistemas de distribución de energía eléctrica.

Comparar los métodos implementados mediante la simulación en las plataformas de MATLAB y OPENDSS utilizando el sistema de distribución de 34 barras reportado en la base de datos de la IEEE.

2. Marco Teórico

Con el propósito de contextualizar la temática descrita en el proyecto se expone a continuación algunos indicadores históricos y detalles del problema abordado que permiten comprender de manera general las causas que impulsan este trabajo de grado.

2.1 Precedentes

Los problemas relacionados con la distorsión armónica a nivel industrial han estado presentes desde finales del siglo XIX, dejando como resultado pérdidas en la calidad de la energía eléctrica. Muchos años atrás las grandes industrias eran las fuentes más significativas de contaminación armónica ya que dentro de sus equipos figuraban elementos que describían comportamientos no lineales. Hoy en día el panorama es distinto debido a la proliferación del uso de la electrónica de potencia, lo cual implica el uso de elementos semiconductores para el diseño de sistemas electrónicos, esto ha aumentado la cantidad de distorsión armónica presente en los sistemas eléctricos, por tales motivos se ha hecho necesario la evaluación de técnicas de estimación del estado armónico que permitan identificar de manera más precisa las posibles consecuencias de la distorsión sobre la red, estas técnicas son presentadas a continuación.

2.2 Descripción del problema

La estimación del estado armónico o HES (Harmonic State Estimation) es una herramienta a través de la cual se accede a la información de corrientes y tensiones distorsionadas a partir de medidas tomadas en algunos nodos del sistema. En el presente trabajo de grado se estiman tensiones armónicas partiendo de un pronóstico de demanda por medio del cual se obtienen las corrientes inyectadas a los diferentes nodos, además se analizan desviaciones de estos estados dentro de un sistema de distribución. Para lo descrito anteriormente se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

Los operadores de red son responsables del pronóstico de la demanda y deben velar por la calidad y oportunidad de la información enviada al centro nacional de despacho (CND), en donde se consideran valores de desviación mayores al 5% en el pronóstico de la demanda de energía para cada mercado de comercialización (MC), estas desviaciones son analizadas puesto que pueden poner en riesgo la atención segura y confiable de la demanda, además se identifican durante los seguimientos diarios al comportamiento de la demanda por parte del centro nacional de despacho (CND), por ejemplo, según el acuerdo 1303 del consejo nacional de operación (CON), desviaciones diarias mayores al 5% durante 2 días consecutivos en un mercado de comercialización (MC) deben:

- Realizar un análisis detallado de las desviaciones presentadas y las acciones de mejoras que emprenderán.
- Modificar diariamente el pronóstico de demanda de energía para los próximos 7 días contados a partir del día siguiente al reporte de desviación.

- Informar al comité de distribución y al CNO la evaluación de la efectividad de las acciones de mejora reportadas al CND.

Teniendo en cuenta lo anterior, una correcta estimación del estado armónico en tensión a partir de corrientes con desviaciones en magnitud puede evitar que los operadores de red OR se vean en la necesidad de ejecutar el proceso antes descrito.

Las medidas usadas para la estimación de estado armónico no corresponden a las mismas que se utilizan para un estudio a frecuencia fundamental, por lo tanto, es necesario contar con medidores con sincronización de estampas de tiempo; no obstante, la instalación de este tipo de medidores en todo el sistema de potencia resulta costoso debido a la cantidad de variables de estado que hay que medir.

Por otro lado, múltiples medidas también pueden dar lugar a la posibilidad de que se obtenga un problema mal condicionado lo cual hace referencia a problemas en la inversión de las matrices, ocasionando resultados poco confiables, esta condición se incrementa cuando se trabaja a frecuencias armónicas.

Este trabajo de grado busca estudiar los métodos matemáticos descomposición en valores singulares truncados y Ridge Regression para estimar el estado armónico en tensión a partir de corrientes obtenidas de un pronóstico de demanda. En este caso particular se estudia el desempeño de los métodos en la solución de problemas en la inversión de las matrices utilizando un sistema completamente determinado, pero para el cual se toman algunas variables como medidas (obtenidas de simulación) y otras del pronóstico. Para cada uno de los métodos, se definen escenarios de evaluación (sección 3.2) y se realiza un análisis de resultados del error (secciones 3.6 y 3.7).

2.3 Motivación

El incremento de cargas no lineales en sistemas de distribución, en especial en el sector residencial, ha ocasionado un aumento de corrientes distorsionadas a través del sistema, las cuales a su vez provocan la aparición de tensiones y corrientes distorsionadas que se propagan por todo el sistema de potencia causando la desconexión de cargas sensibles, fallas en dispositivos electrónicos, incremento en las pérdidas e interrupciones del fluido eléctrico las cuales conllevan a tener pérdidas, en especial en el sector industrial (Thunberg & Soder, 1998) (Almeida & Kagan, 2013). De acuerdo con lo antes expuesto, se evidencia la necesidad de contar con herramientas que permitan obtener información sobre el estado armónico del sistema bajo diferentes condiciones de operación, para así poder ejercer un control sobre la calidad de la potencia eléctrica entregada y de esta forma verificar el cumplimiento de los límites máximos de distorsión y pronóstico de la demanda permitidos en el sistema.

3. Métodos de estimación de estado armónico

A continuación, en este capítulo se presenta la problemática relacionada con la estimación de estado armónico. Además, se describen los métodos matemáticos para resolver tal cosa, y que permiten alcanzar los objetivos propuestos.

3.1 Introducción a la Estimación de Estado Armonico (HSE)

A finales de la década de 1980, GT Heydt planteo el problema de la estimación del estado armónico (Heydt, 1989), el cual se refiere a los sucesivos modos en los que se encuentra un sistema de distribución frente a cambios en las variables de tensión, corriente y demanda en los nodos del sistema. Cuando el fenómeno de distorsión se presenta en las señales de corriente y tensión y a partir de un conjunto de mediciones estratégicamente ubicadas, se obtiene suficiente información sobre el estado del sistema como para estimar la ubicación de sus fuentes de contaminación armónica.

La estimación del estado armónico (HSE) utiliza datos de medición de armónicos sincronizados, es decir que usa el sistema de posicionamiento global (GPS), en tiempo real para monitorear de manera instantánea y al mismo tiempo los puntos de medida. Estas medidas son de corrientes inyectadas a los nodos, la cuales se usan como información de entrada para estimar las tensiones (variables de estado) de barra a frecuencias armónicas y evaluar la penetración de armónicos para toda la red (Meliopoulos & Zelingher, 1994).

A continuación, se describe la ecuación matemática que describe el problema de HSE en orden armónico h -ésimo:

$$I(h) = Y(h)V(h) \quad (1)$$

Donde:

- $I(h)$ = Vector de las corrientes medidas.
- $Y(h)$ = Matriz de admitancias (o ganancia) que relaciona las variables de estado con las mediciones.
- $V(h)$ = Vector de tensiones de nodo (variables de estado).

Los elementos de las matrices y vectores corresponden a fasores por tanto números complejos. La posibilidad de resolver (1) está relacionada con la disponibilidad de las medidas en el sistema.

3.2 Descomposición de Valores Singulares (SVD)

Este método ha sido aplicado con éxito para afrontar problemas de estimación del estado armónico, ya que esta herramienta matemática permite revelar islas observables y no observables dentro del sistema, eliminando así la necesidad de realizar análisis específicos de observabilidad (Matair, Watson, Wong, Pham, & Arrillaga, 2000).

El método SVD descompone la matriz Y (1) en tres matrices:

$$Y = USW^T \quad (2)$$

Donde:

- S = matriz diagonal con elementos positivos o cero, que corresponden a los valores singulares de Y , U y W^T son matrices ortogonales.

De (1) y (2) podemos obtener la siguiente expresión:

$$V = WS^{-1}U^T I \quad (3)$$

Donde:

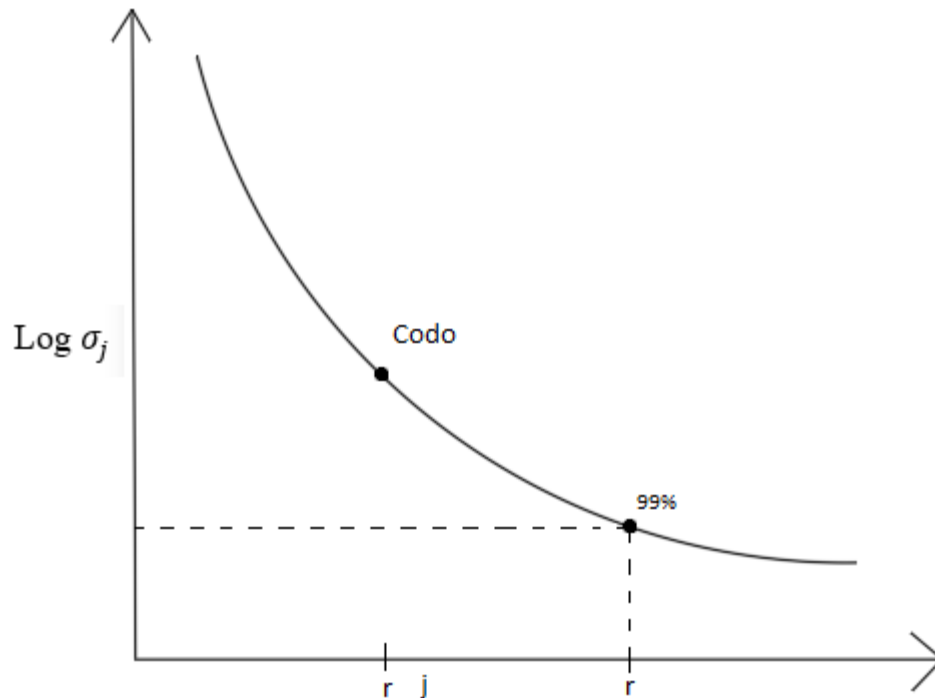
- $WS^{-1}U^T$ = pseudo inverso de Y . (4)

De manera general si los valores singulares de la matriz Y son distintos de cero, entonces el sistema eléctrico es completamente observable y las variables de estado pueden estimarse correctamente.

3.3 Descomposición en Valores Singulares Truncado (TSVD)

De manera general el método es una factorización de una matriz real o compleja, esta descomposición puede reducir el rango, así como la posibilidad de que, por medio de una transformación, basada en datos conocidos, se pueda hacer que los problemas se planteen a la medida de estos. SVD encuentra los mejores vectores o ejes en los cuales proyectar los datos, esto significa que la suma de los errores de proyección al cuadrado se minimiza.

Por otro lado, y a partir de la ecuación (2) SVD truncado es un método alternativo en donde se busca obtener la menor cantidad de modos dados por las columnas de las matrices U y W , para describir los datos en Y . Podemos decir entonces que $Y = Ur Sr Wr^T$, en donde r representa el rango, así el problema es ¿Cómo elegir r ?, de manera regular lo que se hace es trazar el logaritmo de los valores singulares de S denotados como σ_j cómo se observa en la Figura 1, teniendo la distribución se puede elegir r de tal manera que abarque valores singulares realmente energéticos u otros que son más pequeños. Este tipo de proceso para elegir el valor de r es muy heurístico y no funciona muy bien a menos que tenga una caída muy clara en sus valores singulares.

Figura 1.*Logaritmo de valores singulares*

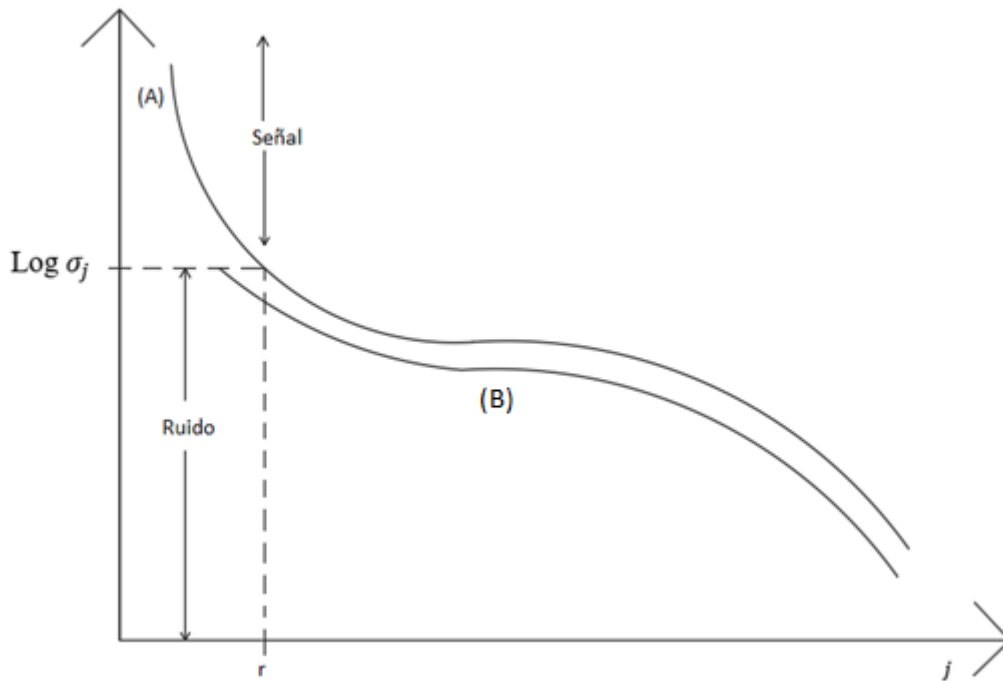
Además, tener en cuenta que, si se tiene más rango r , el modelo es más preciso, pero más complejo, si tiene un rango más bajo r entonces el modelo es menos preciso y menos complejo. Por tal motivo encontrar un punto óptimo con el cual sea posible obtener la mayor cantidad de información contribuye a obtener mejores resultados.

Para encontrar un punto óptimo de truncamiento en el año 2014 los investigadores Matan Gavish y David L. Donoho desarrollaron un artículo en el cual describen una forma óptima de truncar un rango (Gavish & Donoho, 2014). La premisa que plantearon es que los datos pueden escribirse como la suma de datos de rango bajo más una señal de ruido $Y = Y_{lr} + \gamma Y_{ruido}$ (5), se supondrá que el ruido tiene una varianza media cero, distribuidos normalmente. Para una

varianza media de cero unidades de ruido gaussiano multiplicado por gamma (γ), por lo que puede ser grande o pequeño dependiendo de la magnitud de este.

Figura 2.

Logaritmo de valores singulares



Por otro lado, es posible calcular analíticamente como se vería el cálculo del SVD de la matriz de ruido (B). También se tiene en cuenta que, para muchos datos, si toma su SVD en realidad se parecería a (A), donde en algún momento se desvía en los valores singulares grandes como se observa en la Figura 2. En tal caso para cualquier valor que sea más grande que el piso de ruido del SVD es señal y todo lo que esté por debajo es ruido y deberá ser truncado, así es precisamente como encuentran este rango optimo, truncando el SVD, verificando que los datos tienen una estructura de rango bajo y una matriz agregada.

Con este procedimiento se encuentra el primer valor singular que es mayor, que el valor singular más grande de su matriz de ruido con el fin de mantener todos esos valores singulares y truncar todo lo que sea más pequeño que el piso de ruido dado por el σ_{max} de su matriz. Por lo cual para determinar el rango de r se usan solo los valores singulares que son más grandes que un valor de umbral duro por encima de este ruido.

Dado el caso de que Y_{mxm} y $Y_{conocida}$, se trunca todo σ_j por debajo de algún valor umbral τ , definido por $\sigma < \tau$. Para lo cual $\tau = \frac{4}{\sqrt{3}}\gamma\sqrt{n}$ (6), donde n es la dimensión de la matriz Y_{ruido}

A continuación, se describe la formulación matemática para el caso de estudio.

Partiendo de la ecuación (1) tenemos:

$$YV = I \quad (7)$$

$$Y^H YV = Y^H I \quad (8)$$

$$V = (Y^H Y)^{-1} Y^H I \quad (9)$$

Usando la descomposicion en valores singulares tenemos que:

$$SVD(Y) = USW^H \quad (10)$$

$$SVD(Y^H) = WS^H U^H \quad (11)$$

Donde:

- U = Matriz ortogonal de $n \times n$
- W = Matriz ortogonal de $m \times m$
- S = Matriz diagonal de $n \times m$

Reemplazando (10) y (11) en (9) tenemos:

$$V = (WS^H U^H * USW^H)^{-1} * WS^H U^H * I \quad (12)$$

Teniendo en cuenta que:

$$UU^H = 1 \quad (13)$$

$$(W^H)^H = W \quad (14)$$

Al aplicar lo anterior a (12) tenemos:

$$V = W * (S^H * S)^{-1} * S^H U^H * I \quad (15)$$

$$V_{mx1} = W_{mxm} * (S_{mxn} * S_{nxm})^{-1} * S_{mxn} U_{nxn} * I_{nx1} \quad (16)$$

3.4 Ridge Regression

Es un método matemático que se desarrolló como una extensión de la regresión lineal, para estimar los coeficientes de modelos de regresión múltiple en escenarios donde las variables independientes están altamente correlacionadas. La teoría fue introducida por Hoerl y Kennard en el año 1970. El ajuste lineal tradicional implica minimizar la suma residual de cuadrados, en la regresión de cresta (ridge regression) se agrega un nuevo parámetro como medida correctiva para mitigar la multicolinealidad entre la regresión de las variables predictoras en el modelo. Este parámetro se encuentra mediante la validación cruzada ya que debe minimizar el error de prueba. Por lo tanto, se utiliza un rango de lambdas para ajustar el modelo y el valor optimo es la lambda que minimiza el error de prueba. A continuación, se expone su formulación matemática:

$$\beta_{ridge} = (Z^T Z + \lambda I_p)^{-1} Z^T y \quad (17)$$

Donde:

- β_{ridge} = coeficientes estimados
- Z = Matriz modelo de impedancias
- Z^T = Transpuesta de matriz modelo de impedancias
- y = Vector columna

- I_p = Matriz identidad
- λ = Parámetro correctivo

A partir de (1), se desea obtener la solución al conjunto de ecuaciones dada por la siguiente ecuación de gradiente cero:

$$\nabla F(V) = Y^H Y V - Y^H \quad (18)$$

Planteando el siguiente problema de optimización sujeto a la ecuación (1):

$$V = \arg \min \frac{1}{2} \|YV - I\|_F^2 + \lambda_1 \|V\|_F^2 \quad (19)$$

De (18) y (19) se tiene:

$$V = (\lambda_1 I_D + Y^H Y)^{-1} Y^H I \quad (20)$$

Donde I_D es la matriz identidad y λ_1 la penalización que se agrega.

En el problema de estimación de estado armónico es usual que el número de ecuaciones sea menor que el número de variables de estado a determinar por tanto se tiene que:

$$Y_{nxm} V_{mx1} = I_{nx1} \quad (21)$$

$$V_{mx1} = (\lambda * I_{D_{mxm}} + Y_{mxn}^H * Y_{nxm})^{-1} * Y_{mxn}^H * I_{nx1} \quad (22)$$

3.4.1 Validación y validación cruzada

En general se pueden elegir diferentes estructuras de modelo, el mejor tipo de modelo es el que tenga menor error de prueba es decir el que prediga mejor en casos no vistos.

Para poder elegir el mejor modelo existen técnicas que permiten estimar este error. Una de ellas se conoce como validación, en donde se divide el conjunto de datos en dos subconjuntos, los de entrenamiento y de validación. Se utiliza el subconjunto de entrenamiento para entrenar el modelo y después se aplica este sobre el subconjunto de datos de validación, que para ese modelo

sería un caso nuevo y por lo tanto el error que se obtiene sobre ese conjunto de datos de validación es un buen estimador del error de prueba.

La técnica de validación tiene algunas desventajas. La división del conjunto de datos se hace en 2 partes, existen diferentes formas de hacerlo. Eso puede influir en la correcta estimación del error de prueba, ya que se introduce una fuente de variabilidad. Además, al usar esta metodología no se disponen de todos los datos, se usa un subconjunto de datos de entrenamiento, el ajustar un modelo con solo esta porción de datos, este no será eficaz al momento de realizar una estimación. La idea general es que cuanto mayor número de datos se usen cabe esperar que el modelo obtenga una mejor estimación de error de prueba ya que se vería menos afectado por el componente aleatorio subyacente en el proceso.

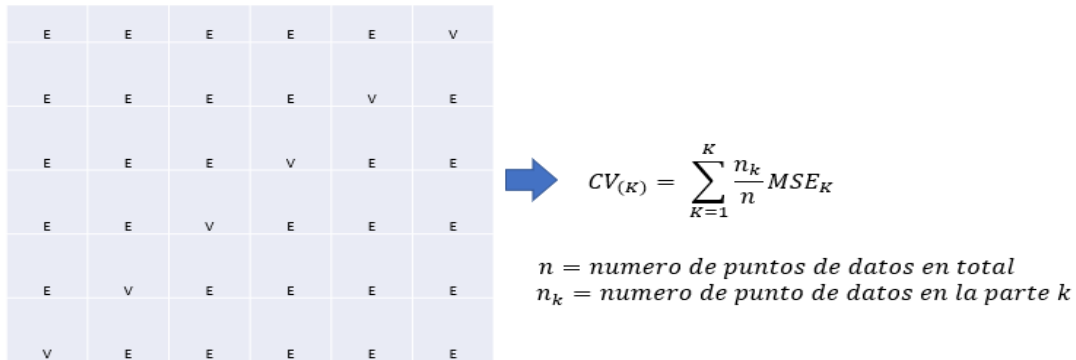
Estas desventajas pueden ser resueltas con la técnica de validación cruzada, que consiste en partir de un conjunto de datos representados en bloques, se divide el conjunto de datos (tabla 1) en K partes; por ejemplo, cuando $K = 6$, se tiene el escenario:

Tabla 1.

Conjunto de datos

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---

La idea es dividir aleatoriamente los datos en k partes de igual tamaño. Dejamos fuera la parte k, se ajusta el modelo a las otras k-1 partes (combinadas) y luego se obtienen predicciones. Esto se hace a su vez para cada parte $k = 1, 2, \dots, k$ y luego se combinan los resultados como se observa en la Figura 3.

Figura 3.*Esquema validación cruzada*

3.5 Conclusiones de los métodos estudiados

La descomposición en valores singulares, es un método que tiene como ventaja el hecho de que puede realizar estimaciones de componentes armónicas en islas observables y no observables, lo cual reduce la cantidad de procesos que se deben realizar para la estimación. Además, contar con islas observables y no observables tiene implicaciones económicas en la adquisición de equipos por parte del operador de red, para conocer el estado real de su sistema.

La descomposición en valores singulares truncada tiene la capacidad de simplificar el proceso matemático ya que obtiene la menor cantidad de modos para la descripción de los datos, también permite elegir un valor de rango que abarque la mayor cantidad de información disponible, adicional permite superar los problemas de mal condicionamiento, así mismo el uso de la metodología propuesta por Gavish y Donoho permite encontrar un equilibrio entre el tiempo de procesamiento y el sacrificio de datos (Gavish & Donoho, 2014).

La regresión de cresta (Ridge Regression) se observa que protege el modelo del sobreajuste, tiene buen desempeño cuando se trata de mejorar la estimación de mínimos cuadrados en situaciones donde hay multicolinealidad y reduce la complejidad del modelo.

Ridge Regression tiene como desventajas la incapacidad de realizar la selección de características, además el modelo final, incluye todos los predictores. Esto es así porque, si bien la penalización fuerza a que los coeficientes tiendan a cero, nunca llegan a ser exactamente cero.

En general se observa que las diferentes metodologías estudiadas pueden responder al problema de matrices mal condicionadas y en general al problema de inversión de matrices en un problema de estimación de estado armónico, a su vez es importante el desarrollo de investigación alrededor del tema ya que se promueve el flujo de información sobre este.

Dado que la precisión en la medición de armónicos se hace cada vez más importante, la revisión de estas metodologías brinda herramientas conceptuales para abordar estimaciones en sistemas lineales, lo que ofrece la oportunidad de conseguir un mejor control de estos, así como además buscar herramientas que permitan mitigar la contaminación armónica en las redes eléctricas.

4. Aplicación de los métodos propuestos

La temática que se describe a continuación abarca el desarrollo y aplicación de los métodos matemáticos propuestos para la estimación del estado armónico en tensión a partir de corrientes

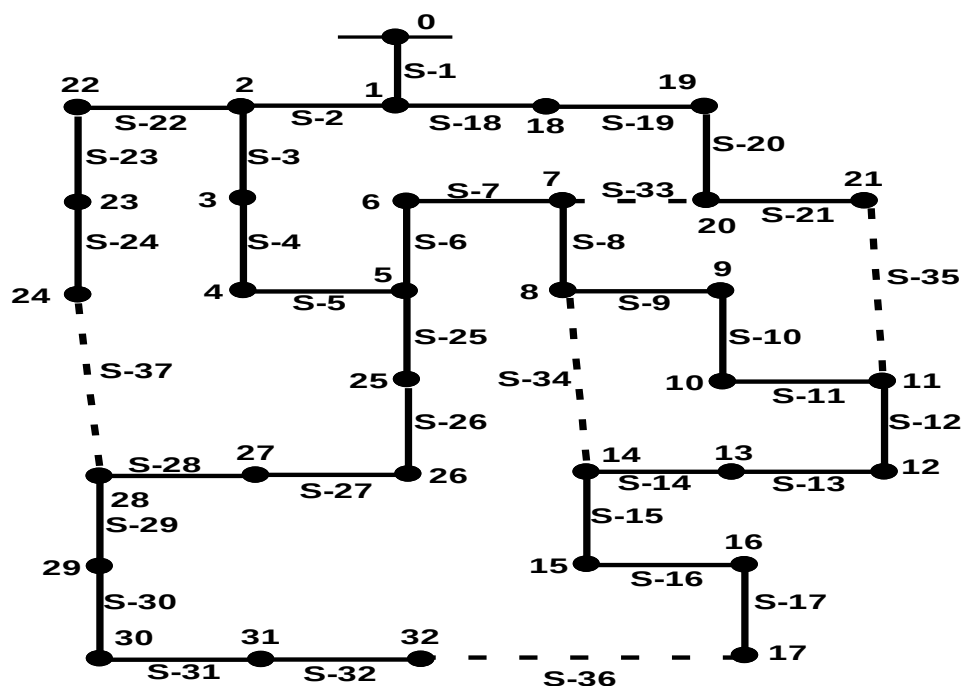
obtenidas de un pronóstico de demanda sobre un sistema de distribución. Incluyendo el análisis de los resultados obtenidos para cada método.

4.1 Descripción del sistema de distribución utilizado

La configuración topológica presentada a continuación en la Figura 4 corresponde a el caso base de operación donde las secciones de línea representadas por líneas discontinuas (secciones S-33, S-34, S-35, S-36, S-37) representan secciones de línea fuera de operación (interruptores de la línea en estado abierto) para garantizar la condición de operación radial. El sistema de distribución está completamente determinado. Para más información de los datos del sistema, consultar (Baran & Wu, 1989).

Figura 4.

Topología del Sistema de Distribución



Los parámetros del sistema son descritos en la Tabla 2, por medio de impedancias de línea donde, Br = numero de la rama, Rc = nodo inicial, Sn= nodo final.

Figura 5.

Parámetros del Sistema de Distribución

Br.No	Rc.Nd.	Sn.Nd.	Br.r(ohm)	Prm.x(ohm)	Br.No	Rc.Nd.	Sn.Nd.	Br.r(ohm)	Prm.x(ohm)
1	0	1	0,30249345	0,15419948	19	18	19	4,93503953	4,44685054
2	1	2	1,61745412	0,82381892	20	19	20	1,34350398	1,56955386
3	2	3	1,20078744	0,61154858	21	20	21	2,32578748	3,07513133
4	3	4	1,25032812	0,63681104	22	2	22	1,48031501	1,01148297
5	4	5	2,68700796	2,31955388	23	22	23	2,94619432	2,32644364
6	5	6	0,61417325	2,03018379	24	23	24	2,93963264	2,30019692
7	6	7	2,33398958	0,77132548	25	5	25	0,66601052	0,33923886
8	7	8	3,3792652	2,4278216	26	25	26	0,93241473	0,47473755
9	8	9	3,42519696	2,4278216	27	26	27	3,47440956	3,06332031
10	9	10	0,64501314	0,2132546	28	27	28	2,63845153	2,2985565
11	10	11	1,2283465	0,40616799	29	28	29	1,6650263	0,84809714
12	11	12	4,81627312	3,7893702	30	29	30	3,1968505	3,15944892
13	12	13	1,77690294	2,33891084	31	30	31	1,01870082	1,187336
14	13	14	1,93897644	1,72572184	32	31	32	1,11876644	1,73950137
15	14	15	2,44849089	1,7880578	33	7	20	6,56168	6,56168
16	15	16	4,22900276	5,64632564	34	8	14	6,56168	6,56168
17	16	17	2,40157488	1,88320216	35	11	21	6,56168	6,56168
18	1	18	0,53805776	0,51345146	36	17	32	1,64042	1,64042
					37	24	28	1,64042	1,64042

La información de las cargas se presenta a continuación en la Tabla 3. Las cargas son consideradas como balanceadas y modeladas como cargas de potencia constante.

Tabla 2.

Datos de Cargas

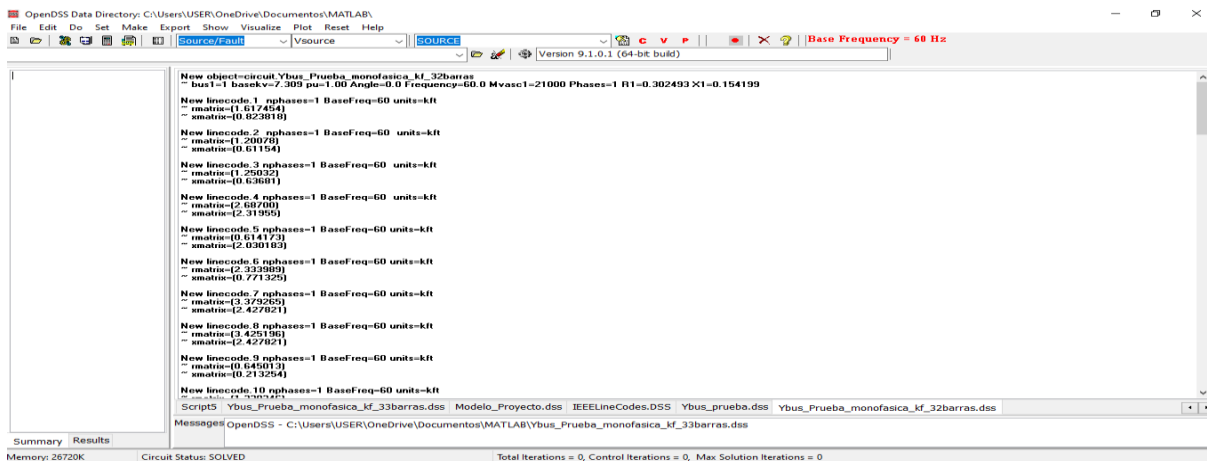
Nodo de ubicación de la carga	Potencia trifásica de la carga		Nodo de ubicación de la carga	Potencia trifásica de la carga	
	P (kW)	Q (kVAr)		P (kW)	Q (kVAr)
1	100	60	17	90	40
2	90	40	18	90	40
3	120	80	19	90	40

Nodo de ubicación de la carga	Potencia trifásica de la carga		Nodo de ubicación de la carga	Potencia trifásica de la carga	
	P (kW)	Q (kVAr)		P (kW)	Q (kVAr)
4	60	30	20	90	40
5	60	20	21	90	40
6	200	100	22	90	50
7	200	100	23	420	200
8	60	20	24	420	200
9	60	20	25	60	25
10	45	30	26	60	25
11	60	35	27	60	20
12	60	35	28	120	70
13	120	80	29	200	600
14	60	10	30	150	70
15	60	20	31	210	100
16	60	20	32	60	40

Para modelar el sistema de distribución en este trabajo de grado se hace uso del programa OpenDss, que tiene como particularidad que se puede acceder a él de manera libre. En la Figura 5 se puede observar el entorno grafico del programa.

Figura 1.

