

**LOCALIZACIÓN DE FALLAS: VALIDACIÓN DE MODELOS DE
FUENTES DE ALIMENTACIÓN Y CARGAS EMPLEADOS EN LA
SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA**

**DIANA ESTEPHANIA CABALLERO SANDOVAL
JOSÉ MAURICIO TROUCHÓN BRAVO**

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas
Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Bucaramanga

2011

**LOCALIZACIÓN DE FALLAS: VALIDACIÓN DE MODELOS DE
FUENTES DE ALIMENTACIÓN Y CARGAS EMPLEADOS EN LA
SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA**

**DIANA ESTEPHANIA CABALLERO SANDOVAL
JOSÉ MAURICIO TROUCHÓN BRAVO**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director

GILBERTO CARRILLO CAICEDO
Doctor Ingeniero Industrial

Codirector

IVÁN DAVID SERNA SUÁREZ
Ingeniero Electricista, M.Sc(c)

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas
Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Bucaramanga

2011

A Dios, promotor y consejero de mi vida y quien me provisiona de sabiduría y dones necesarios para el cumplimiento de todas mis metas.

A mi madre, mi nona y mi hermana por su apoyo incondicional, amor, comprensión, fortaleza y esfuerzo en mis años de vida.

A mis amigos con los que he compartido risas, tristezas y el esfuerzo por lograr esta meta.

— *Diana Estephania Caballero Sandoval.*

A mi padre, mi madre y mi hermana que han sido y seguirán siendo parte importante para mi desarrollo personal y profesional.

A mis familiares y amigos los cuales los cuales con su amor y gran apoyo han ayudado a convertir mis sueños en realidad.

— *José Mauricio Troughón Bravo.*

Agradecimientos

En la culminación de un proceso durante el cual se manifiesta un desarrollo de habilidades, constante aprendizaje, capacidades de trabajo grupal e interacción con distintas fuentes de información queremos expresar nuestros mas sinceros agradecimientos al Dr. Gilberto Carrillo Caicedo, por su dirección, acompañamiento y manifestación de confianza para hacer de este trabajo de investigación un paso mas en la vida de cada uno de nosotros.

De igual manera al Ingeniero Eléctricista Iván David Serna Suárez por guiarnos y manifestarnos su vos de confianza a lo largo de todo el desarrollo del proyecto.

A los profesores de la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones quienes con su grandes conocimientos nos guiaron y estimularon durante todo el proceso de formación profesional y personal a lo largo de la carrera universitaria.

Índice general

Introducción	19
1. Modelos de fuentes de alimentación y cargas	21
1.1. Modelos de carga	22
1.1.1. Modelo de carga estática exponencial	23
1.1.1.1. Modelo de carga exponencial de impedancia constante	24
1.1.1.2. Modelo de carga exponencial de corriente constante .	24
1.1.1.3. Modelo de carga exponencial de potencia constante . .	25
1.1.2. Modelo de carga polinomial	26
1.1.3. Obtención de Datos	27
1.1.4. Determinación de Parámetros	27
1.1.5. Estudio previo de los modelos de cargas	28
1.1.5.1. Modelo Exponencial	29
1.1.5.2. Modelo polinomial (Variación del factor de potencia) .	30
1.2. Modelos de fuente	32
1.3. Modelo Thévenin para estimar parámetros utilizando medidas en es- tado estable	33
1.3.1. Caso monofásico	37
1.3.2. Caso bifásico	37
1.3.3. Caso trifásico desacoplado	37
1.4. Modelo de fuentes para estimar impedancia Thévenin utilizando pro- cesamiento de señales	38
1.4.1. Presentación del modelo	38
1.4.2. Obtención de los datos	38
1.4.3. Estimación de la impedancia de Thévenin	39
2. Validación y resultados de los modelos de fuentes de alimentación y cargas	48

2.1. Modelos de Carga	49
2.1.1. Validación de los modelos de carga	50
2.1.2. Sistema distribución	50
2.1.3. Estudio del modelo polinomial	50
2.1.3.1. Modelo polinomial ZIP	50
2.1.4. Estudio del modelo exponencial	53
2.1.4.1. Modelo polinomial ZIP	53
2.1.5. Determinación de los parámetros de carga para el modelo po- linomial en condición de falla	55
2.1.5.1. Impedancia constante	57
2.1.5.2. Corriente constante	59
2.1.5.3. Potencia constante	62
2.1.6. Variación del nivel de tensión	64
2.2. Validación de los modelos de fuentes de alimentación	66
2.2.1. Validación del modelo de fuentes que estima la impedancia Thévenin utilizando medidas en estado estable	68
2.2.2. Validación del modelo de fuentes que estima la impedancia Thévenin utilizando procesamiento de señales	70
3. Conclusiones	73
Referencias Bibliográficas	75
Anexos	76

Índice de anexos

Programas en Matlab	78
Manual del usuario	93
Resultados obtenidos por el algoritmo en el análisis de sensibilidad	106

Índice de figuras

1.1. Validación del modelo	21
1.2. Cuadro esquemático de los modelos de carga estática.	23
1.3. Variación de la potencia (activa y reactiva) en función del valor eficaz de la tensión para el modelo de carga de impedancia constante	24
1.4. Variación de las potencias (activa y reactiva) en función del valor eficaz de la tensión para el modelo de carga de corriente constante.	25
1.5. Variación de las potencias (activa y reactiva) en función del valor eficaz de la tensión para el modelo de carga de potencia constante.	25
1.6. Diagrama representativo del modelo de carga ZIP	27
1.7. Circuito tipo prueba	28
1.8. Modelo trifásico con acoplamiento	34
1.9. Circuito monofásico	36
1.10. Circuito monofásico conocidas las señales de tensión y corriente en la cabecera	40
1.11. Señales de tensión y corriente en la cabecera del circuito	41
1.12. Admitancia vista desde la cabecera	42
1.13. Diferencias en la tensión de la cabecera del circuito	44
1.14. Diferencias en la corriente de la cabecera del circuito	45
1.15. Diferencias en la admitancia de la cabecera del circuito	46
2.1. Circuito de distribución rural	49
2.2. Circuito en estado estable	56
2.3. Circuito en condición de falla	56
2.4. Circuito en condición de falla sin carga	57
2.5. Corriente en estado estable para el modelo impedancia constante	57
2.6. Corriente en estado de falla bifásica BC para el modelo impedancia constante	58

2.7. Corriente en estado de falla bifásica BC sin carga para el modelo impedancia constante	58
2.8. Corriente en la carga para el modelo impedancia constante	59
2.9. Corriente en estado estable para el modelo corriente constante	60
2.10. Corriente en estado de falla bifásica BC para el modelo corriente constante	60
2.11. Corriente en estado de falla bifásica BC sin carga para el modelo corriente constante	61
2.12. Corriente en la carga para el modelo corriente constante	61
2.13. Corriente en estado estable para el modelo potencia constante	62
2.14. Corriente en estado de falla bifásica BC para el modelo potencia constante	62
2.15. Corriente en estado de falla bifásica BC sin carga para el modelo potencia constante	63
2.16. Corriente en la carga para el modelo potencia constante	63
2.17. Registro de tensión y corriente en la cabecera del circuito para condición de falla	66
2.18. Registro tensión y corriente en la cabecera del circuito para condición normal de operación	67
B.1. Cambio de directorio a la herramienta a ejecutar SPEPC	94
B.2. Ventana principal de la herramienta SPEPC	95
B.3. Ventana con resultados finales de la herramienta SPEPC	98
B.4. Cambio de directorio a la herramienta a ejecutar SPEIT	100
B.5. Ventana principal herramienta SPEIT	101
B.6. Ventana de resultados finales herramienta SPEIT	105
C.1. Resultados ante 41 variaciones en la tensión de la fase a	108
C.2. Resultados ante 41 variaciones en la tensión de la fase b	109
C.3. Resultados ante 41 variaciones en la tensión de la fase c	110
C.4. Resultados ante 41 variaciones en el ángulo de la fase a	111
C.5. Resultados ante 41 variaciones en el ángulo de la fase b	112
C.6. Resultados ante 41 variaciones en el ángulo de la fase c	113
C.7. Resultados ante 41 variaciones en la resistencia propia de la fase a . . .	114
C.8. Resultados ante 41 variaciones en la reactnacia propia de la fase a . . .	115

C.9. Resultados ante 41 variaciones en la resistencia propia de la fase b . . . 116

C.10.Resultados ante 41 variaciones en la reactancia propia de la fase b . . . 117

C.11.Resultados ante 41 variaciones en la resistencia propia de la fase c . . . 118

C.12.Resultados ante 41 variaciones en la reactancia propia de la fase c . . . 119

C.13.Resultados ante 41 variaciones en la reactancia mutua entre las fases a
y b 120

C.14.Resultados ante 41 variaciones en la reactancia mutua entre las fases a
y c 121

C.15.Resultados ante 41 variaciones en la reactancia mutua entre las fases b
y c 122

Índice de tablas

1.1. Parámetros obtenidos para el modelo de impedancia constante con el modelo polinomial para un sistema de prueba	29
1.2. Parámetros obtenidos para el modelo de corriente constante con el modelo polinomial para un sistema de prueba	30
1.3. Parámetros Obtenidos para el modelo de potencia constante con el modelo polinomial para un sistema de prueba	30
1.4. Parámetros obtenidos para la potencia activa en la fase A para un sistema de prueba	31
1.5. Parámetros obtenidos para la potencia reactiva en la fase A con el modelo polinomial para un sistema de prueba	32
1.6. Composición de la impedancia de Thévenin del sistema	35
1.7. Valores de tensión y corriente en la cabecera	36
1.8. Parámetros obtenidos del circuito monofásico	37
2.1. Parámetros de potencia activa y reactiva obtenidas para el modelo polinomial del sistema tipo prueba basado en un sistema de distribución	51
2.2. Parámetros obtenidos para la potencia activa en la fase A para un sistema de distribución real	52
2.3. Parámetros obtenidos para la potencia activa en la fase A para un sistema de distribución real	52
2.5. Parámetros obtenidos para la potencia activa en la fase A con el modelo exponencial para un sistema de distribución	53
2.4. Parámetros de las potencias activa y reactiva obtenidas para modelo exponencial basado en un sistema de distribución	54
2.6. Parámetros obtenidos para la potencia reactiva en la fase A con el modelo exponencial para un sistema de distribución	55
2.7. Parámetros de carga para el modelo de carga impedancia constante . .	59

2.8. Parámetros de carga para el modelo de carga corriente constante	61
2.9. Parámetros de carga para el modelo de carga potencia constante	63
2.10. Parámetros obtenidos para la potencia activa con el modelo polino- mial para un sistema de distribución	65
2.11. Parámetros obtenidos para la potencia reactiva con el modelo polino- mial para un sistema de distribución	65
2.12. Parámetros obtenidos para la potencia activa con el modelo polino- mial para un sistema de distribución	65
2.13. Parámetros obtenidos para la potencia activa con el modelo polino- mial para un sistema de distribución	65
2.14. Valores de referencia del circuito de distribución	68
2.15. Resultados del modelo que utiliza medidas en estado estable en con- dición de falla	69
2.16. Resultados del modelo que utiliza medidas en estado estable en con- dición normal de operación	69
2.17. Resultados del modelo que utiliza medidas en estado estable en con- dición normal de operación sin acoplamiento	70
2.18. Resultados del modelo que utiliza procesamiento de señales en condi- ción de falla	70
2.19. Resultados del modelo que utiliza procesamiento de señales en condi- ción normal de operación	71
2.20. Comparación de los resultados de los modelos	72
C.1. Condiciones iniciales de la tensión de fase	106
C.2. Condiciones iniciales de las resistencias propias e impedancias pro- pias y acopladas	106

RESUMEN

TÍTULO:

LOCALIZACIÓN DE FALLAS: VALIDACIÓN DE MODELOS DE FUENTES DE ALIMENTACIÓN Y CARGAS EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA¹

AUTORES:

DIANA ESTEPHANIA CABALLERO SANDOVAL
JOSÉ MAURICIO TROUCHÓN BRAVO²

PALABRAS CLAVE:

Validación modelos de fuentes y cargas, sistemas de distribución, localización de fallas.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado surge de la necesidad de ajustar los modelos de fuentes de alimentación y cargas encontrados teóricamente, a los sistemas de distribución mediante las herramientas de simulación ATP y Matlab. El proceso de ajuste de los modelos se justifica, determinando su eficiencia en el sistema de distribución y estimando el error cometido en la implementación.

Los modelos de fuentes de alimentación son validados en un circuito de prueba basado en un sistema de distribución real implementado y simulado en ATP con registros en condición de falla y condición normal de operación del circuito de distribución simulado. La validación de los modelos de cargas al igual que los modelos de fuentes, se realiza teniendo en cuenta las variaciones de la tensión en la cabecera del circuito y métodos de optimización de Matlab. Los resultados obtenidos a partir de la simulación muestran los errores cometidos en el ajuste de los parámetros. Se presenta una dinámica de trabajo para la estimación de los parámetros correspondiente a cada modelo de fuentes de alimentación y cargas que contribuye a obtener resultados bajo la seguridad de un buen funcionamiento. Con la realización del proyecto se propondrán recomendaciones y condiciones del funcionamiento de los modelos estudiados, para mejorar su utilización.

¹Proyecto de Grado

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Gilberto Carrillo Caicedo. Iván David Serna Suárez

ABSTRACT

TITLE:

FAUL LOCATION:VALIDATION OF SOURCE AND LOAD MODELS TO BE USED IN SIMULATION OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEMS¹

AUTHORS:

DIANA ESTEPHANIA CABALLERO SANDOVAL
JOSÉ MAURICIO TROUCHÓN BRAVO²

KEY WORDS:

Validation of source and load models, Distribution systems, fault location.

DESCRIPTION:

The development of this undergraduate final project was carried out to adjust, in a theoretical way, the found supply source and load models, to the distribution system, through the ATP and Matlab simulation tools. The adjusting process of the models is justified by quantizing and assessing the model behavior in a distribution system, to estimate the error produced in the implementation.

The supply source models are validating in a test circuit based on a distribution system and it is simulated in ATP under registers of fault condition and normal condition of the test of simulated distribution circuit. Loads models are validated in a similar way to the sources models process, but the simulation is done considering the variations in the voltage of the source substation and the optimization process of Matlab. The outcomes of the simulation show the failures that had occurred in the parameters adjusting process.

This paper presents a working dynamic for estimating each source supply models, as well as the loads that contributed to get safe function results. With the development of this project it will be proposed some functioning condition and it will be given some recommendation in order to allow the best use of the studied load model for a better use of them.

¹Degree Project

²Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Gilberto Carrillo Caicedo. Iván David Serna Suárez.

Introducción

Los sistemas de distribución de energía eléctrica son una parte importante del sistema de potencia, ya que en su totalidad está conformado por un conjunto de equipos interconectados entre sí y su operación permite mantener altos niveles de confiabilidad en el suministro de la calidad de energía eléctrica en distintos lugares a diferentes niveles de tensión.

Dentro del problema de localización de fallas en los sistemas de distribución real, a pesar de que se ha abordado desde distintas perspectivas, los localizadores no han sido probados bajo entornos reales. Luego, encontrar modelos que nos permitan acoplar la información que se tiene de un entorno real y obtener resultados bajo la seguridad de un buen funcionamiento (una vez implementado en un sistema real) posibilitaría el proceso de toma de decisiones y pruebas de campo asociadas a los análisis de comportamiento del sistema de distribución. Para tal propósito, se debe realizar una estimación de parámetros de los modelos empleados para simular sistemas de distribución reales y se requiere evaluar el desempeño con el fin de disminuir la incertidumbre. Disminuyendo la incertidumbre, se tiene un análisis confiable para tomar decisiones en cuanto a la localización de fallas. En particular, para el problema de localización de fallas precisa se hace crítico el correcto modelado y análisis del impacto de los diferentes modelos sobre la localización.

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es validar los modelos de fuentes de alimentación y cargas de un sistema de distribución, con el fin de dar una solución al problema de localización de fallas.

El documento del presente proyecto de investigación, presenta tres (3) capítulos con tres (3) anexos. En el capítulo uno se elabora un marco teórico que permitirá dar a conocer cuáles son los modelos de fuentes de alimentación y cargas considerados durante el desarrollo del proyecto. En el capítulo dos, se validan y obtienen los resultados de los modelos de fuentes de alimentación y cargas; la validación se realiza a partir de datos obtenidos de la simulación en ATP de un sistema de distribución. Por último, en el capítulo tres se condensarán las observaciones y conclusiones obtenidas

durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

En el Anexo A, se explicarán los programas para la estimación de la impedancia de Thévenin y la estimación de los parámetros de cargas en Matlab, empleados para la simulación. En el Anexo B se presentan los manuales de usuario para los programas creados de los modelos de fuentes de alimentación y cargas. Finalmente, en el Anexo C se ubican los datos obtenidos al realizar el análisis de sensibilidad a las condiciones iniciales de uno de los algoritmos expuestos en el libro.

1. Modelos de fuentes de alimentación y cargas

Se entiende como modelo, la simplificación de un sistema real, que tiene como propósito determinar el comportamiento de los parámetros requeridos en el proceso de modelado de un sistema físico.

La determinación de un modelo de un sistema físico parte de la obtención del sistema a simplificar, es decir, el sistema físico correspondiente al presente proyecto a realizar, el cual tiene características propias, siendo estas descritas a través de un modelo matemático seleccionado previamente y mediante el cual se obtendrán los parámetros representativos del modelo que serán comparados con los datos referenciados obtenidos de la literatura.

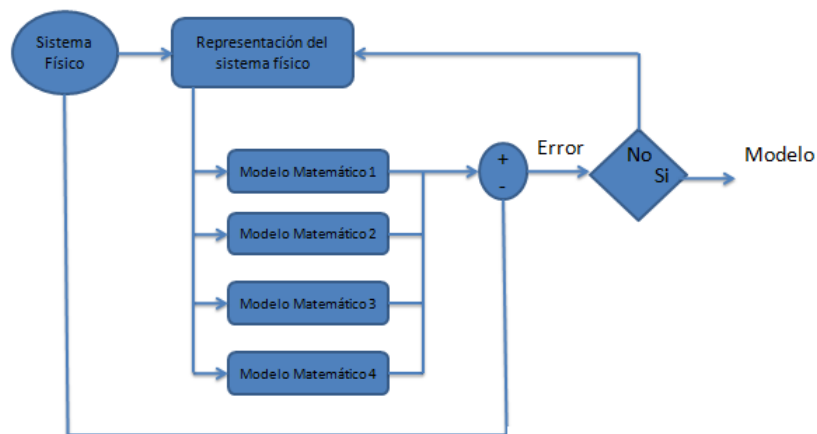


FIGURA 1.1.: Validación del modelo

Del sistema físico sale una representación, la cual no es única. De allí se deduce un modelo el cual se compara con el sistema físico. Si satisface se toma el modelo de lo contrario se ajusta la representación.

1.1. Modelos de carga

A continuación, se plasman las bases teóricas de los modelos de cargas estáticas, las cuales, representan la potencia (activa y reactiva) consumida por la carga en cualquier instante de tiempo en función del valor eficaz de tensión.

Existen algunas aproximaciones del modelo de carga estática, las cuales son el modelo exponencial y el modelo polinomial [Agu06].

Los modelos de carga estática pueden representarse como una función exponencial o polinomial de la tensión (ver ecuación 1.1 y 1.2). El primer modelo puede emplearse para representar cargas de impedancia constante, corriente constante o potencia constante, mientras que los segundos pueden emplearse para obtener un modelo que combine las tres características (Modelo ZIP) [BKC08], ver figura 1.2.

$$S = S_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^k \quad (1.1)$$

$$S = S_0 \left[a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^0 + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + a_3 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (1.2)$$

Para representar un modelo de carga en un sistema de distribución, se debe tener presente las características de las cargas descritas a continuación. Estas tienen un efecto significativo sobre el rendimiento del sistema, debido a que se ha encontrado que los modelos pueden variar en un principio bajo condiciones ambientales, las cuales se deben tener en cuenta para la estimación de parámetros [Cok99][Tas95]:

- Se encuentra compuesta por una gran cantidad de componentes que por lo general no se pueden caracterizar totalmente.
- Las propiedades y la ubicación de los dispositivos de carga.
- Cambian de composición y de magnitud con el tiempo.
- La falta de información precisa para identificar los modelos de carga.

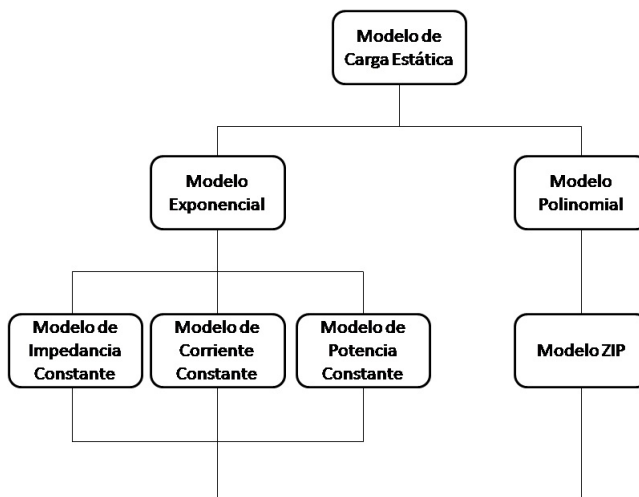


FIGURA 1.2.: Cuadro esquemático de los modelos de carga estática.

1.1.1. Modelo de carga estática exponencial

El modelo de carga exponencial se define matemáticamente de la siguiente manera:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} \quad (1.3)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq} \quad (1.4)$$

Donde:

P_0, Q_0 equivalen a la potencia activa y reactiva nominal a tensión nominal V_0

np, nq los exponentes de potencia activa y reactiva

Las funciones 1.3 y 1.4 representan la relación entre las potencias (activa y reactiva) y la tensión de forma exponencial.

Es necesario indicar que en este modelo se considera que no existen grandes variaciones de tensión [Agu06].

Considerando el modelo exponencial se tiene tres casos especiales, definidos por los exponentes de la función (np y nq), de manera que las características de las cargas pueden ser de tipo impedancia constante, corriente constante y potencia constante.

1.1.1.1. Modelo de carga exponencial de impedancia constante

Este modelo de carga es representado matemáticamente por un modelo exponencial con los exponentes $np = nq = 2$, es decir, la potencia (activa y reactiva) varía directamente con el cuadrado de la magnitud de tensión. El modelo también recibe el nombre de modelo de carga exponencial de admitancia constante.