Entorno gráfico OpenDss



Para realizar la simulación en el programa OpenDss y obtener los datos de corrientes inyectadas, la Ybus (matriz de admitancias) del sistema y las tensiones, se deben seguir los pasos que a continuación se describen:

Crea un nuevo script en la ventana de comandos haciendo click en el icono file de la barra de herramientas o utilizando el comando Ctrl+N; como se muestra en la figura 5. Una vez creado el nuevo script se debe iniciar un nuevo proyecto utilizando la línea de comando que se muestra en Figura 6 en la que se especifica el nombre del sistema y características tales como: nodo de inicio, la tensión base, valor en por unidad, el ángulo, la frecuencia, el número de fases y la corriente máxima de corto circuito monofásico o trifásico.

Figura 6.

Línea de comando OpenDss

```
New object=circuit.Ybus_Prueba_monofasica_kf_33barras  
~ bus1=0 basekv=7.309 pu=1.00 Angle=0.0 Frequency=60.0 Mvasc1=21000 Phases=1
```

Luego, se continua con la introducción de la información de las líneas de transmisión utilizando el comando line code; el cual permite introducir las características de resistencia, impedancia, frecuencia, numero de fases y las unidades de la línea de transmisión como se muestra en la Figura 7.

Figura 7.

Línea de comando OpenDss

```
New linecode.0 nphases=1 BaseFreq=60 units=kft  
~ rmatrix=(0.302493)
```

Las unidades son introducidas por defecto en ohm por pies (ft), sin embargo, estas unidades pueden ser cambiadas. Posteriormente se procede a crear los tramos de las líneas de transmisión especificando los nodos de inicio y fin, así como la longitud de este y la característica de impedancia y resistencia definidas en el paso anterior a través del line code (ver Figura 8).

Figura 8.

Línea de comando OpenDss

New Line.L0	Phases=1	Bus1=0	Bus2=1	LineCode=0	Length=1	units=kft
New Line.L1	Phases=1	Bus1=1	Bus2=2	LineCode=1	Length=1	units=kft

Enseguida se introduce la información de las cargas usando el comando New Load. Los datos que se deben especificar son: el nodo de conexión, el número de fases, el tipo de conexión (estrella, delta o línea-tierra), tensión en la carga y las potencias reactivas y activas como se muestra en la Figura 9.

Figura 9.

Línea de comando OpenDss

New Load.1	Bus1=1	Phases=1	Conn=LN	Model=1	kV=7.3092	kW=100	kVAR=60
New Load.2	Bus1=2	Phases=1	Conn=LN	Model=1	kV= 7.3092	kW=90	kVAR=40

Para finalizar se establecen las tensiones bases del sistema para que los informes sean expresados respecto a la unidad utilizando el comando setVoltageBases, luego se utiliza el

comando `calcvoltagebase` para generar la lista de nodos o barra del sistema y sus respectivas tensiones bases (ver Figura 10).

Figura 10.

Línea de comando OpenDss

```
Set VoltageBases = "12.66 "  
CalcVoltageBases
```

Existen dos formas de solucionar el sistema la primera es directamente a través de OpenDss, compilando el archivo, definiendo las coordenadas del sistema y por último usar el comando `solve`, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11.

Línea de comando OpenDss

```
Compile Ybus_Prueba_monofasica.dss  
Buscoords 33_BusXY.csv  
solve
```

La segunda forma es a través del programa Matlab el cual permite manejar OpenDss y obtener los datos que se necesitan listos para realizar las otras operaciones.

4.2 Procedimiento experimental

A continuación, se describe el proceso realizado para la obtención de los resultados. Los datos de entrada fueron obtenidos por medio de OpenDss como quedo descrito en la sección 3.1,

de donde se extraen las corrientes inyectadas, tensiones de nodo(teóricas) y la matriz de admitancias del sistema. Estos datos son exportados a Matlab en donde las corrientes inyectadas tienen desviaciones en su magnitud en diferentes porcentajes por medio de la función desviación. Por ejemplo, para una corriente $1\angle 30^\circ$ [A], una desviación en su magnitud de 2% es $1.02\angle 30^\circ$ [A].

Para el caso de Ridge Regression, por medio de un algoritmo en Matlab que describe la validación cruzada, se determina el lambda óptimo para cada frecuencia armónica. Enseguida se estiman las tensiones de nodo(experimentales) teniendo en cuenta las corrientes inyectadas y la matriz de admitancia para cada frecuencia armónica por medio de Ridge Regression y el uso de CVX en un ciclo “for”. CVX es un sistema de modelado basado en Matlab para la optimización convexa. Eventualmente con los valores teóricos y experimentales de tensión se determinan los errores de estimación y sus graficas. Por último, se obtienen las gráficas referentes a la manera como se eligieron los valores de lambda.

En la descomposición en valores singulares truncados, por medio de un algoritmo en Matlab se calcula el truncamiento optimo y se determina para cada frecuencia armónica. Enseguida se estiman las tensiones de nodo (experimentales) teniendo en cuenta las corrientes inyectadas y la matriz de admitancia para cada frecuencia armónica por medio de la descomposición en valores singulares truncados en un ciclo “for”. Eventualmente con los valores teóricos y experimentales de tensión se determinan los errores de estimación y sus graficas.

Para abordar el problema descrito en la Sección 1.2 se plantean 4 escenarios sobre los cuales se evalúan los métodos propuestos: descomposición en valores singulares truncados y Ridge Regression. El primer escenario plantea una desviación de -5% en la magnitud de la corriente eléctrica, el segundo escenario -2,18%, el tercero 2,50% y el cuarto 5%. Para cada uno

de los escenarios anteriores se tendrán en cuenta dos características las cuales son: 1) El número de puntos de medida que son 3,5 y 10 2) Las posiciones de las medidas dentro del sistema varían como se observa a continuación en las Figuras 12 a 17 .

- Posiciones para 3 medidas ubicadas aleatoriamente:

Figura 12.

Sistema de distribución con 3 puntos de medición, primera posición.

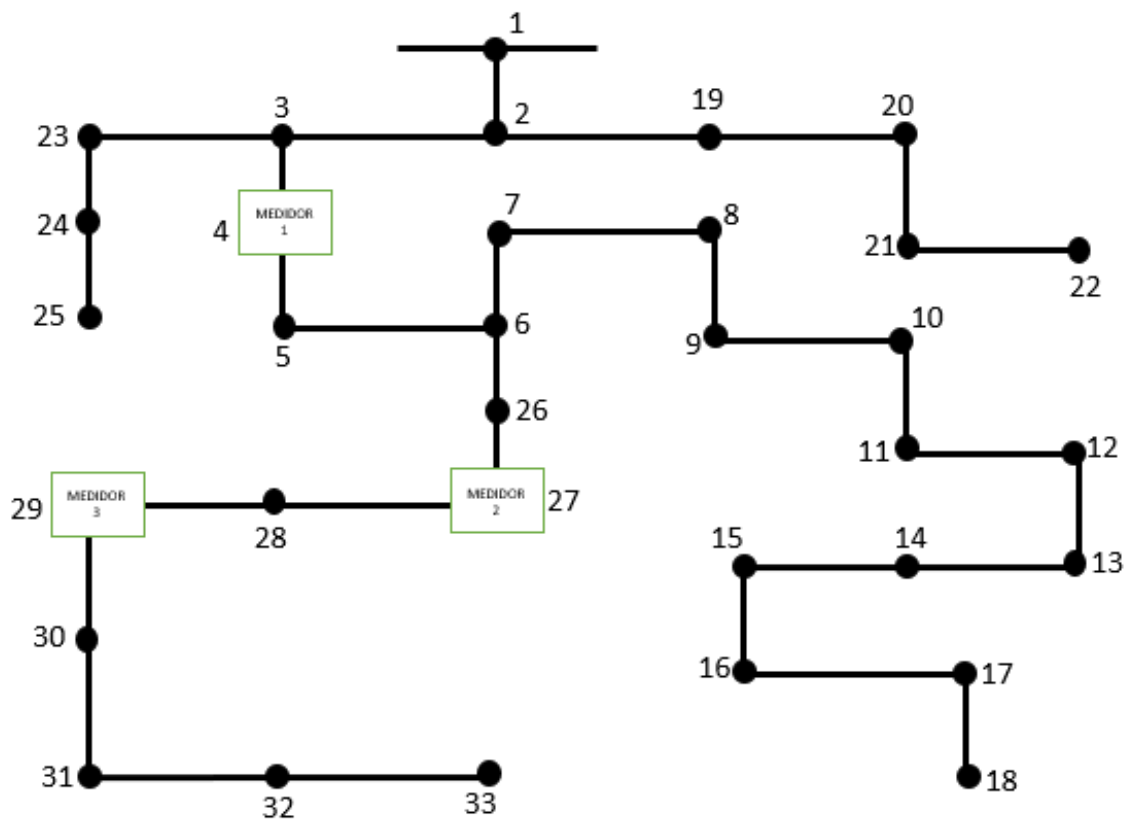
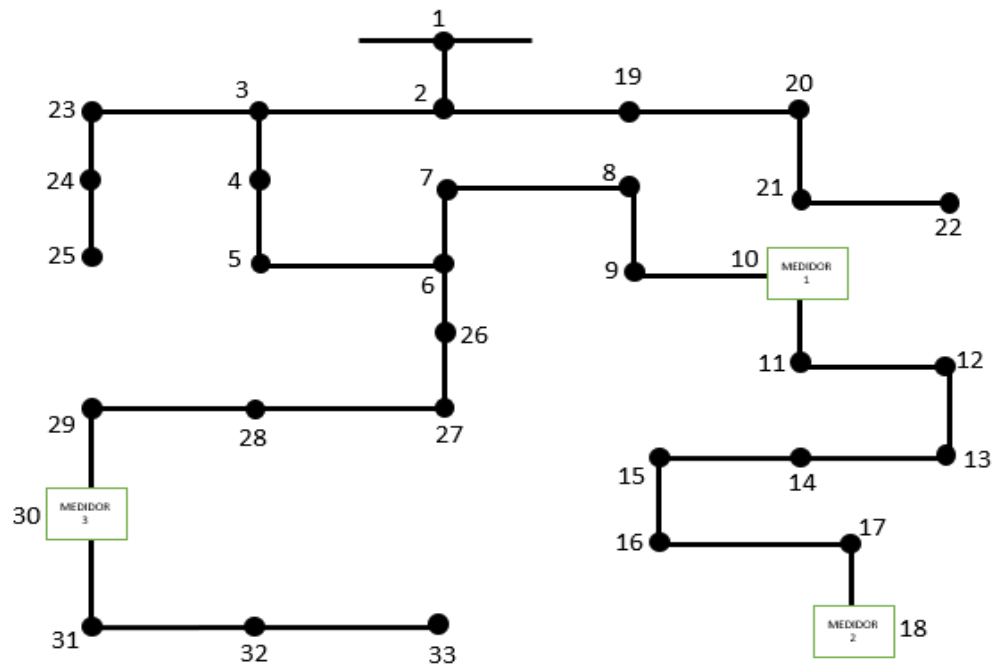


Figura 13.

Sistema de distribución con 3 puntos de medición, segunda posición.



- Posiciones para 5 medidas ubicadas aleatoriamente:

Figura 14.

Sistema de distribución con 5 puntos de medición, primera posición.

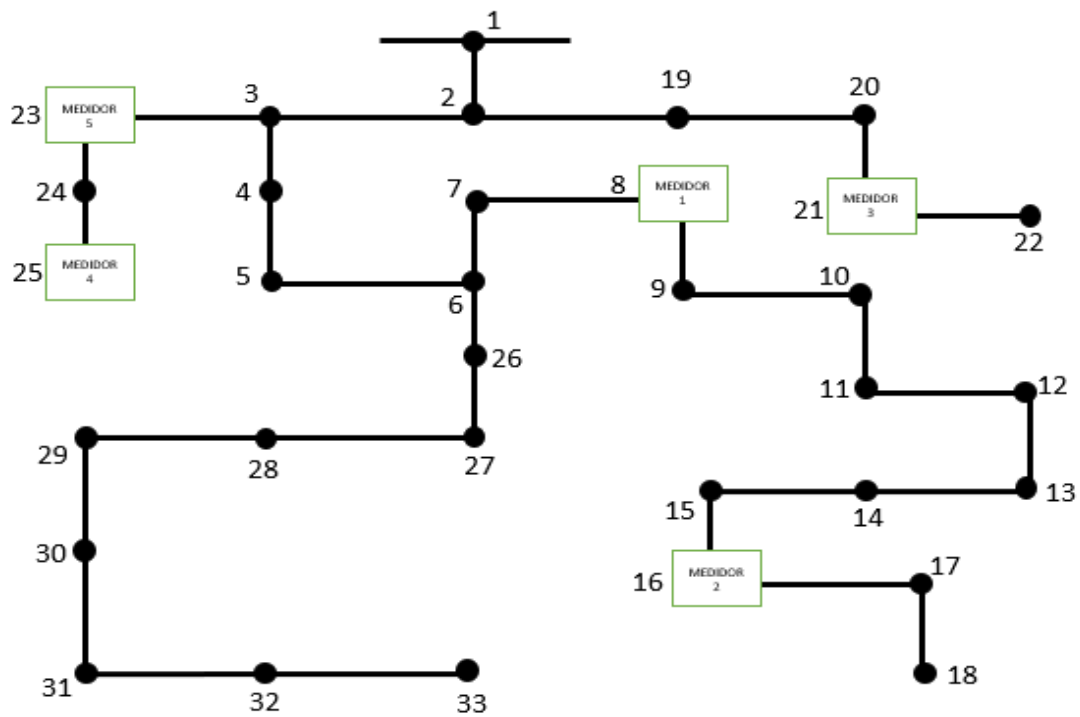
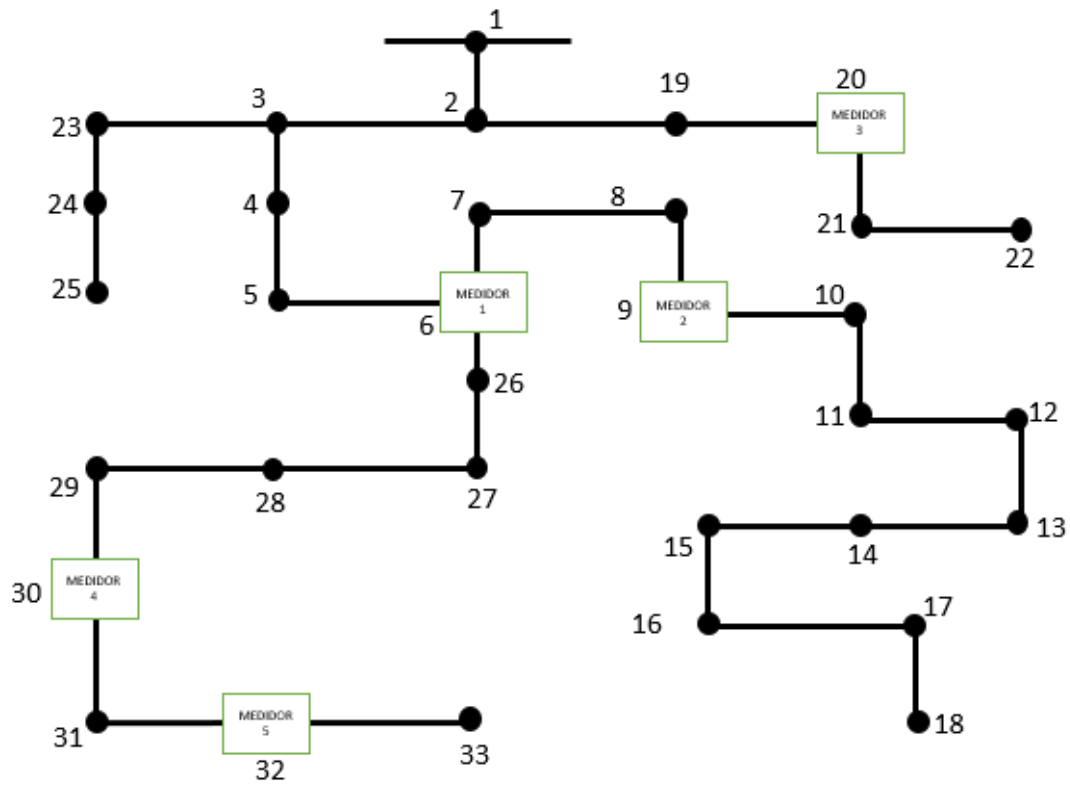


Figura 15.

Sistema de distribución con 5 puntos de medición, segunda posición.



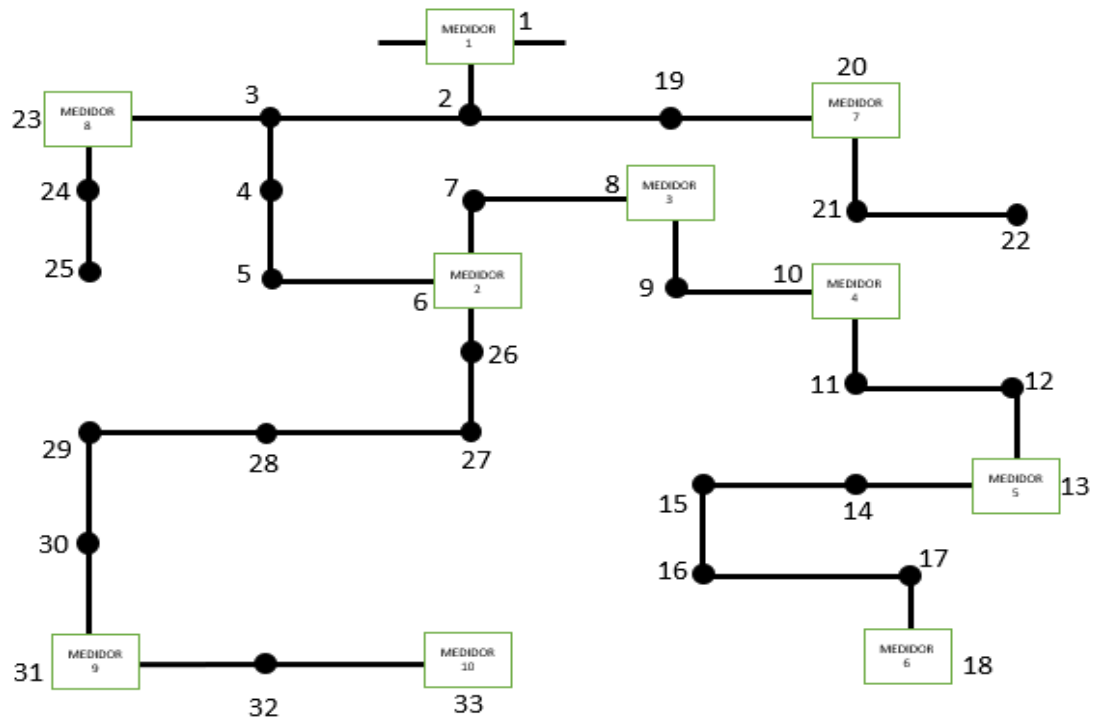
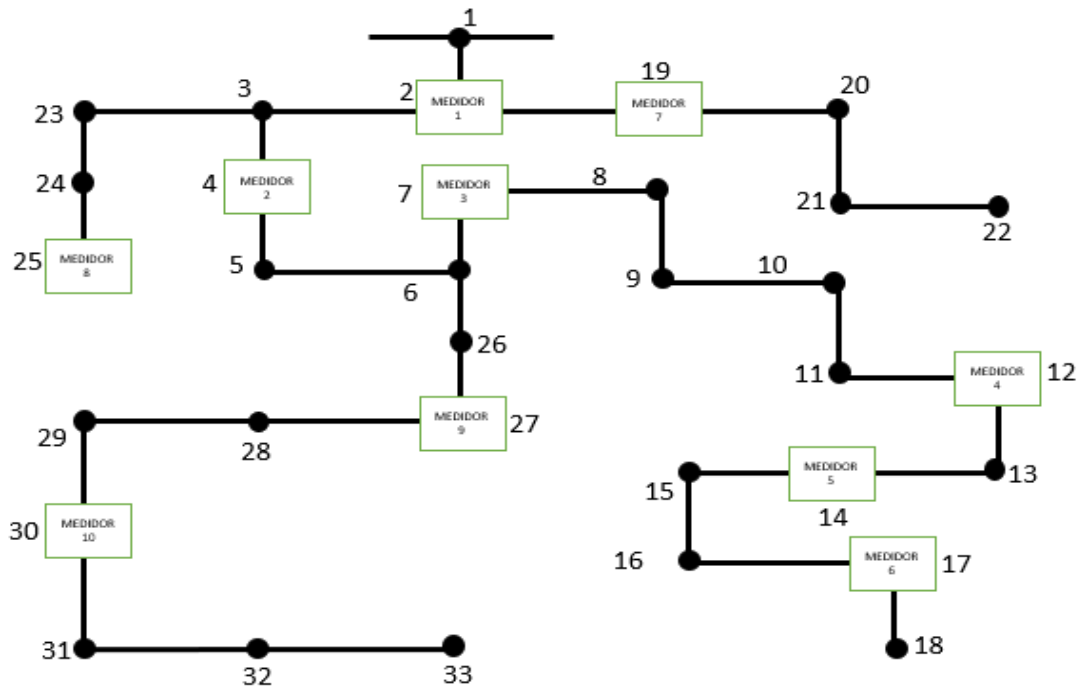


Figura 17.

Sistema de distribución con 10 puntos de medición, segunda posición.



4.3 Aplicación de la descomposición en valores singulares truncados

En cada uno de los escenarios descritos en la sección anterior se realiza el mismo procedimiento; se inicia extrayendo las corrientes inyectadas, tensiones de nodo y matrices de admitancias del software OPENDSS, para después continuar con el proceso de desviar las corrientes en los nodos donde no hay medición, enseguida se inicia el proceso para la selección del truncamiento óptimo.

La aplicación adecuada del método depende de la selección del truncamiento óptimo; teniendo en cuenta que en la literatura establece que deben truncarse los pequeños valores singulares, sin embargo no hay un consenso en el nivel al cual se debe truncar o el método de truncado que se debe usar, en este proyecto se realiza un truncamiento que va desde el menor valor

singular hasta el valor singular menor o igual al valor a $\frac{4}{\sqrt{3}}$. Este valor fue propuesto como el truncamiento óptimo para una matriz cuadrada por los investigadores Matan Gavish y David L. Donoho (Gavish & Donoho, 2014) en su artículo sobre el tema. Para cada valor singular truncado se calculan las tensiones y el error medio cuadrático, tomando como truncamiento óptimo el de menor valor de error medio cuadrático.

Las figuras 18, 19, 20 y 21 se presenta el truncamiento realizado para cada una de las desviaciones propuestas. Para cada una de las figuras el truncamiento óptimo fue de 33, es decir, se trunca el valor singular ubicado en la posición 33, en nuestro caso corresponde al último valor singular.

Una vez realizado el truncamiento óptimo, se procede con la estimación del estado en tensión para cada uno de los casos.

Figura 18.

Truncamiento óptimo desviación de -5%. Para 3 medias tomadas.

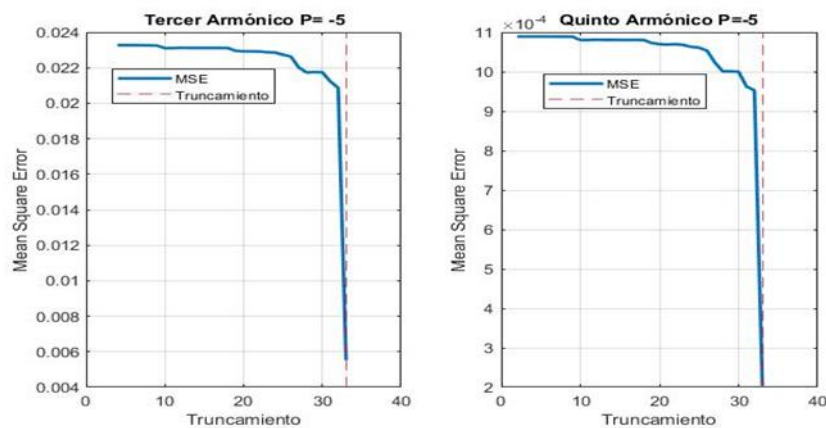
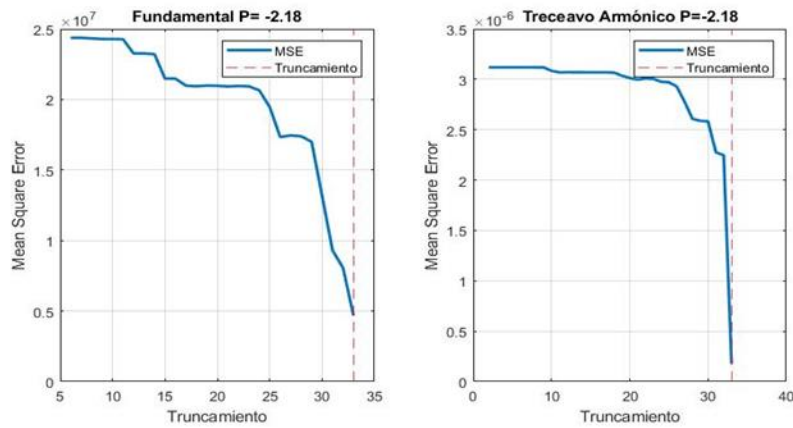


Figura 19.

Truncamiento óptimo desviación de -2.18%. Para 5 medidas tomadas.

**Figura 20.**

Truncamiento óptimo, desviación de 2.50%. Para 10 medidas tomadas.

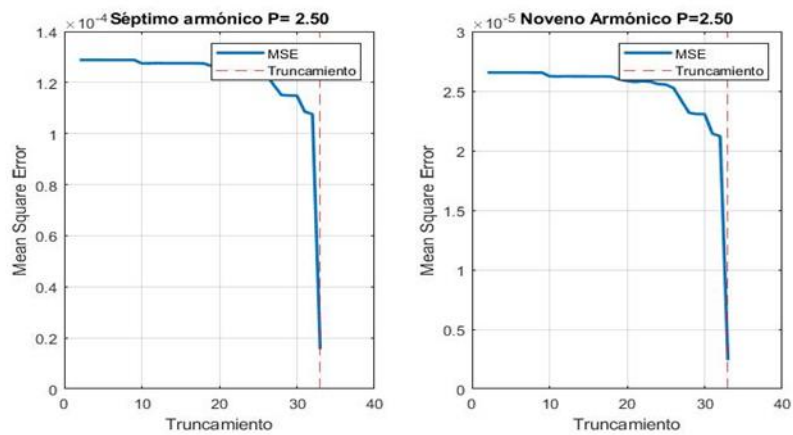
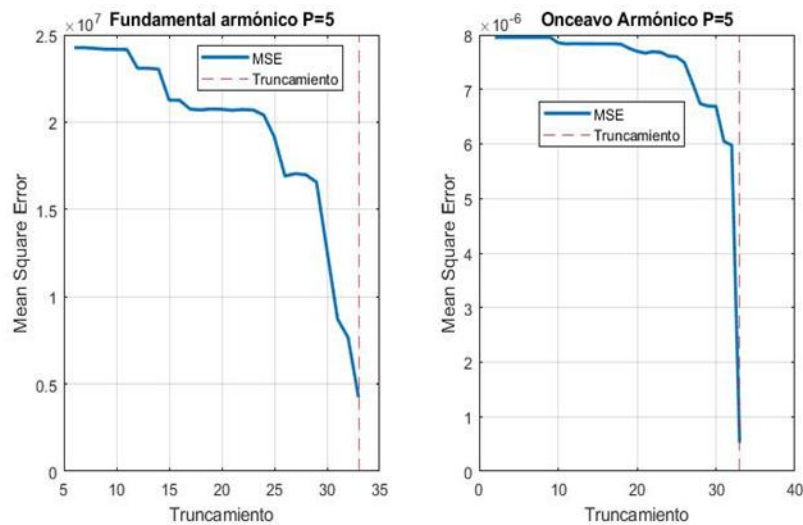


Figura 21.

Truncamiento óptimo para desviación de 5%. Para 3 medidas tomadas.



4.4 Aplicación de ridge regression

La correcta aplicación del método Ridge Regression implica encontrar el lambda que mejor realice un mejor ajuste. Teniendo en cuenta esto, se realiza la validación cruzada de cinco particiones la cual tiene como objetivo evitar una sobre estimación y una elevada varianza en los coeficientes de regresión.

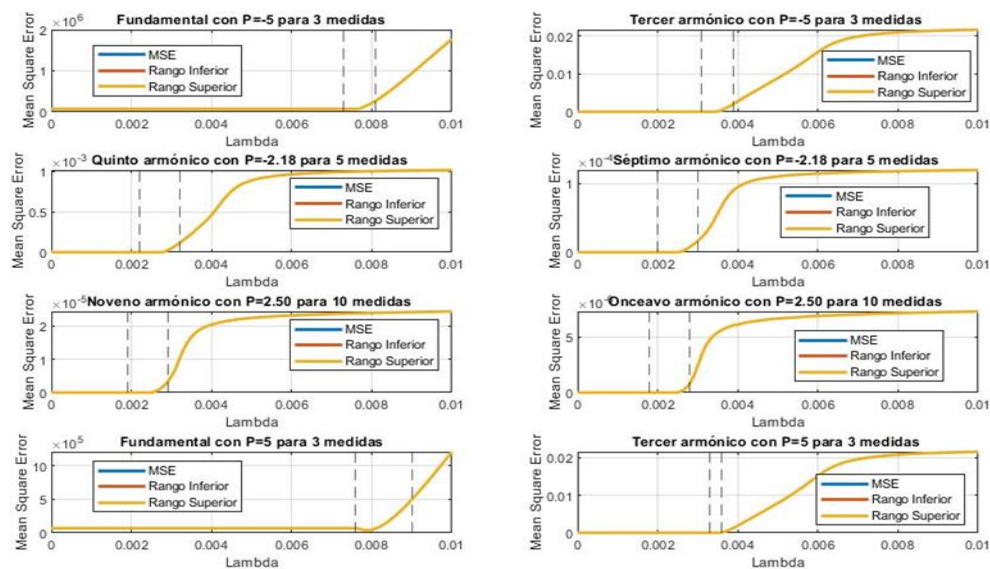
Una de las desventajas de la validación cruzada es el tiempo que toma su aplicación. Con la finalidad de reducirlo antes de aplicar la validación cruzada se realiza un barrido de los lambdas ente 0 y 0,01 con un paso de 1×10^{-5} calculando el error medio cuadrático para cada uno; de esta manera se obtiene el rango de lambdas que presente un mejor ajuste.

Una vez determinado el rango se inicia la validación cruzada para finalizar con la estimación de estado utilizando los parámetros de ajuste obtenido a través de la validación cruzada.

En la Figura 22 se observa la selección del rango de lambda para cada una de las desviaciones y las variaciones en las medida propuestas. En ésta, puede verse que al inicio de cada grafica sin importar la perturbación o el número de medidas permanece constante, esto se debe a la minimización convexa realizada por el solver CVX; por lo tanto, la influencia del lambda no se observa hasta que este alcanza un valor limite que varia con cada perturbación y orden armónico.

Figura 22.

Barrido lamba para cada una de las desviaciones.



Durante el barrido realizado a los parámetros de ajuste se encontró; que aun cuando se varió el número de medidas tomadas, el rango de búsqueda sigue siendo el mismo para 3,5 y 10 medidas tomadas,. Resultado que se extendió a los parámetros de ajuste una vez realizada la validación cruzada.

En las tablas 4 y 5 muestran los rangos seleccionados y los parámetros de ajustes obtenidos para cada una de las desviaciones. Dado que los rangos y los parámetros de ajuste se mantienen

aun cuando se varia las medidas, solo se presentan los rangos y lambdas (parámetros de ajuste) por desviación.

Tabla 3.