Las ecuaciones que representan este tipo de carga son:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (1.5)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (1.6)$$

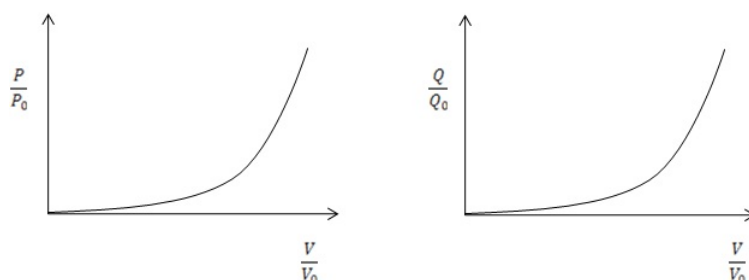


FIGURA 1.3.: Variación de la potencia (activa y reactiva) en función del valor eficaz de la tensión para el modelo de carga de impedancia constante

1.1.1.2. Modelo de carga exponencial de corriente constante

Este modelo de carga es representado matemáticamente por un modelo exponencial 1.3 y 1.4 con los exponentes $np = nq = 1$, es decir las potencias (activa y reactiva) varían directamente con la magnitud de la tensión.

Las ecuaciones que representan este tipo de carga son:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 \quad (1.7)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 \quad (1.8)$$

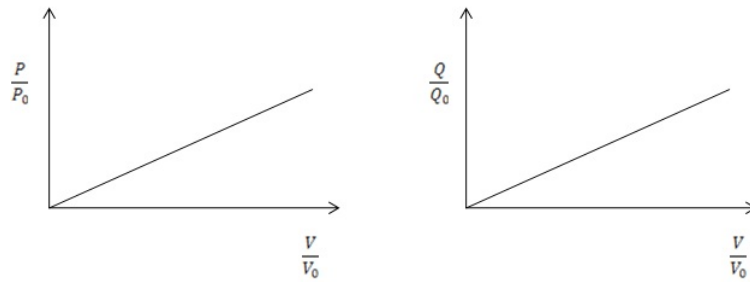


FIGURA 1.4.: Variación de las potencias (activa y reactiva) en función del valor eficaz de la tensión para el modelo de carga de corriente constante.

1.1.1.3. Modelo de carga exponencial de potencia constante

Este modelo de carga es representado matemáticamente por un modelo exponencial con los exponentes $np = nq = 0$, es decir, las potencias (activa y reactiva) no varían con los cambios en la magnitud de tensión. El modelo también recibe el nombre de modelo de carga exponencial a MVA.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^0 = P_0 \quad (1.9)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^0 = Q_0 \quad (1.10)$$

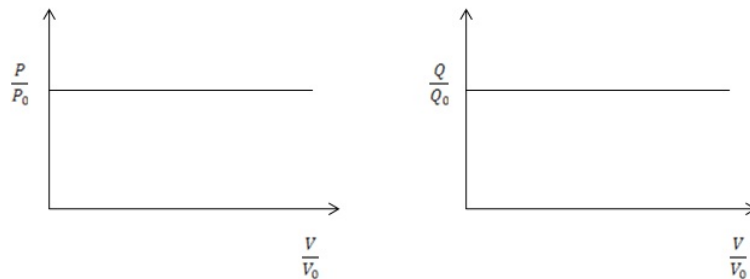


FIGURA 1.5.: Variación de las potencias (activa y reactiva) en función del valor eficaz de la tensión para el modelo de carga de potencia constante.

En estos casos especiales es necesario tener presentes ciertas consideraciones, entre ellas saber en qué rango se encuentra la tensión respecto de la tensión nominal, ya que para tensiones por debajo de la nominal el modelo de carga exponencial de impedancia constante es poco común, mientras que el modelo de carga exponencial de potencia constante se puede encontrar mejor adaptado. Para tensiones por

encima de la nominal el modelo de carga exponencial de corriente constante puede disminuir las oscilaciones del sistema [BQ00].

1.1.2. Modelo de carga polinomial

El modelo de carga polinomial representa la relación entre las potencias (activa y reactiva) y la magnitud de la tensión a través de una ecuación polinomial.

$$P = P_0 \left[P_P \left(\frac{V}{V_0} \right)^0 + P_I \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + P_Z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (1.11)$$

$$Q = Q_0 \left[Q_P \left(\frac{V}{V_0} \right)^0 + Q_I \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + Q_Z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (1.12)$$

Donde:

P_0, Q_0 equivalen a la potencia activa y reactiva nominal a tensión nominal V_0

P_P, Q_P, P_I, Q_I y P_Z, Q_Z los exponentes de potencia activa y reactiva siendo

$$P_P + P_I + P_Z = 1$$

$$Q_P + Q_I + Q_Z = 1$$

Téngase en cuenta que el porcentaje de los coeficientes nos define la cantidad de porción del modelo representado.

Para el posterior estudio se utilizará el modelo ZIP, el cual está provisto para cargas con características puras, como impedancia constante, corriente constante, potencia constante y características mixtas.

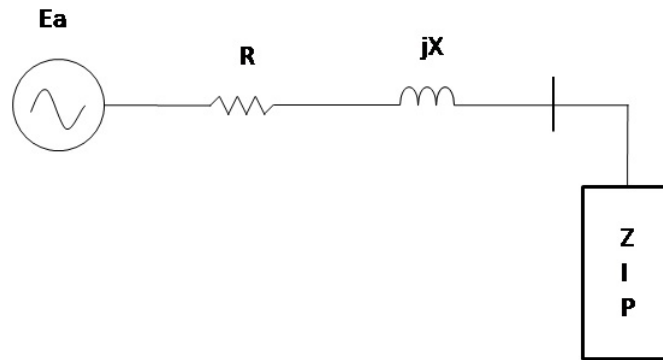


FIGURA 1.6.: Diagrama representativo del modelo de carga ZIP

1.1.3. Obtención de Datos

Los modelos de carga anteriormente mencionados son trabajados ante diferentes ondas de tensión y corriente por fase generados en función del tiempo, los cuales son datos necesarios para el cálculo de los parámetros para cada tipo de carga. Estos valores de tensión y corriente son la base para calcular las potencias (activas y reactivas) consumidas por la carga en cualquier instante de tiempo.

1.1.4. Determinación de Parámetros

Los parámetros estimados son determinados al resolver el problema de los mínimos cuadrados [BKC06], minimizando el error de salida por medio de la siguiente expresión:

$$\min(p) = \min_{p \in Z} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2$$

N Número de muestras

$y(k)$ Valor medido

$\hat{y}(k) = \beta_0 + \beta_1 * X_{k1} + \beta_2 * X_{k2}$ Valor del modelo de las muestras K respectivamente

Los parámetros obtenidos deben ser validados por su rendimiento esperado, es decir, comparar la calidad del modelo sobre los datos utilizados. Una vez obtenidos

los parámetros, se determina la respuesta del modelo de carga que se simula y son comparados con el modelo de salida medido. El desempeño del modelo de carga se evalúa mediante el error relativo siguiente [BKC06]:

$$\epsilon = 100 * \frac{\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2\right)^{1/2}}{\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k))^2\right)^{1/2}}$$

1.1.5. Estudio previo de los modelos de cargas

Los modelos de carga a estudiar se han limitado al polinomial y al exponencial. Un estudio esencial es determinante para la representación de las cargas en un sistema de distribución. A continuación se describe el circuito a representar para el estudio de los modelos de cargas,

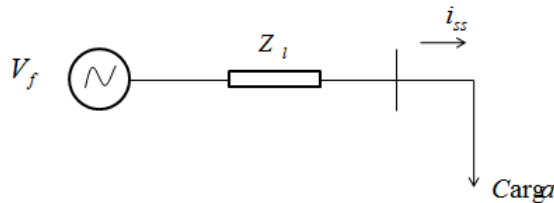


FIGURA 1.7.: Circuito tipo prueba

Para este estudio es necesario realizar un barrido de tensión en la cabecera del circuito por encima y por debajo de la tensión nominal, entre el $\pm 50\%$, teniendo como valor nominal de tensión:

$$V_n = \frac{34500 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 28169,13 [V_{RMS}] \quad (1.13)$$

n Número de simulaciones

Este estudio es basado en un circuito con una distribución con alimentación directa, con el fin de reducir las pérdidas producidas por las líneas de distribución, evitando desviación en la obtención de los parámetros y mediante un problema de mínimos cuadrados se determinan los parámetros representativos para cada tipo de modelo, es decir para el modelo polinomial ZIP ($P_Z, Q_Z, P_L, Q_L, P_P, Q_P$) y para el modelo exponencial (K, np, nq).

1.1.5.1. Modelo Exponencial

La dinámica de este estudio está basada de la siguiente manera:

1. Ajustar los parámetros del modelo de carga.
2. Hacer un barrido de tensión desde el -50 % hasta el 150 %.
3. Registrar las señales de tensión y corriente y determinar los parámetros del modelo mediante el problema de mínimos cuadrados.

A continuación se expresan los parámetros obtenidos para cada tipo de modelo de carga.

Para el estudio de los diferentes modelos de carga se tendrá un valor de referencia de los parámetros de las cargas. Tomando como referencia el modelo de carga polinomial se tiene:

Para el modelo de impedancia constante, representado como Z , se tiene que $np = nq = 2$

Para el modelo de corriente constante, representado como I , se tiene que $np = nq = 1$

Para el modelo de potencia constante, representado como P , se tiene que $np = nq = 0$

Al realizar la regresión no lineal por medio de la expresión matemática de mínimos cuadrados se obtienen los siguientes parámetros para cada uno de los modelos en caso de estudio:

Potencia Activa				Potencia Reactiva			
	Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C
P_P	2,9252e-8	5,1718e-8	1,2837e-8	Q_P	2,9252e-8	5,1718e-8	1,2837e-8
P_I	-6,248e-8	-1,23458e-7	-3,8518e-8	Q_I	-6,2486e-8	-1,2345e-7	-3,8518e-8
P_Z	1,000000	1,000000	1,00000	Q_Z	1,000000	1,00000	1,00000
Error	1,3617e-6	1,0593e-6	1,0877e-6	Error	1,3617e-6	1,0593e-6	1,0877e-6

TABLA 1.1.: Parámetros obtenidos para el modelo de impedancia constante con el modelo polinomial para un sistema de prueba

Potencia Activa				Potencia Reactiva			
	Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C
P_P	-2,5593e-7	9,2605e-7	3,8552e-7	Q_P	-2,5593e-7	9,2605e-7	3,7543e-7
P_I	1,0000	0,999997	1,0043	Q_I	1,0000	0,99999	0,978096
P_Z	-3,6767e-7	1,19242e-6	4,7206e-7	Q_Z	-3,6767e-7	1,1924e-6	4,59712e-7
Error	1,3681e-5	1,9007e-5	1,3351e-5	Error	1,3681e-5	1,9007e-5	1,3351e-5

TABLA 1.2.: Parámetros obtenidos para el modelo de corriente constante con el modelo polinomial para un sistema de prueba

Potencia Activa				Potencia Reactiva			
	Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C
P_P	1,0041	0,9999	1,00436	Q_P	0,9768	0,99999	0,97809
P_I	1,5302e-6	-8,7831e-7	1,8744e-6	Q_I	1,4887e-6	-8,7831e-7	1,8253e-6
P_Z	-8,1907e-7	6,2397e-7	-9,6416e-7	Q_Z	-7,9685e-7	6,2397e-7	-9,3894e-7
Error	1,8387e-5	1,5874e-5	2,2404e-5	Error	1,8387e-5	1,5874e-5	2,2404e-5

TABLA 1.3.: Parámetros Obtenidos para el modelo de potencia constante con el modelo polinomial para un sistema de prueba

1.1.5.2. Modelo polinomial (Variación del factor de potencia)

Para evaluar correctamente el comportamiento del modelo polinomial ante variaciones en el factor de potencia, en primer lugar se establecieron valores de referencia adecuados para el estudio. Se tomaron los valores encontrados en [Agu06], los cuales son producto de una caracterización de la carga residencial en Argentina. Los parámetros de referencia empleados para analizar el comportamiento del modelo polinomial de carga (ZIP) ante variaciones del factor de potencia.

$P_P = 0, P_I = 0,8, P_Z = 0,2$ es decir, que la potencia activa está representada por un 80 % de corriente constante y en un 20 % de impedancia

constante.

$Q_P = 0, Q_I = 0,5, Q_Z = 0,5$ es decir, que la potencia reactiva es representada por un 50 % de la corriente constante y en un 50 % de impedancia

constante.

La dinámica es la siguiente:

1. Ajustar los parámetros del modelo de carga y el factor de potencia a analizar.
2. Hacer un barrido de tensión desde el -50 % hasta el 150 %.
3. Registrar las señales de tensión y corriente y determinar los parámetros del modelo.
4. Cambiar el factor de potencia.
5. Regresar al paso 2.

El proceso se realiza para factores de potencia que van desde 0,1 hasta 0,9, con un paso de 0,1. El modelo de carga es alimentado directamente por la fuente de tensión que sirve de alimentación al circuito de la figura 1.7, de manera que no existan factores externos que puedan modificar el comportamiento de la carga.

La siguiente tabla muestra los resultados de las simulaciones realizadas al circuito tipo prueba para la fase A, de un modelo de carga ZIP con los parámetros anteriormente mencionado.

POTENCIA ACTIVA				
FP	P_P	P_I	P_Z	Error
0,1	0,00036	0,45605	0,45163	0,0005
0,2	0,00137	0,46311	0,44516	0,0018
0,3	0,00290	0,47318	0,43236	0,0039
0,4	0,00475	0,49035	0,41635	0,0068
0,5	0,00660	0,51331	0,39488	0,0098
0,6	0,00821	0,55193	0,37364	0,0127
0,7	0,00886	0,59058	0,33980	0,0145
0,8	0,00828	0,64990	0,30414	0,0141
0,9	0,00557	0,71778	0,25726	0,0100

TABLA 1.4.: Parámetros obtenidos para la potencia activa en la fase A para un sistema de prueba

POTENCIA REACTIVA				
FP	Q_P	Q_I	Q_Z	Error
0,1	0,00039	0,50274	0,49786	0,0005
0,2	0,00151	0,51119	0,49138	0,0018
0,3	0,00322	0,52560	0,48027	0,0039
0,4	0,00530	0,54704	0,46448	0,0068
0,5	0,00742	0,57656	0,44354	0,0098
0,6	0,00910	0,61230	0,41451	0,0127
0,7	0,00997	0,66469	0,38244	0,0145
0,8	0,00916	0,71920	0,33657	0,0141
0,9	0,00615	0,79215	0,28392	0,0100

TABLA 1.5.: Parámetros obtenidos para la potencia reactiva en la fase A con el modelo polinomial para un sistema de prueba

Para la evaluación del comportamiento del modelo polinomial, se realizó una variación en el factor de potencia desde 0,1 hasta 0,9 y la determinación de sus parámetros tuvo como fin el problema de mínimos cuadrados (ver sección 1.1.4). En la tablas (1.4 y 1.5) se muestran los resultados obtenidos para la fase A del circuito de prueba realizado al modelo, donde el factor de potencia determina cual de los dos conjuntos de parámetros de potencia domina. Es decir, siendo efectiva la potencia activa en el caso del factor de potencia 0,9 (una carga altamente resistiva), sus parámetros tienen mayor relevancia, teniendo poca influencia los parámetros de la componente reactiva, de igual manera para el caso donde la representación de la carga es puramente inductiva. Este comportamiento se debe a que para cada condición de tensión a la cual es sometido el modelo, se obliga a este a mantener su factor de potencia, de manera que la razón Q/P permanece constante a lo largo de los casos. Si P y Q cambiaran de manera distinta para el mismo cambio en la tensión, el factor de potencia no se mantendría constante para todos los valores de tensión.

1.2. Modelos de fuente

A continuación se realiza una descripción de los modelos de fuentes de alimentación, los cuales se clasifican de acuerdo con la forma de estimar la impedancia de Thévenin y la forma como se encuentra conformado el sistema [Hap67][KTU94][UBP06][FLR00]. Cada uno de los modelos descritos en [AX07][BL03] utilizan técnicas sustentadas por un grupo de medidas de tensión y corriente trifásicas en la

cabecera del circuito.

Los artículos [AX07][BL03] además de considerar el grupo de medidas de tensión y corriente en la cabecera del circuito, usan procesamiento de señales y leyes básicas de circuitos eléctricos para describir el conjunto de ecuaciones necesarias. Una explicación más detallada de las ecuaciones y principales características de los modelos de fuentes de alimentación empleando medidas en la cabecera de un circuito serán presentadas posteriormente.

1.3. Modelo Thévenin para estimar parámetros utilizando medidas en estado estable

A partir del modelo trifásico mostrado en la figura 1.8 y presentado en [AX07] se determina el conjunto de ecuaciones que se deben tener en cuenta para la estimación de los parámetros.

En la estimación solo se utilizan seis grupos de medidas fasoriales de tensión, corriente y factor de potencia para cada una de las fases medidas en la cabecera del circuito. Se debe tener presente que en el proceso de estimación se considera el efecto de acoplamiento netamente inductivo y se presenta en la impedancia de Thévenin. Además, para poder aplicar el algoritmo se supone que no existen variaciones en el equivalente de Thévenin (pese a las variaciones del estado de carga) y no existen perturbaciones en el sistema.

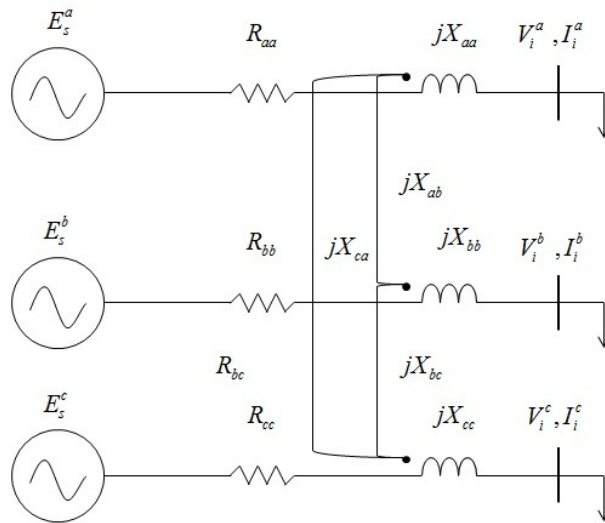


FIGURA 1.8.: Modelo trifásico con acoplamiento

El conjunto de ecuaciones asociadas al modelo de la figura 1.8 y según la ley de voltaje de Kirchhoff, será:

$$E_f = ZI_i + V_i \quad (1.14)$$

Donde

- E_f Vector columna (3x1) de tensiones de la fase A, fase B y la fase C
- i Índice que referencia el grupo de medidas realizadas en un instante de tiempo
- I_i Vector columna (3x1) de corrientes de la fase A, fase B y la fase C para el grupo de medidas i
- V_i Vector columna (3x1) de tensiones de carga de la fase A, fase B y la fase C para el grupo de medidas i
- Z Matriz (3x3) de impedancias considerando el acoplamiento mutuo entre fases

Si se considera la ecuación (1.14) en forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} E_f^a \\ E_f^b \\ E_f^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i^a \\ I_i^b \\ I_i^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_i^a \\ V_i^b \\ V_i^c \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Los valores de la impedancia propia de cada una de las fases del sistema reflejadas corresponden a:

$$Z_{aa} = R_{aa} + jX_{aa}$$

$$Z_{bb} = R_{bb} + jX_{bb}$$

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$$

R_{aa}, R_{bb}, R_{cc} Resistencias de Thévenin de la fase A, fase B y fase C

X_{aa}, X_{bb}, X_{cc} Reactancias de Thévenin de la fase A, fase B y fase C

Los valores de la impedancias mutuas asociadas a la ecuación matricial (1.15) son respectivamente:

$$Z_{ab} = jX_{ab} \tag{1.16}$$

$$Z_{bc} = jX_{bc} \tag{1.17}$$

$$Z_{ca} = jX_{ca} \tag{1.18}$$

X_{ab}, X_{bc}, X_{ca} Reactancias Thévenin mutuas entre la fase A-B, fase B-C y la fase C-A

Los parámetros a estimar son los fasores de tensión de Thévenin E_f^a , E_f^b y E_f^c en la fase A, la fase B y la fase C los cuales en magnitud se consideran constantes. Además de los valores constantes para la impedancia de Thévenin con su respectivo acoplamiento.

Z_{aa}	Z_{ab}	Z_{ac}
Z_{ba}	Z_{bb}	Z_{bc}
Z_{ca}	Z_{cb}	Z_{cc}

TABLA 1.6.: Composición de la impedancia de Thévenin del sistema

Por ejemplo si conocemos V_i^a, I_i^a del circuito monofásico de la figura 1.9, es posible conocer los valores de R_{aa}, X_{aa} y E_s^a .

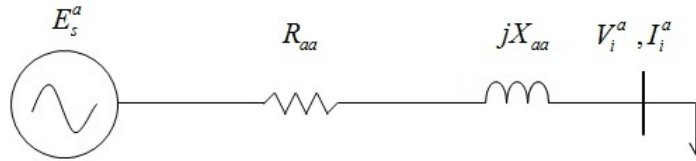


FIGURA 1.9.: Circuito monofásico

$$Z_{aa} = R_{aa} + jX_{aa}$$

Supongamos que el caso de la figura 1.9 los fasores de tensión y corriente V_i^a, I_i^a medidos en la cabecera corresponden a:

Forma Polar			Forma Rectangular		
i	$V^a [V]$	$I^a [A]$	i	$V^a [V]$	$I^a [A]$
1	$92,0358 \angle 4,3987$	$5,8208 \angle -67,1663$	1	$91,7647 + j7,0588$	$2,2588 - j5,3647$
2	$37,2104 \angle 7,12502$	$16,641 \angle -56,3099$	2	$36,9231 + j4,6153$	$9,2307 - j13,8462$

TABLA 1.7.: Valores de tensión y corriente en la cabecera

Según la LVK para cada estado de tiempo se tiene

$$E_f = (R_{aa} + jX_{aa}) \times (5,8208 \angle -67,1663) + (92,0358 \angle -4,3987)$$

$$E_f = (R_{aa} + jX_{aa}) \times (16,641 \angle -56,3099) + 37,2104 \angle 7,12502$$

De las partes reales se obtiene:

$$|E_f| \cos(\theta) = 2,2588R_{aa} + 5,3647X_{aa} + 91,7647 \quad (1.19)$$

$$|E_f| \cos(\theta) = 9,2307R_{aa} + 13,8462X_{aa} + 36,9231 \quad (1.20)$$

De las partes imaginarias se obtiene:

$$|E_f| \sen(\theta) = 2,2588X_{aa} - 5,3647R_{aa} + j7,0588 \quad (1.21)$$

$$|E_f| \text{sen}(\theta) = 9,2307X_{aa} - 13,8462R_{aa} + j4,6153 \quad (1.22)$$

De la solución a un sistema no lineal de ecuaciones 1.19 a la 1.22 se obtienen los siguientes resultados:

E_f [V]	θ°	R_{aa} [Ω]	X_{aa} [Ω]
120	0	3	4

TABLA 1.8.: Parámetros obtenidos del circuito monofásico

A continuación se verán algunos casos particulares del sistema matricial (1.15).

1.3.1. Caso monofásico

Para el caso monofásico y según la ecuación representada matricialmente (1.15) del modelo general es necesario tener en cuenta que solamente se considera la fase A del sistema, es decir, la representación matricial se reduce a:

$$E_f^a = Z_{aa}I_i^a + V_i^a \quad (1.23)$$

1.3.2. Caso bifásico

Dentro de la consideración que se deben tener en cuenta cuando se tiene un caso bifásico es el de considerar que la fase A del sistema no existe y que, según esto, el conjunto de ecuaciones representadas en forma matricial se reduce a la existencia tan solo de la fase B y la fase C del sistema, es decir, la representación matricial:

$$\begin{bmatrix} E_f^b \\ E_f^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i^b \\ I_i^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_i^b \\ V_i^c \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

1.3.3. Caso trifásico desacoplado

Para el caso trifásico desacoplado, se determina que los valores de las impedancias mutuas en las ecuaciones (1.17), (1.16) y (1.18) son iguales a cero, dejando solo los valores de las impedancias propias en cada una de las fases del sistema.

1.4. Modelo de fuentes para estimar impedancia Thévenin utilizando procesamiento de señales

Se considera un extensión del algoritmo presentado en [BL03] donde se desarrolla únicamente una metodología para la estimación de la impedancia de Thévenin. Esta se toma como datos de entrada para el problema inverso un registro de las señales de tensión y corriente eficaces en la cabecera del circuito durante un intervalo de tiempo específico, en el cual la carga varía a través de todo este intervalo.

1.4.1. Presentación del modelo

A partir del modelo de la figura 1.8, y según el artículo [BL03] se puede utilizar la correlación cruzada entre los cambios en la admitancia de carga y los cambios en la tensión de carga y los cambios en la corriente de carga de cada una de las fases para determinar la impedancia propia de Thévenin de cada una de las fases. En este caso no se tiene manera de determinar las componentes mutuas del sistema, por lo tanto, de encontrarse una matriz Z_{th} que tenga las características de una línea o tenga una representación desacoplada en el dominio de las componentes simétricas, es posible aplicar el mismo algoritmo para hallar la matriz de impedancias de Thévenin de secuencia positiva, negativa y cero (Z_{th012}), de manera que tras realizar la transformación de Fortescue adecuada se pueda obtener una matriz Z_{th} que tenga en cuenta acoplamiento entre fases.

1.4.2. Obtención de los datos

El proceso para obtención de los datos está ligado a conocer las señales discretas de tensión, corriente y factor de potencia en la cabecera del circuito expuestas en el modelo de la figura 1.8 en cada una de las fases del sistema y para tres estados de carga distintos. Se encontraran los valores de cada una de las impedancias propias del sistema de la tabla 1.6 con la consideración respectiva en cuanto a las impedancias mutuas se refiere.

1.4.3. Estimación de la impedancia de Thévenin

En la figura 1.8 se tiene un sistema lineal y la impedancia de carga tiene componentes fijas tanto reales como imaginarias y no posee cambios impredecibles en ella. Esto debido a que los cambios en la admitancia de carga pueden ocasionar cambios en las corrientes y tensiones del sistema como se manifiesta en [BL03]. Según la ley de voltajes de kirchhoff (ver ecuación 1.14) y considerando cambios en la tensión E_f , cambios en la corriente de I_i y cambios en la tensión V_i , la ecuación (1.23) se convierte en:

$$(E_f + \Delta E_f) = Z(I_i + \Delta I_i) + (V_i + \Delta V_i) \quad (1.25)$$

Realizando la substracción entre 1.25 y 1.14 se obtiene

$$\Delta E_f = Z\Delta I_i + \Delta V_i \quad (1.26)$$

Multiplicando la expresión anterior por los cambios en la admitancia de carga ΔY

$$\Delta E_f \Delta Y = Z\Delta I_i \Delta Y + \Delta V_i \Delta Y \quad (1.27)$$

Despejando el valor de la impedancia de Thévenin

$$Z = \frac{E \{ \Delta E_f \Delta Y \} - E \{ \Delta V_i \Delta Y \}}{E \{ \Delta I_i \Delta Y \}} \quad (1.28)$$

$E \{ \Delta E_f \Delta Y \}$ Esperanza entre los cambios en la tensión de la fuente y los cambios en la admitancia de la cabecera del circuito

$E \{ \Delta V_i \Delta Y \}$ Esperanza entre los cambios en la tensión y los cambios en la admitancia de la cabecera del circuito

$E \{ \Delta I_i \Delta Y \}$ Esperanza entre los cambios en la corriente y los cambios en la admitancia de la cabecera del circuito

Debido a que no se consideran los cambios en la tensión de la fuente como se manifiesta en [BL03], es decir, se considera sistema con Thévenin constante en el cual valor de $\Delta E_f = 0$ se reduce la expresión anterior a considerar

$$Z = \frac{-E \{ \Delta V_i \Delta Y \}}{E \{ \Delta I_i \Delta Y \}} \quad (1.29)$$

Esta última expresión (1.29) implica que se deben considerar diferentes tipos de medidas, para distintos instantes de tiempo tanto para los cambios en la tensión de la cabecera del circuito, como para los cambios en la corriente de la cabecera del circuito. Cada grupo de medidas viene identificado por el subíndice i .

Supongamos que tenemos un circuito monofásico como el que se muestra en la figura 1.10, en el cual se desea estimar el valor impedancia ($R_a + jX_a$), conocidas la fuente de generación ($E_s^a = 1,5 pu$) y las señales de tensión y corriente de la cabecera (V_i, I_i) en por unidad.

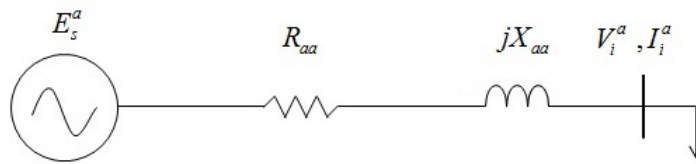


FIGURA 1.10.: Circuito monofásico conocidas las señales de tensión y corriente en la cabecera

Las señales de tensión y corriente de la figura 1.11, tienen un tiempo de muestreo de $t_m = 0,02 seg$ y un tiempo total de $t = 100 seg$. Además, es posible conocer la admitancia en la cabecera como:

$$Y_i = \frac{I_i}{V_i} \quad (1.30)$$

Luego, la admitancia vista desde la cabecera corresponde a lo mostrado en la figura 1.12.

Como en la ecuación (1.29) se necesita conocer los valores de las diferencias, se hace necesario calcular las diferencias para la tensión, corriente y admitancia desde la cabecera del circuito de la figura 1.10. Las diferencias son calculadas como la diferencia entre el valor siguiente menos el anterior a lo largo de todo el grupo de medidas, es decir, por ejemplo $V(t = 0) = 1,4835 + j0,01892$ y $V(t = 0,02) = 1,4874 + j0,0127$ el $\Delta V = V(t = 0,02) - V(t = 0)$. Este mismo procedimiento aplica para el cálculo de las diferencias en la admitancia y en la corriente de la cabecera del circuito. A continuación se anexa el código fuente a partir del cual se obtienen las gráficas de la figura 1.13 a la 1.15, y que corresponde a las diferencias de tensión, corriente y admitancia en la cabecera del circuito.

```
for k=2:501
```

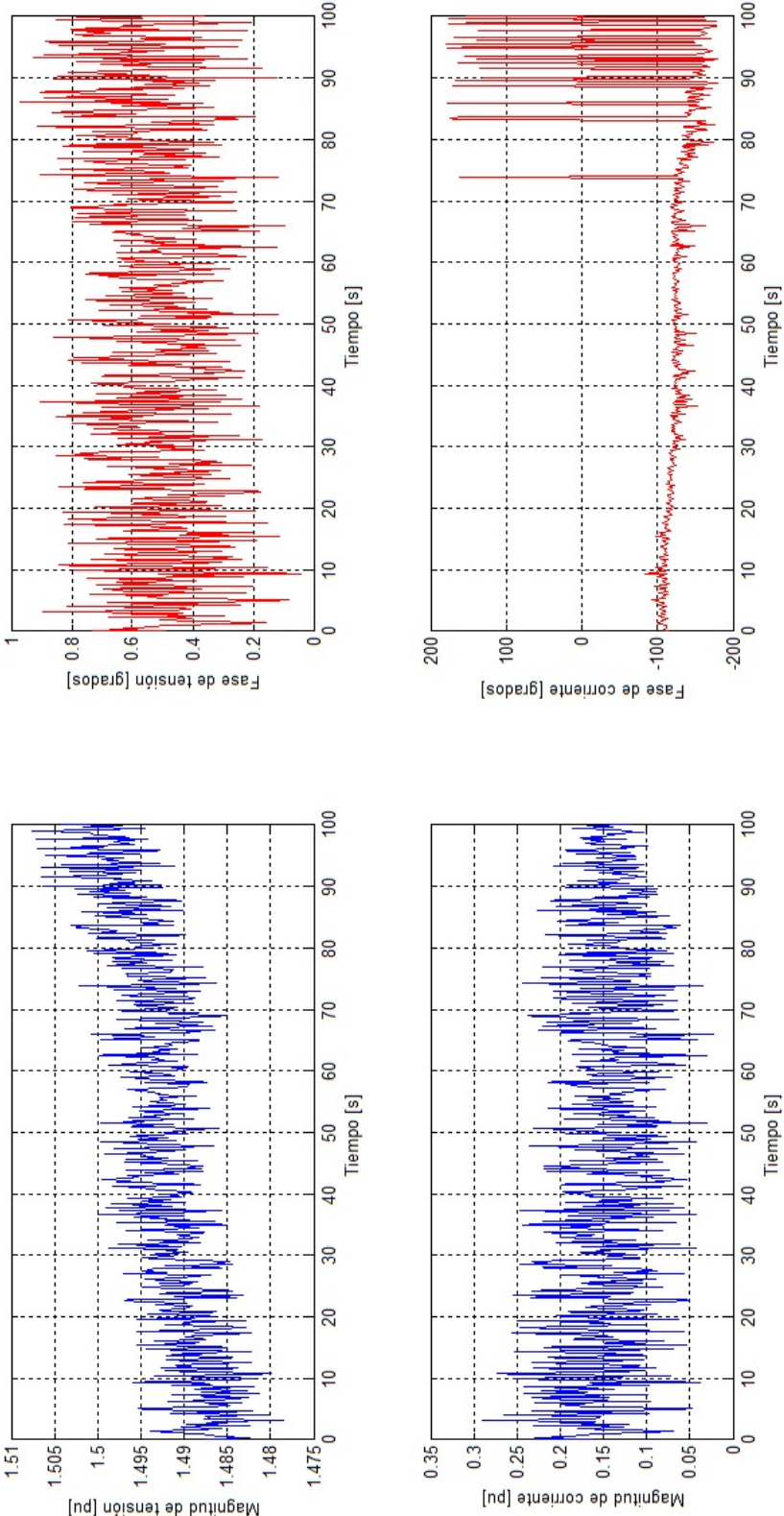


FIGURA 1.11.: Señales de tensión y corriente en la cabecera del circuito

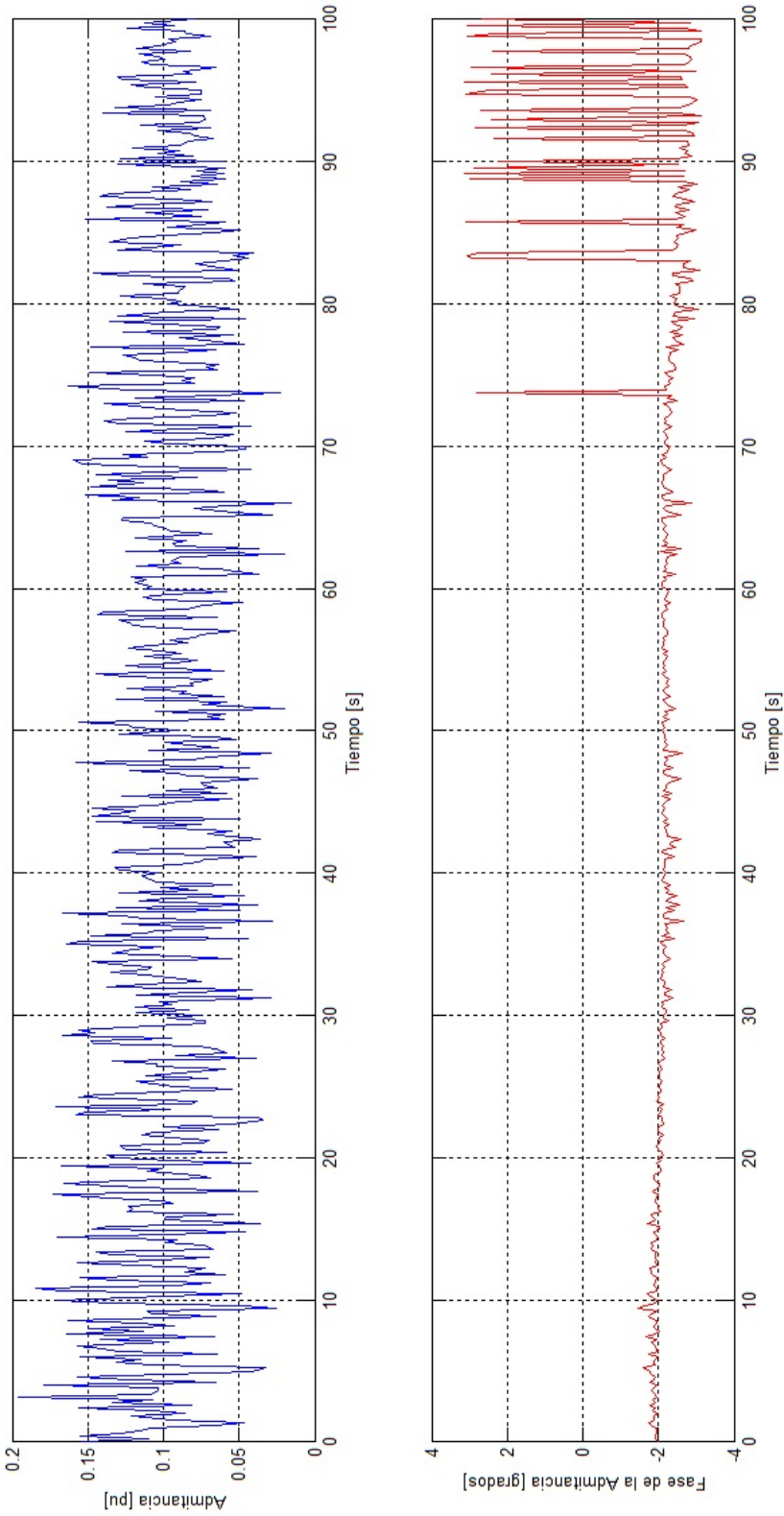


FIGURA 1.12.: Admitancia vista desde la cabecera

```
DNV(k)=V(k)-V(k-1);
DNI(k)=I(k)-I(k-1);
DNY(k)=Y(k)-Y(k-1);

end
DNVRA=real(DNV(1,1:500));
DNVIA=imag(DNV(1,1:500));
figure();
subplot(2,1,1);
plot(0:0.2:99.8,DNVRA);
ylabel('Diferencia de componente real de V [pu]');
xlabel('Tiempo [s]');
grid on;
subplot(2,1,2); plot(0:0.2:99.8,DNVIA,'r');
ylabel('Diferencia de componente imag de V [pu]');
xlabel('Tiempo [s]');
grid on;
DNIRA=real(DNI(1,1:500));
DNIIA=imag(DNI(1,1:500));
figure();
subplot(2,1,1);
plot(0:0.2:99.8,DNIRA);
ylabel('Diferencia de componente real de I [pu]');
xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
subplot(2,1,2);
plot(0:0.2:99.8,DNIIA,'r');
ylabel('Diferencia de componente imag de I [pu]');
xlabel('Tiempo [s]'); grid on
```

Con la obtención de las diferencias de las figuras 1.13 a la 1.15, la ecuación (1.29) nos indica que para el cálculo de la impedancia del circuito de la figura 1.10 es necesario calcular la esperanza entre las diferencias de tensión y las diferencias de la admitancia de la cabecera y la esperanza entre las diferencias de corriente y las diferencias de admitancia de carga. Es por esto que con la ayuda del siguiente código, para posteriormente realizar el cociente como lo expresa la ecuación (1.29). Por tal motivo, y con la ayuda del siguiente código es posible calcular el valor de la impedancia o