Rango de búsqueda y Lambda seleccionado para desviaciones de -5 y -2.18

Perturbación		Perturbación	
-5%		-2,18492304881447%	
Rango Fundamental	Lambda Fundamental	Rango Fundamental	Lambda Fundamental
0,0073-0,0081	0,0075	0,0072-0,0082	0,0075
Rango 3.º Armónico	Lambda 3.º Armónico	Rango 3.º Armónico	Lambda 3.º Armónico
0,0031-0,0039	0,003	0,0029-0,0039	0,003
Rango 5.º Armónico	Lambda 5.º Armónico	Rango 5.º Armónico	Lambda 5.º Armónico
0,0024-0,0032	0,0026	0,0022-0,0032	0,0026
Rango 7.º Armónico	Lambda 7.º Armónico	Rango 7.º Armónico	Lambda 7.º Armónico
0,0021-0,0029	0,0022	0,0020-0,0030	0,0022
Rango 9.º Armónico	Lambda 9.º Armónico	Rango 9.º Armónico	Lambda 9.º Armónico
0,0020-0,0028	0,0023	0,0019-0,0029	0,0019
Rango 11.º	Lambda 11.º	Rango 11.º	Lambda 11.º
Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
0,0020-0,0028	0,0018	0,0018-0,0028	0,0018
Rango 13.º	Lambda 13.º	Rango 13.º	Lambda 13.º
Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
0,0020-0,0028	0,0021	0,0019-0,0029	0,0021

Tabla 4.

Rango de búsqueda y Lambda seleccionado para desviaciones de 5 y 2.50

Perturbación		Perturbación	
5%		2,50%	
Rango Fundamental	Lambda Fundamental	Rango Fundamental	Lambda Fundamental
0,0074-0,0084	0,0078	0,0074-0,0084	0,0078
Rango 3.º Armónico	Lambda 3.º Armónico	Rango 3.º Armónico	Lambda 3.º Armónico
0,0033-0,0036	0,0034	0,0029-0,0039	0,0034

Perturbación		Perturbación	
Rango 5.º	Lambda 5.º	Rango 5.º	Lambda 5.º
Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
0,0023-0,0029	0,0029	0,0022-0,0032	0,0028
Rango 7.º	Lambda 7.º	Rango 7.º	Lambda 7.º
Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
0,0022-0,0025	0,0025	0,0020-0,0030	0,0025
Rango 9.º	Lambda 9.º	Rango 9.º	Lambda 9.º
Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
0,0022-0,0025	0,0025	0,0019-0,0029	0,0025
Rango 11.º	Lambda 11.º	Rango 11.º	Lambda 11.º
Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
0,0022-0,0025	0,0024	0,0018-0,0028	0,0023
Rango 13.º	Lambda 13.º	Rango 13.º	Lambda 13.º
Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
0,0022-0,0025	0,0025	0,0019-0,0029	0,0024

4.5 Análisis de resultados

Con el propósito de brindar un análisis detallado, a continuación, se expone la formulación matemática por medio de la cual se realiza el cálculo de los errores de estimación basado en la definición del error medio cuadrático y el teorema Parseval. Con este tipo de error se pretende determinar el desempeño total de los métodos, vinculando tanto a la magnitud como a la fase (Malagón Carvajal, 2019), por orden armónico h para $h = 1, 3, 5 \dots H$. Las ecuaciones para estos errores de estimación son presentadas a continuación:

MSE Total

$$MSE_i[\%] = \frac{\sum_{h=1}^H |V_{T(h)} - V_{F(h)}|^2}{\sum_{h=1}^H |V_{T(h)}|^2} \times 100\% \quad (23)$$

Donde:

- $V_{T(h)}$ = Valores estimados teóricos obtenidos del flujo.

- $V_{F(h)}$ = Valores estimados con los métodos.
- $i = 1,2,3 \dots 33$ (Nodos Sistema de distribución)
- h = Orden armónico.
- H = Armónico de orden 13.

MSE Individual

$$MSE_{(h)}[\%] = \frac{|V_{T(h)} - V_{F(h)}|^2}{\sum_{h=1}^H |V_{T(h)}|^2} \times 100\% \quad (24)$$

MSE Individual de Magnitud

$$MSE_{(h)}^m[\%] = \frac{[V_{D(h)}]^2}{\sum_{h=1}^H |V_{T(h)}|^2} \times 100\% \quad (25)$$

Donde:

- $V_{D(h)} = |V_{T(h)}| - |V_{F(h)}|$ diferencia de magnitudes

MSE Individual debido al error de fase

$$MSE_{(h)}^{\Delta\theta}[\%] = \frac{|V_{T(h)} - V_{F(h)}|^2 - [V_{D(h)}]^2}{\sum_{h=1}^H |V_{T(h)}|^2} \times 100\% \quad (26)$$

Para lo cual:

$$MSE_i^m[\%] = \sum_{h=1}^H MSE_{(h)}^m : \text{MSE Total de magnitud}$$

$$MSE_i^{\Delta\theta}[\%] = \sum_{h=1}^H MSE_{(h)}^{\Delta\theta} : \text{MSE Total debido al error de fase}$$

$$MSE_i[\%] = MSE_i^m[\%] + MSE_i^{\Delta\theta}[\%]$$

4.6 Resultados del método descomposición en valores singulares truncados (SVDT)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los escenarios de 5% y -5% de desviación.

De las tablas 6 a la 17 se muestra el error total de magnitud, el error total de fase y el error total; el cual corresponde a la suma de los dos errores anteriores.

En cada uno de los escenarios propuestos se observó que la contribución del error de magnitud y el error de fase al error total depende del nodo; ya que por ejemplo en los nodos del 1 al 12 la mayor contribución está dada por el error de magnitud, sin embargo, para los nodos 13 al 18 la mayor contribución al error total está dada por el error de fase; para entender por qué el método se comporta de esta manera se observa la Figura 12 en la que se muestra la topología del sistema en estudio, en ella se puede ver que el nodo 5 a partir del cual el error total comienza a aumentar tiene dos ramificaciones de la cual se desprenden los nodos del 6 al nodo 17 y del nodo 25 al 32; estos nodos muestran una mayor cantidad de variables de la cual depende su estimación (multicolinealidad). Sin embargo, los nodos 1, 2, 3, 4, 19, 20, 21, 22, 23, 24, y 25 están relacionados a una menor cantidad de variables. Por lo tanto, su estimación es mejor; esto muestra que cuando la correlación entre las variables es alta el método muestra un bajo desempeño en la estimación de la fase; sin embargo, la estimación de la magnitud mejora, por otra parte, si tenemos una baja correlación entre las variables el desempeño del método al estimar la fase aumenta y disminuye la estimación de la magnitud. A pesar de que el alta y la baja en la correlación de las variables afecta el desempeño del método, se puede apreciar que la estimación de la magnitud es adecuada ya sea con variables que muestren una alta relación entre ellas.

También se puede observar que el error en los nodos que se tomaron medidas es mayor en comparación con otros nodos cuyos datos de entrada fueron corrientes desviadas como por ejemplo los nodos 1, 3, 19, 26 y 28 en la Tabla 6. Estos resultados se mantienen iguales, aunque se cambió el número de medidas tomadas, el lugar donde estas fueron tomadas y la desviación a la que fueron sometidos los datos, como se puede observar al comparar las tablas 6 a la 17. Esto se debe a que el desempeño del método bajo las condiciones de mal condicionamiento y rango definido depende de que tan bien se seleccione el truncamiento, para el truncamiento adecuado el método es poco susceptible a errores en la matriz de admitancias del sistema y en los datos de entrada (Hansen, 1990) (Hansen, 1986).

Las tablas correspondientes a los resultados obtenidos con las demás desviaciones se encuentran en el apéndice A.

Tabla 5.

Errores totales para desviación de -5% con monitores en los nodos 4, 27 y 29.

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 6.

Errores totales para desviación de -5% con medidas tomadas en los nodos 10, 18 y 30.

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 7.

Errores totales para desviación de -5% con medidores en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 8.

Errores totales para desviación de -5% con medidas en los nodos 6, 9, 20, 30 y 32

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 9.

Errores totales para desviación de -5 con medidores en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23, 31 y

33

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 10.

Errores para una desviación de -5 con medidores en los nodos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27 y 30

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 11.

Errores para desviación de 5% con medidores en los nodos 4, 27 y 29

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 12.

Errores totales para una desviación de 5% con monitores en los nodos 10, 18 y 30

Nodos	Errores Totales [%]		
	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 13.

Errores totales para desviación del 5% con medición en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 14.

Errores totales para la desviación de 5% con medición en los nodos 6, 9, 20, 30 y 32

Nodos	Errores Totales [%]		
	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 15.

Errores totales para la desviación de 5% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23,

31 y 33

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 16.

Errores totales para desviación de 5% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27

y 30

Nodos	Errores Totales [%]		
	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

4.7 Resultados del método Ridge Regression

En esta sección se discuten los resultados obtenidos al aplicar el método Ridge Regression para los diferentes escenarios propuestos.

En los escenarios donde las corrientes inyectadas tienen una desviación negativa y sus puntos de medición no incluyen el nodo 1, se encontró que el método no tiene un buen desempeño; esto es debido a que el parámetro de ajuste λ impone una penalización que reduce el tamaño de los coeficientes de regresión, en este caso particular las tensiones. Los errores totales de magnitud presentados en las tablas 18, a 25 corresponden a las desviaciones de -5% y -2,18% son similares para todos los nodos de la red en estudio.

El desempeño del método cuando se tienen desviaciones positivas y no hay medida de corriente inyectada en el nodo 1 es bueno; ya que los errores totales consignados en las tablas 26 a 27, 29 a 31 y 33 son menores en comparación con los errores totales de las desviaciones negativas bajo las mismas condiciones consignadas en las tablas 18, a 25.

También se observa que el método se comporta de forma excelente al estimar el estado en nodos donde hay una alta correlación de variables. Sin embargo, su desempeño disminuye en las variables que tienen una baja correlación.

Las tablas 32 y 28 muestran los resultados obtenidos para las condiciones: desviación positiva y medición en el nodo 1. En estas tablas se observa que la estimación del método tiene una mejora considerable en relación con las obtenidas cuando se tiene una desviación positiva pero no hay medida en el nodo 1. Sin embargo, su estimación en nodos donde la correlación es alta disminuye.

No obstante, el desempeño del método mejora significativamente cuando se cumplen dos condiciones: desviación negativa y medición en el nodo 1 como se presenta en las tablas 20 y 24.

Tabla 17.

Errores totales para desviación de -5% con monitores en los nodos 4, 27 y 29

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.002500001	0.002500001	1.00578E-15
2	0.002500434	0.002500434	1.30638E-14
3	0.002503036	0.002503036	1.66725E-12
4	0.002505256	0.002505256	7.28499E-12
5	0.002505941	0.002505941	5.53446E-12
6	0.002507921	0.002507921	1.32696E-11
7	0.002507931	0.002507931	1.38403E-11
8	0.002507944	0.002507944	1.36823E-11
9	0.002507959	0.002507959	1.38266E-11
10	0.002507974	0.002507974	1.39469E-11
11	0.002507976	0.002507976	1.39126E-11
12	0.00250798	0.00250798	1.38566E-11
13	0.002507994	0.002507994	1.40219E-11
14	0.002508	0.002508	1.42172E-11
15	0.002508004	0.002508004	1.42991E-11
16	0.002508007	0.002508007	1.43432E-11
17	0.00250801	0.00250801	1.4318E-11
18	0.002508012	0.002508012	1.43364E-11
19	0.002500435	0.002500435	1.29279E-14
20	0.002500437	0.002500437	1.18972E-14
21	0.002500437	0.002500437	1.15493E-14
22	0.002500438	0.002500438	1.11479E-14
23	0.002503044	0.002503044	1.65257E-12
24	0.002503059	0.002503059	1.58675E-12
25	0.002503067	0.002503067	1.55133E-12
26	0.002508417	0.002508417	1.51645E-11
27	0.002509136	0.002509136	1.7437E-11
28	0.002510721	0.002510721	6.11731E-11
29	0.002512133	0.002512133	1.14186E-10
30	0.002512143	0.002512143	1.13227E-10

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
31	0.002512153	0.002512153	1.13963E-10
32	0.002512155	0.002512155	1.14171E-10
33	0.002512156	0.002512156	1.14256E-10

Tabla 18.

Errores totales para desviación de -5% con medidores en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.002500002	0.002500002	1.19817E-14
2	0.002501493	0.002501493	1.55882E-14
3	0.002508674	0.002508674	1.00974E-12
4	0.002509697	0.002509697	1.30914E-12
5	0.002510864	0.002510864	2.26113E-12
6	0.002514303	0.002514303	3.50032E-11
7	0.002515993	0.002515993	5.66987E-10
8	0.002518975	0.002518975	3.85795E-10
9	0.002519263	0.002519262	4.11938E-10
10	0.002519577	0.002519577	4.42589E-10
11	0.002519632	0.002519631	4.41052E-10
12	0.002519736	0.002519736	4.38037E-10
13	0.002520237	0.002520236	5.04447E-10
14	0.002520462	0.002520461	5.72582E-10
15	0.002520683	0.002520683	6.18491E-10
16	0.002520956	0.002520955	6.62831E-10
17	0.002520961	0.002520961	6.62834E-10
18	0.002520963	0.002520963	6.63138E-10
19	0.002502123	0.002502123	4.89308E-12
20	0.002508028	0.002508027	4.31741E-10
21	0.002509843	0.002509842	8.74919E-10
22	0.002509849	0.002509848	8.78202E-10
23	0.002515378	0.002515378	3.79395E-11
24	0.002527052	0.002527051	8.96186E-10
25	0.002539787	0.002539784	3.36954E-09
26	0.002514309	0.002514309	3.48856E-11
27	0.002514316	0.002514316	3.46891E-11
28	0.002514348	0.002514348	3.45416E-11

Errores Totales %			
Nodo	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
29	0.002514374	0.002514374	3.4174E-11
30	0.002514385	0.002514385	3.35049E-11
31	0.002514396	0.002514396	3.39233E-11
32	0.002514399	0.002514399	3.4044E-11
33	0.0025144	0.0025144	3.40932E-11

Tabla 19.

Errores totales para la desviación de -5% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23, 31 y 33

Errores Totales %			
Nodo	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	7.91649E-14	5.30921E-15	7.38557E-14
2	1.47344E-09	1.47214E-09	1.29961E-12
3	4.61506E-08	4.60039E-08	1.46742E-10
4	7.28013E-08	7.22861E-08	5.1525E-10
5	9.86494E-08	9.7526E-08	1.12342E-09
6	1.82745E-07	1.8115E-07	1.59529E-09
7	2.0474E-07	2.03934E-07	8.06246E-10
8	2.26135E-07	2.25097E-07	1.03826E-09
9	2.67406E-07	2.66717E-07	6.88862E-10
10	3.04162E-07	3.03637E-07	5.25191E-10
11	3.10661E-07	3.10082E-07	5.79248E-10
12	3.20666E-07	3.20008E-07	6.58177E-10
13	3.54988E-07	3.54596E-07	3.91909E-10
14	3.71506E-07	3.71345E-07	1.61456E-10
15	3.79038E-07	3.78945E-07	9.32051E-11
16	3.84991E-07	3.84925E-07	6.60562E-11
17	3.89299E-07	3.89235E-07	6.3324E-11
18	3.89338E-07	3.89275E-07	6.319E-11
19	2.95887E-09	2.94246E-09	1.64164E-11
20	3.0847E-08	2.929E-08	1.55699E-09
21	4.6047E-08	4.28765E-08	3.17053E-09
22	6.29321E-08	5.74246E-08	5.50746E-09
23	1.04312E-07	1.04311E-07	3.14249E-13
24	3.27851E-07	3.25177E-07	2.67385E-09

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
25	4.9276E-07	4.8647E-07	6.28974E-09
26	1.98094E-07	1.96158E-07	1.93558E-09
27	2.17449E-07	2.14904E-07	2.5448E-09
28	3.08782E-07	3.04729E-07	4.05296E-09
29	3.91632E-07	3.85025E-07	6.60643E-09
30	4.30604E-07	4.20282E-07	1.03218E-08
31	4.50631E-07	4.41335E-07	9.29593E-09
32	4.57606E-07	4.48772E-07	8.83332E-09
33	4.57642E-07	4.4881E-07	8.83191E-09

Tabla 20.

Errores totales para desviación de -5% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27

y 30

Nodos	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.002500004	0.002500004	1.51636E-14
2	0.002501731	0.002501731	4.48815E-12
3	0.002510225	0.002510225	2.70075E-10
4	0.002513569	0.002513568	8.23271E-10
5	0.002515515	0.002515513	1.67889E-09
6	0.002522065	0.002522061	3.9447E-09
7	0.002523978	0.002523974	3.48463E-09
8	0.002524979	0.002524975	3.81963E-09
9	0.00252687	0.002526867	3.71642E-09
10	0.002528971	0.002528967	3.5786E-09
11	0.00252932	0.002529316	3.68253E-09
12	0.002529996	0.002529992	3.89029E-09
13	0.002531995	0.002531991	3.65702E-09
14	0.002532957	0.002532953	3.21066E-09
15	0.002533136	0.002533133	3.12672E-09
16	0.002533356	0.002533352	3.05008E-09
17	0.002533704	0.002533701	3.03252E-09
18	0.002533707	0.002533704	3.03221E-09
19	0.002502072	0.002502072	7.67413E-13
20	0.00250208	0.00250208	7.32582E-13

Nodos	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
21	0.002502082	0.002502082	7.21022E-13
22	0.002502083	0.002502083	7.08542E-13
23	0.002515335	0.002515335	1.15548E-10
24	0.00252701	0.00252701	1.67521E-10
25	0.002539745	0.002539743	1.68184E-09
26	0.002522943	0.002522939	4.5776E-09
27	0.002524207	0.002524202	5.5994E-09
28	0.00252925	0.002529239	1.01263E-08
29	0.002533667	0.002533651	1.55434E-08
30	0.002535808	0.002535787	2.11764E-08
31	0.002535837	0.002535816	2.11818E-08
32	0.002535843	0.002535822	2.11815E-08
33	0.002535845	0.002535824	2.1181E-08

Tabla 21.

Errores totales para desviación de -2.18% con monitores en los nodos 4, 27 y 29.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.000477389	0.000477389	1.86746E-16
2	0.000477472	0.000477472	2.45842E-15
3	0.000477969	0.000477969	3.1182E-13
4	0.000478394	0.000478394	1.361E-12
5	0.000478525	0.000478525	1.04009E-12
6	0.000478906	0.000478906	2.45039E-12
7	0.000478908	0.000478908	2.59487E-12
8	0.000478912	0.000478912	2.54403E-12
9	0.000478916	0.000478916	2.57234E-12
10	0.000478921	0.000478921	2.59722E-12
11	0.000478921	0.000478921	2.58559E-12
12	0.000478923	0.000478923	2.56611E-12
13	0.000478927	0.000478927	2.60752E-12
14	0.000478929	0.000478929	2.66524E-12
15	0.00047893	0.00047893	2.68829E-12
16	0.000478932	0.000478932	2.69988E-12
17	0.000478933	0.000478933	2.68785E-12
18	0.000478933	0.000478933	2.69303E-12

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
19	0.000477472	0.000477472	2.42884E-15
20	0.000477473	0.000477473	2.22705E-15
21	0.000477473	0.000477473	2.14707E-15
22	0.000477473	0.000477473	2.05288E-15
23	0.000477971	0.000477971	3.09005E-13
24	0.000477974	0.000477974	2.96448E-13
25	0.000477976	0.000477976	2.89685E-13
26	0.000479	0.000479	2.7996E-12
27	0.000479138	0.000479138	3.21788E-12
28	0.000479441	0.000479441	1.13267E-11
29	0.000479712	0.000479712	2.11598E-11
30	0.000479714	0.000479714	2.09697E-11
31	0.000479716	0.000479716	2.11178E-11
32	0.000479717	0.000479717	2.11618E-11
33	0.000479717	0.000479717	2.11838E-11

Tabla 22.

Errores totales para desviación de -2.18% con medidores en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.000477389	0.000477389	2.2263E-15
2	0.000477674	0.000477674	2.85562E-15
3	0.000479046	0.000479046	1.89298E-13
4	0.000479242	0.000479242	2.47019E-13
5	0.000479466	0.000479466	4.28101E-13
6	0.000480124	0.000480124	6.47413E-12
7	0.000480448	0.000480448	1.05323E-10
8	0.000481018	0.000481018	7.15765E-11
9	0.000481075	0.000481075	7.64338E-11
10	0.000481137	0.000481136	8.21334E-11
11	0.000481147	0.000481147	8.18186E-11
12	0.000481168	0.000481167	8.12084E-11
13	0.000481265	0.000481265	9.35862E-11
14	0.000481309	0.000481309	1.06359E-10
15	0.000481352	0.000481352	1.1493E-10
16	0.000481404	0.000481404	1.23184E-10

Errores Totales %			
Nodo	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
17	0.000481406	0.000481406	1.23135E-10
18	0.000481406	0.000481406	1.23203E-10
19	0.000477794	0.000477794	9.06871E-13
20	0.000478922	0.000478922	8.00629E-11
21	0.000479269	0.000479269	1.62251E-10
22	0.00047927	0.00047927	1.62865E-10
23	0.000480326	0.000480326	7.02356E-12
24	0.000482556	0.000482555	1.66128E-10
25	0.000484988	0.000484987	6.24673E-10
26	0.000480126	0.000480126	6.45009E-12
27	0.000480127	0.000480127	6.41057E-12
28	0.000480134	0.000480134	6.39225E-12
29	0.000480139	0.000480139	6.32879E-12
30	0.000480142	0.000480142	6.19808E-12
31	0.000480145	0.000480145	6.28201E-12
32	0.000480145	0.000480145	6.30739E-12
33	0.000480145	0.000480145	6.3199E-12

Tabla 23.

Errores totales para la desviación de -2.18% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23, 31 y 33

Errores Totales %			
Nodo	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	1.51113E-14	1.01326E-15	1.4098E-14
2	2.81257E-10	2.81009E-10	2.47846E-13
3	8.80887E-09	8.78087E-09	2.79999E-11
4	1.38937E-08	1.37954E-08	9.83206E-11
5	1.8824E-08	1.86096E-08	2.14365E-10
6	3.4861E-08	3.45564E-08	3.04587E-10
7	3.9053E-08	3.88988E-08	1.54212E-10
8	4.3127E-08	4.29286E-08	1.98373E-10
9	5.09855E-08	5.08539E-08	1.31638E-10
10	5.79802E-08	5.78798E-08	1.00386E-10
11	5.92172E-08	5.91065E-08	1.10681E-10
12	6.11212E-08	6.09955E-08	1.25698E-10

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
13	6.76463E-08	6.75714E-08	7.49003E-11
14	7.07878E-08	7.07568E-08	3.09383E-11
15	7.2217E-08	7.21991E-08	1.78976E-11
16	7.33458E-08	7.33331E-08	1.27041E-11
17	7.41605E-08	7.41484E-08	1.2165E-11
18	7.41657E-08	7.41536E-08	1.2143E-11
19	5.64844E-10	5.61708E-10	3.13597E-12
20	5.88928E-09	5.59192E-09	2.97353E-10
21	8.7914E-09	8.1859E-09	6.05504E-10
22	1.20153E-08	1.09634E-08	1.05181E-09
23	1.99128E-08	1.99128E-08	6.11245E-14
24	6.25934E-08	6.20825E-08	5.10841E-10
25	9.40805E-08	9.28789E-08	1.20166E-09
26	3.77891E-08	3.74195E-08	3.69559E-10
27	4.14815E-08	4.09956E-08	4.85879E-10
28	5.89053E-08	5.81312E-08	7.74031E-10
29	7.47111E-08	7.34493E-08	1.26186E-09
30	8.21461E-08	8.01747E-08	1.97145E-09
31	8.59614E-08	8.41858E-08	1.77563E-09
32	8.72908E-08	8.56035E-08	1.68731E-09
33	8.72966E-08	8.56095E-08	1.6871E-09

Tabla 24.

Errores totales para desviación de -2.18% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27 y 30

Nodos	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.00047739	0.00047739	2.81392E-15
2	0.00047772	0.00047772	8.32968E-13
3	0.000479342	0.000479342	5.01183E-11
4	0.000479981	0.000479981	1.52777E-10
5	0.000480354	0.000480353	3.11577E-10
6	0.000481606	0.000481606	7.31666E-10
7	0.000481972	0.000481972	6.45721E-10
8	0.000482165	0.000482164	7.08171E-10

Nodos	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
9	0.000482527	0.000482527	6.89001E-10
10	0.00048293	0.00048293	6.63399E-10
11	0.000482997	0.000482996	6.82752E-10
12	0.000483127	0.000483126	7.21423E-10
13	0.00048351	0.00048351	6.77985E-10
14	0.000483695	0.000483694	5.94901E-10
15	0.00048373	0.000483729	5.79228E-10
16	0.000483772	0.000483772	5.64974E-10
17	0.000483839	0.000483839	5.61825E-10
18	0.00048384	0.000483839	5.61741E-10
19	0.000477785	0.000477785	1.42556E-13
20	0.000477786	0.000477786	1.36024E-13
21	0.000477787	0.000477787	1.33772E-13
22	0.000477787	0.000477787	1.31316E-13
23	0.000480318	0.000480318	2.14485E-11
24	0.000482548	0.000482548	3.1041E-11
25	0.000484979	0.000484979	3.11774E-10
26	0.000481774	0.000481773	8.49065E-10
27	0.000482016	0.000482015	1.0386E-09
28	0.00048298	0.000482978	1.87792E-09
29	0.000483824	0.000483821	2.88227E-09
30	0.000484233	0.000484229	3.9269E-09
31	0.000484239	0.000484235	3.92775E-09
32	0.00048424	0.000484236	3.92761E-09
33	0.000484241	0.000484237	3.92743E-09

Tabla 25.

Errores totales para desviación de 2.50% con monitores en los nodos 4, 27 y 29.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.000624939	0.000624939	1.17508E-11
2	0.000600301	0.000600298	2.72264E-09
3	0.000470465	0.000470321	1.44155E-07
4	0.000378925	0.000378444	4.80606E-07
5	0.000288719	0.00028752	1.19929E-06
6	9.19858E-05	9.16723E-05	3.13502E-07

Errores Totales %			
Nodo	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
7	4.97128E-05	4.76307E-05	2.08216E-06
8	1.03419E-05	1.02317E-05	1.10219E-07
9	1.17447E-05	1.15738E-05	1.70869E-07
10	0.000102105	0.000101802	3.03119E-07
11	0.000122734	0.000122659	7.52498E-08
12	0.000162807	0.000162764	4.31674E-08
13	0.000415134	0.000414997	1.37238E-07
14	0.0005529	0.000550622	2.27779E-06
15	0.000671395	0.000667692	3.7037E-06
16	0.000788471	0.000784031	4.44026E-06
17	0.00091445	0.000911486	2.96449E-06
18	0.000961023	0.000957724	3.29925E-06
19	0.00059729	0.000597288	2.38933E-09
20	0.000571964	0.000571963	1.24557E-09
21	0.000566309	0.000566309	2.70441E-10
22	0.000560776	0.000560776	7.57577E-11
23	0.000462936	0.000462801	1.3468E-07
24	0.00045112	0.000451014	1.06272E-07
25	0.000444674	0.000444583	9.10765E-08
26	8.17308E-05	8.13336E-05	3.97214E-07
27	6.97446E-05	6.9214E-05	5.30603E-07
28	2.89218E-05	2.87137E-05	2.08015E-07
29	1.02246E-05	1.01251E-05	9.95503E-08
30	4.99435E-06	4.71417E-06	2.80182E-07
31	1.48759E-07	3.95948E-08	1.09164E-07
32	1.30813E-07	7.48636E-08	5.59495E-08
33	3.50335E-07	3.33232E-07	1.71029E-08

Tabla 26.

Errores totales para desviación de 2.50% con medidores en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23

Errores Totales %			
Nodo	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.000624939	0.000624939	1.15023E-11
2	0.000600553	0.00060055	2.73598E-09
3	0.000471644	0.0004715	1.44327E-07
4	0.000379725	0.000379243	4.8188E-07

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
5	0.000289474	0.000288273	1.20077E-06
6	9.25105E-05	9.21957E-05	3.14822E-07
7	5.01687E-05	4.81132E-05	2.05555E-06
8	1.065E-05	1.05447E-05	1.05271E-07
9	1.14144E-05	1.12499E-05	1.64476E-07
10	0.000101141	0.000100847	2.94261E-07
11	0.000121682	0.000121611	7.08384E-08
12	0.000161603	0.000161557	4.66672E-08
13	0.000413193	0.000413062	1.30781E-07
14	0.000550635	0.000548385	2.25008E-06
15	0.000668876	0.000665209	3.66704E-06
16	0.0007857	0.000781301	4.39852E-06
17	0.000911511	0.000908581	2.93006E-06
18	0.000958024	0.000954761	3.26301E-06
19	0.000597695	0.000597692	2.50114E-09
20	0.000573765	0.000573763	2.05682E-09
21	0.000568531	0.00056853	9.447E-10
22	0.000562986	0.000562986	3.14193E-11
23	0.000465546	0.000465409	1.37386E-07
24	0.000456176	0.00045606	1.16343E-07
25	0.000452384	0.000452275	1.09174E-07
26	8.2178E-05	8.17795E-05	3.98562E-07
27	7.00948E-05	6.95628E-05	5.31988E-07
28	2.90534E-05	2.88463E-05	2.07187E-07
29	1.02538E-05	1.01557E-05	9.80654E-08
30	5.01163E-06	4.73389E-06	2.77739E-07
31	1.488E-07	4.11993E-08	1.076E-07
32	1.27585E-07	7.27662E-08	5.48189E-08
33	3.45359E-07	3.28886E-07	1.64725E-08

Tabla 27.

Errores totales para la desviación de 2.50% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20,

23, 31 y 33

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	1.38583E-11	1.49348E-12	1.23648E-11
2	2.57934E-07	2.55246E-07	2.68821E-09
3	1.12652E-05	1.11212E-05	1.43958E-07
4	3.11552E-05	3.06746E-05	4.80616E-07
5	6.49581E-05	6.37632E-05	1.19485E-06
6	0.000231666	0.000231343	3.22551E-07
7	0.000319357	0.000317384	1.97278E-06
8	0.000458812	0.000458714	9.71991E-08
9	0.000775216	0.000775061	1.55815E-07
10	0.001179711	0.001179429	2.8216E-07
11	0.001246254	0.001246187	6.72709E-08
12	0.001364442	0.001364396	4.61319E-08
13	0.001965823	0.001965697	1.26744E-07
14	0.002243593	0.002241409	2.18389E-06
15	0.002468613	0.002465051	3.5612E-06
16	0.002682051	0.002677777	4.27368E-06
17	0.002905161	0.002902309	2.85259E-06
18	0.00298505	0.002981875	3.17505E-06
19	3.30222E-07	3.28105E-07	2.11732E-09
20	1.2979E-06	1.29768E-06	2.2405E-10
21	1.61824E-06	1.6181E-06	1.43222E-10
22	1.96582E-06	1.96374E-06	2.08126E-09
23	1.27888E-05	1.26588E-05	1.30045E-07
24	1.56816E-05	1.55947E-05	8.68739E-08
25	1.73719E-05	1.73057E-05	6.61223E-08
26	0.000248793	0.000248384	4.0821E-07
27	0.000271209	0.000270664	5.45264E-07
28	0.000375618	0.000375392	2.26514E-07
29	0.000463517	0.000463398	1.19327E-07
30	0.000507505	0.000507185	3.19973E-07
31	0.000597513	0.000597378	1.35203E-07
32	0.000620204	0.000620129	7.5241E-08
33	0.00063491	0.000634881	2.90541E-08

Tabla 28.

Errores totales para desviación de 2.50% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25,

27 y 30

Nodos	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.00062494	0.00062494	1.15001E-11
2	0.000600566	0.000600563	2.63595E-09
3	0.00047171	0.000471571	1.3935E-07
4	0.000380063	0.000379598	4.65639E-07
5	0.000289722	0.000288558	1.16438E-06
6	9.2673E-05	9.23927E-05	2.80289E-07
7	5.0381E-05	4.82029E-05	2.17808E-06
8	1.06111E-05	1.04787E-05	1.32343E-07
9	1.15436E-05	1.13457E-05	1.97861E-07
10	0.000101539	0.000101201	3.383E-07
11	0.000122099	0.000122006	9.31534E-08
12	0.00016205	0.000162018	3.13631E-08
13	0.000414223	0.000414062	1.61035E-07
14	0.000552004	0.00054963	2.37331E-06
15	0.000670642	0.000666815	3.82709E-06
16	0.000787852	0.000783277	4.57531E-06
17	0.000913922	0.00091085	3.07175E-06
18	0.000960584	0.000957171	3.41304E-06
19	0.000597632	0.000597629	2.36532E-09
20	0.000572247	0.000572246	1.22686E-09
21	0.000566579	0.000566579	2.60564E-10
22	0.000561034	0.000561034	8.20283E-11
23	0.000465255	0.000465123	1.31999E-07
24	0.000455866	0.000455755	1.11317E-07
25	0.000452064	0.00045196	1.04267E-07
26	8.23818E-05	8.20248E-05	3.56945E-07
27	7.0351E-05	6.98718E-05	4.7919E-07
28	2.94186E-05	2.92545E-05	1.64096E-07
29	1.05763E-05	1.05132E-05	6.30886E-08
30	5.22501E-06	5.01769E-06	2.07318E-07
31	1.3504E-07	6.95161E-08	6.55242E-08
32	7.02819E-08	4.40646E-08	2.62173E-08
33	2.6754E-07	2.64411E-07	3.12909E-09

Tabla 29.