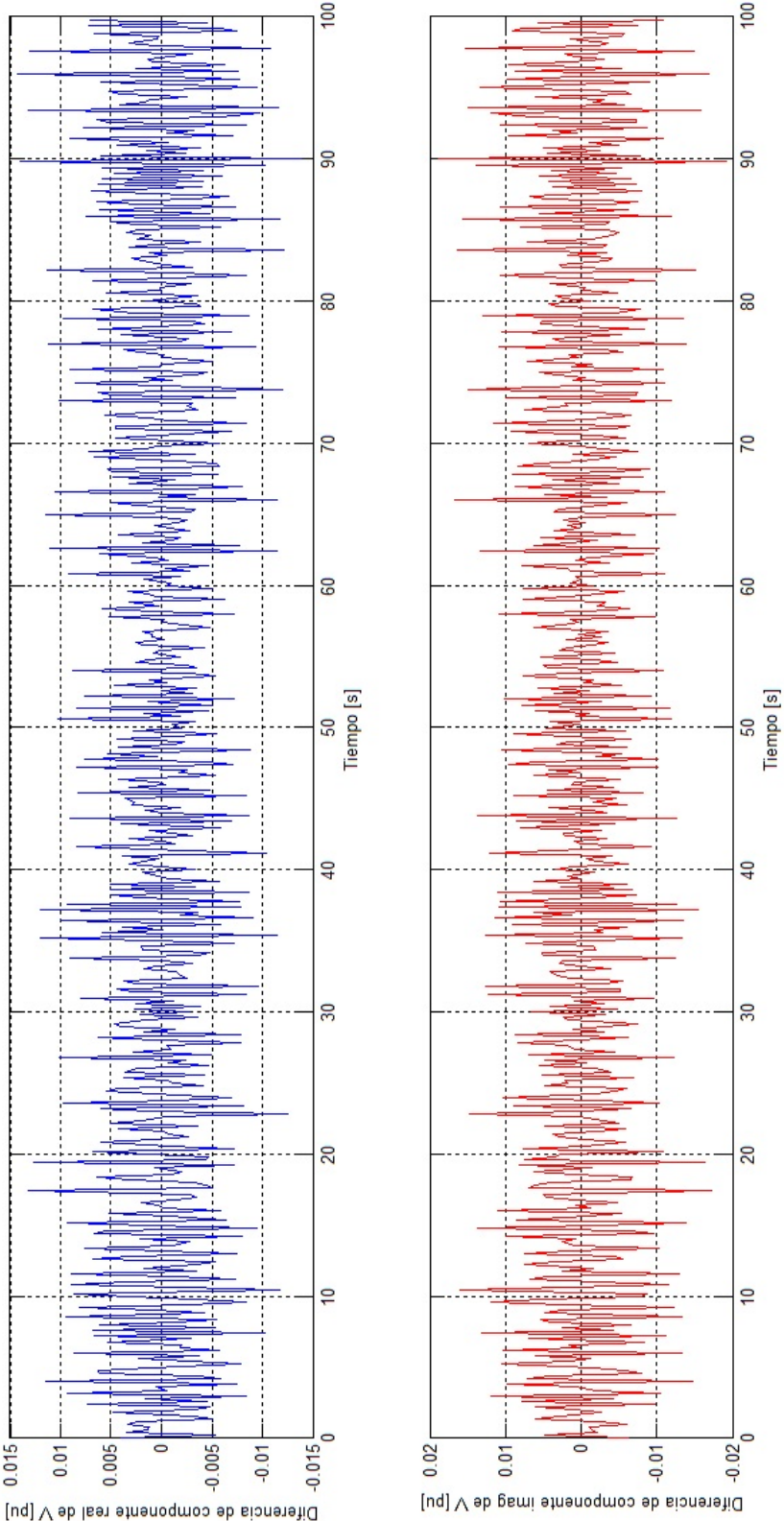


FIGURA 1.13.: Diferencias en la tensión de la cabecera del circuito

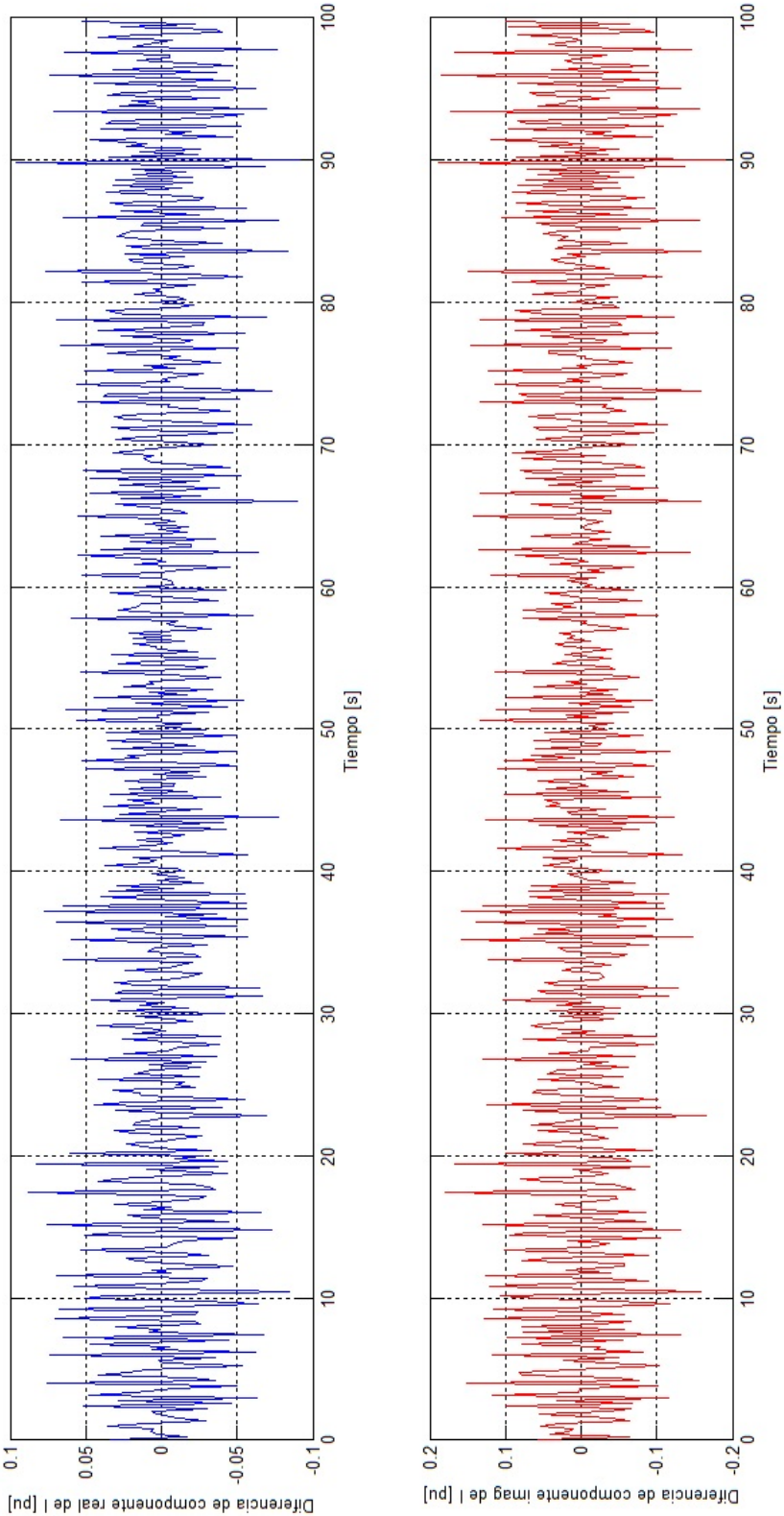


FIGURA 1.14.: Diferencias en la corriente de la cabecera del circuito

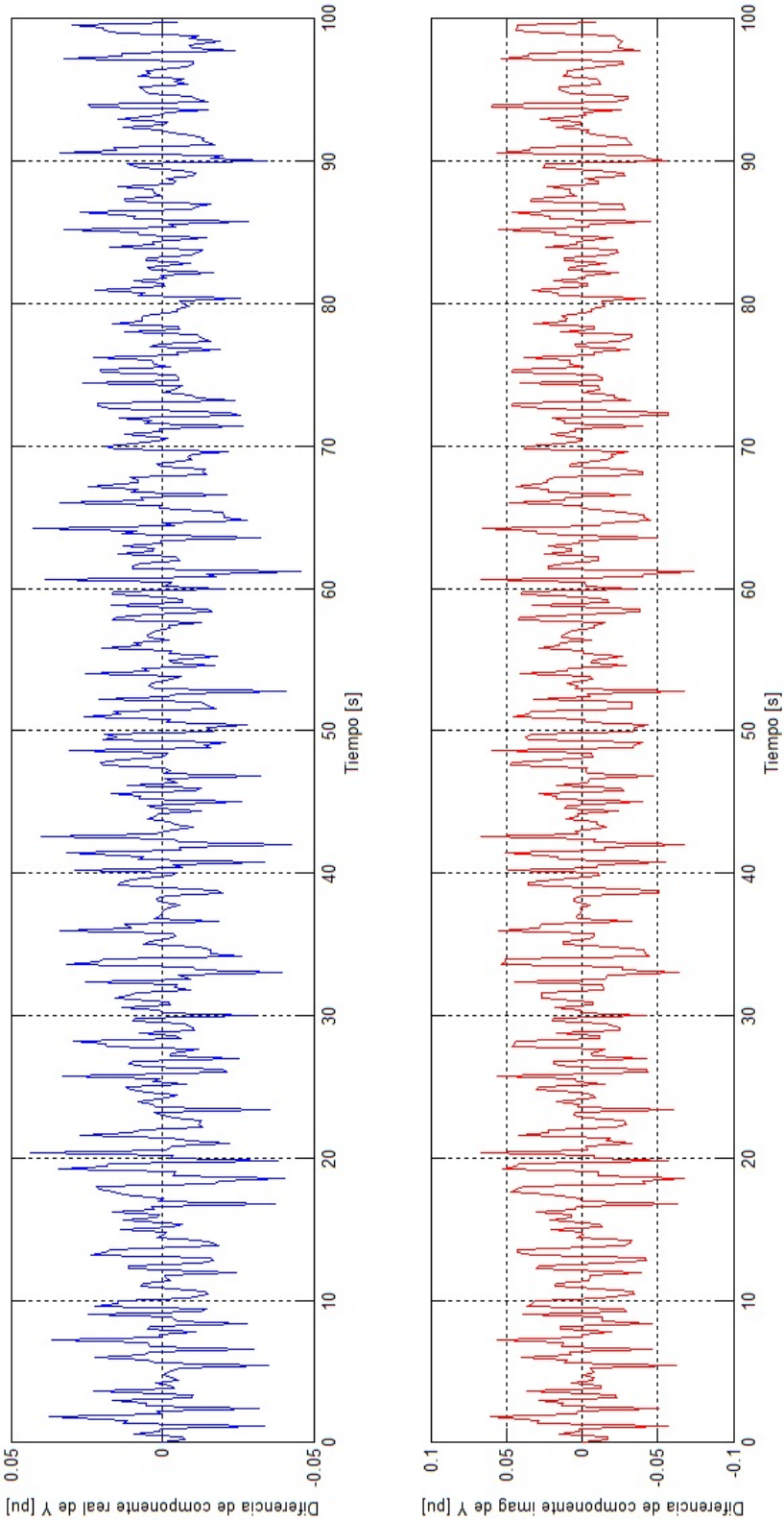


FIGURA 1.15.: Diferencias en la admitancia de la cabecera del circuito

parámetro.

$$\begin{aligned}DVYA &= [DNV(1, 1:500)' , DNY(1, 1:500)'] ; \\ CVYA &= \text{cov}(DVYA) ; \\ DIYA &= [DNI(1, 1:500)' , DNY(1, 1:500)'] ; \\ CIYA &= \text{cov}(DIYA) ; \\ ZA &= -CVYA(1, 2)/CIYA(1, 2)\end{aligned}$$

Luego entonces, el valor de la impedancia del circuito de la figura 1.10 en pu es:

$$Z = 0,04253 + j0,08985 \text{ pu} \quad (1.31)$$

Aunque la ecuación (1.29) aplica únicamente para el caso monofásico, es posible llegar a estimar los valores de las impedancias propias del sistema para cada una de las fases, al aplicar el algoritmo tres veces, una vez por cada una de las fases que se desee analizar, para el caso de un sistema de distribución trifásico trifilar. Entonces, se debe estar seguro de que el modelo desacoplado de la matriz Z_{th} es el que mejor se ajusta para el modelo analizar.

2. Validación y resultados de los modelos de fuentes de alimentación y cargas

La topología del circuito de la figura 2.1 es utilizada para realizar el proceso de validación de los modelos de fuentes de alimentación y cargas. Este circuito alimenta una carga predominantemente residencial al final del circuito; el resto de cargas son del tipo industrial. Tiene un tramo desenergizado, el cual sirve como respaldo para energizar algunas de las cargas en caso de falla. El circuito está situado en un área que es predominantemente plana, sólo con una serie de zonas montañosas. Consta de 332 tramos de líneas trifásicas trifilares con conductor 266.8 ACSR desnudo.

El circuito tiene cuatro tramos de red compacta con conductor de aluminio con cubierta aislante y dos capas internas de polietileno calibre 266, y un pequeño tramo de 250 metros de red subterránea con conductor trifásico calibre 2/0 XLPE a la salida de la subestación. El circuito además cuenta con las siguientes cargas:

- Carga trifásica conectada en delta a los 14 km del circuito con potencia $S=161,732$ kVA y factor de potencia $F_p=0,91$.
- Carga trifásica conectada en delta a los 14 km del circuito con potencia $S=664,278$ kVA y factor de potencia $F_p=0,91$.
- Carga trifásica conectada en delta a los 16 km del circuito (Cruce) con potencia $S=486,276$ kVA y factor de potencia $F_p=0,7$.
- Carga trifásica conectada en delta 2 km antes del final (ramal izquierdo, ver Figura 2.1) del circuito con potencia $S=142,898$ kVA y factor de potencia $F_p=0,8$.
- Carga trifásica conectada en delta al final del circuito (ramal izquierdo, ver Figura 2.1) con potencia $S=122,587$ kVA y factor de potencia $F_p=0,91$.

- Carga trifásica conectada en delta al final del circuito (ramal izquierdo, ver Figura 2.1) con potencia $S= 131,846$ kVA y factor de potencia $F_p=0,91$.
- Carga trifásica conectada en delta al final del circuito (ramal izquierdo, ver Figura 2.1) con potencia $S= 5000,023$ kVA y factor de potencia $F_p=0,95$.

La topología del circuito se puede observar en la Figura 2.1.

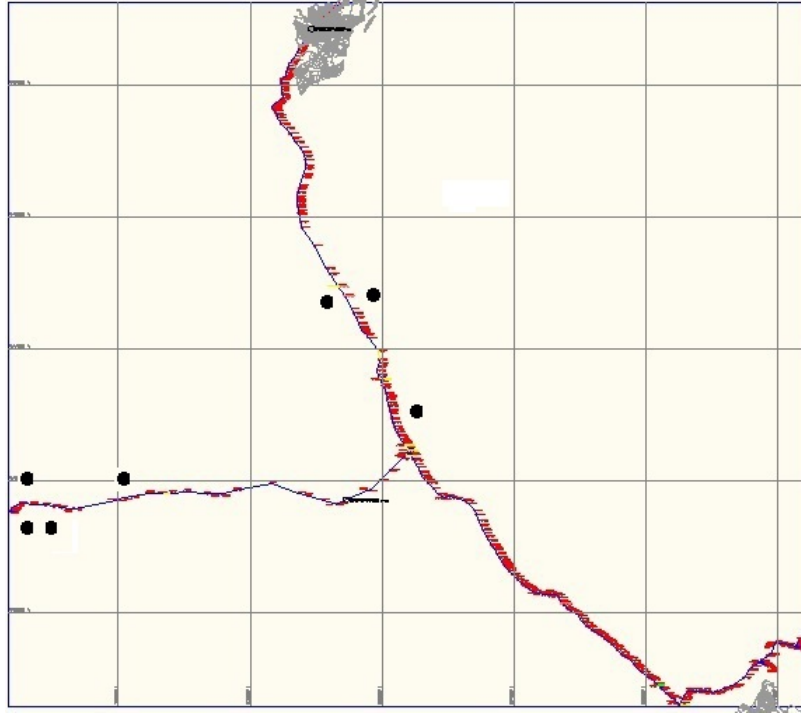


FIGURA 2.1.: Circuito de distribución rural

Con la ayuda de Matlab y los algoritmos expuestos en el anexo A, se obtienen los resultados del proceso de validación de los modelos de fuentes de alimentación.

2.1. Modelos de Carga

En el capítulo anterior se describieron los modelos de carga que son la base de estudio para la estimación de los parámetros representativos de los modelos matemáticos del sistema físico a evaluar. El sistema físico es representado a través de un sistema de distribución prueba, al cual se le realizaron diversas simulaciones para validar los modelos seleccionados respecto a los datos obtenidos en la cabecera del circuito y así determinar la magnitud del error y las restricciones a tener en cuenta.

2.1.1. Validación de los modelos de carga

Una vez obtenido los parámetros característicos representativos de cada modelo de carga estudiado, es decir, para el modelo polinomial ZIP ($P_Z, Q_Z, P_I, Q_I, P_P, Q_P$) y para el modelo exponencial (K, np, nq), se validarán por su rendimiento esperado, esto se hará comprobando la calidad del modelo con base en los datos utilizados. El desempeño del modelo de carga estudiado se obtiene mediante la comparación de las salidas de los modelos de carga, es decir, la comparación de la potencia (activa o reactiva) medida y simulada, siendo esta última calculada con los parámetros obtenidos respectivos del modelo que se encuentre en estudio. La comparación respectiva se realiza mediante la determinación del error relativo indicado en el capítulo 1.

2.1.2. Sistema distribución

El circuito de prueba de la figura 2.1 es la referencia para el desarrollo del presente proyecto. El proceso de validación para los modelos de cargas se realiza utilizando los datos de cargas y variando desde su cabecera los valores de tensión en el rango del -50% al 150% de la tensión nominal de la ecuación 1.7.

2.1.3. Estudio del modelo polinomial

La tabla (2.1) muestra los parámetros obtenidos para el modelo polinomial

2.1.3.1. Modelo polinomial ZIP

Las siguientes tablas muestran los parámetros obtenidos al realizar las simulaciones pertinentes para el estudio del modelo polinomial ZIP para la potencia activa y reactiva en la fase A.

Potencia Activa									
	Potencia Constante			Corriente Constante			Impedancia Constante		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
P_p	1,4435	1,5004	1,05019	0,0090	0,00351	0,00045	-4,1610e-8	-2,3114e-8	-1,60918e-8
P_l	-0,6716	-0,7942	0,05503	0,99963	1,01023	1,0107	9,3611e-8	4,5819e-8	4,3406e-8
P_z	0,2407	0,3036	-0,0781	-0,0013	-0,00635	-0,0074	0,99999	0,99999	0,99999
<i>error</i>	4,6674	4,6141	2,7888	0,0767	0,0305	0,0077	1,0753e-6	7,6673e-7	9,8419e-7
Potencia Reactiva									
	Potencia Constante			Corriente Constante			Impedancia Constante		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
P_p	1,3169	1,3255	0,9898	0,0084952	0,003309	0,00044	-4,1610e-8	-2,3115e-8	-1,6091e-8
P_l	-0,61273	-0,7016	0,0518	0,940965	0,95093	0,98163	9,3611e-8	4,5819e-8	4,3406e-8
P_z	0,2195	0,2682	-0,0736	-0,001301	-0,0059	-0,0071	0,99999	0,99999	0,99999
<i>error</i>	4,6674	4,6141	2,7888	0,0767	0,0305	0,0077	1,0753e-6	7,6673e-7	9,8419e-7

CUADRO 2.1.: Parámetros de potencia activa y reactiva obtenidas para el modelo polinomial del sistema tipo prueba basado en un sistema de distribución

POTENCIA ACTIVA				
FP	P_P	P_I	P_Z	<i>error</i>
0,1	0,00084	0,4541	0,4013	0,0041
0,2	0,0023	0,4924	0,4228	0,0030
0,3	0,0041	0,4874	0,3975	0,0072
0,4	0,0061	0,5094	0,3843	0,0149
0,5	0,0075	0,5455	0,3689	0,0266
0,6	0,0068	0,5825	0,3386	0,0397
0,7	0,0019	0,6394	0,3023	0,0428
0,8	-0,0039	0,7048	0,2634	0,0270
0,9	0,0084	0,7290	0,2443	0,0462

CUADRO 2.2.: Parámetros obtenidos para la potencia activa en la fase A para un sistema de distribución real

POTENCIA REACTIVA				
FP	Q_P	Q_I	Q_Z	<i>error</i>
0,1	0,0009	0,5316	0,4699	0,0041
0,2	0,0023	0,5391	0,4629	0,0030
0,3	0,0046	0,5556	0,4531	0,0072
0,4	0,0069	0,5792	0,4370	0,0149
0,5	0,0084	0,6096	0,4122	0,0266
0,6	0,0077	0,6577	0,3823	0,0397
0,7	0,0022	0,7195	0,3402	0,0428
0,8	-0,0044	0,7813	0,2919	0,0270
0,9	0,0092	0,8058	0,2700	0,0462

CUADRO 2.3.: Parámetros obtenidos para la potencia reactiva en la fase A para un sistema de distribución real

El comportamiento del modelo polinomial para el circuito de distribución real presenta la misma dinámica realizada para el circuito de la figura 1.7, ante variaciones del factor de potencia.

En el estudio realizado se obtuvieron los resultados mostrados en las tablas (2.1 hasta la 2.3), para impedancia constante, corriente constante, potencia constante y polinomial ZIP. En el estudio de este circuito se tuvo en cuenta el efecto de la línea para la obtención de los parámetros, y se observó según los resultados obtenidos con el circuito de la figura 1.7, el efecto de la línea no altera o no desvía en una porción considerable el comportamiento de los parámetros que representan las cargas en estado estable. Esto equivale a que el margen de error varía, pero se mantiene dentro

del rango establecido. La eficiencia del modelo se determina con la equivalencia del error, procedimiento que tuvo las mismas características y determinación que en el caso del circuito de la figura 1.7.

Para el modelo polinomial ZIP, se realizó una variación en el factor de potencia de la carga, ya que los parámetros para representar el comportamiento de la carga tienen dependencia en gran parte del factor de potencia representativo.

2.1.4. Estudio del modelo exponencial

El estudio del modelo exponencial se realizó teniendo en cuenta las características del circuito de distribución real, y se tuvieron en cuenta las mismas condiciones y los análisis que se realizaron al circuito de la figura 1.7.

2.1.4.1. Modelo polinomial ZIP

La siguiente tabla muestra los parámetros obtenidos al realizar las simulaciones pertinentes para el estudio del modelo polinomial ZIP.

POTENCIA ACTIVA			
FP	K	n_p	<i>error</i>
0,1	0,7201	1,4381	17,2968
0,2	0,8445	1,4285	9,5236
0,3	0,7856	1,4125	13,1295
0,4	0,8079	1,3905	11,7448
0,5	0,8542	1,3632	8,9163
0,6	0,8656	1,3314	8,2008
0,7	0,8973	1,2963	6,2719
0,8	0,9393	1,2586	3,7885
0,9	0,9796	1,2194	1,6383

CUADRO 2.5.: Parámetros obtenidos para la potencia activa en la fase A con el modelo exponencial para un sistema de distribución

Potencia Activa									
	Potencia Constante			Corriente Constante			Impedancia Constante		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
n_p	-0,1712	-0,1701	-0,0458	0,9887	0,9903	0,9927	2,0000	2,0000	1,9999
K	1,0573	1,0662	1,0287	1,0178	1,0168	1,0079	1,0000	1,0000	0,9999
<i>error</i>	5,6541	6,1011	3,9039	1,0064	0,9522	0,4582	1,3893e-6	9,6862e-7	1,8334e-6
Potencia Reactiva									
	Potencia Constante			Corriente Constante			Impedancia Constante		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
n_q	-0,1712	-0,1701	-0,0458	0,9887	0,9903	0,9927	2,0000	2,0000	1,9999
K	0,8557	0,8015	0,8978	0,8855	0,8846	0,9423	1,0000	1,0000	0,9999
<i>error</i>	9,7655	12,8588	6,9645	6,6505	6,6975	3,2979	1,3893e-6	9,6862e-7	1,8334e-6

CUADRO 2.4.: Parámetros de las potencias activa y reactiva obtenidas para modelo exponencial basado en un sistema de distribución

POTENCIA REACTIVA			
FP	K	n_q	error
0,1	1,0355	1,4381	2,0102
0,2	1,0405	1,4285	2,2495
0,3	1,0619	1,4125	3,3109
0,4	1,0862	1,3905	3,3109
0,5	1,1031	1,3632	5,4865
0,6	1,1447	1,3314	7,7067
0,7	1,1774	1,2963	9,4557
0,8	1,1908	1,2586	10,1842
0,9	1,2335	1,2194	12,4053

CUADRO 2.6.: Parámetros obtenidos para la potencia reactiva en la fase A con el modelo exponencial para un sistema de distribución

Teniendo en cuenta el modelo exponencial para el sistema de distribución de la figura 2.1, se obtuvieron los resultados mostrados en las tablas (2.4 hasta la 2.5), con un eficiente comportamiento para la representación de las cargas en estado estable, se analiza como un resultado eficiente a pesar que sus errores aumentan en relación con los obtenidos en el modelo polinomial, esto se debe a que como ya se mencionó anteriormente que el circuito de trabajo tiene como referencia un modelo polinomial y en este caso se está determinando o ajustando a un modelo exponencial .

2.1.5. Determinación de los parámetros de carga para el modelo polinomial en condición de falla

A continuación se realizó un estudio con el modelo polinomial para las diferentes características de carga teniendo en cuenta un sistema en estado de falla. En este caso la determinación del modelo de carga se reduce a cuantificar el aporte de la corriente de falla para el circuito sin carga, para luego restárselo a la corriente de falla observada en los registros, la cual es una suma entre la corriente de falla y la corriente de carga. Evidentemente, este tipo de metodología no funciona si la corriente de carga es comparable con la corriente de cortocircuito. No obstante, para una relación 10 : 1 entre la corriente de falla y la corriente nominal del circuito se pueden esperar buenos resultados.

El estudio realizado para la determinación de los parámetros de carga, tomando como ejemplo una falla bifásica a tierra, se trabajó mediante simulaciones al circuito

de distribución, para la obtención de los valores de la carga se basó en la eliminación de la energía producida por la falla, es decir, se realizaron tres simulaciones en diferentes condiciones al circuito, la primera en condición de estado estable 2.2, la segunda en condición de falla 2.4 y la tercera en condición de falla sin carga 2.4. Esto con el fin de determinar los valores de corriente de carga de posfalla del circuito, restandole los valores de falla sin carga a los valores en condiciones de falla, y tomando como base los valores nominales en condición de estado estable.

$$i_c = i_f - i_{fsc}$$

Siendo:

- i_f La corriente en condición fallado
- i_{fsc} La corriente en condición de falla sin carga
- i_c La corriente de carga

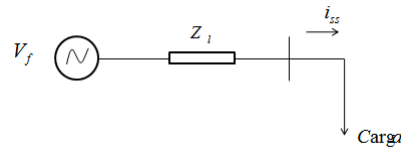


FIGURA 2.2.: Circuito en estado estable

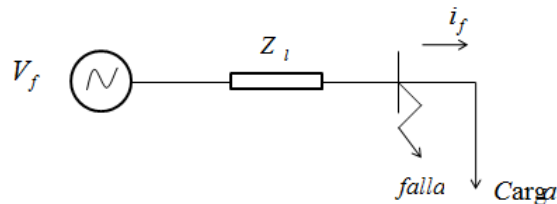


FIGURA 2.3.: Circuito en condición de falla

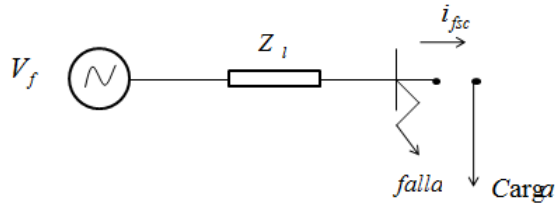


FIGURA 2.4.: Circuito en condición de falla sin carga

A continuación se muestran los resultados de los parámetros obtenidos para los diferentes tipos característicos de modelos de carga, mediante el estudio anteriormente mencionado.

2.1.5.1. Impedancia constante

Los parámetros obtenidos en la tabla 2.7, se obtuvieron mediante el método planteado en el inicio del capítulo 2. A continuación se representa gráficamente el procedimiento secuencial que se realizó para obtener la corriente de carga en un sistema de distribución en condición de falla para el modelo de impedancia constante, así como el comportamiento de esta después de ocurrida la falla.