Errores totales para desviación de 5% con monitores en los nodos 4, 27 y 29.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.002499875	0.002499875	1.19569E-11
2	0.00244931	0.002449307	2.78821E-09
3	0.002173375	0.002173227	1.47461E-07
4	0.001966437	0.001965946	4.91403E-07
5	0.001746959	0.001745731	1.2282E-06
6	0.001171543	0.001171219	3.23598E-07
7	0.000993278	0.000991147	2.13163E-06
8	0.000766634	0.000766522	1.11968E-07
9	0.000437762	0.000437588	1.73924E-07
10	0.000198047	0.000197738	3.09163E-07
11	0.000170421	0.000170345	7.62818E-08
12	0.000128331	0.000128286	4.50093E-08
13	1.25325E-05	1.2393E-05	1.39564E-07
14	2.45355E-06	1.2133E-07	2.33222E-06
15	8.14574E-06	4.35173E-06	3.79401E-06
16	2.30521E-05	1.85029E-05	4.54922E-06
17	4.5901E-05	4.28648E-05	3.03617E-06
18	5.69989E-05	5.36195E-05	3.37937E-06
19	0.002443072	0.002443069	2.44657E-09
20	0.002390279	0.002390278	1.27448E-09
21	0.002378413	0.002378412	2.75825E-10
22	0.002366774	0.002366774	7.8625E-11
23	0.002156762	0.002156624	1.37756E-07
24	0.002130562	0.002130453	1.08662E-07
25	0.002116192	0.002116099	9.31021E-08
26	0.001133094	0.001132684	4.09886E-07
27	0.001085734	0.001085187	5.47312E-07
28	0.000895065	0.000894848	2.16807E-07
29	0.000766802	0.000766697	1.05344E-07
30	0.000710674	0.000710382	2.92822E-07
31	0.000606797	0.000606681	1.15354E-07
32	0.000583107	0.000583047	5.98093E-08
33	0.000568128	0.000568109	1.88864E-08

Tabla 30.*Errores totales para desviación de 5% con medidores en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23*

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.002499877	0.002499877	1.14641E-11
2	0.002450328	0.002450325	2.81491E-09
3	0.002178445	0.002178298	1.47807E-07
4	0.001970083	0.001969589	4.9395E-07
5	0.001750673	0.001749442	1.23117E-06
6	0.001175285	0.001174958	3.2625E-07
7	0.000997621	0.000995543	2.07859E-06
8	0.000772012	0.00077191	1.02221E-07
9	0.000441771	0.000441609	1.61296E-07
10	0.000200707	0.000200416	2.91611E-07
11	0.000172896	0.000172828	6.76332E-08
12	0.000130495	0.000130442	5.21993E-08
13	1.31984E-05	1.30715E-05	1.26848E-07
14	2.47387E-06	1.96907E-07	2.27697E-06
15	7.68062E-06	3.95976E-06	3.72086E-06
16	2.21392E-05	1.76732E-05	4.46594E-06
17	4.45811E-05	4.16136E-05	2.96751E-06
18	5.55326E-05	5.22255E-05	3.30709E-06
19	0.002444707	0.002444705	2.67256E-09
20	0.002397639	0.002397636	3.08886E-09
21	0.002387517	0.002387515	2.01124E-09
22	0.002375853	0.002375852	3.76666E-10
23	0.002168023	0.00216788	1.43189E-07
24	0.002152512	0.002152383	1.29218E-07
25	0.002149783	0.002149652	1.30818E-07
26	0.001136423	0.00113601	4.12594E-07
27	0.001088498	0.001087947	5.50093E-07
28	0.000896541	0.000896326	2.15139E-07
29	0.000767332	0.00076723	1.02336E-07
30	0.000711153	0.000710865	2.87898E-07
31	0.000607187	0.000607074	1.12189E-07
32	0.000583478	0.00058342	5.751E-08
33	0.000568487	0.000568469	1.75882E-08

Tabla 31.

Errores totales para la desviación de 5% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23,

31 y 33.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	1.47813E-11	1.56848E-12	1.32128E-11
2	2.75115E-07	2.72395E-07	2.71954E-09
3	1.18816E-05	1.17345E-05	1.47103E-07
4	3.23602E-05	3.18686E-05	4.91549E-07
5	6.68499E-05	6.56303E-05	1.21957E-06
6	0.000235842	0.0002355	3.42277E-07
7	0.000324155	0.000322241	1.91376E-06
8	0.000464339	0.000464253	8.65393E-08
9	0.000781748	0.000781604	1.44254E-07
10	0.001186679	0.001186411	2.6762E-07
11	0.001253286	0.001253225	6.06581E-08
12	0.001371522	0.001371471	5.1198E-08
13	0.001972288	0.001972169	1.18823E-07
14	0.002249674	0.00224753	2.14475E-06
15	0.002474122	0.002470612	3.50937E-06
16	0.002686934	0.002682718	4.21643E-06
17	0.002909286	0.002906473	2.81263E-06
18	0.002988821	0.00298569	3.13125E-06
19	3.58483E-07	3.5657E-07	1.91292E-09
20	1.48683E-06	1.48681E-06	2.4461E-11
21	1.87745E-06	1.87584E-06	1.61753E-09
22	2.30088E-06	2.29404E-06	6.8406E-09
23	1.38333E-05	1.37048E-05	1.28496E-07
24	1.78406E-05	1.77693E-05	7.13819E-08
25	2.01996E-05	2.0153E-05	4.65947E-08
26	0.00025331	0.000252877	4.32582E-07
27	0.000276157	0.00027558	5.7756E-07
28	0.00038258	0.000382325	2.55529E-07
29	0.000472258	0.00047211	1.47916E-07
30	0.000517076	0.000516699	3.77041E-07
31	0.000607781	0.000607609	1.71754E-07
32	0.000630676	0.000630573	1.0257E-07
33	0.000645419	0.000645372	4.70616E-08

Tabla 32.

Errores totales para desviación de 5% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27

y 30

Nodos	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0.002499879	0.002499878	1.14598E-11
2	0.002450382	0.00245038	2.6162E-09
3	0.002178741	0.002178604	1.37938E-07
4	0.001971666	0.001971204	4.61725E-07
5	0.001752005	0.001750846	1.15888E-06
6	0.001176625	0.001176366	2.58685E-07
7	0.000998686	0.00099636	2.32545E-06
8	0.000770938	0.00077078	1.57961E-07
9	0.000440643	0.000440413	2.2962E-07
10	0.000199804	0.000199422	3.81205E-07
11	0.000172002	0.000171889	1.13724E-07
12	0.000129639	0.000129616	2.29685E-08
13	1.29075E-05	1.27188E-05	1.88796E-07
14	2.67766E-06	1.52617E-07	2.52504E-06
15	8.25363E-06	4.21097E-06	4.04266E-06
16	2.30927E-05	1.82715E-05	4.82121E-06
17	4.58411E-05	4.25886E-05	3.25243E-06
18	5.69659E-05	5.33572E-05	3.60873E-06
19	0.002444454	0.002444451	2.39867E-09
20	0.002391436	0.002391435	1.2372E-09
21	0.002379519	0.002379519	2.56293E-10
22	0.002367831	0.002367831	9.14818E-11
23	0.002166778	0.002166645	1.32424E-07
24	0.002151178	0.00215106	1.18854E-07
25	0.002148399	0.002148279	1.20303E-07
26	0.001138171	0.00113784	3.31099E-07
27	0.001090838	0.001090391	4.46622E-07
28	0.000901002	0.000900869	1.33121E-07
29	0.000773444	0.000773405	3.89804E-08
30	0.000717894	0.000717738	1.55957E-07
31	0.000613109	0.000613072	3.709E-08
32	0.000589226	0.000589217	9.43243E-09
33	0.000574138	0.000574138	1.09186E-10

4.8 Comparación de los métodos propuestos

Para realizar una adecuada estimación de estado es importante tener en cuenta: la multicolinealidad de los sistemas de potencia y los posibles errores que tienen los datos de entrada. Los métodos en descomposición de valores singulares truncados y Ridge Regression aborda cada uno de estos desafíos manera diferente.

El desempeño del método de descomposición en valores singulares truncados no es susceptible a las diferentes desviaciones a la que fueron sometidos los datos, así como tampoco lo fue al cambio en la posición de los medidores.

Por otra parte, el desempeño del método Ridge Regression si es susceptible a las desviaciones a las que se someten los datos de entrada. Por ejemplo, cuando se varían las posiciones de los medidores el desempeño del método permanece constante, pero si entre los nodos medidos se incluye el nodo 1 su desempeño varía según la magnitud de la desviación.

En cuanto a la multicolinealidad del sistema, el método Ridge Regression tiene una excelente estimación para los nodos que tiene una alta correlación de variables. Sin embargo, si el nodo 1 es medido, la estimación en estos nodos disminuye y aumenta la estimación en los nodos que no exhiben una alta correlación de variables.

El método de descomposición en valores singulares truncados es excelente para los nodos que no tienen una alta correlación de variables, pero a medida que los nodos aumentan su nivel de correlación, el desempeño del método va decayendo.

Cada uno de los métodos tiene sus ventajas y desventajas de acuerdo con las diferentes situaciones a las que fueron expuestos, sin embargo, se puede decir que ambos métodos tienen un buen desempeño.

5. Conclusiones

Las técnicas de estimación de estado armónico son uno de los componentes más importantes de la estimación de estado armónico, ya que son ellas las que toman toda la información recolectada describen el estado del sistema. Para diseñar estas técnicas es necesario superar dos problemas: la singularidad de los sistemas de distribución y la cantidad de variables medidas a las que se tiene acceso.

Con la finalidad de superar estos obstáculos se trabaja con medidas de corrientes tomadas del proceso de pronóstico de la demanda que los operadores red deben realizar y con métodos de regularización como la descomposición en valores singulares truncados y Ridge Regression que tienen un buen desempeño al trabajar con sistemas que son cercanos a singulares.

Al realizar una revisión de las distintas fuentes bibliográficas sobre los métodos de regularización: descomposición en valores singulares truncados y Ridge Regression; se encontró que ambos métodos son aplicados con éxito en diferentes campos de la ciencia, sin embargo, su aplicación para la estimación de estado armónico no se ha implementado.

La implementación de los métodos de descomposición en valores singulares truncados y Ridge Regresión para la estimación de estado armónico en tensión de un sistema de distribución de energía eléctrica reportado en la IEEE se realizó a través del software OpenDss de donde se obtuvieron los parámetros de entrada a los algoritmos usados en el software Matlab para realizar la estimación de estado armónico en tensión.

El desempeño de los métodos propuestos varía según las condiciones bajo las cuales son aplicados; el método de descomposición en valores singulares truncados no es susceptible a los

errores en la entrada, pero su estimación en nodos con alta correlación de variables no es buena. Por otra parte, el método Ridge Regression tiene un buen manejo de la multicolinealidad del sistema, sin embargo, es susceptible a errores en los datos de entrada y a cambios en la medición.

A partir de los resultados obtenidos durante el trabajo de grado se puede evidenciar que la estimación de estado armónico en tensión a partir de corrientes obtenidas de un pronóstico de demanda en donde se presenta desviación del estado tiene una gran aplicación en la industria, ya que, les permite a los operadores de red obtener información del estado en tensión del sistema de distribución a frecuencias armónicas sin la necesidad de instalar medidores de sincronización con estampa de tiempo en todos los nodos.

Durante el desarrollo de este proyecto de grado fueron consolidados varios aspectos de nuestra vida profesional como por ejemplo la capacidad investigativa, técnicas y de comprensión de lectura sobre temáticas relacionadas con la ingeniería eléctrica. Además, se fortalecieron las habilidades de trabajo en equipo y manejo de herramientas informáticas.

6. Recomendaciones

La continuidad en las investigaciones es lo que abre las puertas a nuevos avances científicos, lo que un día fue pensado para una función en específico el día de mañana puede ser utilizado como base para algo nuevo o servir de inspiración para nuevos avances.

Este trabajo de grado abre las puertas a diversos proyectos; tales como: estudio de posicionamiento óptimo de medidores para la estimación de estado armónico utilizando el método

Ridge Regression, evaluar la estimación de estado armónico mediante los métodos propuestos frente a cambios en la topología del sistema, utilizar los métodos propuestos para la estimación de estado armónico en corriente, estudiar como la combinación de los métodos propuestos impacta en las ventajas y desventajas se observaron al aplicar cada uno de los métodos por separado.

Referencias Bibliográficas

- Almeida, C. F., & Kagan, N. (2013). Harmonic state estimation through optimal monitoring systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, No 1, 467- 478.
- Arefi, A., Haghifam, M. R., Fathi, S. H., Niknam, T., & Olamaei, J. (2009). A novel algorithm based on Honey Bee Mating Optimization for distribution harmonic state estimation including distributed generators. *IEEE Bucharest PowerTech*, 1-7, doi: 10.1109/PTC.2009.5282101.
- Baran, M., & Wu, F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,. *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.4, no.2, 1401,1407.
- Chang, G. W., Chen, C. I., & Teng, Y. F. (2008). An application of radial basis function neural network for harmonics detection. *2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 1-5, doi: 10.1109/ICHQP.2008.4668761.
- Chen, C., & Chang, G. W. (2010). Radial basis function-based neural network for harmonics detection. *2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 486-491, doi: 10.1109/ICIEA.2010.5517128.
- Gavish, M., & Donoho, D. L. (2014). The Optimal Hard Threshold for Singular Values is $4/\sqrt{3}$. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 60, no. 8, 5040-5053, doi: 10.1109/TIT.2014.2323359.
- Hansen, C. (1986). The truncated SVD as a method for regularization. *Numerical Analysis Project Computer Science Department, Stanford University, Manuscript NA-86-36*.

- Hansen, C. (1990). Truncated singular value decomposition solutions to discrete ill-posed problems with ill-determined numerical rank. *SIAM J. Sci. STAT. COMPUT*, vol. 11, no. 3, 503-518.
- Hansen, C. (2008). Regularization tools. A Matlab package for analysis and solution of discrete ill posed problems. *University of Denmark, Lyngby, reporte march* .
- Heydt, G. T. (1989). Identification of harmonic sources by a state estimation technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, 569-576, doi: 10.1109/61.19248.
- Lin, H. C. (2007). Intelligent Neural Network-Based Fast Power System Harmonic Detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, 43-52, doi: 10.1109/TIE.2006.888685.
- Liu, S. (1998). An adaptive Kalman filter for dynamic estimation of harmonic signals. " *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.98EX227)*, vol.2, 636-640, doi: 10.1109/ICHQP.1998.760120.
- Malagón Carvajal, G. A. (2019). *Metodos de modelado y simulacion para la evaluacion de la distorcion de cargas basadas en fuentes conmutadas considerando los fenomenos de diversidad y atenuacion-amplificacion*. Bucaramanga.
- Marulanda Durango, J. J. (2013). Regularización de Tikhonov para estimar los parámetros de un modelo de un horno de arco. *Tecnura*, 17(37), 41–52.
- Matair, S. S., Watson, N. R., Wong, K. P., Pham, V. L., & Arrillaga, J. (2000). Harmonic state estimation: a method for remote harmonic assessment in a deregulated utility network. *DRPT2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Proceedings (Cat. No.00EX382)*, 41-46, doi: 10.1109/DRPT.2000.855636.

- Meliopoulos, A. P., & Zelingher, S. (1994). Power system harmonic state estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 3, 1701-1709, doi: 10.1109/61.311191.
- Meliopoulos, A. P., Fan Zhang, S., & Zelingher, S. (1992). "Hardware And Software Requirements For A Transmission System Harmonic Measurement System. *ICHPS V International Conference on Harmonics in Power Systems*, 330-338, doi: 10.1109/ICHPS.1992.559103.
- Owen, E. L. (1998). A history of harmonics in power systems," . *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, no. 1 Jan.-Feb., 6-12, doi: 10.1109/2943.644881.
- Thunberg, E., & Soder, L. (1998). Harmonic Norton model of a real distribution network. *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings*, vol. 1, 279-284.
- Walach, E., & Widrow, B. (1984). The least mean fourth (LMF) adaptive algorithm and its family. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 30, no. 2, 275-283, doi: 10.1109/TIT.1984.1056886.

Apéndices

Apéndice A. Errores del método descomposición en valores singulares truncados

Este apéndice enseña los valores obtenidos con el método descomposición en valores singulares truncados para el error total, error total de magnitud y error total de fase para las desviaciones de -2.18% y 2.50%.

Tabla 33.

Errores totales para desviación de -2.18% con medición en los nodos 4, 27 y 29.

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 34.

Errores totales para desviación de -2.18% con medición en los nodos 10, 18 y 30.

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 35.

Errores totales para desviación del -2.18% con medición en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23.

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 36.

Errores totales para la desviación de -2.18% con medición en los nodos 6, 9, 20, 30 y 32.

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 37.

Errores totales para la desviación de -2.18% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20, 23, 31 y 33

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 38.

Errores totales para desviación de -2.18% con medición en los puntos 2, 4, 7, 12, 14, 17, 19, 25, 27 y 30.

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 39.

Errores totales para desviación de 2.50% con medición en los nodos 4, 27 y 29.

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 40.

Errores totales para desviación de 2.50% con medición en los nodos 10, 18 y 30.

Nodos	Errores Totales [%]		
	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 41.

Errores totales para desviación del 2.50% con medición en los nodos 8, 16, 21, 25 y 23

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 42.

Errores totales para la desviación de 2.50% con medición en los nodos 6, 9, 20, 30 y 32

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 43.

Errores totales para la desviación de 2.50% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20,

23, 31 y 33

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Tabla 44.

Errores totales para la desviación de 2.50% con medición en los nodos 1, 6, 8, 10, 13, 18, 20,

23, 31 y 33

Errores Totales [%]			
Nodos	Error total de fase	Error total de magnitud	Error total
1	7.01031E-09	8.84372E-10	7.89469E-09
2	1.76308E-06	0.000145176	0.000146939
3	0.000120908	0.006955116	0.007076024
4	0.000438673	0.020129477	0.02056815
5	0.001186502	0.042988021	0.044174524
6	0.000533452	0.163408758	0.163942209
7	0.003525769	0.233598176	0.237123945
8	0.000181563	0.358156018	0.358337581
9	0.000663598	0.646466673	0.647130271
10	0.077156822	0.955137619	1.032294441
11	0.190908861	0.906263989	1.097172849
12	0.40868162	0.805825454	1.214507074
13	1.410097048	0.419099948	1.829196996
14	1.825522273	0.294082001	2.119604274
15	2.145120596	0.213321549	2.358442145
16	2.436424514	0.151262609	2.587687122
17	2.729884671	0.100078761	2.829963433
18	2.832844008	0.08440265	2.917246658
19	1.64068E-06	0.000149674	0.000151314
20	9.62102E-07	0.000183669	0.000184631
21	7.67043E-07	0.000191189	0.000191956
22	5.77221E-07	0.000198268	0.000198846
23	0.000116197	0.007340316	0.007456513
24	0.000103074	0.007945226	0.008048301
25	9.5828E-05	0.008277256	0.008373084
26	0.000638687	0.172485259	0.173123946
27	0.000801553	0.184137235	0.184938788
28	0.000532473	0.23763896	0.238171434
29	0.000426465	0.281066091	0.281492555
30	0.000762027	0.30207212	0.302834147
31	0.0005456	0.345667968	0.346213568
32	0.000436149	0.356583479	0.357019627
33	0.000319614	0.363712872	0.364032486

Apéndice B. Truncamiento óptimo

Se exponen las figuras que representan la selección del truncamiento óptimo para las desviaciones -5%, -2.18%, 2.5% y 5% del estado de corriente.

Figura 23.

Truncamiento óptimo para desviación de -5%, a frecuencia fundamental.

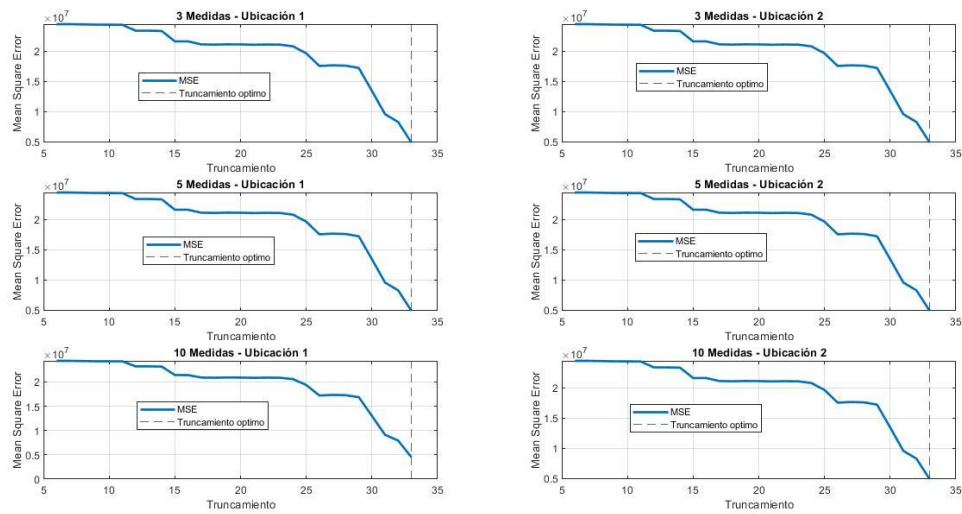


Figura 24.

Truncamiento óptimo para desviación de -5%, para el 3 armónico.

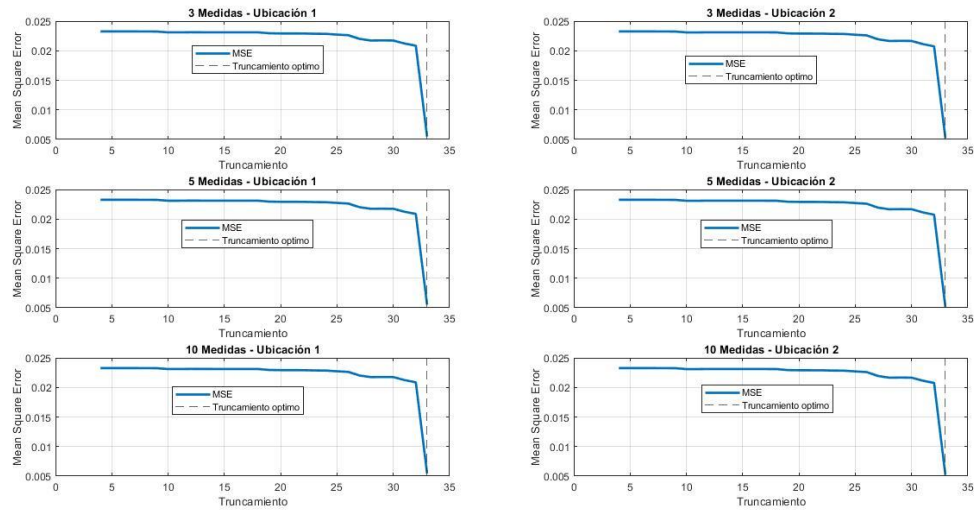


Figura 25.

Truncamiento óptimo para desviación de -5%, para el 5 armónico.

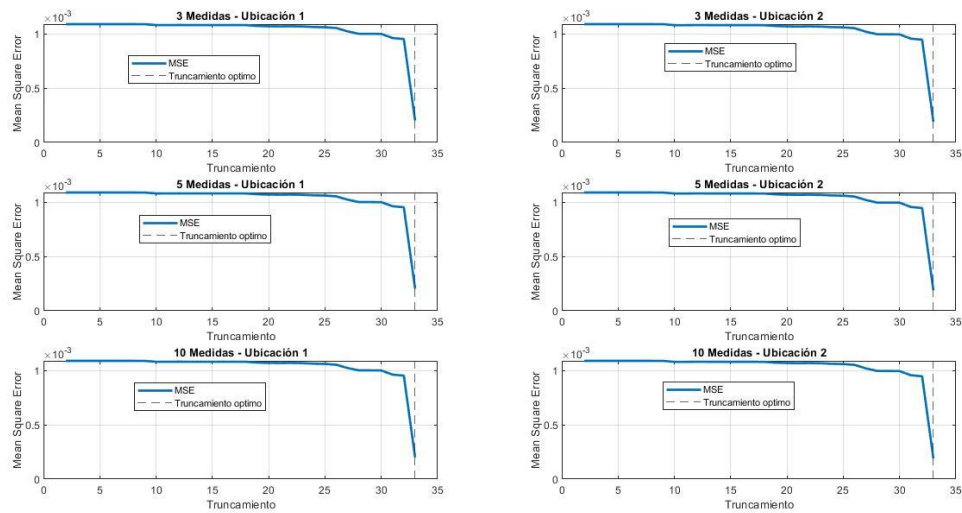
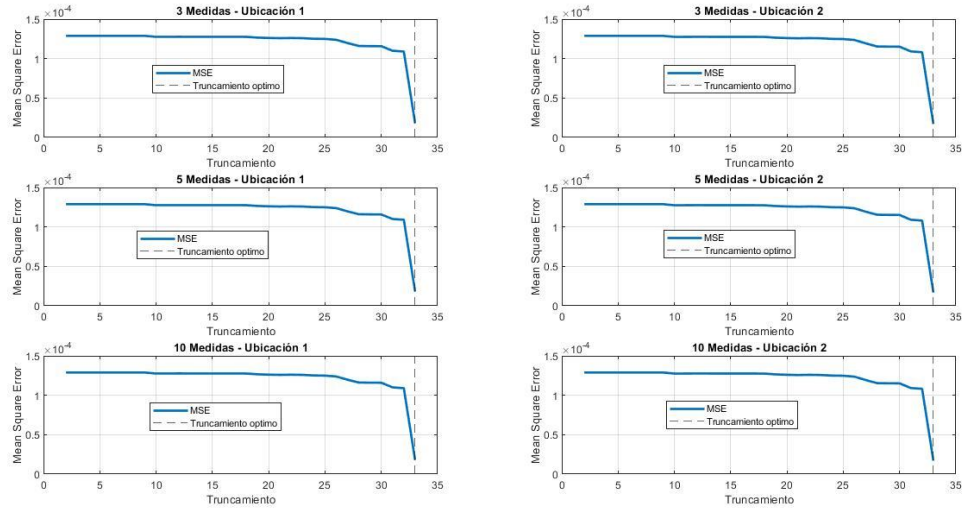


Figura 26.

Truncamiento óptimo para desviación de -5%, para el 7 armónico.

**Figura 27.**

Truncamiento óptimo para desviación de -5%, para el 9 armónico

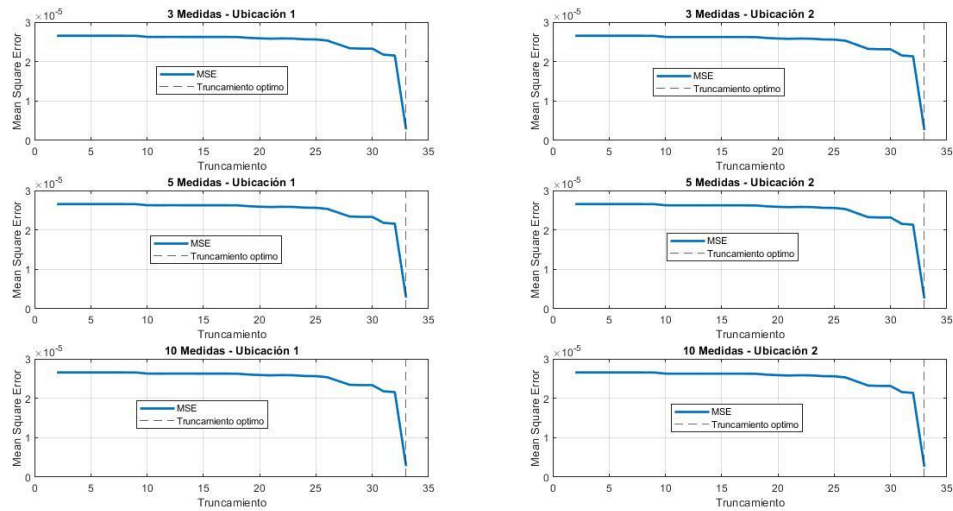
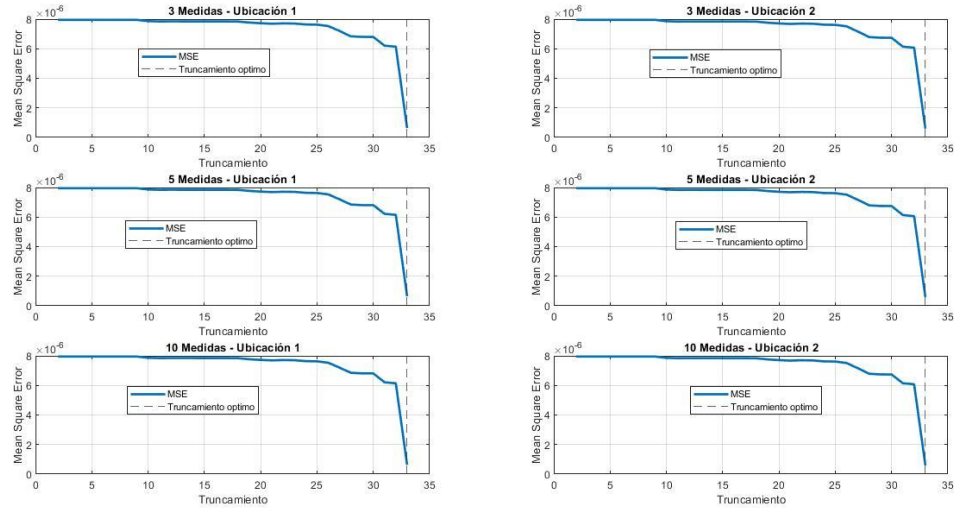


Figura 28.

Truncamiento óptimo para desviación de -5%, para el 11 armónico

**Figura 29.**

Truncamiento óptimo para desviación de -5%, para el 13 armónico

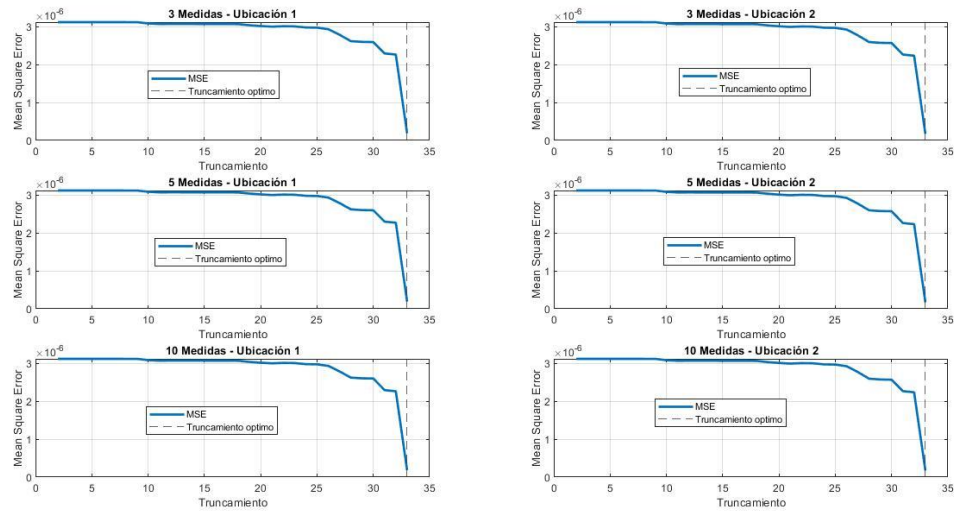


Figura 30.