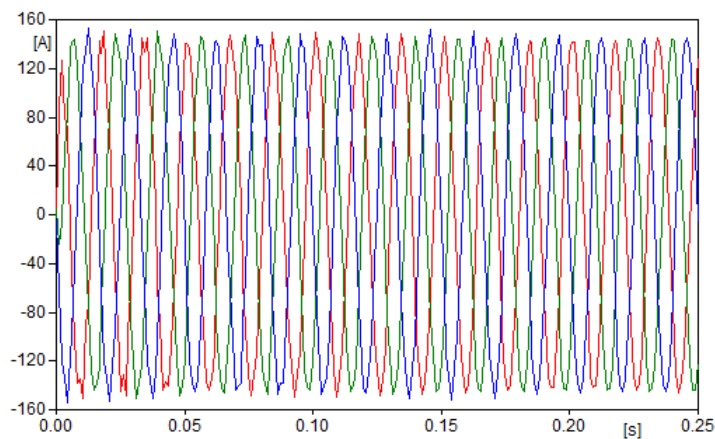


FIGURA 2.5.: Corriente en estado estable para el modelo impedancia constante

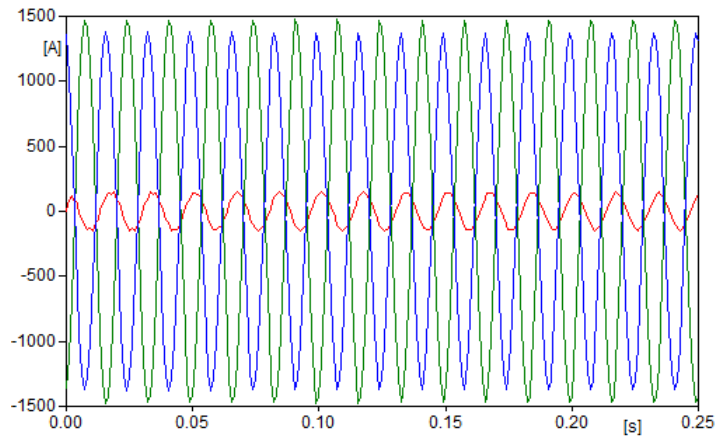


FIGURA 2.6.: Corriente en estado de falla bifásica BC para el modelo impedancia constante

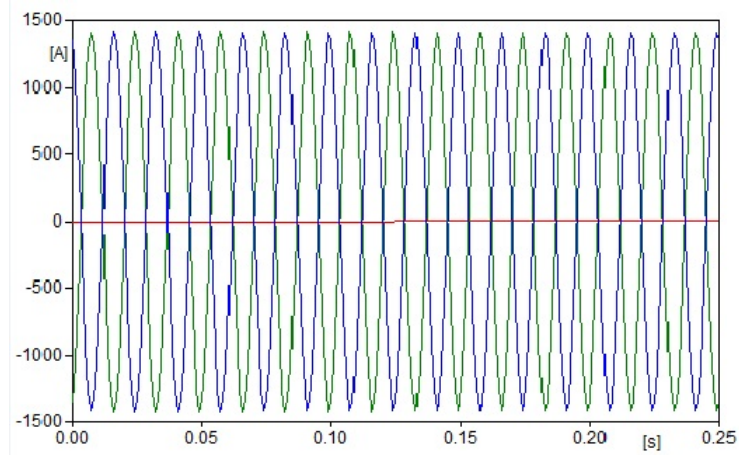


FIGURA 2.7.: Corriente en estado de falla bifásica BC sin carga para el modelo impedancia constante

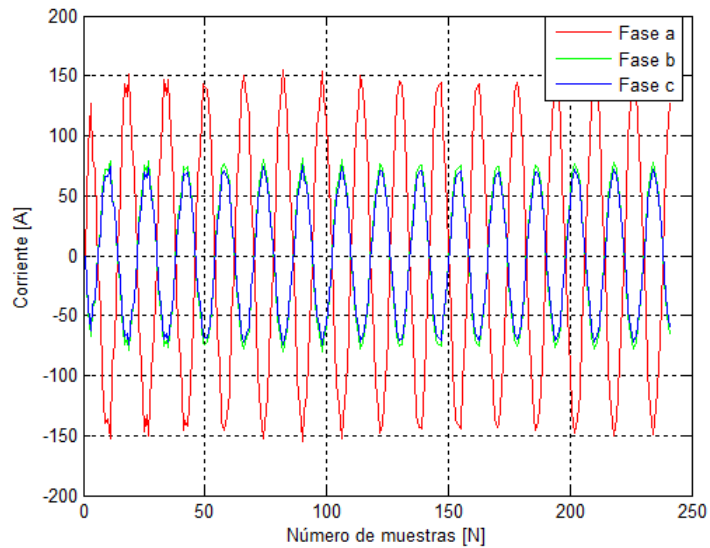


FIGURA 2.8.: Corriente en la carga para el modelo impedancia constante

La gráfica 2.8, representa la corriente de carga obtenida, con la que se calcularon los parámetros mostrados en la siguiente tabla.

	Potencia Activa			Potencia Reactiva		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
P_p	2,2379e-8	-3,8756e-8	-7,8521e-8	2,1720e-8	-6,9339e-7	-1,4579e-7
P_l	-5,7584e-8	8,8775e-8	2,1092e-7	-5,5888e-8	1,5883e-6	3,9161e-7
P_z	1,0143	0,0814	0,4205	0,9844	1,4573	0,7807
<i>error</i>	1,1319e-6	1,6108e-5	1,3172e-5	1,1319e-6	1,6108e-5	1,3172e-5

CUADRO 2.7.: Parámetros de carga para el modelo de carga impedancia constante

2.1.5.2. Corriente constante

Como se mostró anteriormente, para el estudio de los modelos en caso de presentar una perturbación, se realizó un procedimiento secuencial con que se determinó la corriente de carga después de ocurrida una perturbación, a continuación se muestran las gráficas obtenidas de este estudio para el modelo de corriente constante, e igualmente se puede visualizar el comportamiento de las cargas después de ocurrida una perturbación. De igual manera se determinaron los parámetros presentados en la tabla 2.8, que representan el comportamiento de las cargas.

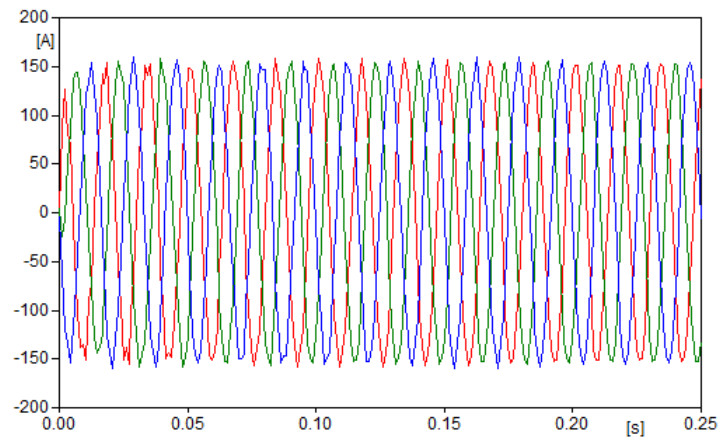


FIGURA 2.9.: Corriente en estado estable para el modelo corriente constante

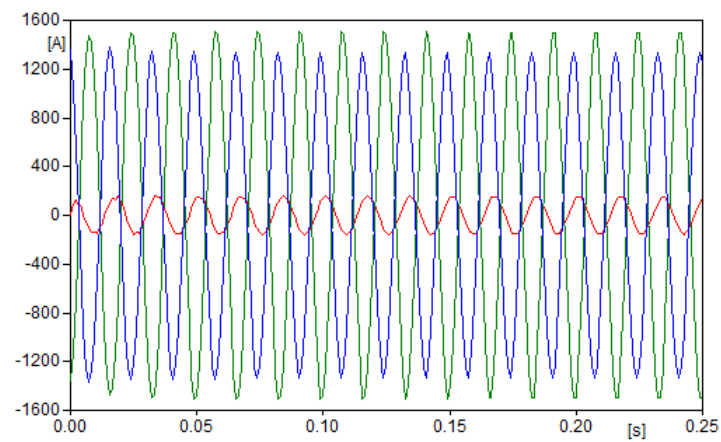


FIGURA 2.10.: Corriente en estado de falla bifásica BC para el modelo corriente constante

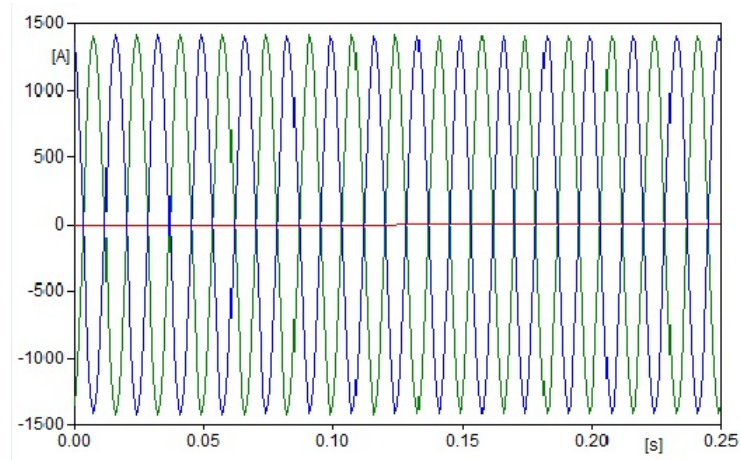


FIGURA 2.11.: Corriente en estado de falla bifásica BC sin carga para el modelo corriente constante

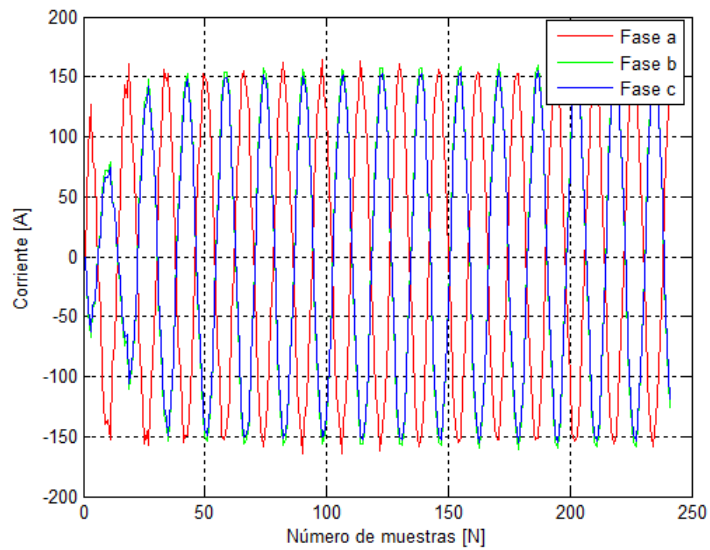


FIGURA 2.12.: Corriente en la carga para el modelo corriente constante

	Potencia Activa			Potencia Reactiva		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
P_p	0,0058	-0,0006	-0,0062	0,0051	-0,0277	-0,0092
P_l	1,0156	0,0641	0,9304	0,8972	2,9328	1,3934
P_z	0,0086	-0,0003	-0,0046	0,0076	-0,0132	-0,0069
<i>error</i>	0,0434	0,0512	0,0523	0,0434	0,0512	0,0523

CUADRO 2.8.: Parámetros de carga para el modelo de carga corriente constante

2.1.5.3. Potencia constante

Para el estudio del modelo de potencia constante se obtuvieron los parámetros mostrados en la tabla 2.9, que representan el comportamiento de la corriente de carga obtenida después de la perturbación.

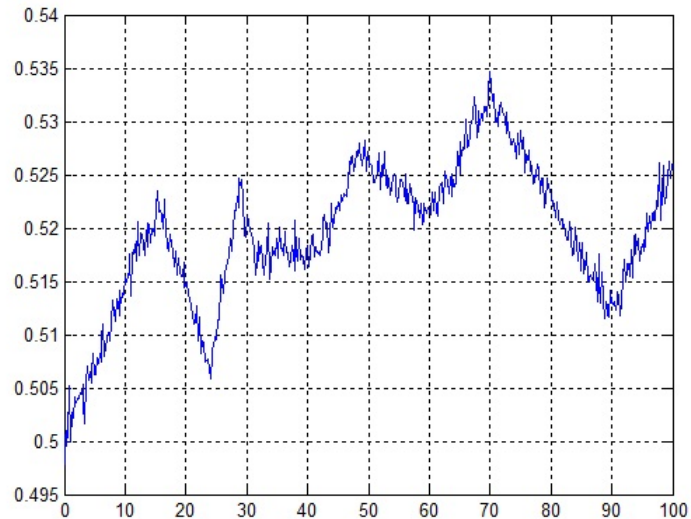


FIGURA 2.13.: Corriente en estado estable para el modelo potencia constante

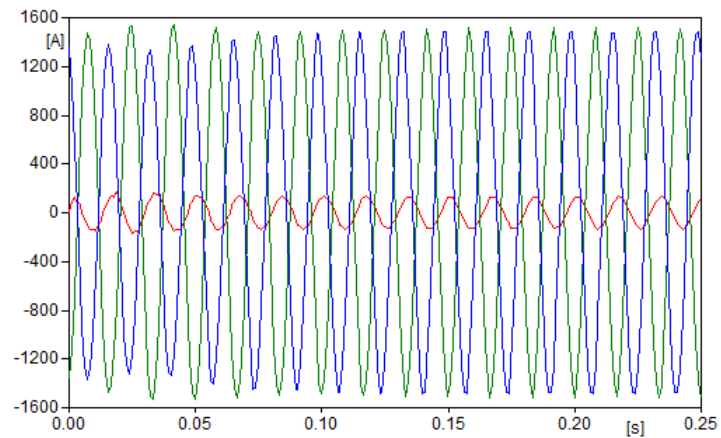


FIGURA 2.14.: Corriente en estado de falla bifásica BC para el modelo potencia constante

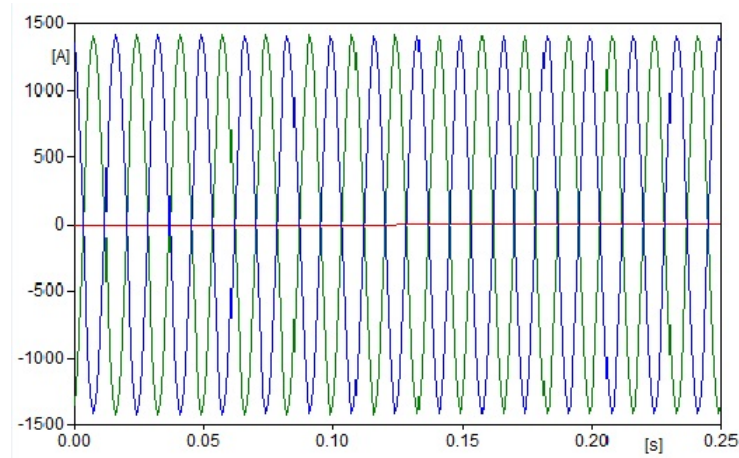


FIGURA 2.15.: Corriente en estado de falla bifásica BC sin carga para el modelo potencia constante

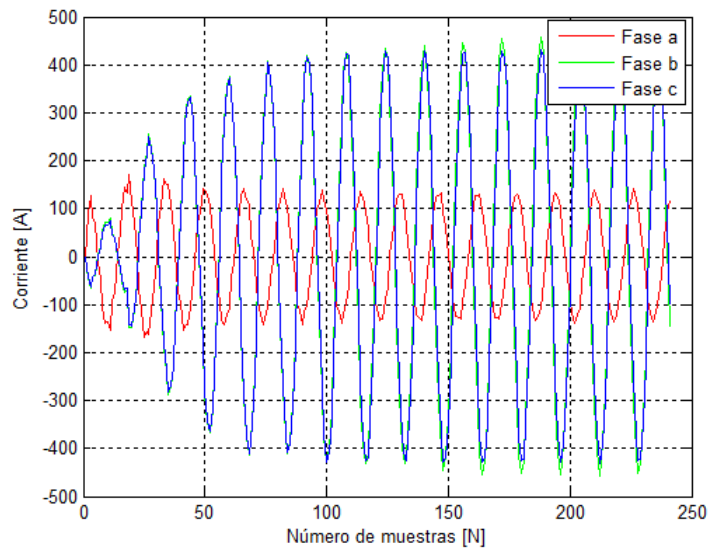


FIGURA 2.16.: Corriente en la carga para el modelo potencia constante

	Potencia Activa			Potencia Reactiva		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
P_P	1,1655	-0,0732	0,2631	0,8647	0,4618	0,0727
P_I	-0,5964	-0,2131	0,0722	-0,4425	1,3447	0,0200
P_Z	0,2483	-0,8174	2,4218	0,1842	5,1574	0,6708
<i>error</i>	4,4961	1,6390	0,4746	4,4961	1,6390	0,4746

CUADRO 2.9.: Parámetros de carga para el modelo de carga potencia constante

El estudio realizado para los modelos de carga de impedancia constante, corriente constante y potencia constante implica el ajuste de los parámetros de los modelos de carga en posfalla. Para determinar los parámetros solo se tuvo en cuenta la corriente de la carga después de la perturbación. La obtención de la corriente de carga se basó en el procedimiento que se explicó anteriormente, esto con el fin de evitar la desviación de los parámetros debido a la energía producida por la perturbación. El estudio de los modelos estáticos muestra la potencia activa y reactiva consumida por las cargas en función de la tensión, en el caso de un sistema en condición de falla, se analiza que el comportamiento de la potencia activa y reactiva puede variar, imposibilitando la identificación de las características de las cargas. Por esta razón los parámetros obtenidos para la fase b en ninguno de los casos estudiados representan los datos medidos, haciendo más relevante su estado reactivo debido a sus cambios físicos provenientes de la falla, pues como se puede observar en cada una de las gráficas de corriente de carga para cada uno de los modelos el desfase que se produce, siendo notorio el efecto que produce el factor de potencia en la representación de las cargas. Sin embargo, se debe interpretar los coeficientes obtenidos para el modelo polinomial como los mejores datos a los que se pueden ajustar las curvas de potencia activa y reactiva provenientes de un sistema después de una perturbación, los cuales pueden variar a los esperados debido a los efectos físicos causados por la perturbación, pero según su margen de error proveniente de la comparación mantiene el rango establecido.

2.1.6. Variación del nivel de tensión

Para el circuito de distribución de la figura 2.1 se realizó una variación de tensión desde el 10 % hasta el 110 % en la cabecera del circuito, tomando como referencia los datos obtenidos en la literatura, con el fin de determinar el estado mínimo de funcionamiento de los modelos de carga implementados. La obtención del error en potencia se presenta mediante la comparando datos de entrada del sistema con datos de salida.

Acontinuación se presentan los resultados obtenidos para la potencia activa y reactiva del circuito de distribución teniendo en cuenta en el rango establecido se presentan 25 variación de tensión considerando el mismo cambio de tensión, :

Los resultados obtenidos para la potencia activa y reactiva del circuito de distribución teniendo en cuenta 3 variación de tensión:

POTENCIA ACTIVA				
fase	P_P	P_I	P_Z	<i>error</i>
A	-0,00578	0,8251	0,1733	0,9195
B	-0,00143	0,8137	0,1804	0,755
C	0,00091	0,8059	0,1857	0,7208

CUADRO 2.10.: Parámetros obtenidos para la potencia activa con el modelo polinomial para un sistema de distribución

POTENCIA REACTIVA				
fase	P_P	P_I	P_Z	<i>error</i>
A	-0,00614	0,8765	0,1841	6,874
B	-0,00152	0,8644	0,1916	6,165
C	0,00096	0,8550	0,1969	5,935

CUADRO 2.11.: Parámetros obtenidos para la potencia reactiva con el modelo polinomial para un sistema de distribución

POTENCIA ACTIVA				
fase	P_P	P_I	P_Z	<i>error</i>
A	-0,004811	0,8239	0,1736	1,2129
B	-0,00114	0,8135	0,1804	0,9684
C	0,00096	0,8058	0,1857	0,9462

CUADRO 2.12.: Parámetros obtenidos para la potencia activa con el modelo polinomial para un sistema de distribución

POTENCIA REACTIVA				
fase	P_P	P_I	P_Z	<i>error</i>
A	-0,00511	0,8753	0,1844	7,1988
B	-0,00126	0,8643	0,1916	3,3853
C	0,001024	0,8549	0,1970	4

CUADRO 2.13.: Parámetros obtenidos para la potencia activa con el modelo polinomial para un sistema de distribución

Este estudio determina que con un mínimo de 3 variaciones de tensión el algoritmo de los modelos de cargas manifiestan resultados con bajos índices de error. Sin embargo si se contemplan más de 3 variaciones de tensión dentro del mismo rango del $\pm 10\%$ del valor nominal el proceso de optimización es más efectivo.

2.2. Validación de los modelos de fuentes de alimentación

Para esta sección, los modelos de fuentes serán sometidos a dos tipos de pruebas diferentes con el fin de realizar su validación. Con datos simulados en condiciones de falla y condiciones normales de operación del circuito de la figura 2.1, se realizarán las pruebas a cada uno de los modelos. Las gráficas para condición de una falla bifásica y condiciones normales de operación son mostrados en las figuras 2.17 y 2.18. En estas gráficas se muestra el comportamiento de la magnitud y la fase de la tensión y corriente que son la base de estudio para la validación de los modelos de fuentes de alimentación.

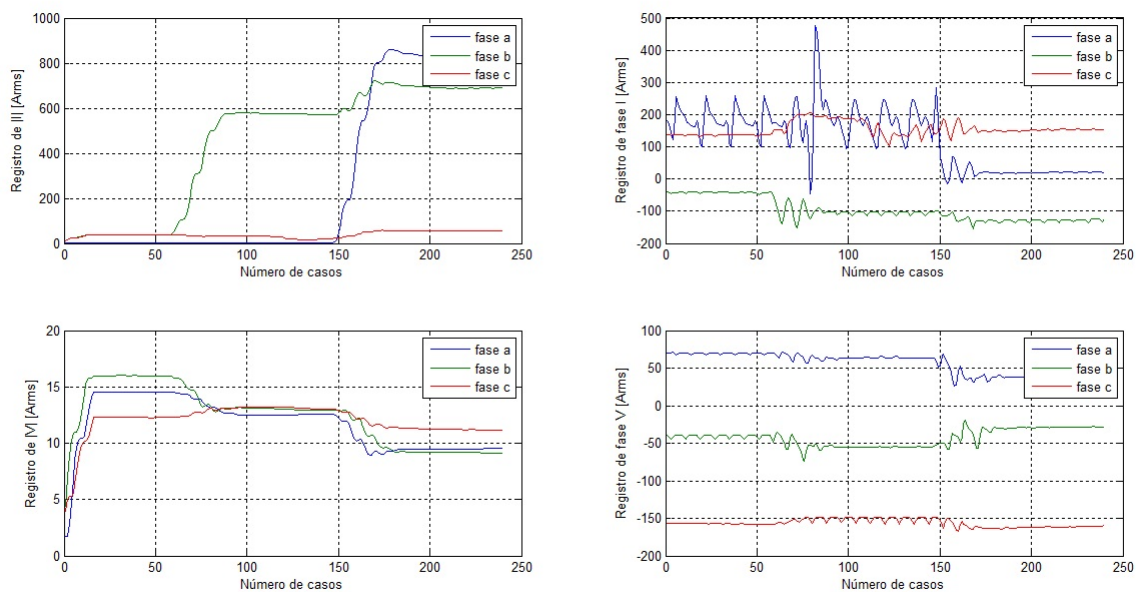


FIGURA 2.17.: Registro de tensión y corriente en la cabecera del circuito para condición de falla

Con el propósito de medir la fiabilidad de los modelos de fuentes de alimenta-

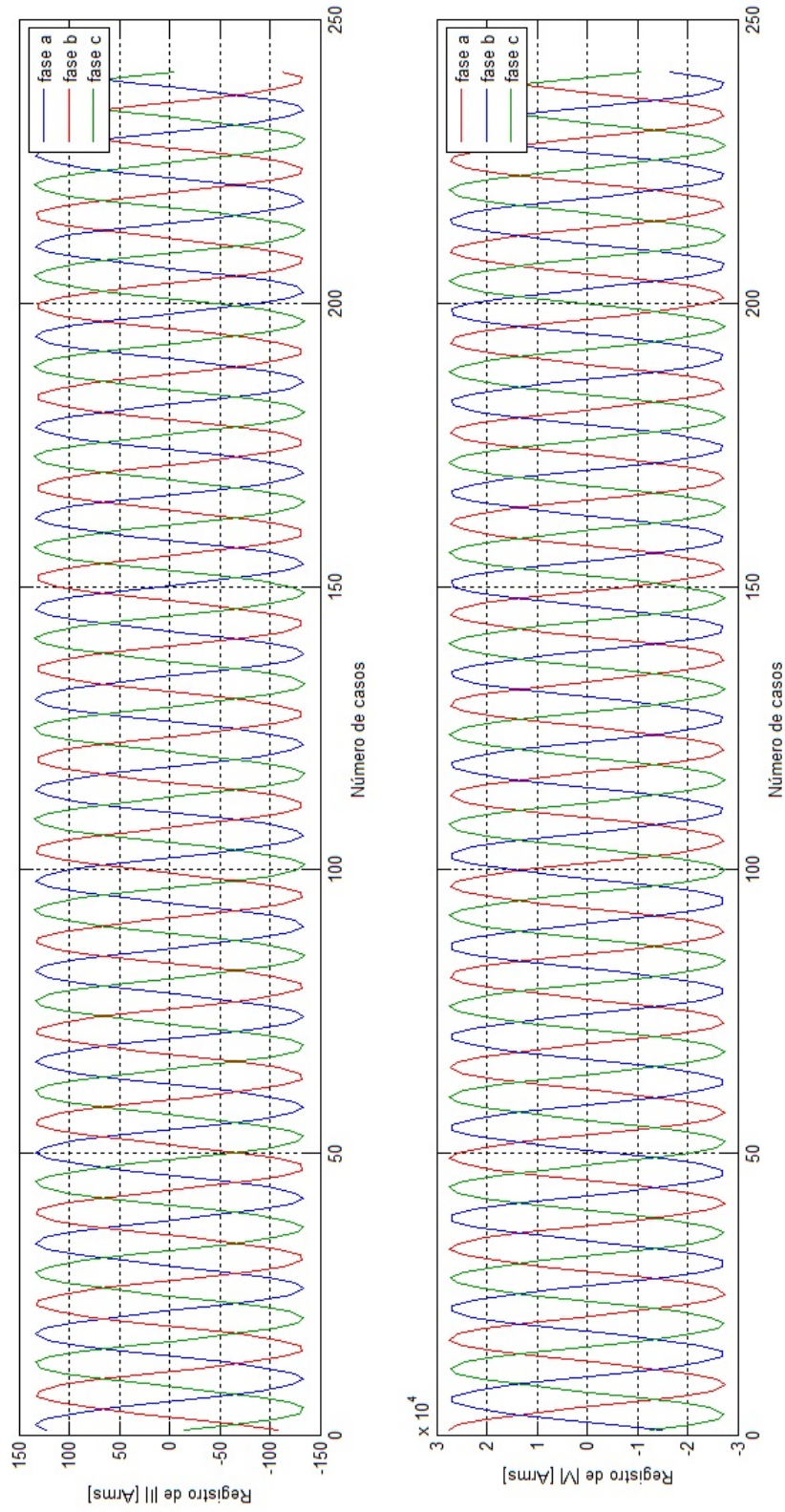


FIGURA 2.18.: Registro tensión y corriente en la cabecera del circuito para condición normal de operación

ción se definirá en la siguiente ecuación el porcentaje de error ($\%Error$) como un indicador.

$$\%Error = \frac{P_E - P_R}{P_R} \times 100\% \quad (2.1)$$

Donde:

P_E Es el parámetro estimado por el modelo

P_R Es el parámetro de referencia del circuito de distribución

Para los modelos de fuentes se utilizará el error definido en 2.1 para cada una de las pruebas. Los parámetros de referencia corresponden a los mostrados en la tabla.

Parámetros	Valores de referencia
$R_{aa} [\Omega]$	1,0475
$X_{aa} [\Omega]$	12,2974
$R_{bb} [\Omega]$	1,0475
$X_{bb} [\Omega]$	12,2974
$R_{cc} [\Omega]$	1,0475
$X_{cc} [\Omega]$	12,2974
$X_{ab} [\Omega]$	1,1766
$X_{ac} [\Omega]$	1,1766
$X_{bc} [\Omega]$	1,1766

CUADRO 2.14.: Valores de referencia del circuito de distribución

2.2.1. Validación del modelo de fuentes que estima la impedancia Thévenin utilizando medidas en estado estable

A partir de los registros de tensión y corriente medidos en la cabecera del circuito 2.1 de las figuras 2.17 y 2.18 , se obtienen los siguientes resultados mostrados en las tablas 2.15 y 2.16.

Modelo utilizando medidas en estado estable			
Parámetros	Parámetros estimados	Parámetros de referencia	% Error
$R_{aa} [\Omega]$	0,5	1,0475	52,2673
$X_{aa} [\Omega]$	8,8460	12,2974	28,0660
$R_{bb} [\Omega]$	3,2205	1,0475	207,4463
$X_{bb} [\Omega]$	17	12,2974	38,2406
$R_{cc} [\Omega]$	0,5	1,0475	52,2673
$X_{cc} [\Omega]$	19,1866	12,2974	56,0215
$X_{ab} [\Omega]$	5,9613	1,1766	406,6547
$X_{ac} [\Omega]$	5,8492	1,1766	397,1273
$X_{bc} [\Omega]$	5	1,1766	324,9532

CUADRO 2.15.: Resultados del modelo que utiliza medidas en estado estable en condición de falla

Modelo utilizando medidas en estado estable			
Parámetros	Parámetros estimados	Parámetros de referencia	% Error
$R_{aa} [\Omega]$	3,0819	1,0475	194,2147
$X_{aa} [\Omega]$	14,9985	12,2974	21,9648
$R_{bb} [\Omega]$	2,3533	1,0475	124,6587
$X_{bb} [\Omega]$	16,7713	12,2974	36,3808
$R_{cc} [\Omega]$	2,0554	1,0475	96,2195
$X_{cc} [\Omega]$	19,0793	12,2974	55,1490
$X_{ab} [\Omega]$	7,0865	1,1766	502,2813
$X_{ac} [\Omega]$	6,5958	1,1766	460,5813
$X_{bc} [\Omega]$	7,5141	1,1766	538,6282

CUADRO 2.16.: Resultados del modelo que utiliza medidas en estado estable en condición normal de operación

De los resultados obtenidos se puede apreciar que los errores en la estimación de parámetros en condiciones normales de operación y condiciones de falla son grandes. Sin embargo, si para el modelo en la condición normal de operación no considera la impedancia mutua los resultados obtenidos en la estimación serán:

Modelo utilizando medidas en estado estable			
Parámetros	Parámetros estimados	Parámetros de referencia	% Error
$R_{aa} [\Omega]$	1,0269	1,0475	1,9665
$X_{aa} [\Omega]$	12,4864	12,2974	1,5369
$R_{bb} [\Omega]$	1,05144	1,0475	0,3761
$X_{bb} [\Omega]$	12,467	12,2974	1,3791
$R_{cc} [\Omega]$	1,0214	1,0475	2,4916
$X_{cc} [\Omega]$	12,49	12,2974	1,5661

CUADRO 2.17.: Resultados del modelo que utiliza medidas en estado estable en condición normal de operación sin acoplamiento

2.2.2. Validación del modelo de fuentes que estima la impedancia Thévenin utilizando procesamiento de señales

Se mencionó anteriormente, que no es posible encontrar los parámetros asociados a la impedancia mutua, por esta razón únicamente se consideran los parámetros desacoplados. Luego, con los registros de tensión y corriente de las figuras 2.17 y 2.18, se obtienen los resultados mostrados en las siguientes tablas.

Modelo utilizando procesamiento de señales			
Parámetros	Parámetros estimados	Parámetros de referencia	% Error
$R_{aa} [\Omega]$	$3,0429e^{-3}$	1,0475	99,7095
$X_{aa} [\Omega]$	$-0,4232e^{-3}$	12,2974	100,0034
$R_{bb} [\Omega]$	-3,604	1,0475	444,0572
$X_{bb} [\Omega]$	-2,6901	12,2974	121,8753
$R_{cc} [\Omega]$	$2,2282e^{-3}$	1,0475	99,7872
$X_{cc} [\Omega]$	$2,2391e^{-3}$	12,2974	99,9817

CUADRO 2.18.: Resultados del modelo que utiliza procesamiento de señales en condición de falla

Modelo utilizando procesamiento de señales			
Parámetros	Parámetros estimados	Parámetros de referencia	% Error
$R_{aa} [\Omega]$	1,0411	1,0475	0,6109
$X_{aa} [\Omega]$	12,463	12,2974	1,3466
$R_{bb} [\Omega]$	1,0558	1,0475	0,7923
$X_{bb} [\Omega]$	12,4599	12,2974	1,3214
$R_{cc} [\Omega]$	1,0458	1,0475	0,1622
$X_{cc} [\Omega]$	12,4491	12,2974	1,2335

CUADRO 2.19.: Resultados del modelo que utiliza procesamiento de señales en condición normal de operación

De los resultados obtenidos de las tablas 2.17 y 2.19 relacionados en la tabla comparativa 2.20 se puede apreciar que para la estimación de parámetros en condiciones normales de operación (sin considerar la estimación de los parámetros acoplados) presenta un desempeño ligeramente mejor con el modelo que utiliza procesamiento de señales; los errores para el caso del modelo que utiliza medidas en estado estable de la tabla 2.17 están un poco más alejados en comparación con los errores encontrados en la estimación de parámetros del modelo que utiliza procesamiento de señales y mostrados en la tabla 2.19. Esto se debe a que para el modelo que utiliza medidas en estado estable requiere solucionar un sistema no lineal de ecuaciones, lo cual representa una mayor complejidad al momento de obtener los resultados. Además el algoritmo implementado para el modelo que trabaja con medidas en estado estable (ver Anexo A) requiere de contemplar como entrada al algoritmo condiciones iniciales para realizar el proceso de estimación de parámetros. Un estudio de sensibilidad del impacto que se tiene cuando se varían las condiciones iniciales para el modelo que utiliza medidas en estado estable se aprecia en el Anexo C.

Para el modelo que estima la impedancia de Thévenin utilizando procesamiento de señales si se tiene un cambio en la corriente solicitada y esta no representa un cambio en la topología del circuito (En el algoritmo implementado no es posible trabajar con una señal del sistema en condiciones normales), es posible aislar el efecto constante de la impedancia de Thévenin de otros efectos constantes y de aquellos efectos que causaran variación en la corriente. Por esta razón, este principio sólo puede ser aplicado con señales obtenidas en condiciones normales de operación, ya que la probabilidad de que un mismo tipo de falla ocurra dos veces en un mismo lugar es muy baja.

Parámetros	Medidas en estado estable	Procesamiento de señales
$R_{aa} [\Omega]$	1,0269	1,0411
$X_{aa} [\Omega]$	12,4864	12,463
$R_{bb} [\Omega]$	1,05144	1,0558
$X_{bb} [\Omega]$	12,467	12,4599
$R_{cc} [\Omega]$	1,0214	1,0458
$X_{cc} [\Omega]$	12,49	12,4491

CUADRO 2.20.: Comparación de los resultados de los modelos

3. Conclusiones

Este documento muestra los resultados de la implementación de los modelos de las cargas para un sistema de distribución de prueba y un sistema de distribución. En este estudio se optó por utilizar los modelos polinomial (ZIP) y exponencial para cargas estáticas y se consideraron distintos tipos de carga para la estimación de los parámetros. Las simulaciones fueron realizadas mediante el software ATP complementado con programas en MATLAB y de esta manera presentar un análisis detallado de los resultados obtenidos ante los diferentes tipos de carga planteados.

Los estudios realizados a los modelos de cargas planteados, es decir, impedancia constante, corriente constante y potencia constante resulta óptimo seleccionar cualquiera de los dos modelos, polinomial o exponencial, ya que el margen de error presente se encuentra dentro de los rangos establecidos como resultados eficientes en el momento de analizar los parámetros. Por otra parte, al estudiar el modelo de carga ZIP, donde cada parámetro define el aporte porcentual de cada uno de los modelos mencionados, se concluye que si la carga es puramente resistiva la potencia reactiva no influye en la estimación de los parámetros, es decir, los parámetros de la potencia activa dominan. Este comportamiento se debe a que para cada condición de tensión a la cual es sometido el modelo, lo obliga a mantener su factor de potencia.

El estudio previo de los datos de referencia arroja resultados no satisfactorios después de producirse una falla en el sistema de distribución. El modelo polinomial ZIP no mantiene su comportamiento con relación a la potencia activa y reactiva medidas, debido a la energía producida en estado de falla. De esta forma resulta importante disponer de información adecuada de entrada para determinar un modelo que se ajuste a las necesidades del problema.

Si se dispone de información adecuada de falla para permitir su caracterización, se hace posible ajustar el modelo de carga determinando la corriente de posfalla de carga, esto implica eliminar el efecto de la energía producida para no alterar los resultados del modelo.

Para encontrar los parámetros de la impedancia Thévenin de los modelos de fuen-

tes, en el presente trabajo se implementaron las metodologías propuestas en los artículos [AX07][BL03], los cuáles desarrollan dos metodologías completamente diferentes para la estimación del equivalente de la impedancia Thévenin de un sistema de distribución.

Los resultados obtenidos del proceso de validación de los modelos de fuentes de alimentación mostraron que el modelo que utiliza procesamiento de señales en la cabecera del circuito presenta resultados más confiables que el modelo que utiliza medidas en estado estable. Esto se debe a que para la estimación a través del modelo que utiliza medidas en estado estable se requiere solucionar un sistema no lineal de ecuaciones.

Según los resultados de la estimación de parámetros de fuentes en un sistema, no se permite que se tengan cambios bruscos en los registros valores de tensión y corriente RMS, es decir, los modelos no arrojan resultados favorables cuando se consideran condiciones de falla o se introducen componentes dinámicas al sistema. Sus resultados no dependen de la topología del circuito sino de los valores de tensión y corriente en la cabecera del circuito.

Para el caso del modelo que utiliza procesamiento de señales en estado estable no se tiene manera de determinar las componentes mutuas del sistema, por lo tanto, se recomienda aplicar el modelo para hallar las impedancias de Thévenin de secuencia positiva, negativa y cero (Z_{th012}), de tal forma que si se realiza la transformación Fortescuese se pueda obtener una matriz Z_{th} dentro de la cual se tengan en cuenta los acomplamientos entre las fases del sistema.

Se crearon dos herramientas software completamente independientes en Matlab para los modelos de fuentes de alimentación y cargas, concebidas a partir de los principios expuestos en las metodologías. Las herramientas emplean una interfaz con la cual es posible con la información de los datos de tensión y corriente de ATP ó registros de tensiones y corrientes en valores RMS en un formato específico mostrar una presentación clara y ordenada de los resultados.

Se elaboró el manual del usuario de las herramientas software para estimar los parámetros de las fuentes de alimentación y cargas de un sistema de distribución en estado estable. La herramienta es de fácil instalación y ejecución.

Referencias Bibliográficas

- [Agu06] Barbieri M.B.-Beroqui M.C. Agüero, J.L. Voltage depending load models. validation by voltage step tests. *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, page 6 pp., 0-0 2006.
- [AX07] S.A. Arefifar and W. Xu. Tracking power system equivalent circuit parameters using steady state measurements. *Power Symposium, 2007. NAPS '07. 39th North American*, pages 108–113, 30 2007-Oct. 2 2007.
- [BKC06] Yinhong Li Hua Li Yung-Tien Chen Der-Hua Huang Lauby M.G. Byoung-Kon Choi, Hsiao-Dong Chiang. Measurement-based dynamic load models: derivation, comparison, and validation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 21(3):1276 –1283, Aug. 2006.
- [BKC08] Cain S.T. Byoung-Kon Choi, Hsiao-Dong Chiang. Justification of some field observations of dynamic load behaviors: Analytical and numerical approach. *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, pages 1 –7, July 2008.
- [BL03] M. Bahadornejad and G. Ledwich. System thevenin impedance estimation using signal processing on load bus data. *Advances in Power System Control, Operation and Management, 2003. ASDCOM 2003. Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 497)*, 1:274 – 279, 2003.
- [BQ00] Y. Baghzouz and C. Quist. Determination of static load models from ltc and capacitor switching tests. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, 1:389 –394 vol. 1, 2000.
- [Cok99] Kgasoane H. Coker, M.L. Load modeling. *AFRICON, 1999 IEEE*, 2:663 –668 vol.2, 1999.

- [FLR00] G. Fusco, A. Losi, and M. Russo. Constrained least squares methods for parameter tracking of power system steady-state equivalent circuits. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 15(3):1073–1080, July 2000.
- [Hap67] H.H. Happ. Z diakoptics - torn subdivisions radially attached. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-86(6):751–769, June 1967.
- [KTU94] A. Kaypmaz, Y. Tokad, and O. Usta. Diakoptics-a parallel processing approach for the analysis of large-scale power systems. *Electrotechnical Conference, 1994. Proceedings., 7th Mediterranean*, pages 1069–1072 vol.3, Apr 1994.
- [Tas95] TaskForce. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 10(3):1302–1313, Aug 1995.
- [UBP06] F.M. Uriarte and K.L. Butler-Purry. Diakoptics in shipboard power system simulation. *Power Symposium, 2006. NAPS 2006. 38th North American*, pages 201–210, Sept. 2006.

Anexos

A. Programas en Matlab

A.1. Programa para el cálculo de los parámetros de carga

El siguiente código de Matlab se encuentra asociado a la obtención de los parámetros de un modelo de carga Polinomial, específicamente referido al modelo ZIP. Al presente código se le ingresan datos de entrada del sistema definidos por las tensiones de fase, corrientes de fase y factor de potencia (obtenido directamente de los datos de entrada de las tensiones de fase y corrientes de fase respectivamente), anexo en este capítulo.

La función *mPl42mat* contiene la información de los datos de entrada del sistema en caso que se obtengan directamente del ATP, normalmente nombrados como:

vNf01a Tensión de fase a

vNf01b Tensión de fase b

vNf01c Tensión de fase c

iNf0aNf01a Corriente de fase a

iNf0bNf01b Corriente de fase b

iNf0cNf01c Corriente de fase c

La función *RMSi* realiza el proceso de obtención de los valores RMS respectivos para los datos de entrada.

N número de simulaciones.

Nom Columna referente al valor nominal de los datos de entrada.

La función *desphase* realiza el proceso de obtención del factor de potencia.

El código se especifico para la fase a.

```

%% MODELO ZIP
mPl42mat
N=25;
Nom=13;
va1=RMSi1(vNf01a,60,15,1/960);
ia1=RMSi1(iNf0aNf01a,60,15,1/960);
vb1=RMSi1(vNf01b,60,15,1/960);
ib1=RMSi1(iNf0bNf01b,60,15,1/960);
vc1=RMSi1(vNf01c,60,15,1/960);
ic1=RMSi1(iNf0cNf01c,60,15,1/960);
%% CÁLCULO PARA LA FASE A
Vnoma=RMSp(vNf01a(:,Nom),60,15,1/960);
Inoma=RMSp(iNf0aNf01a(:,Nom),60,15,1/960);
Snoma=Vnoma*Inoma;
for k=1:N

    fpna=desphase(iNf0aNf01a(:,Nom),vNf01a(:,Nom));
    fpnax(k)=fpna;

end
for k=1:N

    fpa=desphase(iNf0aNf01a(:,k),vNf01a(:,k));
    fpax(k)=fpa;

end
Va=va1;
Ia=ia1;
%% DESARROLLO
Inoma=Snoma/sqrt(3)/Vnoma;
Pnoma=Snoma*fpna;
Qnoma=sqrt(Snoma^2-Pnoma^2);
Sa=Va.*Ia;
Pa=Va.*Ia*fpa;

```

```
Qa=sqrt(Sa.^2-Pa.^2);
Pua=(Pa/Pnoma)';
Qua=(Qa/Qnoma)';
nB=3;
R=ones(1,nB);
r=1;
xpa=Va./Vnoma;
XP=zeros(length(xpa),nB);
for k=1:length(xpa)
    for l=1:nB
        XP(k,l)=xpa(k).^(l-1);
    end
end
clear
Bta
Aha
Bta=(XP'*XP)\(XP'*Pua)
Aha=(XP'*XP)\(XP'*Qua)
sum(Bta)
sum(Aha)
a=xpa.^0;
b=xpa;
c=xpa.^2;
a1=a.*Bta(1);
b1=b.*Bta(2);
c1=c.*Bta(3);
Psim=a1+b1+c1;
a2=a.*Aha(1);
b2=b.*Aha(2);
c2=c.*Aha(3);
Qsima=a2+b2+c2;
%GRAFICA DE Q SIMULADA Y MEDIDA
plot(xpa,Qsima,'r')
axis([0.5 1.2 -1 2])
```

```

plot(xpa, Qua)
axis([0.5 1.2 -1 2])
plot(xpa, Psima, 'r')
axis([0.5 1.2 -1 2])
plot(xpa, Pua)
axis([0.5 1.2 -1 2])
%% ERRORES
e1=0; e2=0;
for n=1:N

    ya=Pnoma*(Bta(1)*(Va(n)/Vnoma)^0+Bta(2)*(Va(n)/Vnoma)^1+...
    Bta(3)*(Va(n)/Vnoma)^2);
    a=((Pa(n)-ya)^2); b=(Pa(n))^2;
    e1=e1+a;
    e2=e2+b;

end
errorBta=100*sqrt((1/N)*e1)/(sqrt((1/N)*e2))
e3=0;
e4=0;
for n=1:N

    xa=Qnoma*(Aha(1)*(Va(n)/Vnoma)^0+Aha(2)*(Va(n)/Vnoma)^1+...
    Aha(3)*(Va(n)/Vnoma)^2);
    a=((Qa(n)-xa)^2);
    b=(Qa(n))^2;
    e3=e3+a;
    e4=e4+b;

end
errorAha=100*sqrt((1/N)*e3)/(sqrt((1/N)*e4))

```

A.1.1. Subprogramas

Esta subsección muestra los códigos de Matlab utilizados como subprogramas, es decir, las funciones utilizadas en el código principal del modelo de carga ZIP para la

obtención de los parámetros de carga especificados anteriormente.