Truncamiento óptimo para desviación de -2.18%, a frecuencia fundamental

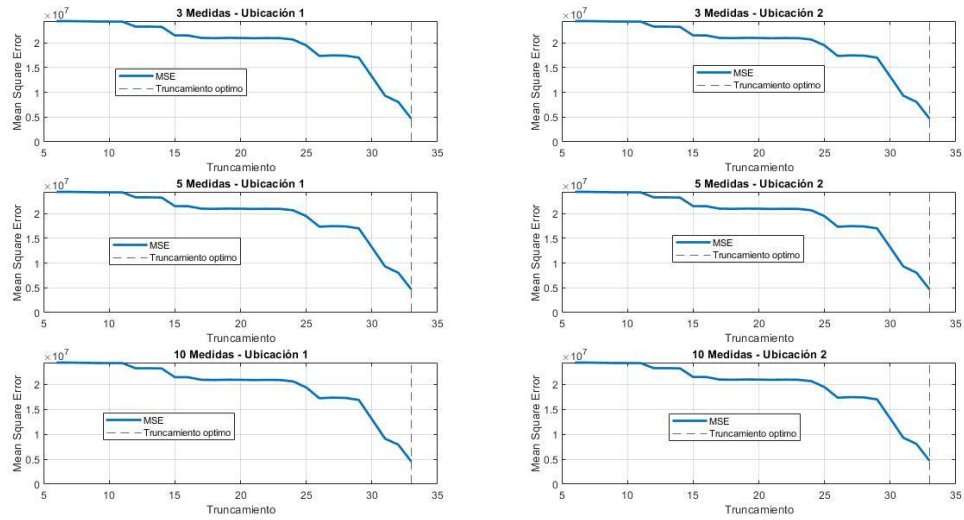


Figura 31.

Truncamiento óptimo para desviación de -2.18%, para el 3 armónico.

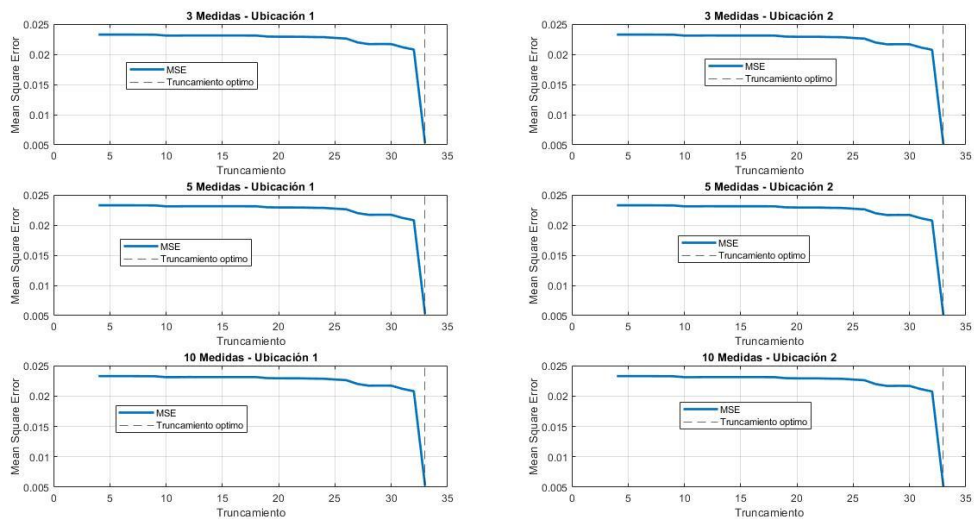
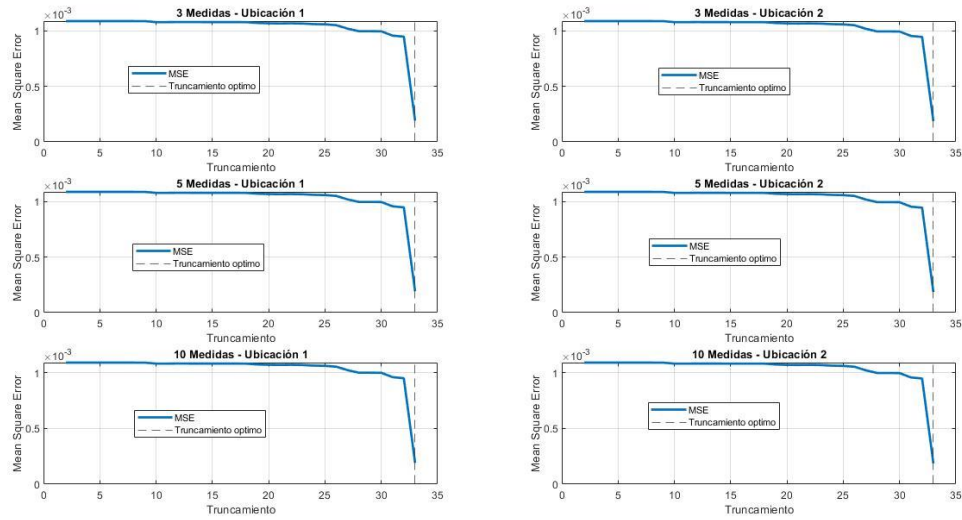


Figura 32.

Truncamiento óptimo para desviación de -2.18%, para el 5 armónico.

**Figura 33.**

Truncamiento óptimo para desviación de -2.18%, para el 7 armónico.

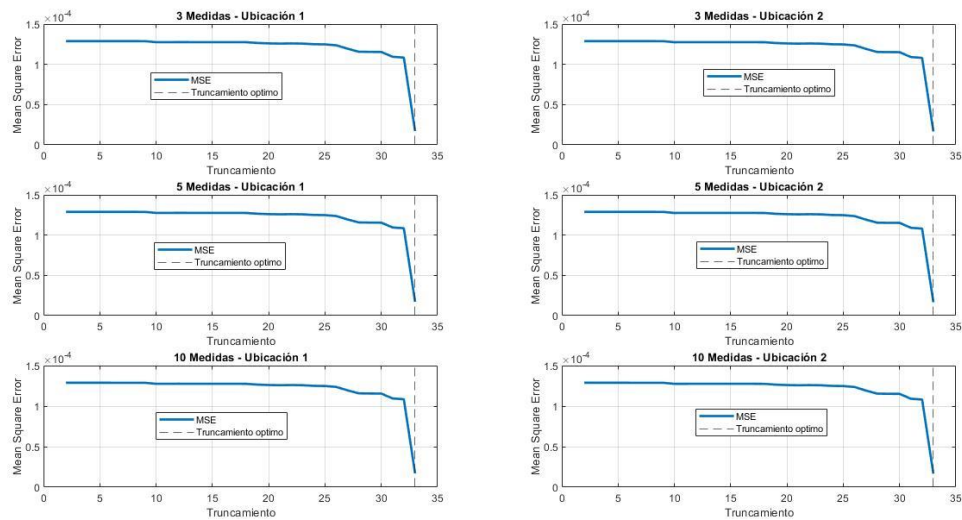
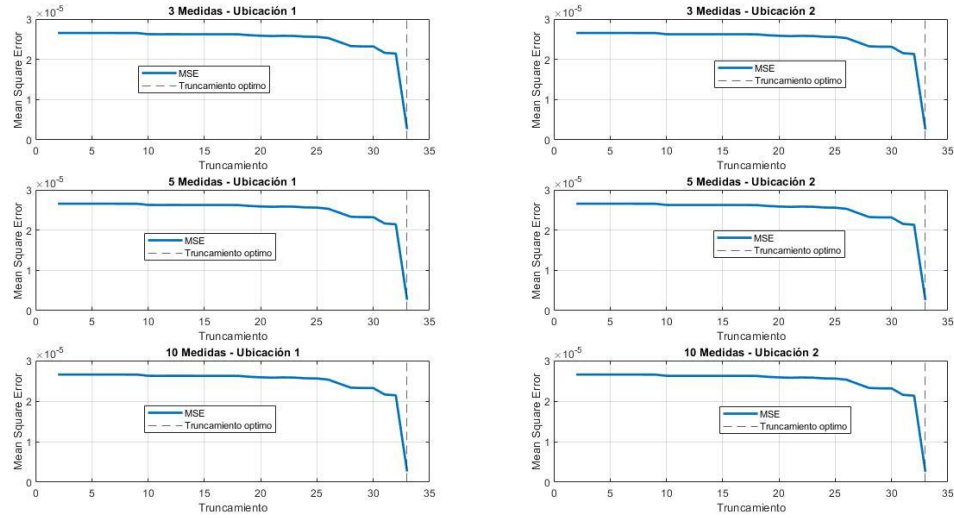


Figura 34.

Truncamiento óptimo para desviación de -2.18%, para el 9 armónico.

**Figura 35.**

Truncamiento óptimo para desviación de -2.18%, para el 11 armónico.

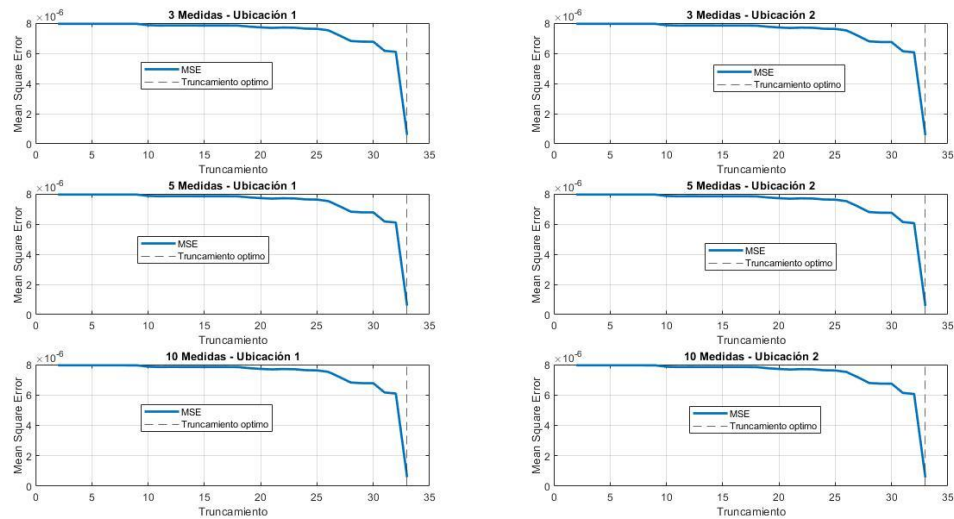


Figura 36.

Truncamiento óptimo para desviación de -2.18%, para el 13 armónico.

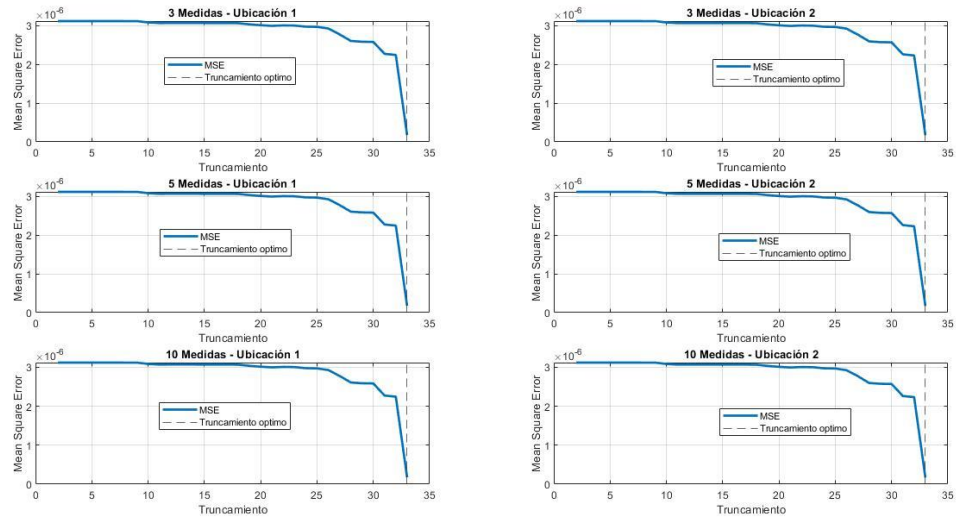


Figura 37.

Truncamiento óptimo para desviación de 2.5%, a frecuencia fundamental.

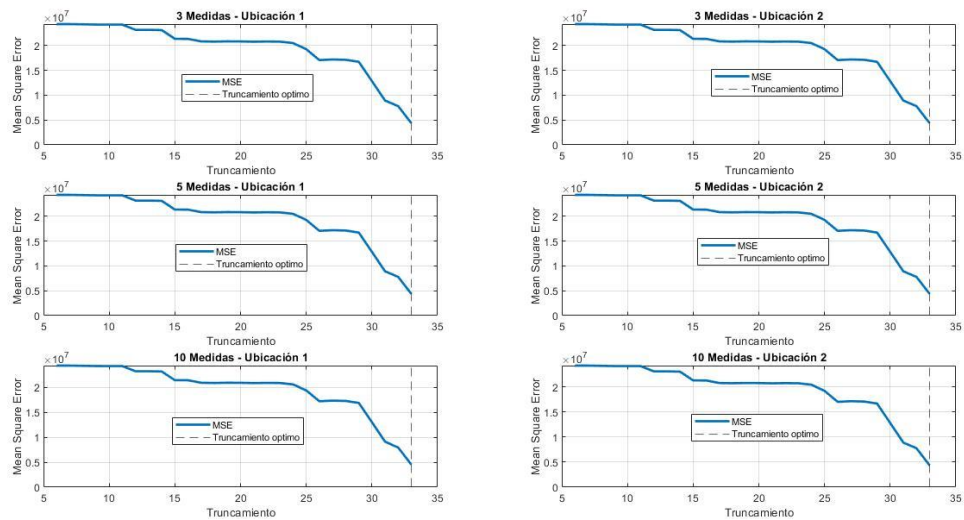
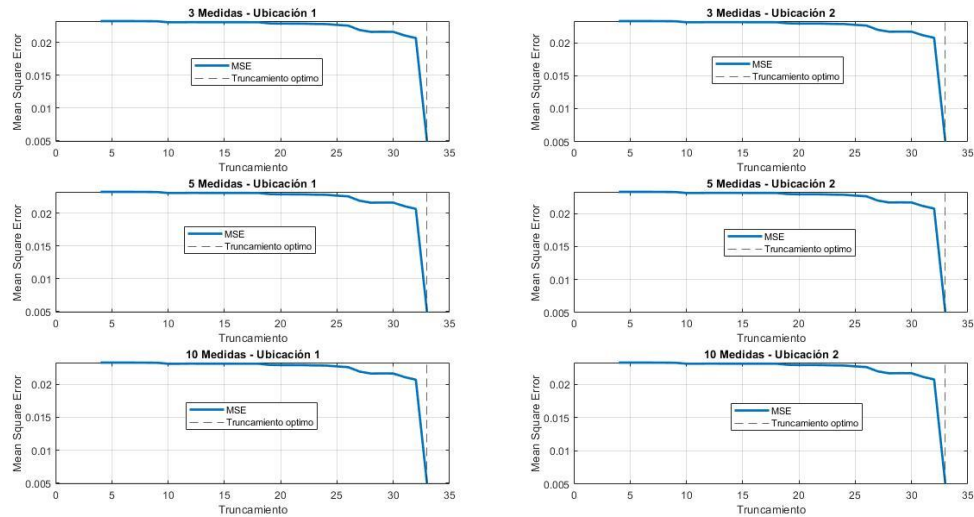


Figura 38.

Truncamiento óptimo para desviación de 2.5%, para el 3 armónico

**Figura 39.**

Truncamiento óptimo para desviación de 2.5%, para el 5 armónico

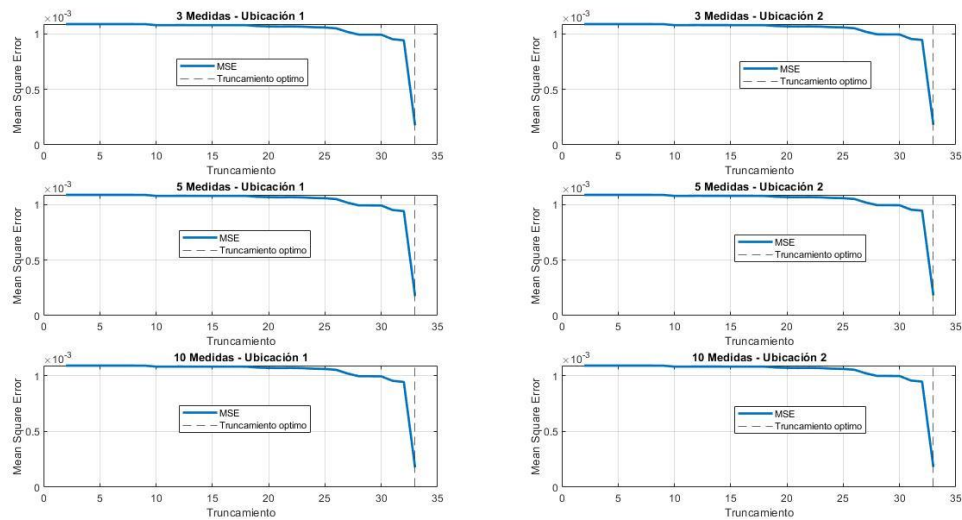
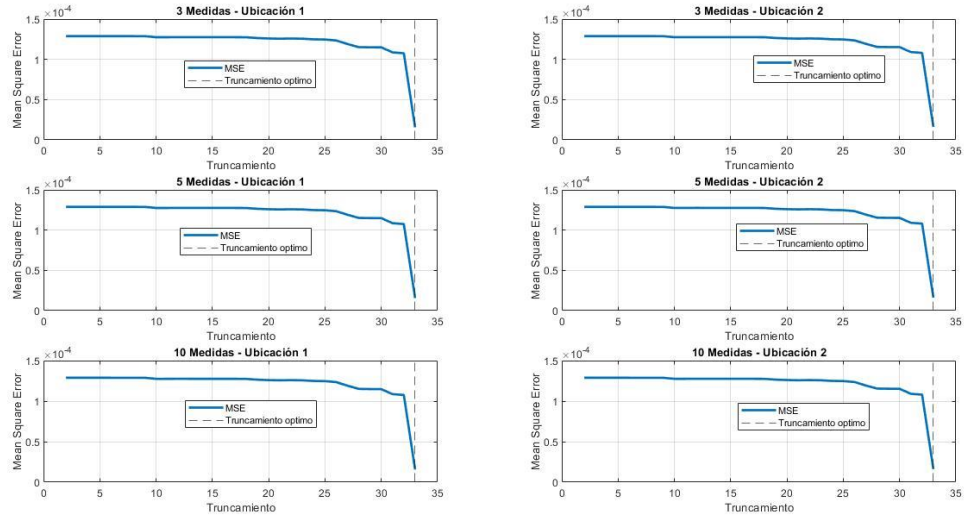


Figura 40.

Truncamiento óptimo para desviación de 2.5%, para el 7 armónico

**Figura 41.**

Truncamiento óptimo para desviación de 2.5%, para el 9 armónico

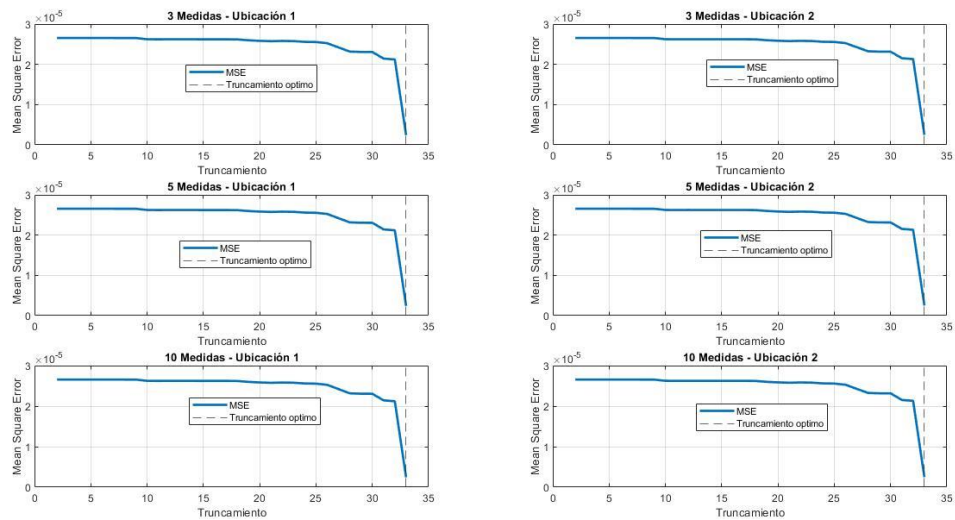


Figura 42.

Truncamiento óptimo para desviación de 2.5%, para el 11 armónico

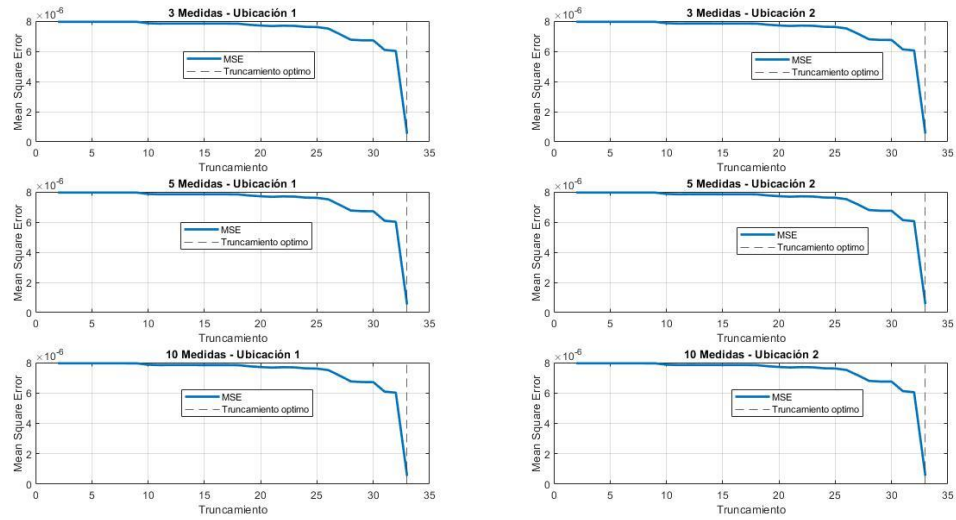


Figura 43.

Truncamiento óptimo para desviación de 2.5%, para el 13 armónico

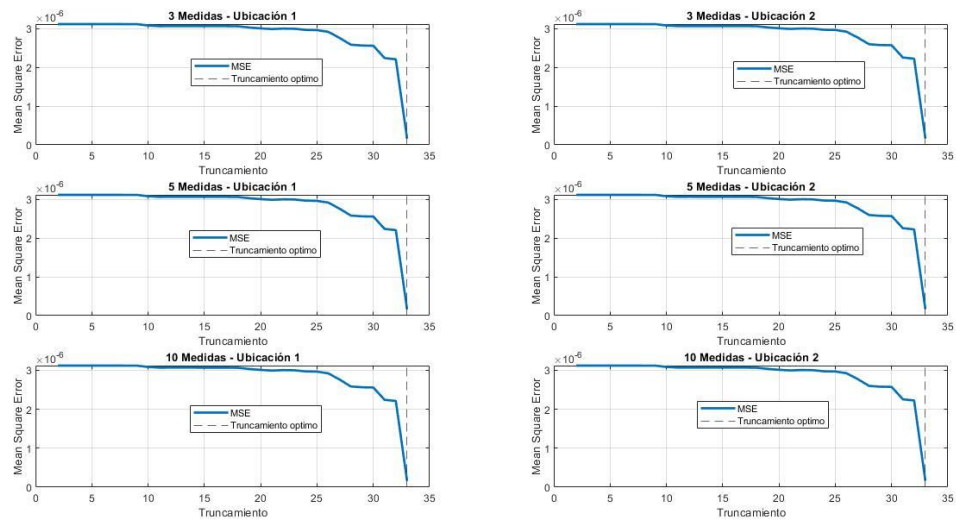
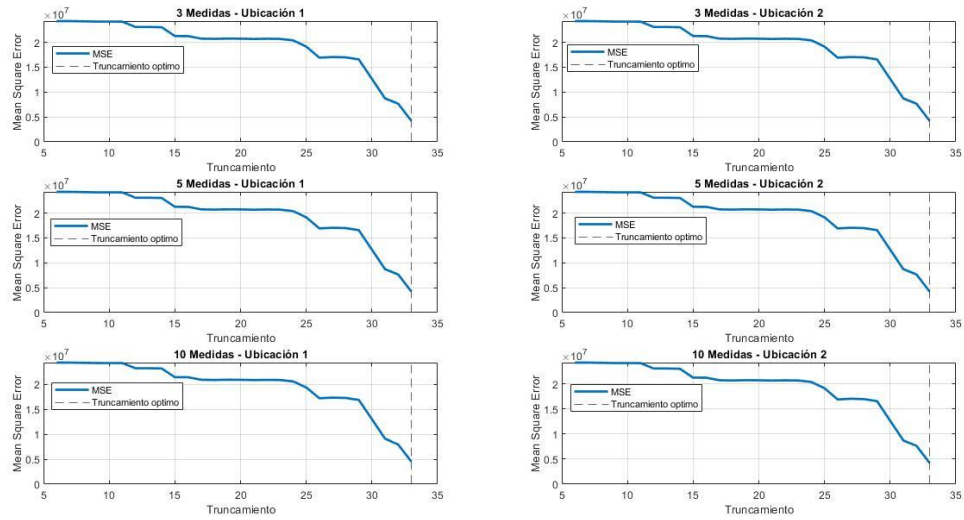


Figura 44.

Truncamiento óptimo para desviación de 5%, a frecuencia fundamental

**Figura 45.**

Truncamiento óptimo para desviación de 5%, para el 3 armónico

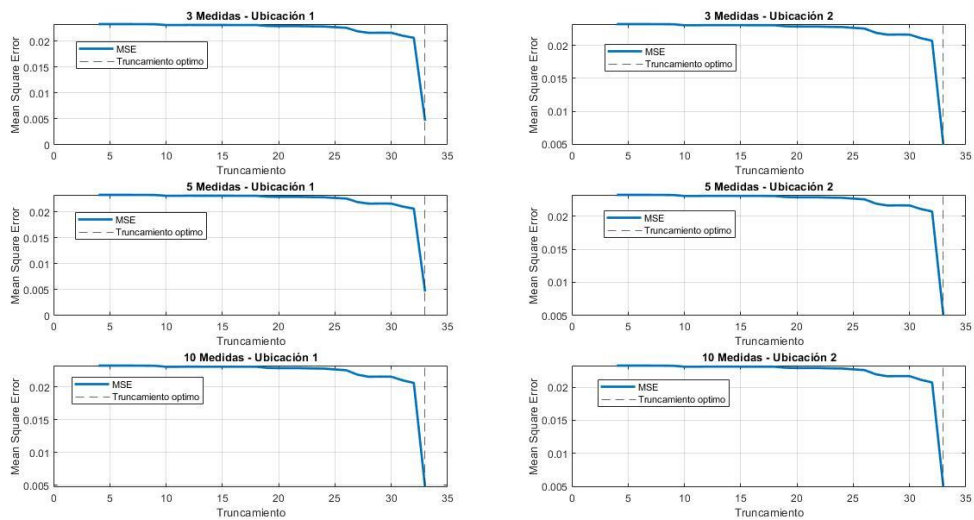


Figura 46.

Truncamiento óptimo para desviación de 5%, para el 5 armónico

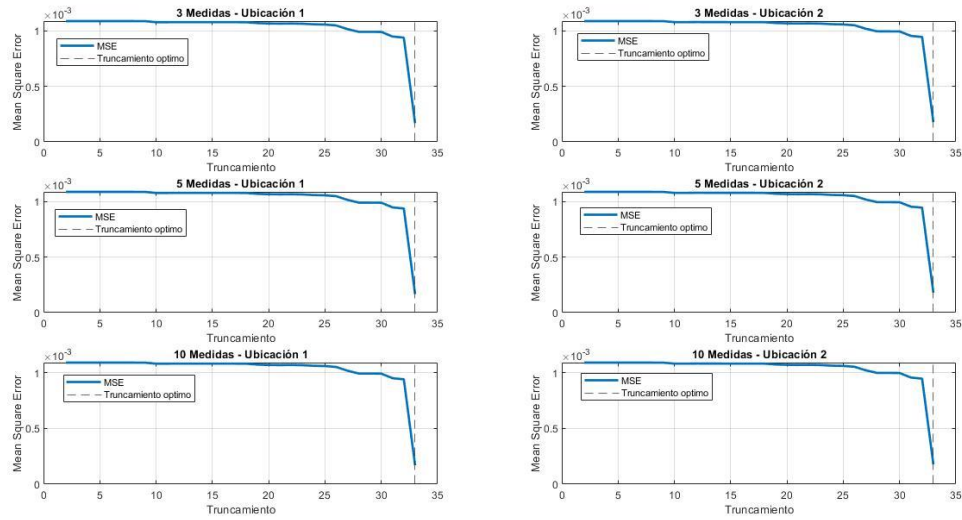


Figura 47.

Truncamiento óptimo para desviación de 5%, para el 7 armónico

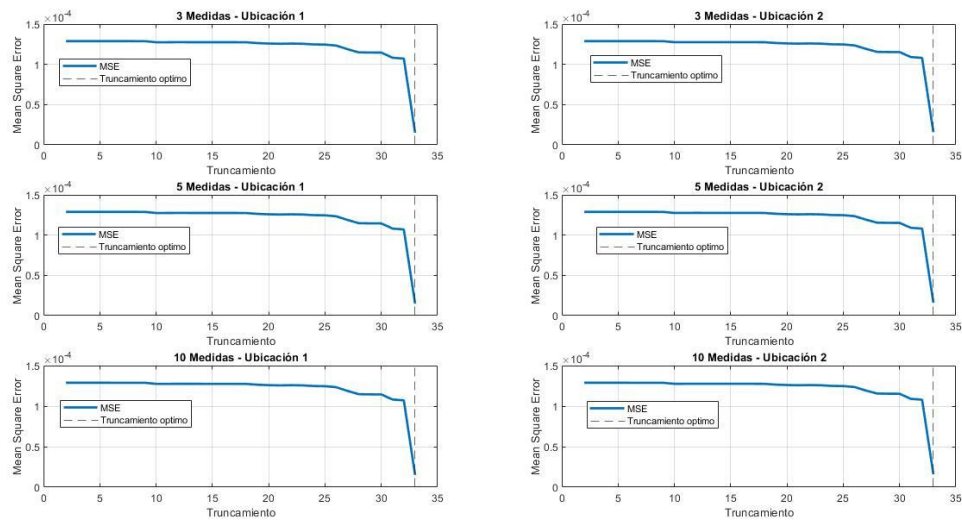
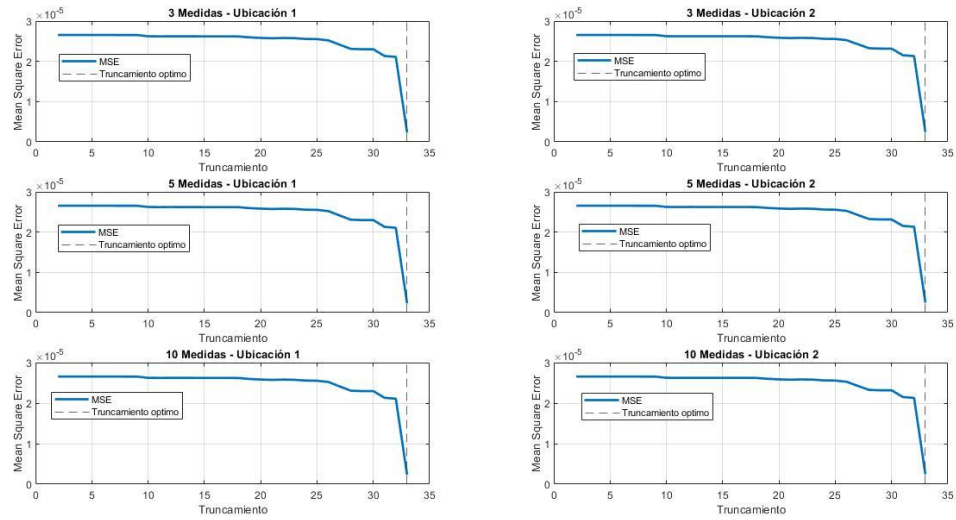


Figura 48.