A.1.1.1. Desphase

```
function fp=desphase(ia,va)
fm=1/960; fs=60;
t=0:fm:(length(ia)/(1/fm));
t=t(1:length(t)-1);
xx = 0:0.025*fm:length(ia)/(1/fm);
yy = spline(t,ia,xx);
xx1=0:0.025*fm:length(va)/(1/fm);
yy1=spline(t,va,xx);
xco = xcorr(yy,yy1,'coeff');
tx = [-length(ia)/(1/fm):0.025*fm:length(ia)/(1/fm)];
[mx,ix] = max(xco);
lag = tx(ix);
fasecal=(lag*pi/0.0083250000000000)*180/pi;
fp=cos( fasecal*pi/180);
```

A.1.1.2. Valor RMSi1

```
function St = RMSi1(S1,freq,ndc,dt)

t = 0:dt:(ndc/freq)-dt;
mpc = 1/(dt*freq);
f=length(S1(1,:));
for k=1:f
    S=(S1(:,k))';
    Srms = zeros(1,length(t)+1);
    S2 = cumsum(S.^2);
    Srms(1:mpc)= sqrt((S2(1:mpc))/mpc);
    n1=sqrt((S2(mpc+1:end)-S2(1:end-mpc))/mpc);
    n=n1(end);
    Srms(mpc+1:end) =n;
    St(:,k)=Srms(end);
end
```

```
end
```

A.1.1.3. Valor RMSp

```
function n = RMSp(S,freq,ndc,dt)
    t = 0:dt:(ndc/freq)-dt; mpc = 1/(dt*freq);
    Srms = zeros(1,length(t)+1);
    S2 = cumsum(S.^2);
    Srms(1:mpc)= sqrt((S2(1:mpc))/mpc);
    n1=sqrt((S2(mpc+1:end)-S2(1:end-mpc))/mpc);
    n=n1(end);
    Srms(mpc+1:end) =n;
end
```

A.2. Programa para el cálculo de la impedancia de Thévenin

Con el presente código de Matlab descrito a continuación, es posible encontrar los parámetros asociados a un equivalente trifásico con acoplamiento en la fuente. Este programa representa el desarrollo del primer modelo de fuentes, el cual está contemplado con mayor detalle dentro del marco teórico. Al presente código se le ingresan datos de entrada definidos por tensión las tensiones de fase, corrientes de fase y factor de potencia para seis estados de carga en tres instantes de tiempo diferentes.

La función *ATPACO* es la que realiza el proceso iterativo de optimización. Esta función trae consigo un vector x , dentro del cual se encuentra contenida la información correspondiente a las condiciones iniciales y una *cell* de Matlab (c)¹, la cual contiene información de los parámetros de entrada del sistema².

Además los siguientes parámetros especifican:

I Cell (6×1) dentro de la cual hay información acerca de las corrientes por la fase A, fase B y la fase C.

¹Remítase a la ayuda de Matlab para tener mas información acerca de una cell

²Los parámetros de entrada al sistema son la tensión de la carga, la corriente en la carga.

V Cell (6×1) dentro de la cual hay información acerca de las corrientes por la fase A, fase B y la fase C.

```
function F = ATPACO(x,c)
F = cell(8,1); x00 =cell(2,1); an =cell(6,1);

I{1} = c{1}(1:3,1);
I{2} = c{1}(4:6,1);
I{3} = c{1}(7:9,1);
I{4} = c{1}(10:12,1);
I{5} = c{1}(13:15,1);
I{6} = c{1}(16:18,1);
V{1} = c{2}(1:3,1);
V{2} = c{2}(4:6,1);
V{3} = c{2}(7:9,1);
V{4} = c{2}(10:12,1);
V{5} = c{2}(13:15,1);
V{6} = c{2}(16:18,1);
x00{1}= x(1:3);
an{1} = x(4:6);
an{2} = x(7:9);
an{3} = x(10:12);
an{4} = x(13:15);
an{5} = x(16:18);
an{6} = x(19:21);
x00{2}= [x(22)+1i*x(23) 1i*x(28)          1i*x(29);
         1i*x(23)          x(24)+1i*x(25) 1i*x(30);
         1i*x(29)          1i*x(30)          x(26)+1i*x(27)];
for kk = 1:6
    F{kk}=abs(x00{1}).*exp(1i*an{kk}) ...
        - (x00{2}*I{kk} + V{kk});
end
F{7}=real([F{1}; F{2}; F{3}; F{4}; F{5}; F{6}]);
F{8}=imag([F{1}; F{2}; F{3}; F{4}; F{5}; F{6}]);
F=[F{7}';F{8}'];
```

end

Con la creación de la anterior función y utilizando la función de Matlab *fsolve*³, la cual permite dar solución a un sistema de ecuaciones no lineales y conociendo parámetros de entrada se procede a encontrar la solución de dicho sistema. La función *fsolve* nos encuentra una solución aproximada al valor deseado con un margen de error para unas condiciones de entrada específica (contenidas en el vector *c*), y ⁴

```
function x = Smyfuntriacoplado(x01,c1)

    listo = 0;
    itera = 0;
    numitera = 1;
    while listo == 0
        options = optimset('MaxIter',100000,..
                            'MaxFunEvals',100000,...
                            'TolFun',1e-10);
        [x,output] =...
            lsqnonlin(@(x1) ATPACO(x1,c1),x01,...
                    0.5; 5; 0.5; 5; 0.5; 5 ; 0.5 ; 0.5 ;0.5],...
                    1.8; 15; 1.5; 17; 1.5; 20; 1.5; 1.5; 1.5],...
                    options)
        x(4:21) = 180/pi*x(4:21);
        if isempty(find(x(22:30)<0,1)) ~= 1

            x01(4:21) = x01(4:21) +ones(18,1)*pi/180 -5*pi/180;
            itera = itera +1;
        else
            listo = 1;
        end
    end
    if itera == numitera
        listo = 1;
    end
end
```

³Esta función de Matlab utiliza para realizar la optimización el algoritmo de *lsqnonlin* el cual resuelve sistemas cuadrados no lineales.

⁴La entrada específica hace referencia a los valores de tensión de carga y corriente de carga para los seis estados de tiempo.

```

        end
    end
end

```

A.2.1. Ejemplo de generación de los datos

A continuación se da un ejemplo de cómo se generan los datos para posteriormente llamar la función *Smyfuntriacoplado* dentro de la cual se genera el proceso iterativo que me permitirá encontrar los valores. Dentro de la cell *c* de dimensión (1*2) se encuentra la información de las corrientes por fase de cada uno de los seis estados de carga y las tensiones de fase de cada uno de los seis estados de carga

```

IT=[I{1}; I{2}; I{3}; I{4}; I{5}; I{6}];
VT=[V{1}; V{2}; V{3}; V{4}; V{5}; V{6}];
c{1,1}=IT;
c{1,2}=VT;
x0=[100;100;200;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;...
    0;0;0;0;0;0;0;0;1;1;1;1;1;1;1;1;1];

```

$$I\{i\} = \begin{bmatrix} I_{ai} \\ I_{bi} \\ I_{ci} \end{bmatrix}$$

similarmente para la tensión,

$$V\{i\} = \begin{bmatrix} V_{ai} \\ V_{bi} \\ V_{ci} \end{bmatrix}$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

i Número de estados de carga.

I_{ai}, I_{bi}, I_{ci} Corresponden a las corrientes en la carga de las fases A, fase B y fase C para los *i* estados de carga.

V_{ai}, V_{bi}, V_{ci} Corresponden a las tensiones en la carga de las fases A, fase B y fase C para los i estados de carga.

$X0$ Corresponde al vector columna de dimensión $(30*1)^5$

Con la simulación del programa en Matlab y las recomendaciones especificadas anteriormente a la salida encontraremos los valores de

$$(E_{sa}, E_{sb}, E_{sc}, an_i, R_{aa}, X_{aa}, X_{ab}, X_{ac}, X_{ba}, R_{bb}, X_{bb}, X_{bc}, X_{ca}, X_{cb}, R_{cc}, X_{cc})$$

con:

$$i = 1, 2, 3 \dots 15$$

A.3. Programa para calcular la impedancia de Thévenin por medio del procesamiento de señales

Para realizar el cálculo de la impedancia de Thévenin por medio del procesamiento de señales sea hace necesario tener presente el siguiente algoritmo en Matlab, dentro del cual se tiene en cuenta el intervalo de tiempo de la señal que se desea procesar para encontrar los parámetros de la impedancia de Thévenin de un sistema trifásico sin acoplamiento. Para esto se deben tener los registros de los valores RMS de las tensiones y corrientes, además de los ángulos correspondientes a cada uno. Internamente el programa opera de la siguiente manera:

- Toma la información contenida en las señales tensión y corriente⁶.
- Con la información de las señales se obtiene la señal de admitancia, realizando un cociente entre la señal de corriente y la señal de tensión.

⁵Los primeros tres valores del vector corresponden a las condiciones iniciales para la tensión en la fase A, fase B y fase C de la fuente del sistema, los últimos doce valores a las condiciones iniciales para la impedancia de Thévenin y los valores centrales a las condiciones iniciales de cada uno de los ángulos en los i estados de carga.

⁶La información de las señales corresponde a la magnitud y fase de cada una de ellas para la fase A, fase B y fase C del sistema.

- Se encuentran las diferencias para las señales de corriente, tensión y admitancia de la siguiente manera:

$$X[t] - X[t - 1]$$

X puede ser la señal de corriente, tensión ó admitancia de carga.

t son los valores sobre el eje del tiempo de la señal X .

- Por último se determina el vector de covarianzas entre las diferencias de tensión de carga de cada una de las fases y las diferencias de admitancia de carga y el vector de covarianzas entre las diferencias de corriente de carga de cada una de las fases y las diferencias de admitancia de carga.

```

z=size(aTMP,1)
I=cell(z,1);
V=cell(z,1);
aTI=cell(z,1);
aTV=cell(z,1);
c1=cell(1,2);
A=randperm(z);
for jj=1:z
    for kk=1:3
        ID(jj, kk)=mTMP(A(jj), kk);
        VD(jj, kk)=mTMP(A(jj), 3+kk);
        aI(jj, kk)=aTMP(A(jj), kk);
        aV(jj, kk)=aTMP(A(jj), 3+kk);
        ITotal(kk)=ID(jj, kk)';
        I{jj}=ITotal.';
        VTotal(kk)=VD(jj, kk)';
        V{jj}=VTotal.';
        ATI(kk)=aI(jj, kk)';
        aTI{jj}=ATI;
        ATV(kk)=aV(jj, kk)';
        aTV{jj}=ATV;
    end
end

```

```

        I{jj}=(I{jj}'.*exp(1i*aTI{jj})).';
        V{jj}=(V{jj}'.*exp(1i*aTV{jj})).';
        Y{jj}=I{jj}./V{jj};
    end

end

subplot(2,1,1)
plot(ID(:,1));hold on;
plot(ID(:,2),'r');hold on;
plot(ID(:,3),'color',[0 0.6 0]); hold on;
ylabel('|I| [Arms]');
xlabel('Casos posibles')
legend('fase a','fase b','fase c',1);grid on;
subplot(2,1,2)
plot(aI(:,1)*180/pi);hold on;
plot(aI(:,2)*180/pi,'r');hold on;
plot(aI(:,3)*180/pi,'color',[0 0.6 0]); hold on;
ylabel('Angulo I [grados]');
xlabel('Casos posibles')
legend('fase a','fase b','fase c',1);grid on;
figure();
subplot(2,1,1)
plot(VD(:,1));hold on;
plot(VD(:,2),'r');hold on;
plot(VD(:,3),'color',[0 0.6 0]); hold on;
ylabel('|V| [Vrms]');
xlabel('Casos posibles')
legend('fase a','fase b','fase c',1);grid on;
subplot(2,1,2)
plot(aV(:,1)*180/pi);hold on;
plot(aV(:,2)*180/pi,'r');hold on;
plot(aV(:,3)*180/pi,'color',[0 0.6 0]); hold on;
ylabel('Angulo V [grados]');
xlabel('Casos posibles')
legend('fase a','fase b','fase c',1);grid on;

```

```

for k=2:z
    DNV{k}=V{k}-V{k-1};
    DNI{k}=I{k}-I{k-1};
    DNY{k}=Y{k}-Y{k-1};
end
DNY= cell2mat(DNY);
size(DNY) DNV = cell2mat(DNV);
DNVRA=real(DNV(1,1:z-1));
DNVRB=real(DNV(2,1:z-1));
DNVRC=real(DNV(3,1:z-1));
DNVIA=imag(DNV(1,1:z-1));
DNVIB=imag(DNV(2,1:z-1));
DNVIC=imag(DNV(3,1:z-1));
figure();
plot(0:0.2:(z-2)*0.2,DNVRA);
grid on; figure();
plot(0:0.2:(z-2)*0.2,DNVIA); grid on;
DNI=cell2mat(DNI);
DNIRA=real(DNI(1,1:z-1));
DNIRB=real(DNI(2,1:z-1));
DNIRC=real(DNI(3,1:z-1));
DNIIA=imag(DNI(1,1:z-1));
DNIIB=imag(DNI(2,1:z-1));
DNIIIC=imag(DNI(3,1:z-1));
figure();
plot(0:0.2:(z-2)*0.2,DNIRA); grid on;
figure();
plot(0:0.2:(z-2)*0.2,DNIIA); grid on
RXXA=xcorr(DNVRA);
size(RXXA);
figure();
plot(-2:2/(z-2):2,RXXA); grid on;
RXXB=xcorr(DNVRB);
size(RXXB); figure();

```

```

plot(-2:2/(z-2):2,RXXB); grid on;
RXXC=xcorr(DNVRC);
size(RXXC); figure();
plot(-2:2/(z-2):2,RXXC); grid on;
DVYA=[DNV(1,1:z-1).',DNY(1,1:z-1).'];
CVYA=cov(DVYA)
DVYB=[DNV(2,1:z-1).',DNY(2,1:z-1).'];
CVYB=cov(DVYB);
DVYC=[DNV(3,1:z-1).',DNY(3,1:z-1).'];
CVYC=cov(DVYC);
DIYA=[DNI(1,1:z-1).',DNY(1,1:z-1).'];
CIYA=cov(DIYA);
DIYB=[DNI(2,1:z-1).',DNY(2,1:z-1).'];
CIYB=cov(DIYB);
DIYC=[DNI(3,1:z-1).',DNY(3,1:z-1).'];
CIYC=cov(DIYC);
ZA=-conj(CVYA(1,2)/CIYA(1,2))
ZB=-conj(CVYB(1,2)/CIYB(1,2))
ZC=-conj(CVYC(1,2)/CIYC(1,2))

```

$CVY_{a,b,c}$ vector de esperanza entre las diferencias de tensión de carga de cada una de las fases y las diferencias de admitancia de carga.

$CIY_{a,b,c}$ vector de esperanza entre las diferencias decorriente de carga de cada una de las fases y las diferencias de admitancia de carga.

A.3.1. Formato de los datos de la señal

Cuando se tienen las señales de tensión y corriente RMS en el tiempo, es necesario crear unas variables en el workspace de Matlab que contienen la información de las señales, para tal propósito se debe crear las siguientes variables:

- Variable aTMP
- Variable mTMP

La variable aTMP, contiene los valores de los ángulos de las señales de corriente y tensión, se encuentra organizado así:

- De la columna 1 a la 3 la variable aTMP contiene los valores de los ángulos de corriente en la fase A, fase B y fase C.
- De la columna 4 a la 6 la variable aTMP contiene los valores de los ángulos de tensión en la fase A, fase B y fase C.

La variable mTMP, contiene los valores de la magnitud de las señales de corriente y tensión, además esta organizado así:

- De la columna 1 a la 3 la variable mTMP contienen los valores de las magnitudes de corriente en la fase A, fase B y fase C.
- De la columna 4 a la 6 la variable mTMP contiene los valores de las magnitudes de tensión en la fase A, fase B y fase C.

Con base en esto podemos afirmar que tanto aTMP como mTMP son matrices de $(n, 6)$ donde n , es el número de registros que se tengan de ángulos ó magnitudes.

B. Manual del usuario

Las herramientas softwares para la estimación de parámetros de fuentes de alimentación y cargas en el presente trabajo de grado, se desarrolló conjuntamente por Diana Estephania Caballero Sandoval y José Mauricio Troughón Bravo estudiantes de pregrado, del Programa Académico de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander como proyecto de pregrado.

B.1. Manual del usuario para el modelo de cargas

El manual del usuario describe la herramienta de simulación correspondiente al desarrollo de un software para realizar la estimación de los parámetros de cargas de un sistema de distribución, así como las gráficas de la magnitudes de las potencias (activa y reactiva) correspondiente a casa fase, tanto para los datos medidos como los datos simulados.

La herramienta para la estimación de parámetros de cargas es un algoritmo elaborado para realizar la estimación de los parámetros de cargas de un sistema de distribución, teniendo conocimiento de las medidas de tensión y corriente ó las señales de tensión y corriente en el tiempo en la cabecera del circuito. Es por esta misma razón que la herramienta contiene dos modelos asociados a la herramienta definidos como modelo polinomial y modelo exponencial.

B.1.1. Ejecución de la Herramienta

B.1.1.1. Ejecución

Para la ejecución de la herramienta se hace necesario contar con una versión de Matlab 7.8 ó superior y una versión de ATP 5.5.

Con el cumplimiento de los dos requerimientos anteriores, antes de la ejecución de la herramienta para cualquier PC, se debe copiar la carpeta con el nombre de la he-

herramienta software¹ contenida dentro del CD instalador. Seguidamente se debe abrir el archivo.m «SPEPC.m» contenido en la carpeta, con el cual se abrirá la herramienta en Matlab.

Antes de realizar la ejecución del programa, es necesario oprimir donde se encuentra el botón browse for folder en la parte superior derecha del software de Matlab, posteriormente seleccionar la carpeta "SPEPC" y oprimir la opción «OK». En la figura B.1 mostrada a continuación se especifica con mayor detalle esta operación.

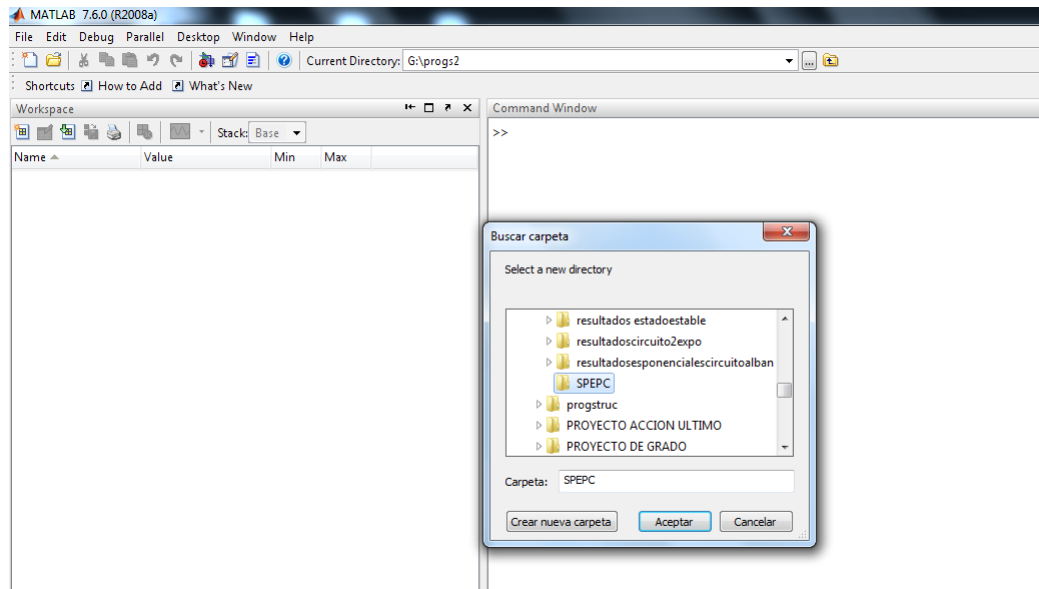


FIGURA B.1.: Cambio de directorio a la herramienta a ejecutar SPEPC

B.1.2. Herramienta para la estimación de parámetros de cargas

B.1.2.1. Ventana principal

Al ejecutar la herramienta para la estimación de parámetros de cargas desde el "prompt" de Matlab oprimiendo la tecla «F5» aparecerá en pantalla la ventana principal de la herramienta tal y como se muestra en la figura B.2. Dentro de la interfaz se permitirá al usuario escoger cualquiera de los dos modelos posibles allí encontrados, con el cual desea realizar el proceso de estimación de los parámetros de cargas.

¹La carpeta con la herramienta software hace alusión a la carpeta SPEPC.