Truncamiento óptimo para desviación de 5%, para el 9 armónico

**Figura 49.**

Truncamiento óptimo para desviación de 5%, para el 11 armónico

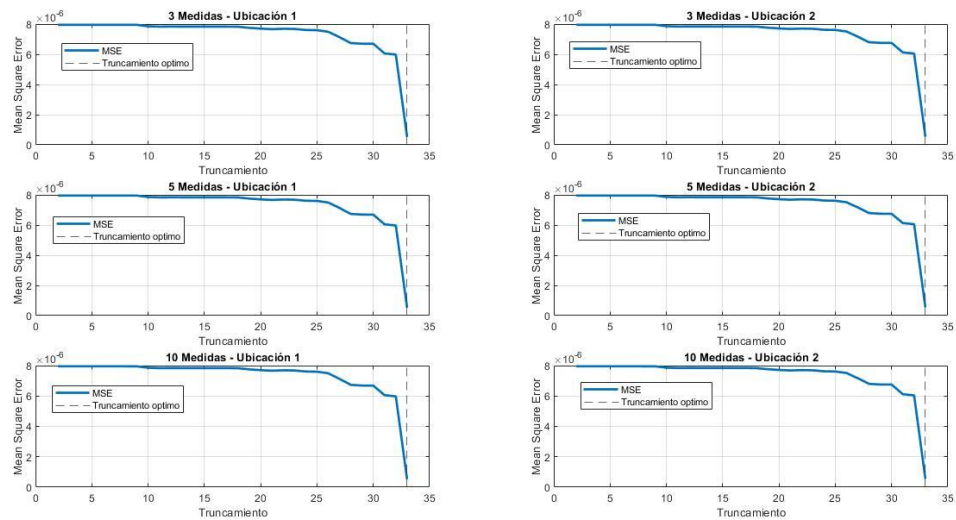
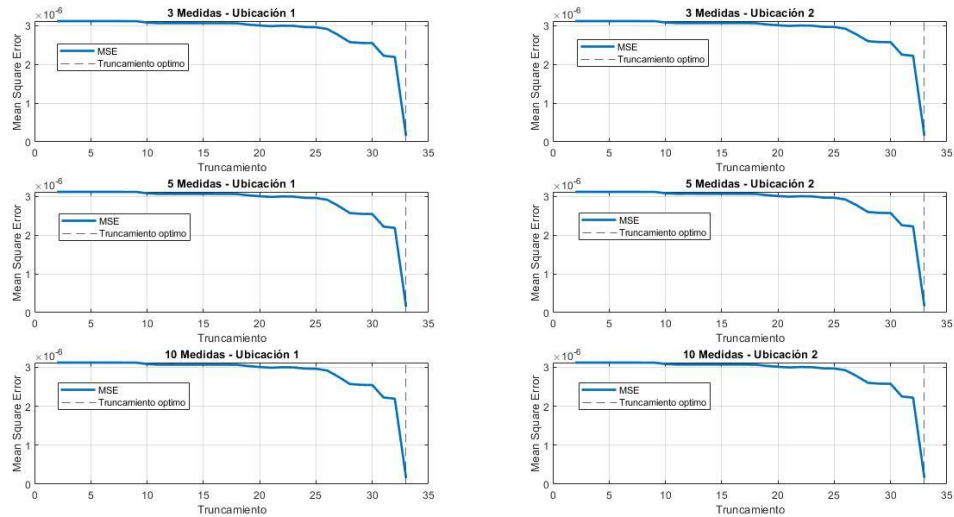


Figura 50.

Truncamiento óptimo para desviación de 5%, para el 13 armónico



Apéndice C. Selección de rangos

A continuación, se muestran los diferentes barridos por desviación 5%, 2.5%, -2.18% y -5% del estado de corriente, para el parámetro lambda, usado en el método ridge regresión, a frecuencia fundamental y armónicas, para los diferentes puntos medidos.

Figura 51.

Barrido lambda con desviación de 5%, a frecuencia fundamental

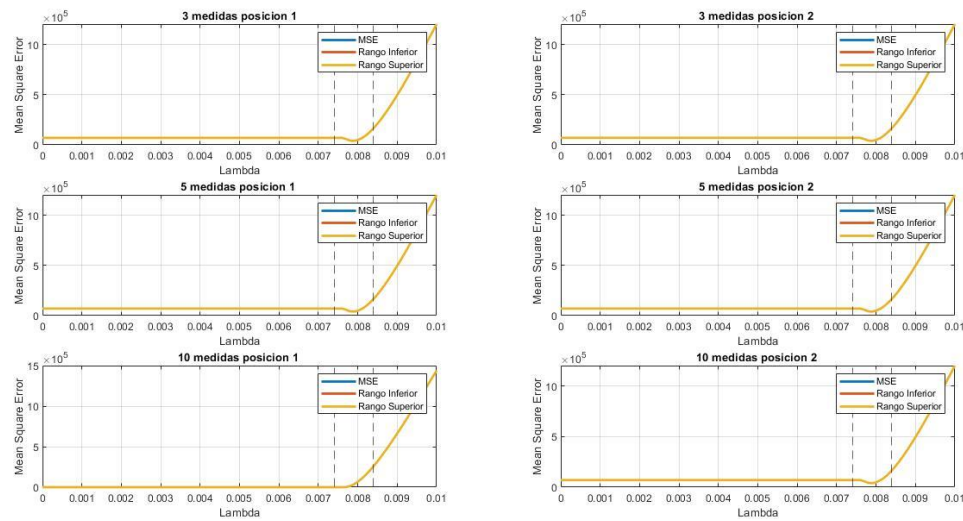
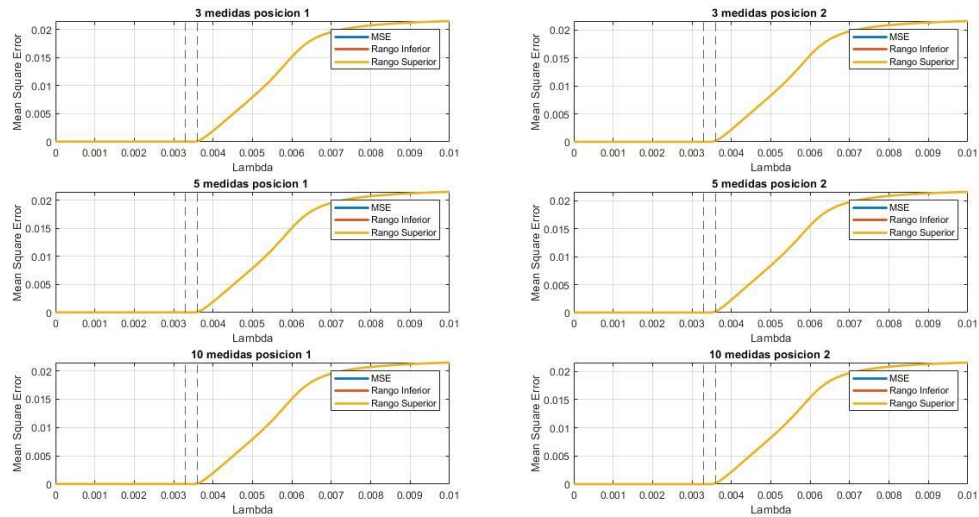


Figura 52.

Barrido lambda con desviación de 5%, para el 3 armónico

**Figura 53.**

Barrido lambda con desviación de 5%, para el 5 armónico

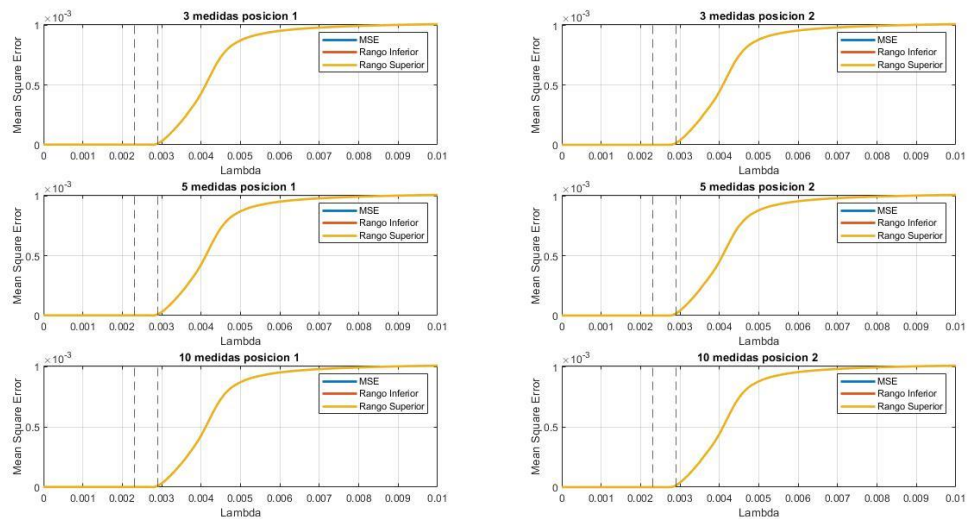
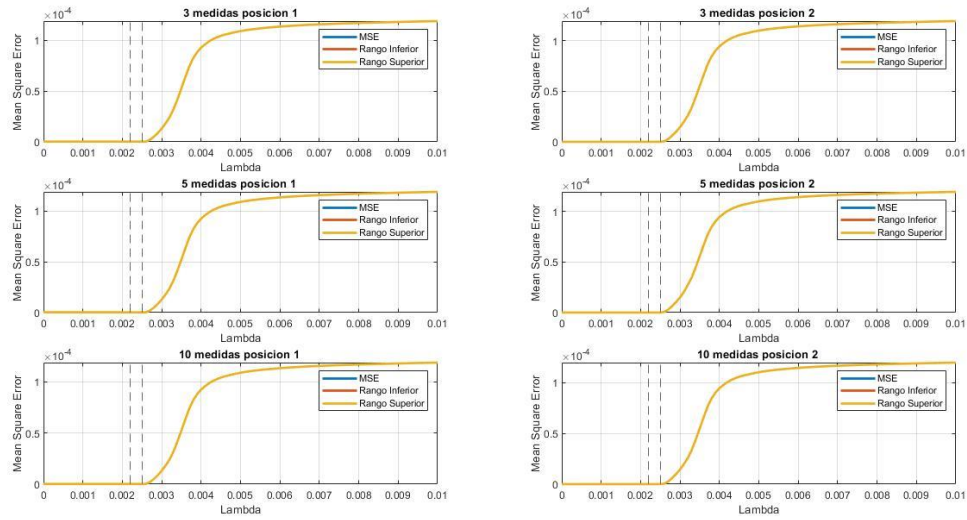


Figura 54.

Barrido lambda con desviación de 5%, para el 7 armónico

**Figura 55.**

Barrido lambda con desviación de 5%, para el 9 armónico

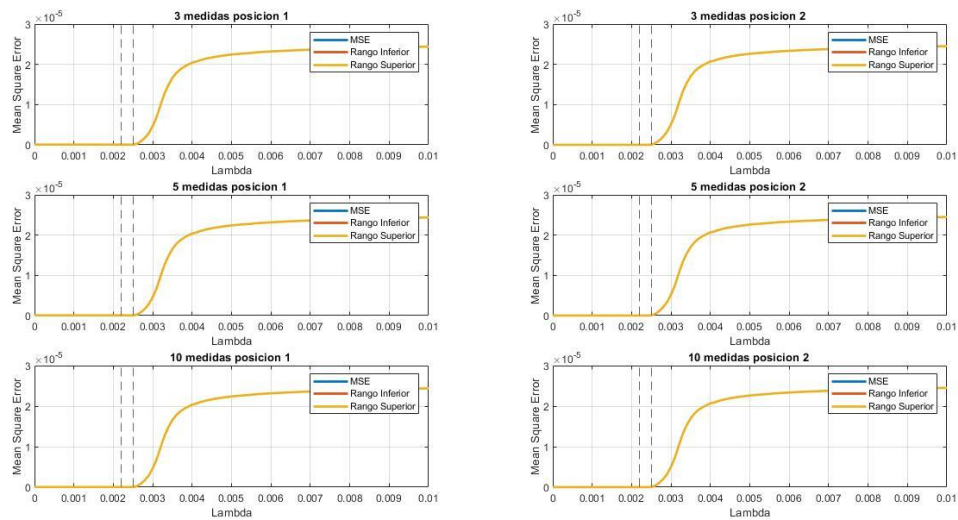
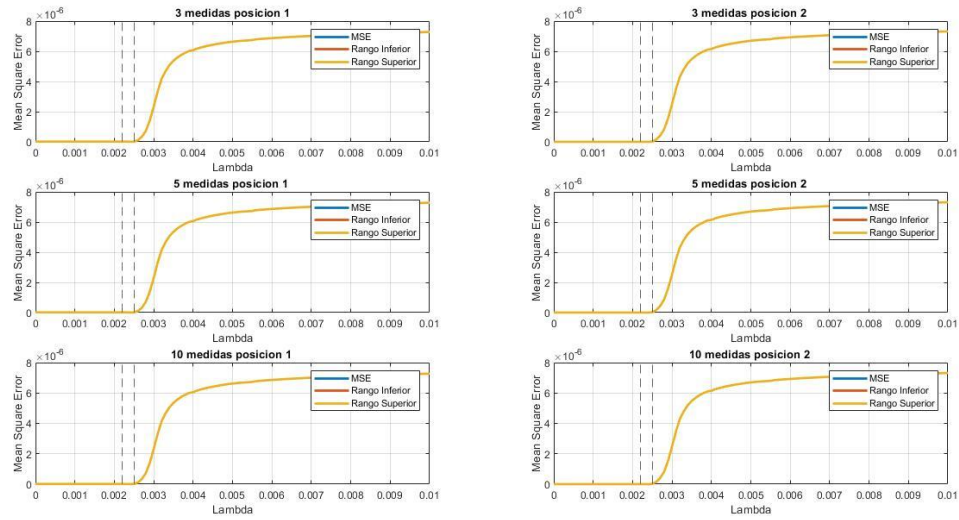


Figura 56.

Barrido lambda con desviación de 5%, para el 11 armónico

**Figura 57.**

Barrido lambda con desviación de 5%, para el 13 armónico

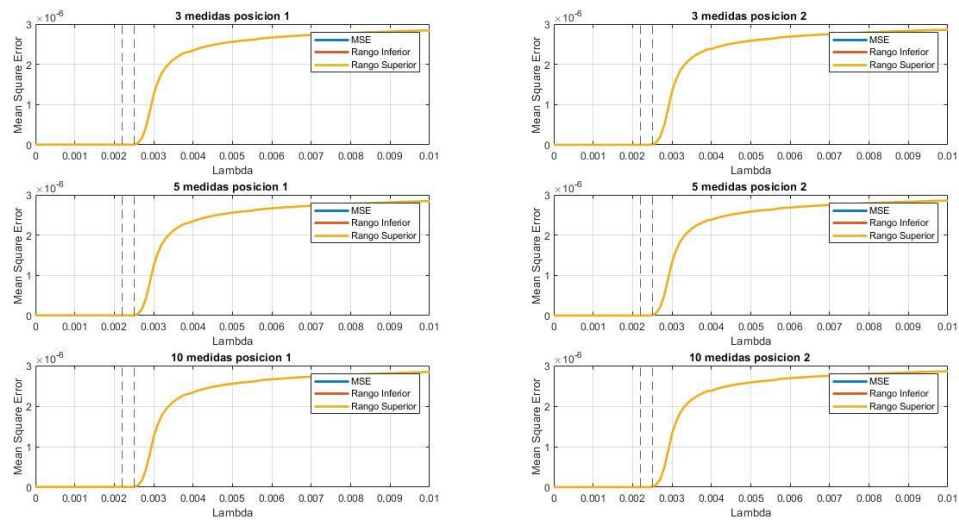
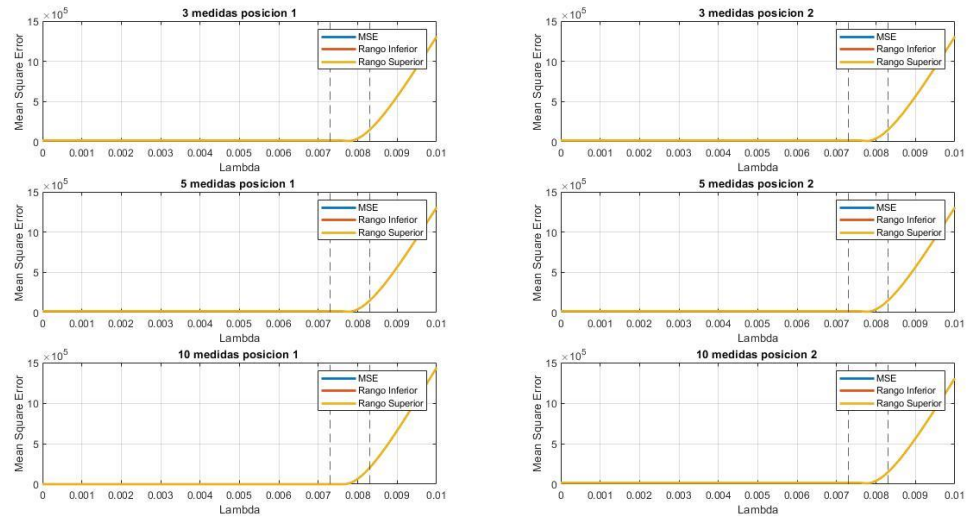


Figura 58.

Barrido lambda con desviación de 2.5%, a frecuencia fundamental

**Figura 59.**

Barrido lambda con desviación de 2.5%, para el 3 armónico

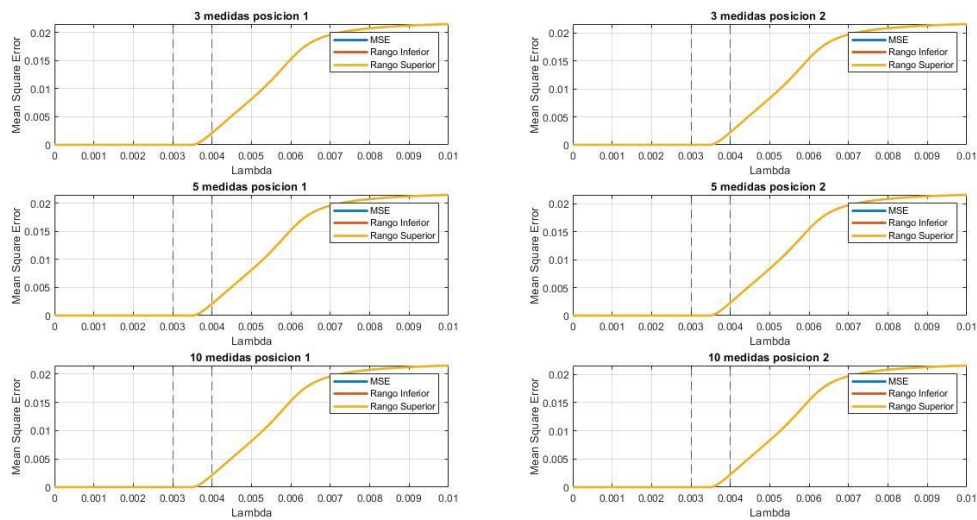
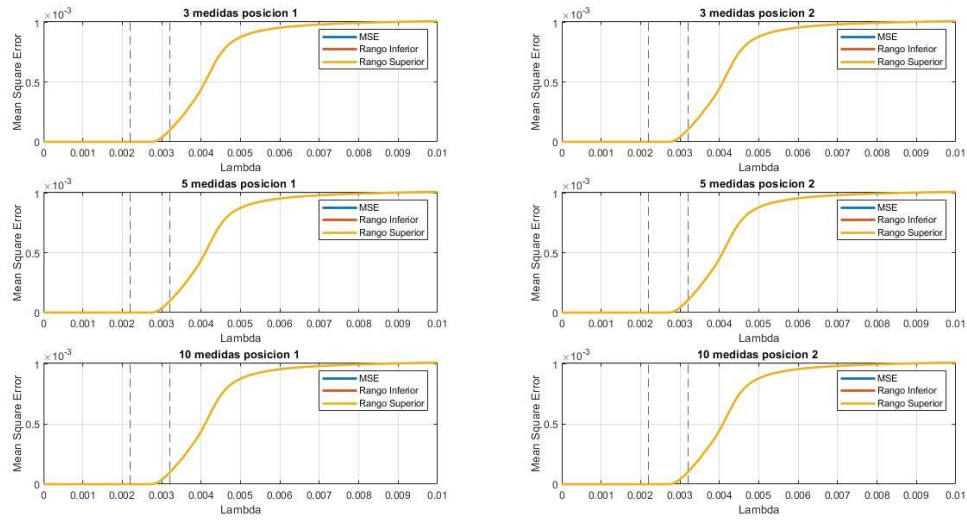


Figura 60.

Barrido lambda con desviación de 2.5%, para el 5 armónico

**Figura 61.**

Barrido lambda con desviación de 2.5%, para el 7 armónico

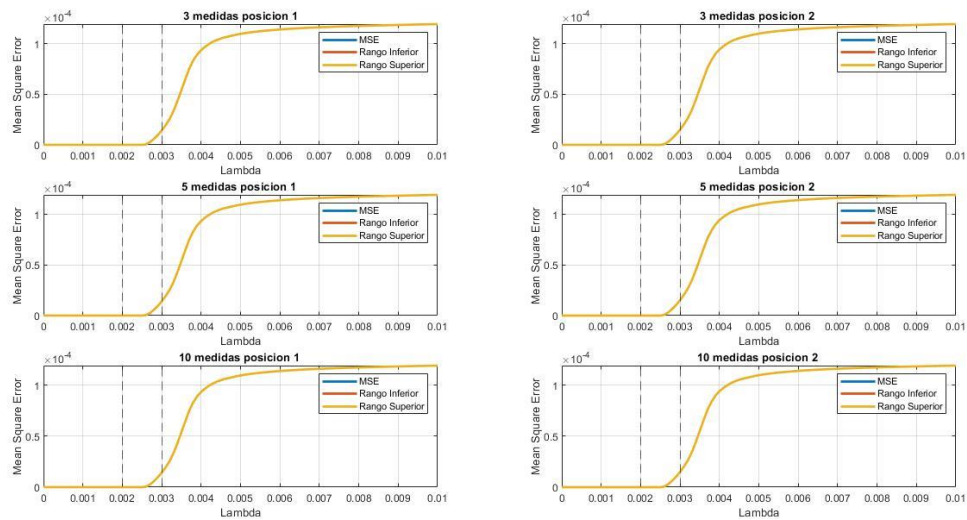
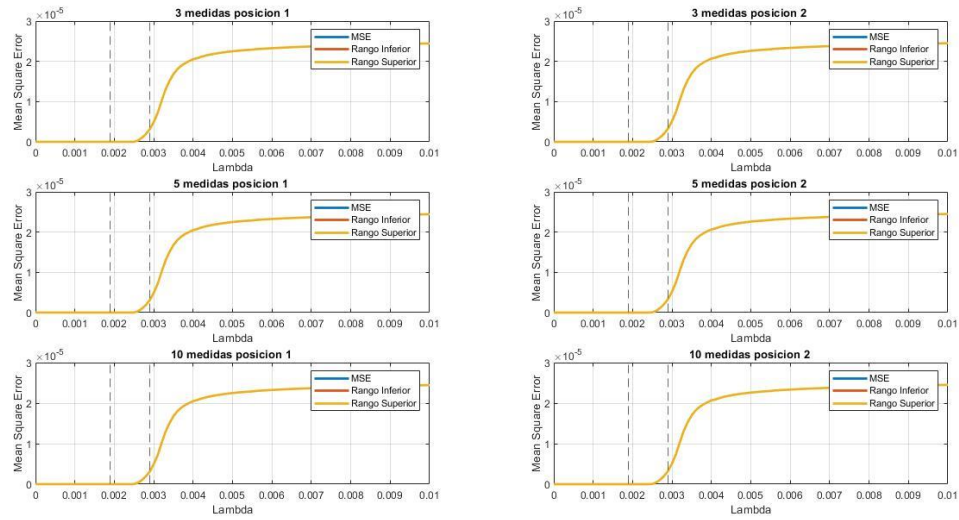


Figura 62.

Barrido lambda con desviación de 2.5%, para el 9 armónico

**Figura 63.**

Barrido lambda con desviación de 2.5%, para el 11 armónico

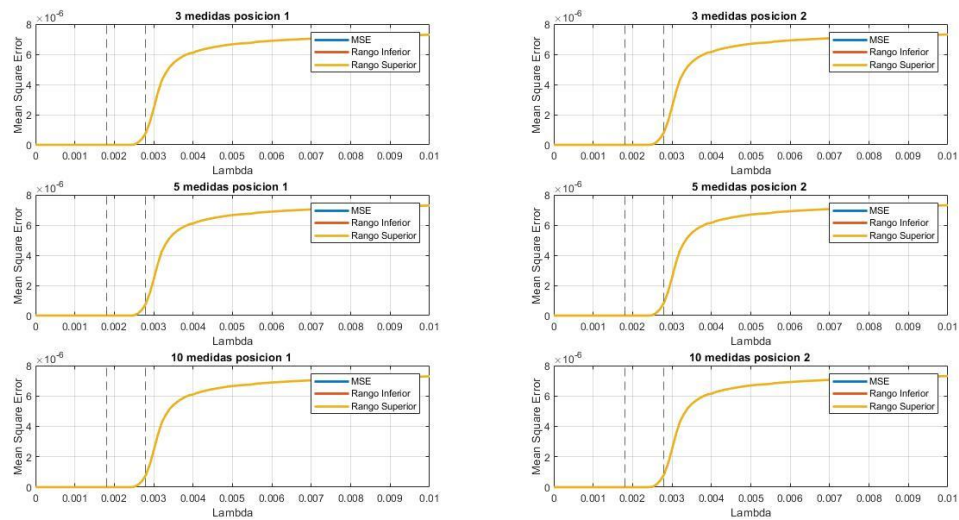
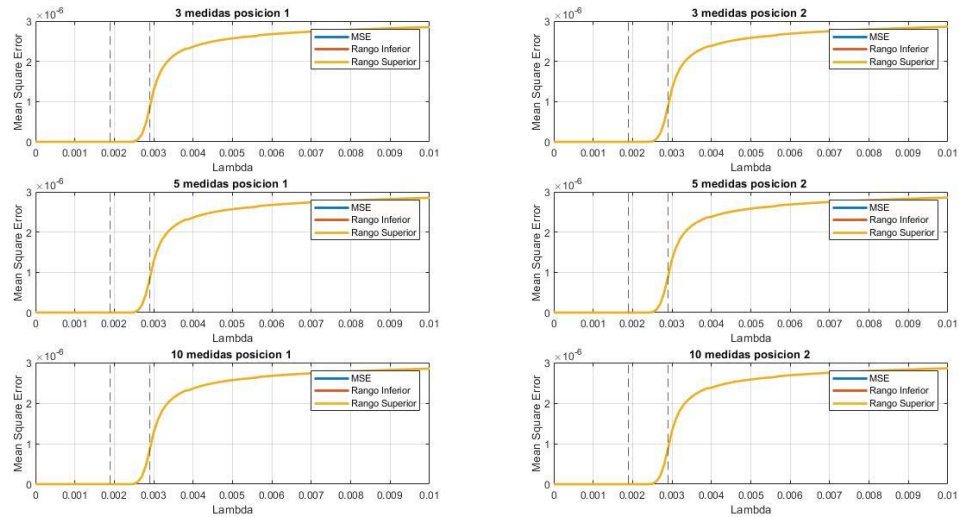


Figura 64.

Barrido lambda con desviación de 2.5%, para el 13 armónico

**Figura 65.**

Barrido lambda con desviación de -2.18%, a frecuencia fundamental.

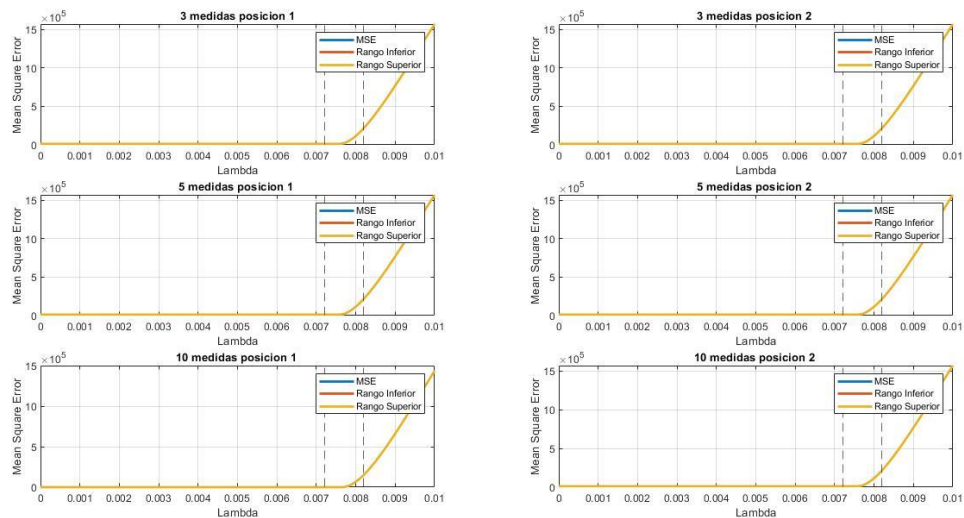
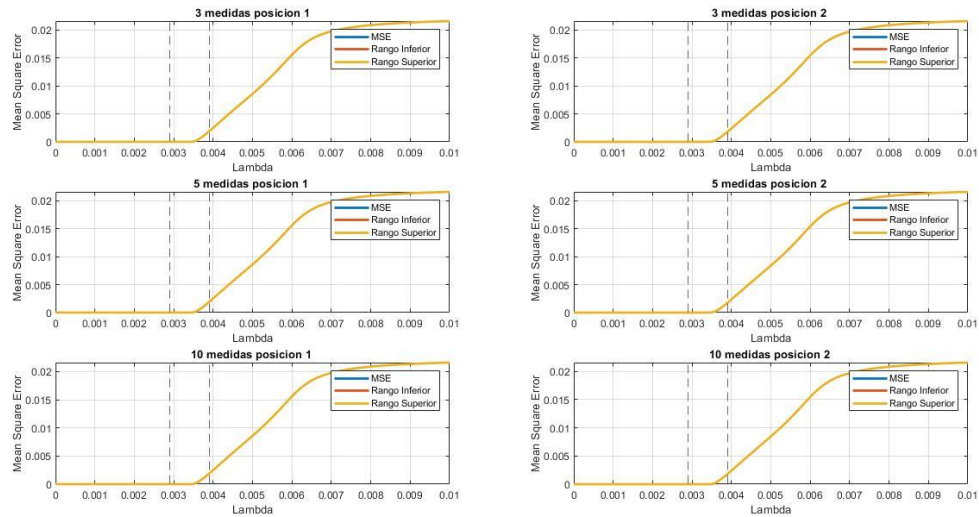


Figura 66.

Barrido lambda con desviación de -2.18%, para el 3 armónico

**Figura 67.**

Barrido lambda con desviación de -2.18%, para el 5 armónico

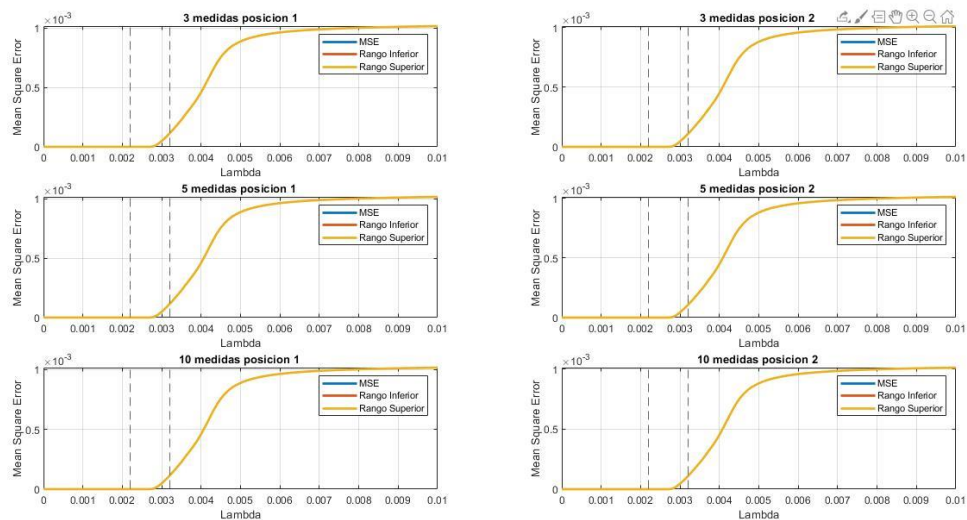
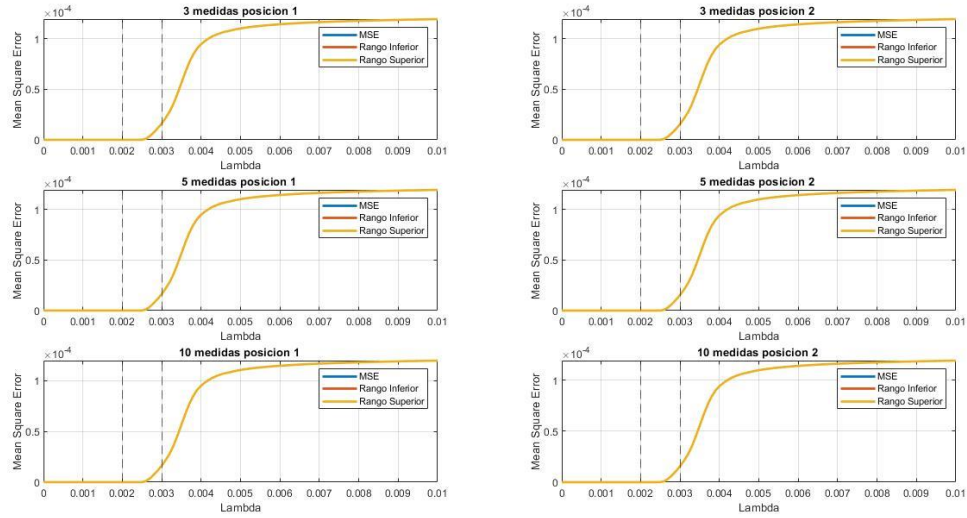


Figura 68.

Barrido lambda con desviación de -2.18%, para el 7 armónico

**Figura 69.**

Barrido lambda con desviación de -2.18%, para el 9 armónico

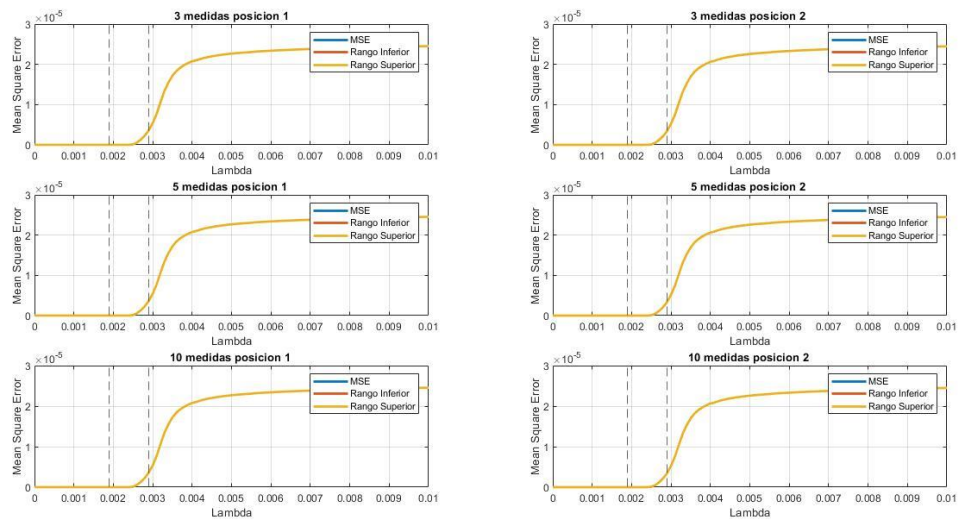
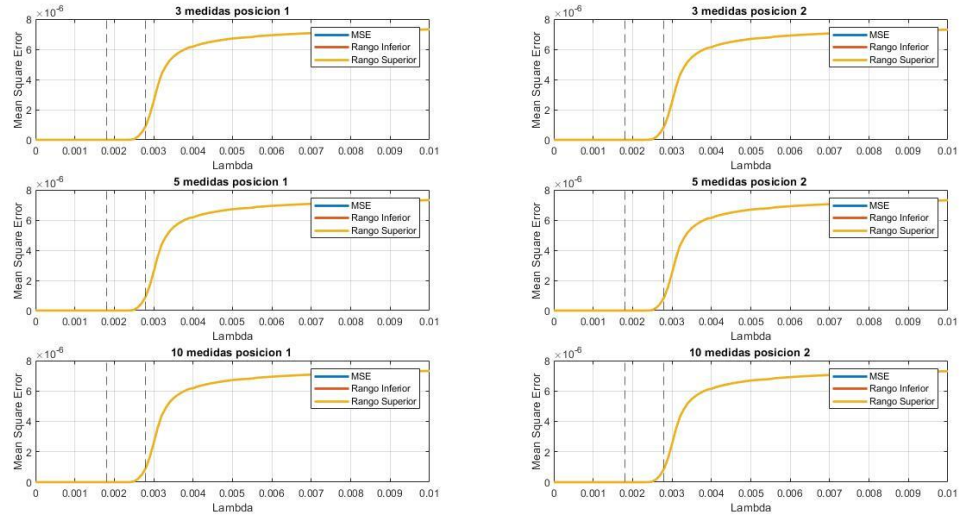


Figura 70.

Barrido lambda con desviación de -2.18%, para el 11 armónico

**Figura 71.**

Barrido lambda con desviación de -2.18%, para el 13 armónico

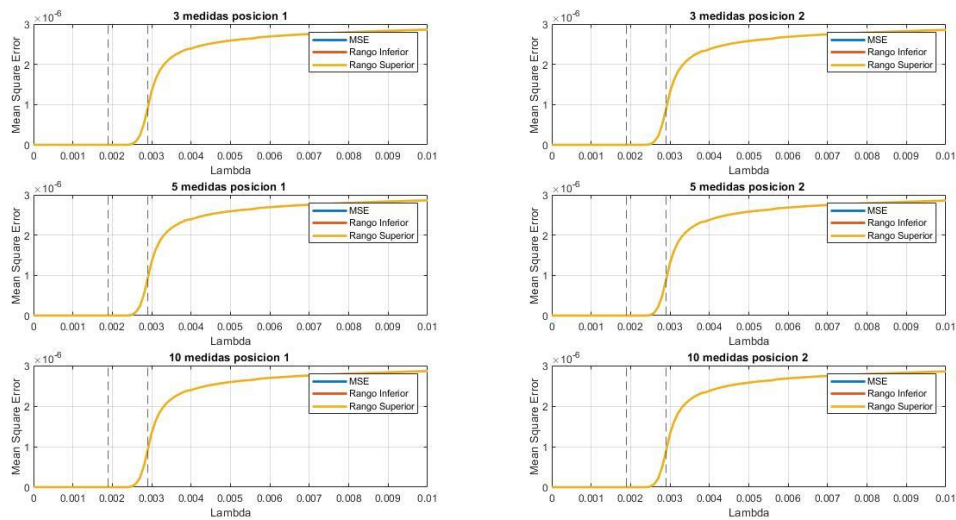
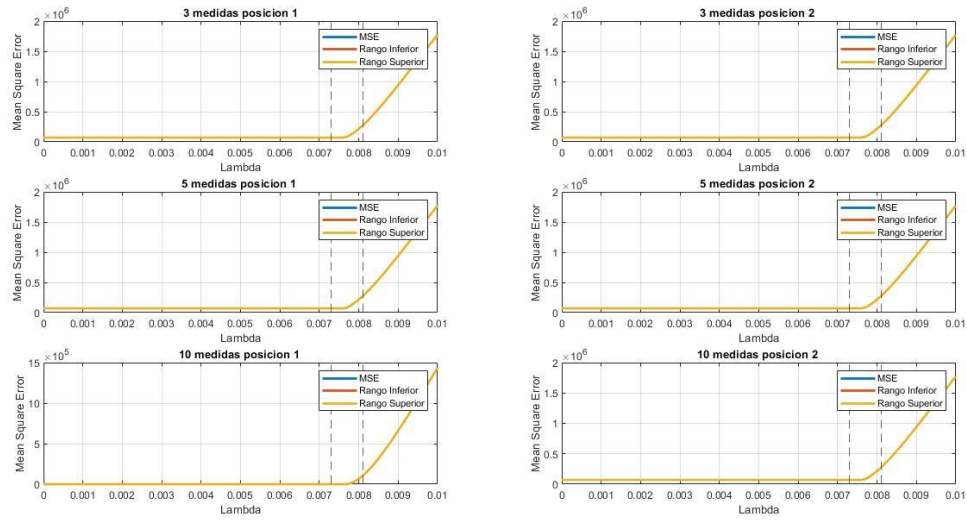


Figura 72.

Barrido lambda con desviación de -5%%, a frecuencia fundamental

**Figura 73.**

Barrido lambda con desviación de -5%, para el 3 armónico

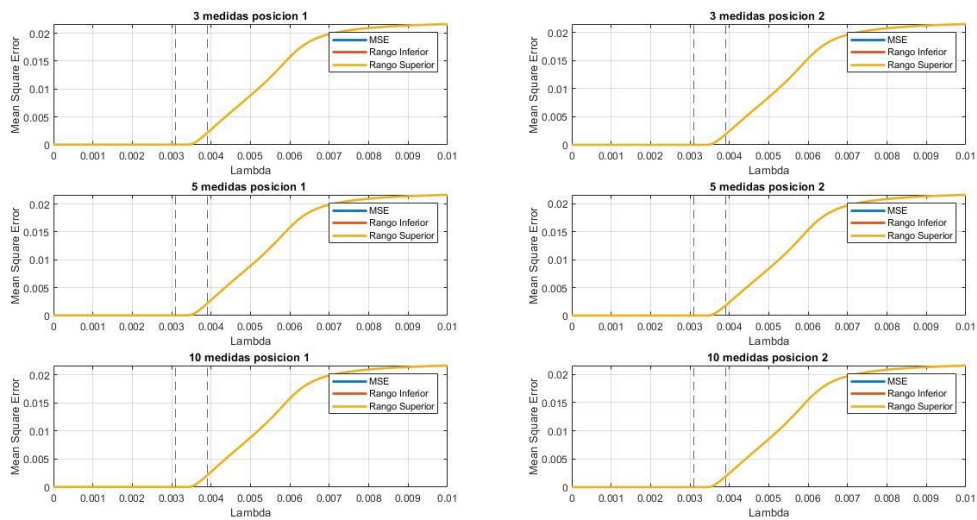
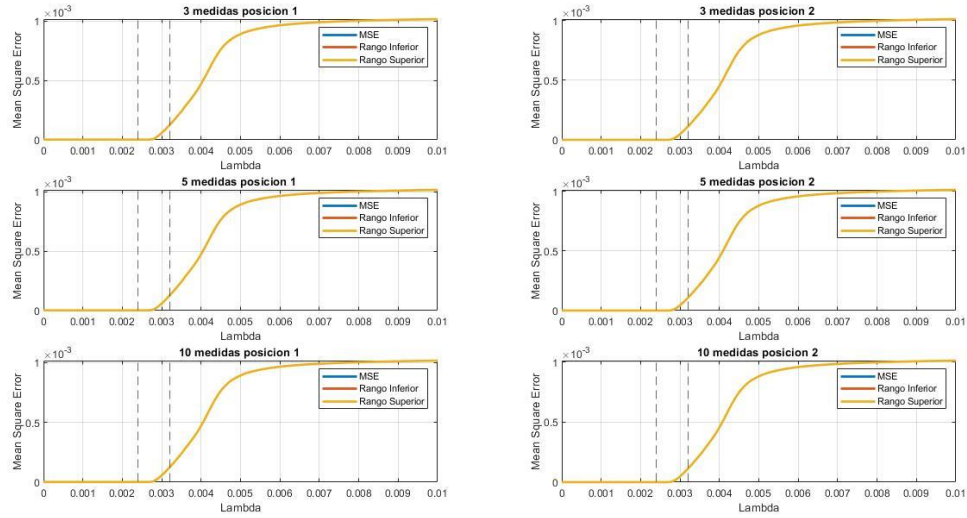


Figura 74.

Barrido lambda con desviación de -5%, para el 5 armónico

**Figura 75.**

Barrido lambda con desviación de -5%, para el 7 armónico

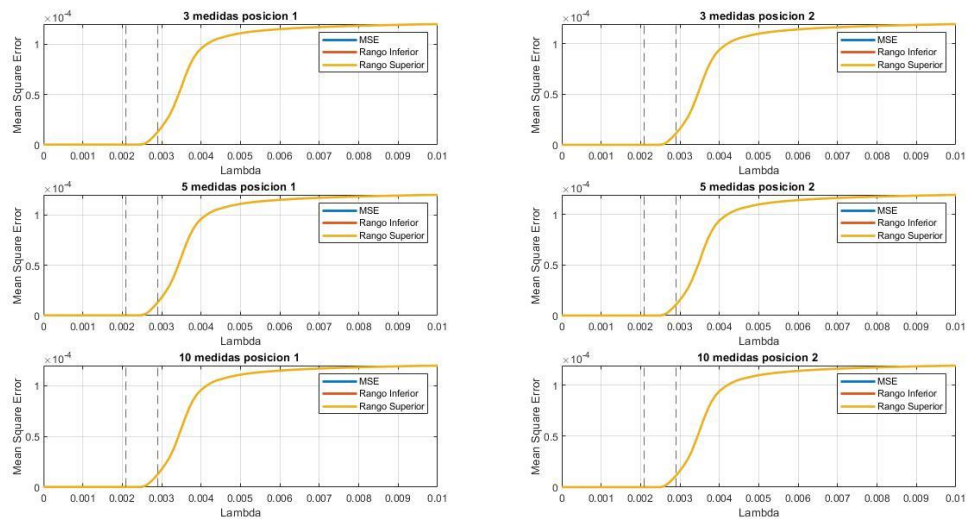


Figura 76.

Barrido lambda con desviación de -5%, para el 9 armónico

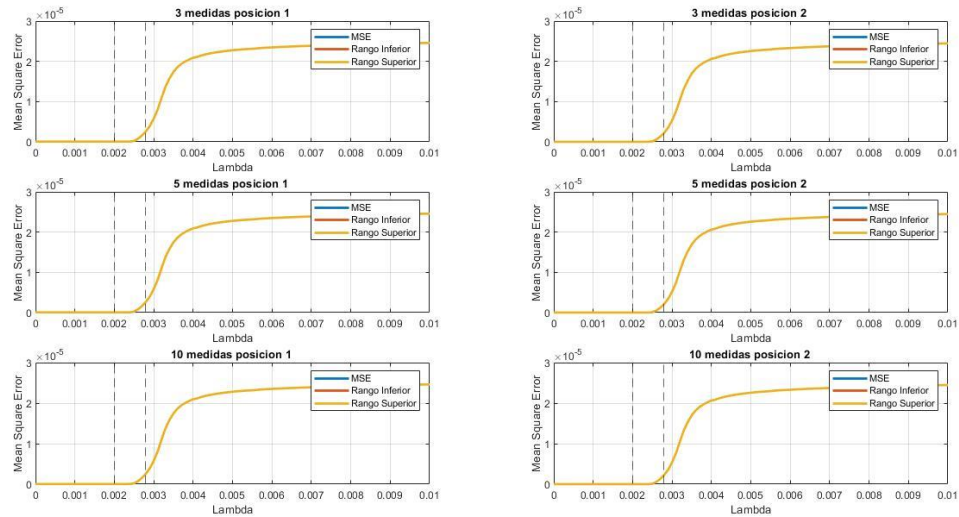


Figura 77.

Barrido lambda con desviación de -5%, para el 11 armónico

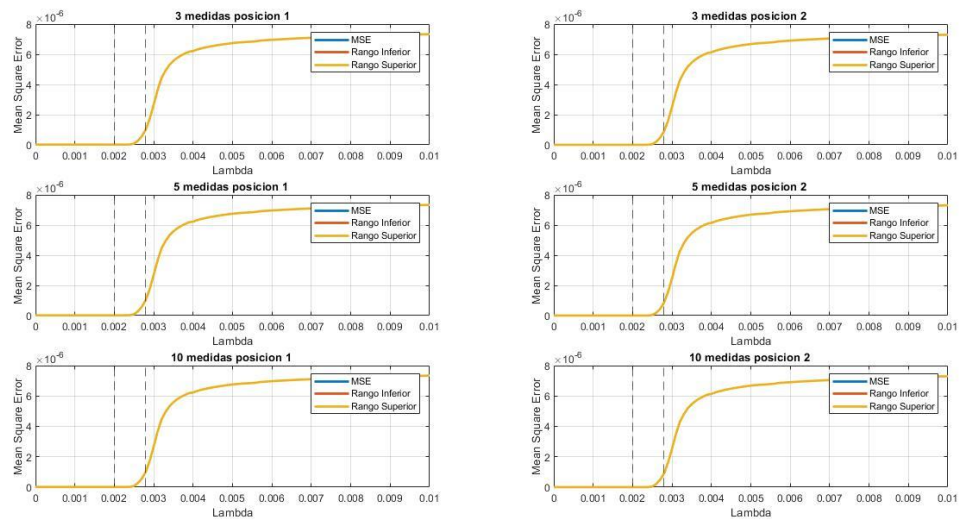
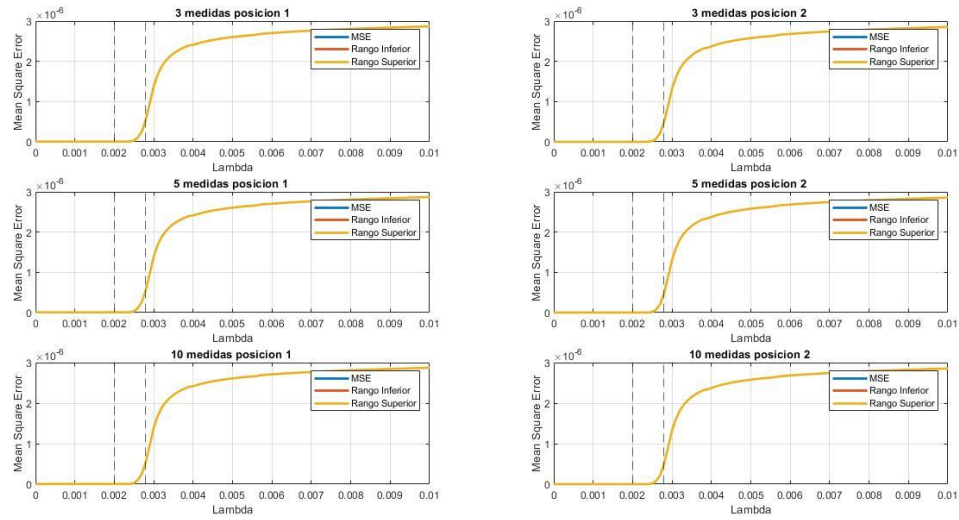


Figura 78.

Barrido lambda con desviación de -5%, para el 13 armónico



Apéndice D. Errores obtenidos con el método Ridge Regression

Este apéndice enseña los valores obtenidos con el método ridge regression para el error total, error total de magnitud y error total de fase para las desviaciones de -2.18%, 2.50%, -5% y 5% en la segunda posición.

Tabla 45.

Errores totales para desviación del 5% con 3 medidas, segunda posición.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0,002499876	0,002499876	1,21131E-11
2	0,00244901	0,002449007	2,7006E-09
3	0,002171405	0,002171262	1,43217E-07
4	0,001963198	0,00196272	4,78371E-07
5	0,001743965	0,001742772	1,19363E-06
6	0,001169611	0,001169325	2,86409E-07
7	0,000991643	0,000989416	2,22671E-06
8	0,000765241	0,000765107	1,3393E-07
9	0,000436868	0,000436669	1,9871E-07
10	0,000197591	0,000197253	3,38435E-07
11	0,000169971	0,00016988	9,1013E-08
12	0,000127899	0,000127864	3,49885E-08
13	1,23989E-05	1,22403E-05	1,58514E-07
14	2,51364E-06	1,0604E-07	2,4076E-06
15	8,33635E-06	4,44767E-06	3,88868E-06
16	2,33458E-05	1,8695E-05	4,65078E-06
17	4,62451E-05	4,31267E-05	3,11839E-06
18	5,7342E-05	5,38786E-05	3,46347E-06
19	0,002442765	0,002442763	2,36415E-09
20	0,002389917	0,002389916	1,21391E-09
21	0,002378039	0,002378038	2,47353E-10
22	0,002366388	0,002366388	9,55819E-11
23	0,002154778	0,002154644	1,33633E-07
24	0,002128554	0,002128449	1,04947E-07

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
25	0,002114172	0,002114082	8,96363E-08
26	0,001131211	0,001130849	3,61834E-07
27	0,001083914	0,001083432	4,81385E-07
28	0,000895237	0,000895084	1,53083E-07
29	0,000768463	0,000768412	5,03236E-08
30	0,00071327	0,000713093	1,77428E-07
31	0,000609129	0,00060908	4,81651E-08
32	0,00058539	0,000585374	1,54443E-08
33	0,000570391	0,00057039	2,89916E-10

Tabla 46.

Errores totales para desviación del 5% con 5 medidas, segunda posición.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0,002499876	0,002499876	1,19123E-11
2	0,002449414	0,002449411	2,73373E-09
3	0,002172388	0,002172244	1,44339E-07
4	0,001964625	0,001964144	4,81665E-07
5	0,001745844	0,001744643	1,20085E-06
6	0,001172381	0,001172084	2,97713E-07
7	0,000994129	0,000991933	2,19521E-06
8	0,00076744	0,000767314	1,26031E-07
9	0,000438506	0,000438318	1,88539E-07
10	0,000198338	0,000198009	3,28624E-07
11	0,000170652	0,000170566	8,59044E-08
12	0,000128472	0,000128433	3,83487E-08
13	1,25288E-05	1,23763E-05	1,52466E-07
14	2,50521E-06	1,17197E-07	2,38801E-06
15	8,25519E-06	4,38834E-06	3,86685E-06
16	2,32298E-05	1,86001E-05	4,62973E-06
17	4,61465E-05	4,30462E-05	3,10033E-06
18	5,72827E-05	5,38353E-05	3,44741E-06
19	0,002443804	0,002443801	2,60226E-09
20	0,002396832	0,002396829	3,10141E-09
21	0,002384938	0,002384937	1,34049E-09
22	0,002373272	0,002373272	1,24203E-10

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
23	0,002155759	0,002155624	1,3472E-07
24	0,002129532	0,002129426	1,05921E-07
25	0,002115148	0,002115058	9,05405E-08
26	0,001134049	0,001133675	3,74697E-07
27	0,001086854	0,001086358	4,9645E-07
28	0,000898594	0,00089843	1,64549E-07
29	0,000772142	0,000772084	5,84092E-08
30	0,000717162	0,00071697	1,92401E-07
31	0,000613489	0,000613431	5,85351E-08
32	0,000589926	0,000589904	2,22401E-08
33	0,000574862	0,000574861	1,754E-09

Tabla 47.

Errores totales para desviación del 2.5% con 3 medidas, segunda posición.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0,000624939	0,000624939	1,1829E-11
2	0,000600226	0,000600224	2,67866E-09
3	0,000470005	0,000469863	1,42023E-07
4	0,00037821	0,000377736	4,74063E-07
5	0,000288101	0,000286919	1,18194E-06
6	9,17019E-05	9,14072E-05	2,94704E-07
7	4,95704E-05	4,7441E-05	2,12946E-06
8	1,0271E-05	1,015E-05	1,21005E-07
9	1,18319E-05	1,16488E-05	1,831E-07
10	0,000102294	0,000101977	3,17626E-07
11	0,000122939	0,000122856	8,24945E-08
12	0,00016304	0,000163002	3,80498E-08
13	0,000415587	0,000415441	1,466E-07
14	0,000553471	0,000551155	2,31535E-06
15	0,000672035	0,000668284	3,7509E-06
16	0,000789146	0,000784656	4,4909E-06
17	0,000915095	0,00091209	3,00548E-06
18	0,000961614	0,000958272	3,34118E-06
19	0,000597214	0,000597212	2,34795E-09
20	0,000571876	0,000571875	1,21509E-09

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
21	0,000566218	0,000566218	2,55983E-10
22	0,000560682	0,000560682	8,39822E-11
23	0,000462475	0,000462343	1,32609E-07
24	0,000450657	0,000450552	1,04405E-07
25	0,00044421	0,00044412	8,93338E-08
26	8,14605E-05	8,10876E-05	3,72912E-07
27	6,94897E-05	6,89924E-05	4,97241E-07
28	2,89099E-05	2,87348E-05	1,75101E-07
29	1,02939E-05	1,02238E-05	7,01126E-08
30	5,04473E-06	4,8251E-06	2,19622E-07
31	1,22535E-07	4,98603E-08	7,26746E-08
32	9,3133E-08	6,22756E-08	3,08574E-08
33	3,11098E-07	3,0622E-07	4,87829E-09

Tabla 48.

Errores totales para desviación del 2.5% con 5 medidas, segunda posición.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0,000624939	0,000624939	1,17284E-11
2	0,000600326	0,000600324	2,69533E-09
3	0,000470234	0,000470092	1,42588E-07
4	0,000378524	0,000378049	4,75721E-07
5	0,000288485	0,000287299	1,18557E-06
6	9,20936E-05	9,17931E-05	3,00478E-07
7	4,98307E-05	4,77168E-05	2,11385E-06
8	1,03946E-05	1,02774E-05	1,17178E-07
9	1,16928E-05	1,15147E-05	1,78128E-07
10	0,000102018	0,000101705	3,12799E-07
11	0,000122645	0,000122565	8,00164E-08
12	0,000162721	0,000162681	3,98023E-08
13	0,000415189	0,000415046	1,43643E-07
14	0,000553069	0,000550763	2,30562E-06
15	0,000671659	0,000667919	3,74004E-06
16	0,000788828	0,000784348	4,48043E-06
17	0,000914901	0,000911904	2,99649E-06
18	0,000961514	0,000958181	3,33319E-06

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
19	0,000597471	0,000597469	2,46661E-09
20	0,000573567	0,000573565	2,062E-09
21	0,000567901	0,000567901	7,05906E-10
22	0,000562358	0,000562358	2,02611E-12
23	0,000462703	0,00046257	1,33157E-07
24	0,000450882	0,000450777	1,04896E-07
25	0,000444434	0,000444344	8,979E-08
26	8,18457E-05	8,14662E-05	3,79492E-07
27	6,98668E-05	6,93618E-05	5,04959E-07
28	2,92163E-05	2,90351E-05	1,81248E-07
29	1,05112E-05	1,04364E-05	7,48395E-08
30	5,21361E-06	4,98566E-06	2,27959E-07
31	1,50378E-07	7,14423E-08	7,8936E-08
32	7,65757E-08	4,1141E-08	3,54347E-08
33	2,63502E-07	2,56709E-07	6,79343E-09

Tabla 49.

Errores totales para desviación del -2.18% con 3 medidas, segunda posición.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0,000477389	0,000477389	3,04433E-17
2	0,000477425	0,000477425	2,14625E-13
3	0,000477638	0,000477638	1,10841E-11
4	0,000477818	0,000477818	3,42224E-11
5	0,000478021	0,000478021	7,76758E-11
6	0,000478708	0,000478708	2,00128E-10
7	0,000478772	0,000478772	1,55073E-10
8	0,000478892	0,000478891	1,60575E-10
9	0,000479106	0,000479106	1,32391E-10
10	0,000479344	0,000479344	1,03095E-10
11	0,000479355	0,000479355	1,04003E-10
12	0,000479377	0,000479377	1,05772E-10
13	0,000479485	0,000479485	9,62574E-11
14	0,000479535	0,000479535	8,51512E-11
15	0,000479583	0,000479583	7,90499E-11
16	0,000479642	0,000479642	7,41112E-11

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
17	0,000479734	0,000479734	7,60021E-11
18	0,000479795	0,000479795	7,00269E-11
19	0,000477425	0,000477425	2,1467E-13
20	0,000477425	0,000477425	2,15202E-13
21	0,000477425	0,000477425	2,1502E-13
22	0,000477426	0,000477426	2,14714E-13
23	0,000477639	0,000477639	1,11273E-11
24	0,00047764	0,00047764	1,11946E-11
25	0,000477641	0,000477641	1,12281E-11
26	0,000478823	0,000478823	2,66903E-10
27	0,000478988	0,000478988	3,82335E-10
28	0,000479943	0,000479942	9,37708E-10
29	0,000480779	0,000480778	1,67552E-09
30	0,000481185	0,000481183	2,48742E-09
31	0,000481189	0,000481187	2,48868E-09
32	0,00048119	0,000481187	2,48879E-09
33	0,00048119	0,000481188	2,48872E-09

Tabla 50.

Errores totales para desviación del -2.18% con 5 medidas, segunda posición.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0,000477389	0,000477389	3,40869E-16
2	0,000477503	0,000477503	1,01497E-13
3	0,000477843	0,000477843	7,05004E-12
4	0,000478132	0,000478132	2,27378E-11
5	0,00047846	0,00047846	5,35052E-11
6	0,000479499	0,000479499	8,80967E-11
7	0,000479559	0,000479559	5,76647E-11
8	0,000479681	0,00047968	5,86992E-11
9	0,000479894	0,000479894	3,86286E-11
10	0,000479899	0,000479899	3,85955E-11
11	0,0004799	0,0004799	3,86626E-11
12	0,000479902	0,000479901	3,8773E-11
13	0,000479907	0,000479907	3,86532E-11
14	0,000479909	0,000479909	3,84176E-11

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
15	0,000479911	0,000479911	3,83259E-11
16	0,000479912	0,000479912	3,82853E-11
17	0,000479914	0,000479914	3,83468E-11
18	0,000479914	0,000479914	3,8329E-11
19	0,000477626	0,000477626	3,842E-13
20	0,000478777	0,000478777	8,05928E-11
21	0,000478778	0,000478778	8,09063E-11
22	0,000478779	0,000478779	8,12232E-11
23	0,000477845	0,000477845	7,06854E-12
24	0,000477847	0,000477847	7,07864E-12
25	0,000477848	0,000477848	7,08223E-12
26	0,000479647	0,000479647	1,32561E-10
27	0,000479859	0,000479859	2,14657E-10
28	0,000481038	0,000481038	5,7987E-10
29	0,000482076	0,000482075	1,09262E-09
30	0,000482606	0,000482604	1,76147E-09
31	0,000482911	0,000482909	1,57682E-09
32	0,000483017	0,000483015	1,49329E-09
33	0,000483017	0,000483016	1,49314E-09

Tabla 51.

Errores totales para desviación del -5% con 3 medidas, segunda posición.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0,002500001	0,002500001	1,49833E-16
2	0,002500188	0,002500188	1,15561E-12
3	0,002501299	0,002501299	5,96815E-11
4	0,002502238	0,002502238	1,84259E-10
5	0,002503301	0,0025033	4,18196E-10
6	0,002506889	0,002506888	1,07862E-09
7	0,002507218	0,002507217	8,37367E-10
8	0,002507839	0,002507838	8,66145E-10
9	0,002508953	0,002508952	7,14206E-10
10	0,002510189	0,002510189	5,56289E-10
11	0,002510247	0,002510246	5,61006E-10
12	0,002510358	0,002510357	5,70235E-10

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
13	0,002510913	0,002510913	5,19288E-10
14	0,002511172	0,002511171	4,60042E-10
15	0,002511423	0,002511423	4,27338E-10
16	0,00251173	0,002511729	4,00769E-10
17	0,002512208	0,002512207	4,1077E-10
18	0,002512525	0,002512525	3,78561E-10
19	0,002500188	0,002500188	1,15594E-12
20	0,002500189	0,002500189	1,15929E-12
21	0,002500189	0,002500189	1,15904E-12
22	0,00250019	0,00250019	1,15835E-12
23	0,002501303	0,002501303	5,99174E-11
24	0,00250131	0,00250131	6,02896E-11
25	0,002501314	0,002501314	6,04758E-11
26	0,00250749	0,002507489	1,43854E-09
27	0,002508353	0,002508351	2,06072E-09
28	0,002513347	0,002513342	5,05566E-09
29	0,002517725	0,002517715	9,03463E-09
30	0,002519848	0,002519835	1,34121E-08
31	0,002519866	0,002519852	1,34196E-08
32	0,00251987	0,002519856	1,34205E-08
33	0,002519871	0,002519858	1,34205E-08

Tabla 52.

Errores totales para desviación del -5% con 5 medidas, segunda posición.

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
1	0,002500002	0,002500002	1,82687E-15
2	0,002500599	0,002500599	5,46139E-13
3	0,002502375	0,002502375	3,79471E-11
4	0,002503882	0,002503882	1,22385E-10
5	0,002505597	0,002505597	2,87978E-10
6	0,002511028	0,002511028	4,74711E-10
7	0,00251134	0,00251134	3,11668E-10
8	0,002511971	0,00251197	3,16701E-10
9	0,002513079	0,002513078	2,08473E-10
10	0,002513099	0,002513099	2,08347E-10

Nodo	Errores Totales %		
	Error total	Error total de magnitud	Error total de fase
11	0,002513102	0,002513102	2,086E-10
12	0,002513106	0,002513106	2,09005E-10
13	0,002513126	0,002513125	2,08583E-10
14	0,002513133	0,002513133	2,07752E-10
15	0,002513138	0,002513138	2,07416E-10
16	0,002513142	0,002513142	2,07265E-10
17	0,002513146	0,002513146	2,07448E-10
18	0,002513148	0,002513148	2,07387E-10
19	0,002501242	0,002501242	2,07366E-12
20	0,002507268	0,002507268	4,34597E-10
21	0,002507273	0,002507273	4,36273E-10
22	0,002507277	0,002507277	4,37963E-10
23	0,002502381	0,002502381	3,80491E-11
24	0,002502394	0,002502394	3,81112E-11
25	0,0025024	0,0025024	3,8135E-11
26	0,002511801	0,002511801	7,1435E-10
27	0,002512913	0,002512912	1,15683E-09
28	0,002519085	0,002519082	3,12634E-09
29	0,002524517	0,002524511	5,89168E-09
30	0,002527289	0,00252728	9,49801E-09
31	0,002528881	0,002528872	8,50294E-09
32	0,002529436	0,002529428	8,05276E-09
33	0,002529438	0,00252943	8,05222E-09

Apéndice E. Codigos

Este apéndice contiene los códigos utilizados durante el desarrollo de este proyecto de grado.

E.1 Función variable de estado

```
function [IH, VH, YBUS, Zbus]=Variables_de_estado_33B
% esta seccion se establece la coneccion entre OpenDSS y matlab
clc;
clear all
close all;
DSSObj=actxserver('OpenDSSEngine.DSS');
if ~DSSObj.Start(0)
    disp('unable to start the openDSS Engine')
    return
end
DSSText=DSSObj.Text;
DSSCircuit=DSSObj.ActiveCircuit;
DSSSolution=DSSCircuit.Solution;
DSSText.Command='Compile "C:\Users\Adelg\OneDrive\Datos adjuntos
de correo
electrónico\Documentos\MATLAB\Ybus_Prueba_monofasica_kf_33barras
.dss"';% nombre del archivo que contiene la representacion del
sitio en estudio
DSSSolution.Solve
DSSText.Command='BusCoords 33_BusXY.csv';
DSSText.Command='Solve mode=snapshot';
%DSSText.Command='Solve mode=harmonics';
%% armado de la matrix de admitancia por frecuencia, llamado de
las tensiones y corrientes por frecuencia
for i=1:2:13
    a=60*i;
    b=num2str(a);
    DSSText.Command=strcat('Solve Frequency=', b);
    n = length(DSSCircuit.AllNodeNames);
```

```

if i==1
    A=DSSCircuit.YCurrents;
    AA=DSSCircuit.YNodeVarray;
    aa=length(A);
    CI_1=zeros(1,aa);
    V_1=zeros(1,aa);
    for k=1:2:aa-1
        CI_1(1,k)=complex(A(1,k),A(1,k+1));
        V_1(1,k)=complex(AA(1,k),AA(1,k+1));
    end
    % vectores de tensión y corriente
    Pc=2:2:length(CI_1);
    Pc1=2:2:length(V_1);
    CI_1(Pc)=[];
    CI_1=CI_1.';
    IH(:, :, 1)=CI_1;
    V_1(Pc1)=[];
    V_1=V_1.';
    VH(:, :, 1)=V_1;
    % matriz de admitancia
    ineven=2:2:n*2;
    inodd=1:2:(n*2-1);
    Ybus=DSSCircuit.SystemY;
    Ybus1=reshape(Ybus,n*2,n)';
    Ybus1=Ybus1(:,inodd)+1i*Ybus1(:,ineven);
    YBUS(:, :, 1)=Ybus1;
    Zbus(:, :, 1)=inv(Ybus1);

end

if i==3
    B=DSSCircuit.YCurrents;
    BB=DSSCircuit.YNodeVarray;
    bb=length(B);
    CI_3=zeros(1,bb);
    V_3=zeros(1,bb);
    for k=1:2:bb-1
        CI_3(1,k)=complex(B(1,k),B(1,k+1));
        V_3(1,k)=complex(BB(1,k),BB(1,k+1));
    end
end

```

```

end
    % vectores de tensión y corriente
    Pc=2:2:length(CI_3);
    Pc1=2:2:length(V_3);
    CI_3(Pc)=[];
    CI_3=CI_3.';
    IH(:, :, 2)=CI_3;
    V_3(Pc1)=[];
    V_3=V_3.';
    VH(:, :, 2)=V_3;
    % matriz de admitancia
    ineven=2:2:n*2;
    inodd=1:2:(n*2-1);
    Ybus=DSSCircuit.SystemY;
    Ybus3=reshape(Ybus,n*2,n)';
    Ybus3=Ybus3(:, inodd)+1i*Ybus3(:, ineven);
    YBUS(:, :, 2)=Ybus3;
    Zbus(:, :, 2)=inv(Ybus3);
end
if i==5
    C=DSSCircuit.YCurrents;
    CC=DSSCircuit.YNodeVarray;
    cc=length(C);
    CI_5=zeros(1,cc);
    V_5=zeros(1,cc);
    for k=1:2:cc-1
        CI_5(1,k)=complex(C(1,k),C(1,k+1));
        V_5(1,k)=complex(CC(1,k),CC(1,k+1));
    end
    % vectores de tensión y corriente
    Pc=2:2:length(CI_5);
    Pc1=2:2:length(V_5);
    CI_5(Pc)=[];
    CI_5=CI_5.';
    IH(:, :, 3)=CI_5;
    V_5(Pc1)=[];
    V_5=V_5.';
    VH(:, :, 3)=V_5;
    % matriz de admitancia
    ineven=2:2:n*2;
    inodd=1:2:(n*2-1);

```

```

    Ybus=DSSCircuit.SystemY;
    Ybus5=reshape(Ybus,n*2,n)';
    Ybus5=Ybus5(:,inodd)+1i*Ybus5(:,ineven);
    YBUS(:, :, 3)=Ybus5;
    Zbus(:, :, 3)=inv(Ybus5);

end

if i==7
    D=DSSCircuit.YCurrents;
    DD=DSSCircuit.YNodeVarray;
    dd=length(D);
    CI_7=zeros(1,dd);
    V_7=zeros(1,dd);
    for k=1:2:dd-1
        CI_7(1,k)=complex(D(1,k),D(1,k+1));
        V_7(1,k)=complex(DD(1,k),DD(1,k+1));
    end
    % vectores de tensión y corriente
    Pc=2:2:length(CI_7);
    Pc1=2:2:length(V_7);
    CI_7(Pc)=[];
    CI_7=CI_7.';
    IH(:, :, 4)=CI_7;
    V_7(Pc1)=[];
    V_7=V_7.';
    VH(:, :, 4)=V_7;
    % matriz de admitancia
    ineven=2:2:n*2;
    inodd=1:2:(n*2-1);
    Ybus=DSSCircuit.SystemY;
    Ybus7=reshape(Ybus,n*2,n)';
    Ybus7=Ybus7(:,inodd)+1i*Ybus7(:,ineven);
    YBUS(:, :, 4)=Ybus7;
    Zbus(:, :, 4)=inv(Ybus7);

end

if i==9
    E=DSSCircuit.YCurrents;
    EE=DSSCircuit.YNodeVarray;
    ee=length(E);
    CI_9=zeros(1,ee);
    V_9=zeros(1,ee);

```

```

    for k=1:2:ee-1
        CI_9(1,k)=complex(E(1,k),E(1,k+1));
        V_9(1,k)=complex(EE(1,k),EE(1,k+1));
    end
    % vectores de tensión y corriente
    Pc=2:2:length(CI_9);
    Pc1=2:2:length(V_9);
    CI_9(Pc)=[];
    CI_9=CI_9.';
    IH(:, :, 5)=CI_9;
    V_9(Pc1)=[];
    V_9=V_9.';
    VH(:, :, 5)=V_9;
    % matriz de admitancia
    ineven=2:2:n*2;
    inodd=1:2:(n*2-1);
    Ybus=DSSCircuit.SystemY;
    Ybus9=reshape(Ybus,n*2,n)';
    Ybus9=Ybus9(:, inodd)+1i*Ybus9(:, ineven);
    YBUS(:, :, 5)=Ybus9;
    Zbus(:, :, 5)=inv(Ybus9);
end
if i==11
    F=DSSCircuit.YCurrents;
    FF=DSSCircuit.YNodeVarray;
    ff=length(FF);
    CI_11=zeros(1,ff);
    V_11=zeros(1,ff);
    for k=1:2:ff-1
        CI_11(1,k)=complex(F(1,k),F(1,k+1));
        V_11(1,k)=complex(FF(1,k),FF(1,k+1));
    end
    % vectores de tensión y corriente
    Pc=2:2:length(CI_11);
    Pc1=2:2:length(V_11);
    CI_11(Pc)=[];
    CI_11=CI_11.';
    IH(:, :, 6)=CI_11;
    V_11(Pc1)=[];
    V_11=V_11.';
    VH(:, :, 6)=V_11;

```

```

    % matriz de admitancia
    ineven=2:2:n*2;
    inodd=1:2:(n*2-1);
    Ybus=DSSCircuit.SystemY;
    Ybus11=reshape(Ybus,n*2,n)';
    Ybus11=Ybus11(:,inodd)+1i*Ybus11(:,ineven);
    YBUS(:, :, 6)=Ybus11;
    Zbus(:, :, 6)=inv(Ybus11);
end
if i==13
    G=DSSCircuit.YCurrents;
    GG=DSSCircuit.YNodeVarray;
    gg=length(G);
    CI_13=zeros(1,gg);
    V_13=zeros(1,gg);
    for k=1:2:gg-1
        CI_13(1,k)=complex(G(1,k),G(1,k+1));
        V_13(1,k)=complex(GG(1,k),GG(1,k+1));
    end
    % vectores de tensión y corriente
    Pc=2:2:length(CI_13);
    Pc1=2:2:length(V_13);
    CI_13(Pc)=[];
    CI_13=CI_13.';
    IH(:, :, 7)=CI_13;
    V_13(Pc1)=[];
    V_13=V_13.';
    VH(:, :, 7)=V_13;
    % matriz de admitancia
    ineven=2:2:n*2;
    inodd=1:2:(n*2-1);
    Ybus=DSSCircuit.SystemY;
    Ybus13=reshape(Ybus,n*2,n)';
    Ybus13=Ybus13(:,inodd)+1i*Ybus13(:,ineven);
    YBUS(:, :, 7)=Ybus13;
    Zbus(:, :, 7)=inv(Ybus13);
end
end

```

E.2 Función desviación

```

function [IH_Perturbada1,IH_Perturbada2]=desviación(IH,P, caso)
%% variables
m=length(IH(:, :, 1));
a=caso;
Magnitud=abs(IH);
Fase=angle(IH);
perturbacion1=zeros(m,1,7);
perturbacion2=zeros(m,1,7);
IH_Perturbada1=zeros(m,1,7);
IH_Perturbada2=zeros(m,1,7);
%% caso 1: 3 medidores
if a==1
for kk=1:1:7
    for jj=1:1:m
        if jj==1 || jj==2 || jj==3 || jj==5 || jj==6 || jj==7 || jj==8
|| jj==9 || jj==10 || jj==11 || jj==12 || jj==13 || jj==14 ||
jj==15 || jj==16 || jj==17 || jj==18 || jj==19 || jj==20 || jj==21
|| jj==22 || jj==23 || jj==24 || jj==25 || jj==26 || jj==28 ||
jj==30 || jj==31 || jj==32 || jj==33

            perturbacion1(jj, :, kk)=(Magnitud(jj, :, kk)*abs(P))/100;
        end
        if jj==4 || jj==27 || jj==29

            perturbacion1(jj, :, kk)=0;
        end
    end
end

for zz=1:1:7
    for ee=1:1:m
        if ee==1 || ee==2 || ee==3 || ee==4 || ee==5 || ee==6 || ee==7
|| ee==8 || ee==9 || ee==11 || ee==12 || ee==13 || ee==14 || ee==15
|| ee==16 || ee==17 || ee==19 || ee==20 || ee==21 || ee==22 ||
ee==23 || ee==24 || ee==25 || ee==26 || ee==27 || ee==28 || ee==29
|| ee==31 || ee==32 || ee==33

            perturbacion2(ee, :, zz)=(Magnitud(ee, :, zz)*abs(P))/100;
        end
    end
end

```

```

    end
    if ee==10 || ee==18 || ee==30

        perturbacion2(ee,:,zz)=0;
    end
end
end
%% casos 2: 5 medidores
if a==2
    for kk=1:1:7
        for jj=1:1:m
            if jj==1 || jj==2 || jj==3 || jj==4 || jj==5 || jj==6 || jj==7
|| jj==9 || jj==10 || jj==11 || jj==12 || jj==13 || jj==14 ||
jj==15 || jj==17 || jj==18 || jj==19 || jj==20 || jj==22 || jj==24
|| jj==26 || jj==27 || jj==28 || jj==29 || jj==30 || jj==31 ||
jj==32 || jj==33
                perturbacion1(jj,:,kk)=(Magnitud(jj,:,kk)*abs(P))/100;
            end
            if jj==8 || jj==16 || jj==21 || jj==23 || jj==25
                perturbacion1(jj,:,kk)=0;
            end
        end
    end
end

for zz=1:1:7
    for ee=1:1:m
        if ee==1 || ee==2 || ee==3 || ee==4 || ee==5 || ee==7 || ee==8
|| ee==10 || ee==11 || ee==12 || ee==13 || ee==14 || ee==15 ||
ee==16 || ee==17 || ee==18 || ee==19 || ee==21 || ee==22 || ee==23
|| ee==24 || ee==25 || ee==26 || ee==27 || ee==28 || ee==29 ||
ee==31 || ee==33
            perturbacion2(ee,:,zz)=(Magnitud(ee,:,zz)*abs(P))/100;
        end
        if ee==6 || ee==9 || ee==20 || ee==30 || ee==32
            perturbacion2(ee,:,zz)=0;
        end
    end
end
end
%% caso 3: 10 medidores

```

```

if a==3
for QQ=1:1:7
    for hh=1:1:m
        if hh==2 || hh==3 || hh==4 || hh==5 || hh==7 || hh==9 ||
hh==11 || hh==12 || hh==14 || hh==15 || hh==16 || hh==17 || hh==19
|| hh==21 || hh==22 || hh==24 || hh==25 || hh==26 || hh==27 ||
hh==28 || hh==29 || hh==30 || hh==32
            perturbacion1(hh,:,QQ)=(Magnitud(hh,:,QQ)*abs(P))/100;
        end
        if hh==1 || hh==6 || hh==8 || hh==10 || hh==13 || hh==18 ||
hh==20 || hh==23 || hh==31 || hh==33
            perturbacion1(hh,:,QQ)=0;
        end
    end
end

for zz=1:1:7
    for ee=1:1:m
        if ee==1 || ee==3 || ee==5 || ee==6 || ee==8 || ee==9 ||
ee==10 || ee==11 || ee==13 || ee==15 || ee==16 || ee==18 || ee==20
|| ee==21 || ee==22 || ee==23 || ee==24 || ee==26 || ee==28 ||
ee==29 || ee==31 || ee==32 || ee==33
            perturbacion2(ee,:,zz)=(Magnitud(ee,:,zz)*abs(P))/100;
        end
        if ee==2 || ee==4 || ee==7 || ee==12 || ee==14 || ee==17 ||
ee==19 || ee==25 || ee==27 || ee==30
            perturbacion2(ee,:,zz)=0;
        end
    end
end
end
if P>0

%% desviación positivas
for yy=1:1:7
    for LL=1:1:m

IH_Perturbada1(LL,:,yy)=(Magnitud(LL,:,yy)+perturbacion1(LL,:,yy
))*exp(1i*Fase(LL,:,yy));

```

```

IH_Perturbada2(LL,:,yy)=(Magnitud(LL,:,yy)+perturbacion2(LL,:,yy)
))*exp(1i*Fase(LL,:,yy));

    end
end
end
if P<0

%% desviación negativas
for yy=1:1:7
    for LL=1:1:m
        IH_Perturbada1(LL,:,yy)=(Magnitud(LL,:,yy)-
perturbacion1(LL,:,yy))*exp(1i*Fase(LL,:,yy));
        IH_Perturbada2(LL,:,yy)=(Magnitud(LL,:,yy)-
perturbacion2(LL,:,yy))*exp(1i*Fase(LL,:,yy));

    end
end
end

```

E.3 Codigo ridge regression

```

%% Ybus, tension y corrientes del sistema para las diferentes
frecuencias ,
[IH, VH, YBUS, Zbus]=Variables_de_estado_33B; % funcion que enlaza
con opendss para llamar la Ybus, la tension y la corriente para
los siete armónicos
%% Distorciones y casos propuestos
PP=[-5;-2.18492304881447;2.50;5];% desviaciones
casos=[1; 2; 3]; % caso 1= 3 monitores, caso2= 5 monitores, caso3=
10 monitores
for jj=1:1:1
P=PP(jj);
% rangos segun la desviacion
if jj==1
R1=0.0073:1e-5:0.0081;
R2=0.0031:1e-5:0.0039;

```

```
R3=0.0024:1e-5:0.0032;
R4=0.0021:1e-5:0.0029;
R5=0.0020:1e-5:0.0028;
R6=0.0020:1e-5:0.0028;
R7=0.0020:1e-5:0.0028;
end
if jj==2
R1=0.0072:1e-5:0.0082;
R2=0.0029:1e-5:0.0039;
R3=0.0022:1e-5:0.0032;
R4=0.0020:1e-5:0.0030;
R5=0.0019:1e-5:0.0029;
R6=0.0018:1e-5:0.0028;
R7=0.0019:1e-5:0.0029;
end
if jj==3
R1=0.0074:1e-5:0.0084;
R2=0.0029:1e-5:0.0039;
R3=0.0022:1e-5:0.0032;
R4=0.0020:1e-5:0.0030;
R5=0.0019:1e-5:0.0029;
R6=0.0018:1e-5:0.0028;
R7=0.0019:1e-5:0.0029;
end
if jj==4
R1=0.0074:1e-5:0.0084;
R2=0.0033:1e-5:0.0036;
R3=0.0023:1e-5:0.0029;
R4=0.0022:1e-5:0.0025;
R5=0.0022:1e-5:0.0025;
R6=0.0022:1e-5:0.0025;
R7=0.0022:1e-5:0.0025;
end
for aa=1:1:3
caso=casos(aa);
[IH_Perturbada1, IH_Perturbada2 ]=desviacion(IH,P,caso);% funcion
desviación
for ee=1:1:2
AA=zeros(33,1);
BB=zeros(33,1);
TMSE_T=zeros(33,1);
```

```

N_I=zeros(33,1,7);
TMSE_I=zeros(33,1,7);
N_I_M=zeros(33,1,7);
TMSE_I_M=zeros(33,1,7);
TMSE_I_M_T=zeros(33,1);
N_I_F=zeros(33,1,7);
TMSE_I_F=zeros(33,1,7);
TMSE_I_F_T=zeros(33,1);
Error_individual_H=zeros(33,4,7);
Error_individual_M_H=zeros(33,4,7);
Error_individual_F_H=zeros(33,4,7);
if ee==1
    IH_Perturbada=IH_Perturbada1;
end
if ee==2
    IH_Perturbada=IH_Perturbada2;
end
Ybus=YBUS; Ih=IH_Perturbada; Vh=VH;
[lambda]=lambda_Ridge_SD_cvx(Ybus, Ih, R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7);%
funcion que realiza la validacion cruzada
VT=zeros(length(YBUS),1,7);% se crea el vector V_80 en el cual se
guardan los resultados del SVDT
h=length(YBUS(:, :, 1));
for k=1:1:7
    A=Ybus(:, :, k);
    B=Ih(:, :, k);
    trunc=lambda(k);
    VT(:, :, k)=mini_func(A,B,h,trunc);% funcion que llama al solver
CVX
end
% cálculo de errores
% cálculo del MSE total
for kk=1:1:7
    for ii=1:1:33
        AA(ii)=AA(ii)+(abs((VH(ii, :, kk)-VT(ii, :, kk)))).^2;
        BB(ii)=(BB(ii))+(abs(VH(ii, :, kk))).^2;
    end
end
end

for uu=1:1:33
    TMSE_T(uu)=AA(uu)/BB(uu);

```

```

end
% cálculo del MSE individual
for w=1:1:7
    N_I(:, :, w) = (abs(VH(:, :, w)) - VT(:, :, w)).^2;
end
for zz=1:1:7
    for GG=1:1:33
        TMSE_I(GG, :, zz) = N_I(GG, :, zz) / BB(GG);
    end
end
% calculo del MSE individual de magnitud
for ww=1:1:7
    N_I_M(:, :, ww) = (abs(VH(:, :, ww)) - abs(VT(:, :, ww))).^2;
end
for T=1:1:7
    for TT=1:1:33
        TMSE_I_M(TT, :, T) = N_I_M(TT, :, T) / BB(TT);
    end
end
for F=1:1:7
    for FF=1:1:33
        TMSE_I_M_T(FF) = TMSE_I_M_T(FF) + TMSE_I_M(FF, :, F);
    end
end
% cálculo del desajuste individual debido al error de fase
for r=1:1:7
    N_I_F(:, :, r) = N_I(:, :, r) - N_I_M(:, :, r);
end
for Q=1:1:7
    for QQ=1:1:33
        TMSE_I_F(QQ, :, Q) = N_I_F(QQ, :, Q) / BB(QQ);
    end
end
for Y=1:1:7
    for YY=1:1:33
        TMSE_I_F_T(YY) = TMSE_I_F_T(YY) + TMSE_I_F(YY, :, Y);
    end
end
end
end
end
end

```

E.4 Función para la validación cruzada

```
function [lambda]=lambda_Ridge_SD_cvx(Ybus,
Ih,R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7)
rng('default') % For reproducibility
rango1=R1;
rango2=R2;
rango3=R3;
rango4=R4;
rango5=R5;
rango6=R6;
rango7=R7;
lambda1=0;
lambda2=0;
lambda3=0;
lambda4=0;
lambda5=0;
lambda6=0;
lambda7=0;
for z=1:1:7
X=Ybus(:, :, z);
Y=Ih(:, :, z);
if z==1

n1=rango1;
MSE1=zeros(length(n1),1);
for k=1:1:length(n1)
MSE1(k,:)= crossval('mse',X,Y,'kfold',5,'Predfun',@regf);
end
Error_min=min(abs(MSE1));
for s=1:1:length(n1)
    if Error_min==abs(MSE1(s,:))
        lambda1=n1(s);
    end
end

end

if z==2

n2=rango2;
```

```
MSE2=zeros(length(n2),1);
for k=1:1:length(n2)
MSE2(k,:)= crossval('mse',X,Y,'kfold',5,'Predfun',@regf);
end
Error_min=min(abs(MSE2));
for s=1:1:length(n2)
    if Error_min==abs(MSE2(s,:))
        lambda2=n2(s);
    end
end
end
if z==3

n3=rango3;
MSE3=zeros(length(n3),1);
for k=1:1:length(n3)
MSE3(k,:)= crossval('mse',X,Y,'kfold',5,'Predfun',@regf);
end
Error_min=min(abs(MSE3));
for s=1:1:length(n3)
    if Error_min==abs(MSE3(s,:))
        lambda3=n3(s);
    end
end
end
if z==4

n4=rango4;
MSE4=zeros(length(n4),1);
for k=1:1:length(n4)
MSE4(k,:)= crossval('mse',X,Y,'kfold',5,'Predfun',@regf);
end
Error_min=min(abs(MSE4));
for s=1:1:length(n4)
    if Error_min==abs(MSE4(s,:))
        lambda4=n4(s);
    end
end
end
end
```

```
if z==5

n5=rango5;
MSE5=zeros(length(n5),1);
for k=1:1:length(n5)
MSE5(k,:)= crossval('mse',X,Y,'kfold',5,'Predfun',@regf);
end
Error_min=min(abs(MSE5));
for s=1:1:length(n5)
    if Error_min==abs(MSE5(s,:))
        lambda5=n5(s);
    end
end

end

if z==6

n6=rango6;
MSE6=zeros(length(n6),1);
for k=1:1:length(n6)
MSE6(k,:)= crossval('mse',X,Y,'kfold',5,'Predfun',@regf);
end
Error_min=min(abs(MSE6));
for s=1:1:length(n6)
    if Error_min==abs(MSE6(s,:))
        lambda6=n6(s);
    end
end

end

if z==7

n7=rango7;
MSE7=zeros(length(n7),1);
for k=1:1:length(n7)
MSE7(k,:)= crossval('mse',X,Y,'kfold',5,'Predfun',@regf);
end
Error_min=min(abs(MSE7));
for s=1:1:length(n7)
    if Error_min==abs(MSE7(s,:))
        lambda7=n7(s);
    end
end

end
```

```
end
lambda=[lambda1,lambda2,lambda3,lambda4,lambda5,lambda6,lambda7]
;
end

function trunc=numero(k,z)
if z==1
h=R1;
trunc=h(k);
end
if z==2
h=R2;
trunc=h(k);
end
if z==3
h=R3;
trunc=h(k);
end
if z==4
h=R4;
trunc=h(k);
end
if z==5
h=R5;
trunc=h(k);
end
if z==6
h=R6;
trunc=h(k);
end
if z==7
h=R7;
trunc=h(k);
end

end
function Yfit=regf(Xtrain,Ytrain,Xtest)
trunc=numero(k,z);
A=Xtrain;
B=Ytrain;
```

```

h=length(Xtrain);
[XX]=mini_func(A,B,h,trunc);
Yfit=Xtest*XX;
end
end

```

E.4 Código para el método descomposición en valores singulares truncados

```

%% Ybus, tension y corrientes del sistema para las diferentes
frecuencias
[IH, VH, YBUS, Zbus]=Variables_de_estado_33B; % funcion que enlaza
con opendss para llamar la Ybus, la tension y la corriente para
los siete armónicos
%% Distorciones y casos propuestos
PP=[-5;-2.18492304881447;2.49918467641946;5];
casos=[1; 2; 3];
for jj=1:1:1
P=PP(jj);
for aa=1:1:3
caso=casos(aa);
[IH_Perturbada1, IH_Perturbada2 ]=perturbacion(IH,P,caso);
for ee=1:1:2
AA=zeros(33,1);
BB=zeros(33,1);
TMSE_T=zeros(33,1);
N_I=zeros(33,1,7);
TMSE_I=zeros(33,1,7);
N_I_M=zeros(33,1,7);
TMSE_I_M=zeros(33,1,7);
TMSE_I_M_T=zeros(33,1);
N_I_F=zeros(33,1,7);
TMSE_I_F=zeros(33,1,7);
TMSE_I_F_T=zeros(33,1);
Error_individual_H=zeros(33,4,7);
Error_individual_M_H=zeros(33,4,7);
Error_individual_F_H=zeros(33,4,7);
a=ee;
if a==1
IH_Perturbada=IH_Perturbada1;

```

```

end
if a==2
IH_Perturbada=IH_Perturbada2;
end
Ybus=YBUS; Ih=IH_Perturbada; Vh=VH;
TO=truncamiento_optimo(Ybus,Ih,Vh);
VT=zeros(length(YBUS),1,7);% se crea el vector V_80 en el cual se
guardan los resultados del SVDT
for k=1:1:7
[U, S, W]=svd(YBUS(:, :, k));
U=U(:, 1:TO(k)-1);
S=S(1:TO(k)-1, 1:TO(k)-1);
W=W(:, 1:TO(k)-1);
VT(:, :, k)=W*(S.'*S)^-1*S'*U'*IH(:, :, k);
end
% cálculo de errores
% cálculo del MSE total
for kk=1:1:7
for ii=1:1:33
AA(ii)=AA(ii)+(abs((VH(ii, :, kk)-VT(ii, :, kk)))).^2;
BB(ii)=(BB(ii)+(abs(VH(ii, :, kk)))).^2;
end
end

for uu=1:1:33
TMSE_T(uu)=AA(uu)/BB(uu);
end
% cálculo del MSE individual
for w=1:1:7
N_I(:, :, w)=(abs(VH(:, :, w)-VT(:, :, w)))).^2;
end
for zz=1:1:7
for GG=1:1:33
TMSE_I(GG, :, zz)=N_I(GG, :, zz)/BB(GG);
end
end
% calculo del MSE individual de magnitud
for ww=1:1:7
N_I_M(:, :, ww)=(abs(VH(:, :, ww))-abs(VT(:, :, ww)))).^2;
end
for T=1:1:7

```

```

for TT=1:1:33
    TMSE_I_M(TT, :, T) = N_I_M(TT, :, T) / BB(TT);
end
end
for F=1:1:7
for FF=1:1:33
    TMSE_I_M_T(FF) = TMSE_I_M_T(FF) + TMSE_I_M(FF, :, F);
end
end
% cálculo del desajuste individual debido al error de fase
for r=1:1:7
N_I_F(:, :, r) = N_I(:, :, r) - N_I_M(:, :, r);
end
for Q=1:1:7
for QQ=1:1:33
    TMSE_I_F(QQ, :, Q) = N_I_F(QQ, :, Q) / BB(QQ);
end
end
for Y=1:1:7
for YY=1:1:33
    TMSE_I_F_T(YY) = TMSE_I_F_T(YY) + TMSE_I_F(YY, :, Y);
end
end
Errores_Individuales_totales_M_F_T = [TMSE_I_F_T      TMSE_I_M_T
TMSE_T];
Nodo=1:1:33;
for LL=1:1:7
Error_individual_H(:, :, LL) = [Nodo'      VH(:, :, LL)      VT(:, :, LL)
TMSE_I(:, :, LL)];
Error_individual_M_H(:, :, LL) = [Nodo'      abs(VH(:, :, LL))
abs(VT(:, :, LL)) TMSE_I_M(:, :, LL)];
Error_individual_F_H(:, :, LL) = [Nodo'      angle(VH(:, :, LL))
angle(VT(:, :, LL)) TMSE_I_F(:, :, LL)];
end
end
end
end

```

E.4 Código para el truncamiento optimo

```

function TO=truncamiento_optimo(Ybus,Ih,Vh)
TO=zeros(7,1);
Error_min=zeros(1,1,7);
for z=1:1:7
[U, S, W]=svd(Ybus(:, :, z));
mm=length(Ybus(:, :, z));
cont1=0; cont2=0;
D=diag(S);
m=length(D);
for k=1:1:m
if D(k)<=4/sqrt(3)
cont1=cont1+1;
end
end
A=zeros(cont1,1);
for kk=1:1:m
if D(kk)<=4/sqrt(3)
cont2=cont2+1;
A(cont2,1)=kk;
end
end
V=zeros(mm,1,cont1);
MSE=zeros(cont1,2);
A=sort(A,'descend');
for n=1:1:cont1
r=A(n);
U=U(:,1:r-1);
S=S(1:r-1,1:r-1);
W=W(:,1:r-1);
V(:, :, n)=W*(S'*S)^-1*S'*U'*Ih(:, :, z);
MSE(n,1)=immse(abs(V(:, :, n)),abs(Vh(:, :, z)));
MSE(n,2)=r;
end
Error_min(:,1,z)=min(MSE(:,1));
for nn=1:1:cont1
if Error_min(:,1,z)==MSE(nn,1)
TO(z,1)=MSE(nn,2);
end
end

```

end

end