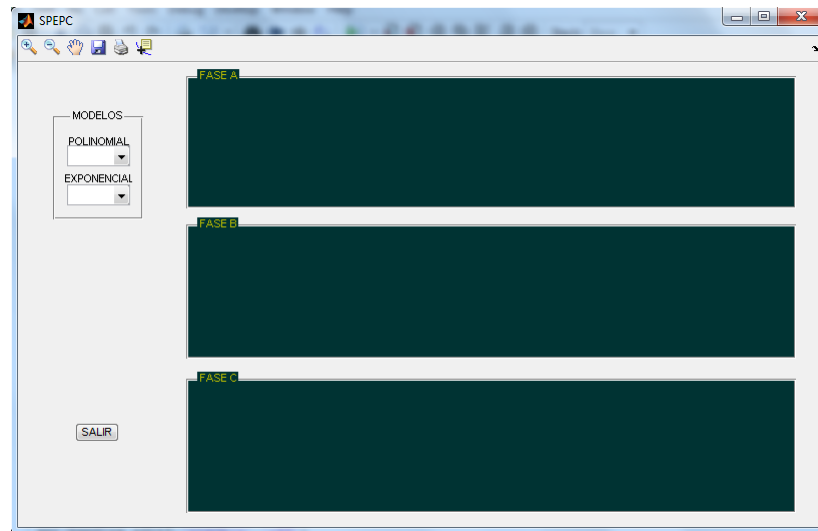


FIGURA B.2.: Ventana principal de la herramienta SPEPC

B.1.3. Botones

La interfaz considera dos botones principales, los cuales se denominan en el presente trabajo, «ATP», «REGISTRO» y «SALIR». Estos botones serán descritos a continuación realizando una descripción paso a paso de su proceso para la obtención de resultados y la secuencia que deberá seguirse para la obtención adecuada de los mismos.

Al momento de seleccionar cualquiera de los Modelos presentes en la ventana de inicio, se desplegará una ventana de selección «ATP» ó «REGISTRO», lo cual indica la procedencia de los datos con los que se realizara la estimación de los parámetros.

B.1.3.1. Selección de ATP

Si la procedencia de los datos que el usuario selecciona corresponde a "ATP", es necesario tener en cuenta las siguientes recomendaciones enumeradas a continuación:

- El sistema que se tenga modelado en "ATP" sea guardado como Alban.
- El archivo de "ATP" con extensión «.atp» sea guardado con el nombre "Alban.atp"² y su ruta se encuentre especificada como «C:\ATP\work\Alban».

²Este proceso se realiza oprimiendo en el programa abierto de ATP donde aparece el botón ATP, luego seleccionar Sub-process y Make ATP profile.

- Al ser seleccionado de la lista desplegable "ATP" se le pedirá al usuario que ingrese un número que indica la posición-columna de la muestra que hace referencia a la base de los datos de tensión y corriente de los datos a analizar.

Con las anteriores recomendación y procediendo a correr el software de simulación "ATP" los archivos que se generan en la ruta «C:\ATP\work\Alban» son los archivos que se cargarán cuando los datos motivo de estudio son procedentes del software ATP.

B.1.3.2. Selección de Registro

Si la procedencia de los datos que el usuario selecciona corresponde a "Registro", se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El archivo con extensión «.mat» que contiene los registros de tensión y corriente del sistema sea guardado con el nombre "datosreales".
- Con el archivo " datosreales " abierto dentro debe existir una variable guardada con el nombre DtRF.

La variable DtRF es una «cell» en Matlab ajustada a la siguiente configuración:

$$\{1, registro\}(fase, :, Magnitud / Fase)\}$$

registro corresponde a la posición en la cual se encuentra el registro que se desea analizar.

fase es un vector que detalla la información del valor de corriente o tensión y la fase que le corresponde. Se encuentra organizado de la siguiente manera

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

NoRegistros son los registros que se tienen de los valores de tensión y corriente.

Magnitud/Fase cuando se coloca 1 se hace alusión a la magnitud y si se coloca un 2 se hace referencia a la magnitud.

Cuando se selecciona 1 se deben tener las magnitudes de las corrientes y tensiones en el siguiente orden

$$\begin{bmatrix} MI_a \\ MI_b \\ MI_c \\ MV_a \\ MV_b \\ MV_c \end{bmatrix}$$

Cuando se selecciona 2 se deben tener los ángulos de las corrientes y tensión en el siguiente orden

$$\begin{bmatrix} AI_a \\ AI_b \\ AI_c \\ AV_a \\ AV_b \\ AV_c \end{bmatrix}$$

Con las recomendaciones anteriores en la interfaz al momento de seleccionar en la lista desplegable "Registros" se le pedirá al usuario que ingrese el número que indica la posición en la cual se tiene el registro que se desea analizar.

B.1.3.3. Ejecución

La ejecución de los modelos de cargas sera efectiva al momento de darle "click" al boton "ATP" o "REGISTRO" según el modelo seleccionado anteriormente al seguir los pasos en el orden correcto, como resultado se obtendran los parámetros de cargas respectivos de cada modelo y las gráficas correspondientes a la potencia (Activa y reactiva) medidas y simuladas.

Posteriormente después de ejecutar el programa y desea volver a la página principal, se debe accionar el botón "SALIR".

B.1.4. Ventana de resultados finales

Al final de todo el proceso se obtendra una ventana como la mostrada en la figura B.3, la cual refleja los resultados obtenidos de los parámetros de los modelos de carga.

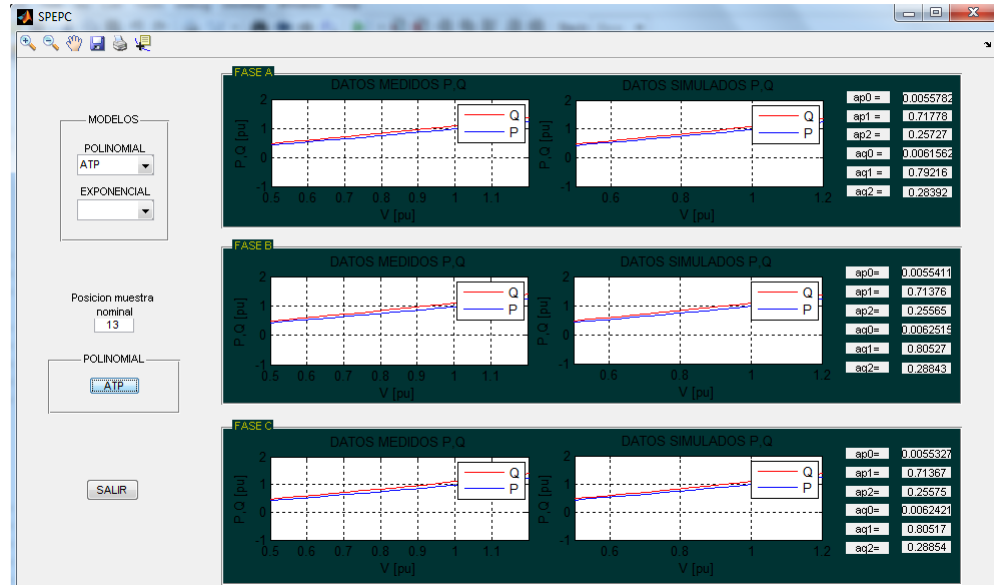


FIGURA B.3.: Ventana con resultados finales de la herramienta SPEPC

B.2. Manual del usuario para el modelo de fuentes

La herramienta de simulación descrita a continuación, corresponde al desarrollo de un software para realizar la estimación de los parámetros de la impedancia de Thévenin de un sistema de distribución, así como las graficas de la magnitudes de corrientes, tensiones y los ángulos de fase correspondientes a cada uno de estas.

La herramienta para la estimación de parámetros de la impedancia Thévenin es un algoritmo elaborado para realizar la estimación de la impedancia de Thévenin de un sistema de distribución, teniendo conocimiento únicamente de las medidas de tensión y corriente para seis estados de carga diferentes ó el conocimiento de las señales de tensión y corriente en el tiempo en la cabecera del circuito. Es por esta misma razón que la herramienta contiene dos modelos asociados a la herramienta definidos como primer modelo y segundo modelo.

El modelo Uno tiene en cuenta el conocimiento de las señales de tensión y corriente del sistema de distribución medido en la cabecera, en cambio el modelo Dos realiza la estimación de la impedancia de Thévenin con el conocimiento de los valores de tensión y corriente para seis estados de carga diferentes del sistema. Sin embargo, a continuación se realizará una descripción más detallada del funcionamiento de la herramienta para la estimación de parámetros de la impedancia Thévenin desde el proceso de instalación hasta el funcionamiento de cada uno de los botones allí encontrados con su respectivo orden de ejecución.

B.2.1. Ejecución de la Herramienta

B.2.1.1. Ejecución

Para la ejecución de la herramienta se hace necesario contar con una versión de Matlab 7.8 ó superior y una versión de ATP 5.5.

Con el cumplimiento de los dos requerimientos anteriores, antes de la ejecución de la herramienta para cualquier PC, se debe copiar la carpeta con el nombre de la herramienta software³ contenida dentro del CD instalador. Seguidamente se debe abrir el archivo.m «SPEIT.m» contenido en la carpeta, con el cual se abrirá la herramienta en Matlab.

Antes de realizar la ejecución del programa, es necesario oprimir donde se encuentra el botón browse for folder en la parte superior derecha del software de Matlab, posteriormente seleccionar la carpeta "SPEIT" y oprimir la opción «OK». En la figura B.4 mostrada a continuación se especifica con mayor detalle esta operación.

³La carpeta con la herramienta software hace alusión a la carpeta SPEIT.

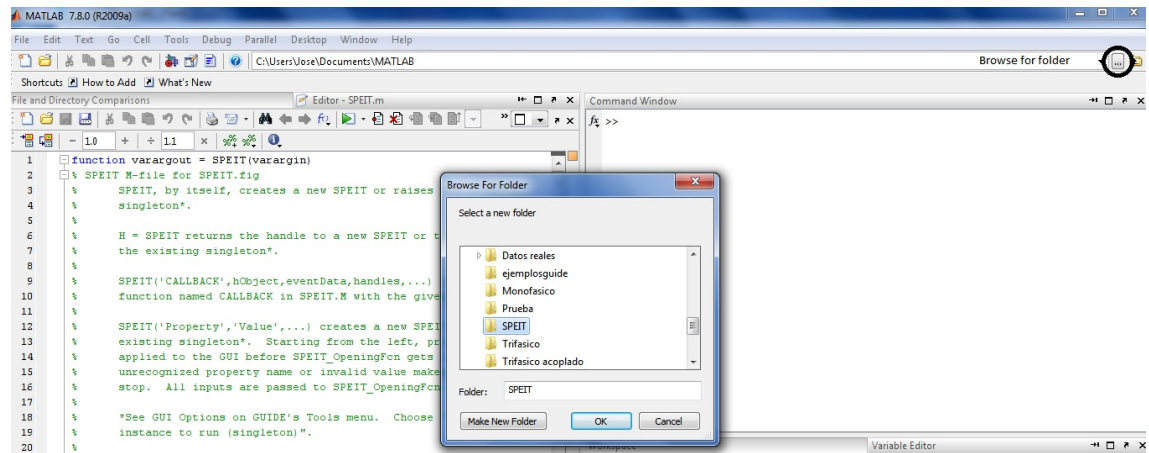


FIGURA B.4.: Cambio de directorio a la herramienta a ejecutar SPEIT

B.2.2. Herramienta SPEIT

B.2.2.1. Ventana principal

Al ejecutar la herramienta para la estimación de parámetros de la impedancia Thévenin desde el "prompt" de Matlab oprimiendo la tecla «F5» aparecerá en pantalla la ventana principal de la herramienta tal y como se muestra en la figura B.5. Dentro de la interfaz se permitirá al usuario escoger cualquiera de los dos modelos posibles allí encontrados, con el cual desea realizar el proceso de estimación de los parámetros de la impedancia de Thévenin.

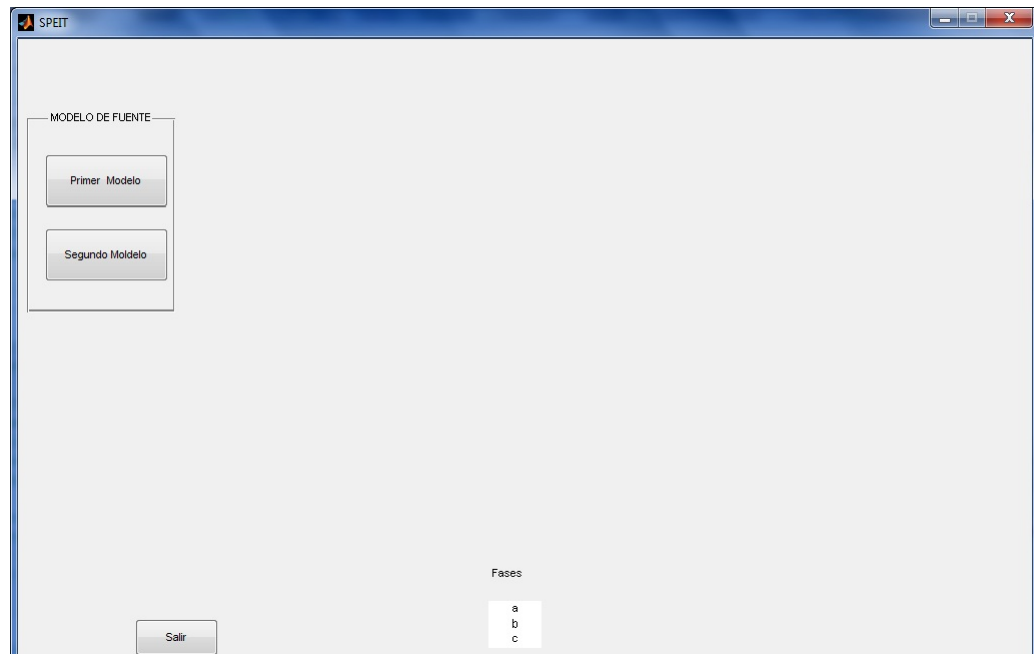


FIGURA B.5.: Ventana principal herramienta SPEIT

B.2.3. Botones

En esencia la interfaz considera como botones principales son en esencia tres, los cuales se denominan en el presente trabajo, «PRIMER MODELO», «SEGUNDO MODELO» y «SALIR». Estos botones serán descritos a continuación realizando una descripción paso a paso de lo que cada uno de ellos realiza dentro de su proceso de obtención de resultados y la secuencia que deberá seguirse para la obtención adecuada de los mismos.

B.2.3.1. Botón Segundo Modelo

Si se selecciona el Modelo 1, inmediatamente la interfaz habilitará una serie de opciones, dentro de la cual se pedirá al usuario que en la ventana desplegable seleccione la procedencia de los datos para la cual se desea realizar la estimación. La procedencia para el primer modelo contiene dos posibles casos:

- ATP
- Registros

Si la procedencia de los datos que el usuario selecciona corresponde a "ATP", es necesario tener en cuenta las siguientes recomendaciones enumeradas a continuación:

- El sistema que se tenga modelado en " ATP " sea guardado como Alban.
- El archivo de "ATP" con extensión «.atp» sea guardado con el nombre "Alban.atp"⁴ y su ruta se encuentre especificada como «C:\ATP\work\Alban».

Con las anteriores recomendación y procediendo a correr el software de simulación "ATP" los archivos que se generan en la ruta «C:\ATP\work\Alban» son los archivos que se cargarán cuando se selecciona como procedencia de los datos ATP.

Si la procedencia de los datos que el usuario selecciona corresponde a "Registros", se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El archivo con extensión «.mat» que contiene los registros de tensión y corriente del sistema sea guardado con el nombre "datosreales".
- Con el archivo " datosreales " abierto dentro debe existir una variable guardada con el nombre DtRF.

La variable DtRF es una «cell» en Matlab ajustada a la siguiente configuración:

$$\{1, registro\}(fase, :, Magnitud / Fase)\}$$

registro corresponde a la posición en la cual se encuentra el registro que se desea analizar.

fase es un vector que detalla la información del valor de corriente o tensión y la fase que le corresponde. Se encuentra organizado de la siguiente manera

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

NoRegistros son los registros que se tienen de los valores de tensión y corriente.

⁴Este proceso se realiza oprimiendo en el programa abierto de ATP donde aparece el botón ATP, luego seleccionar Sub-process y Make ATP profile.

Magnitud/Fase cuando se coloca 1 se hace alusión a la magnitud y si se coloca un 2 se hace referencia a la magnitud.

Cuando se selecciona 1 se deben tener las magnitudes de las corrientes y tensiones en el siguiente orden

$$\begin{bmatrix} MI_a \\ MI_b \\ MI_c \\ MV_a \\ MV_b \\ MV_c \end{bmatrix}$$

Cuando se selecciona 2 se deben tener los ángulos de las corrientes y tensión en el siguiente orden

$$\begin{bmatrix} AI_a \\ AI_b \\ AI_c \\ AV_a \\ AV_b \\ AV_c \end{bmatrix}$$

Con las recomendaciones anteriores en la interfaz al momento de seleccionar en la lista desplegable "Registros" se le pedirá al usuario que ingrese un único número, de la posición en la cual se tiene el registro que se desea analizar.

B.2.3.2. Botón Primer Modelo.

Cuando se selecciona el segundo modelo, la interfaz habilitará una ventana con cuatro opciones posibles, con la cual se le pedirá al usuario que seleccione en la ventana desplegable contenida allí la respectiva procedencia de los datos. La procedencia de los datos puede ser:

- ATPDES
- ATPACO
- RegistroDES

■ ResgitroACO

Si la procedencia de los datos es "ATPDES" ó "ATPACO", las recomendaciones que se deben tener presentes son las enumeradas en el «botón Primer Modelo» cuando se seleccionaba la opción de procedencia de datos como "ATP". Además cuando se selecciona "ATPDES" ó "ATPACO", se piensa en un sistema modelado en "ATP" es considerando una impedancia de Thévenin sin acoplamiento ó con acoplamiento.

Si la procedencia de los datos es "RegistroDES" ó "RegistroACO", las recomendaciones que se deben tener presentes son las enumeradas en el «botón Primer Modelo» cuando se selecciona la opción procedencia de datos "Registros". Cuando se selecciona "RegistroDES" ó "RegistroACO", se debe tener presente que el sistema modelado en "ATP" es considerando una impedancia de Thévenin sin acoplamiento ó con acoplamiento.

B.2.3.3. Botón Generación

El botón de generación tiene como función principal el realizar la carga de todos los datos y tener en cuenta las consideraciones que se enunciaron anteriormente tanto para primer modelo como para el segundo modelo. Este botón no arrojará resultado alguno y servirá de soporte para conocer si las recomendaciones de las listas desplegables fueron consideradas correctamente, de lo contrario el programa no podrá continuar y no se realizará la activación del botón que se describirá a continuación.

B.2.3.4. Botón Ejecutar

El botón ejecutar, despues de haber realizado todos los pasos adecuados en el orden correcto, mostrará los resultados de la impedancia de Thévenin y las gráficas correspondientes a las magnitudes y angulos de la corriente y tensión tenidas en cuenta para estimar los parámetros de la impedancia de Thévenin del sistema.

B.2.3.5. Botón Salir

El botón salir, sirve como una opción cuando se ha cometido algún error ó cuando se desea finalizar el proceso.

B.2.4. Ventana de resultados finales

Al final de todo el proceso se consigue una ventana como la mostrada en la figura B.6, la cual refleja los resultados obtenidos al final de todo el proceso.

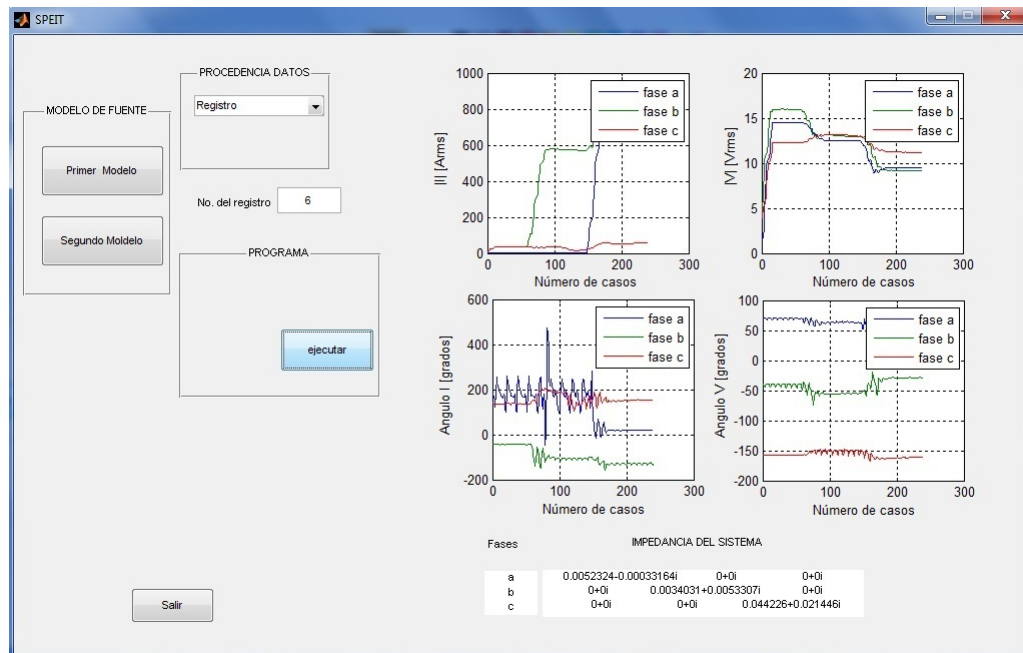


FIGURA B.6.: Ventana de resultados finales herramienta SPEIT

C. Variación de las condiciones iniciales para el modelo que utiliza medidas en estado estable

A continuación se adjuntan las gráficas que muestran el comportamiento del algoritmo basado en el análisis de medidas en estado estable para la estimación de la impedancia de Thévenin, ante variaciones contempladas dentro del rango del -20% hasta el 20% en los valores que son ingresados como condiciones iniciales al mismo. La variación es realizada alrededor de las condiciones de referencias expuestas en las tablas C.1 y C.2.

El procedimiento se contempla por:

1. Ajustar las condiciones iniciales a los valores de referencia
2. Elegir una de las condiciones iniciales y variarla del -20% hasta el 20% (realizando dentro del rango variaciones del 1%) alrededor del valor de referencia.
3. Para cada condición inicial, correr el algoritmo y registrar la solución arrojada.

$E_s^a [kV]$	$E_s^b [kV]$	$E_s^c [kV]$	θ_a°	θ_b°	θ_c°
19,8979	19,9103	19,9092	19,0766	-100,8948	139,0671

CUADRO C.1.: Condiciones iniciales de la tensión de fase

$R_{aa} [\Omega]$	$X_{aa} [\Omega]$	$R_{bb} [\Omega]$	$X_{bb} [\Omega]$	$R_{cc} [\Omega]$	$X_{cc} [\Omega]$	$X_{ab} [\Omega]$	$X_{ac} [\Omega]$	$X_{bc} [\Omega]$
1,0475	15,2789	2,0475	12,6792	3,0475	13,6728	1,17368	1,06182	1,46290

CUADRO C.2.: Condiciones iniciales de las resistencias propias e impedancias propias y acopladas

De la figura C.1 hasta la figura C.15 se presenta la diferencia entre los valores obtenidos para cada simulación del algoritmo y los valores de referencia (Ver tablas C.1 y C.2).

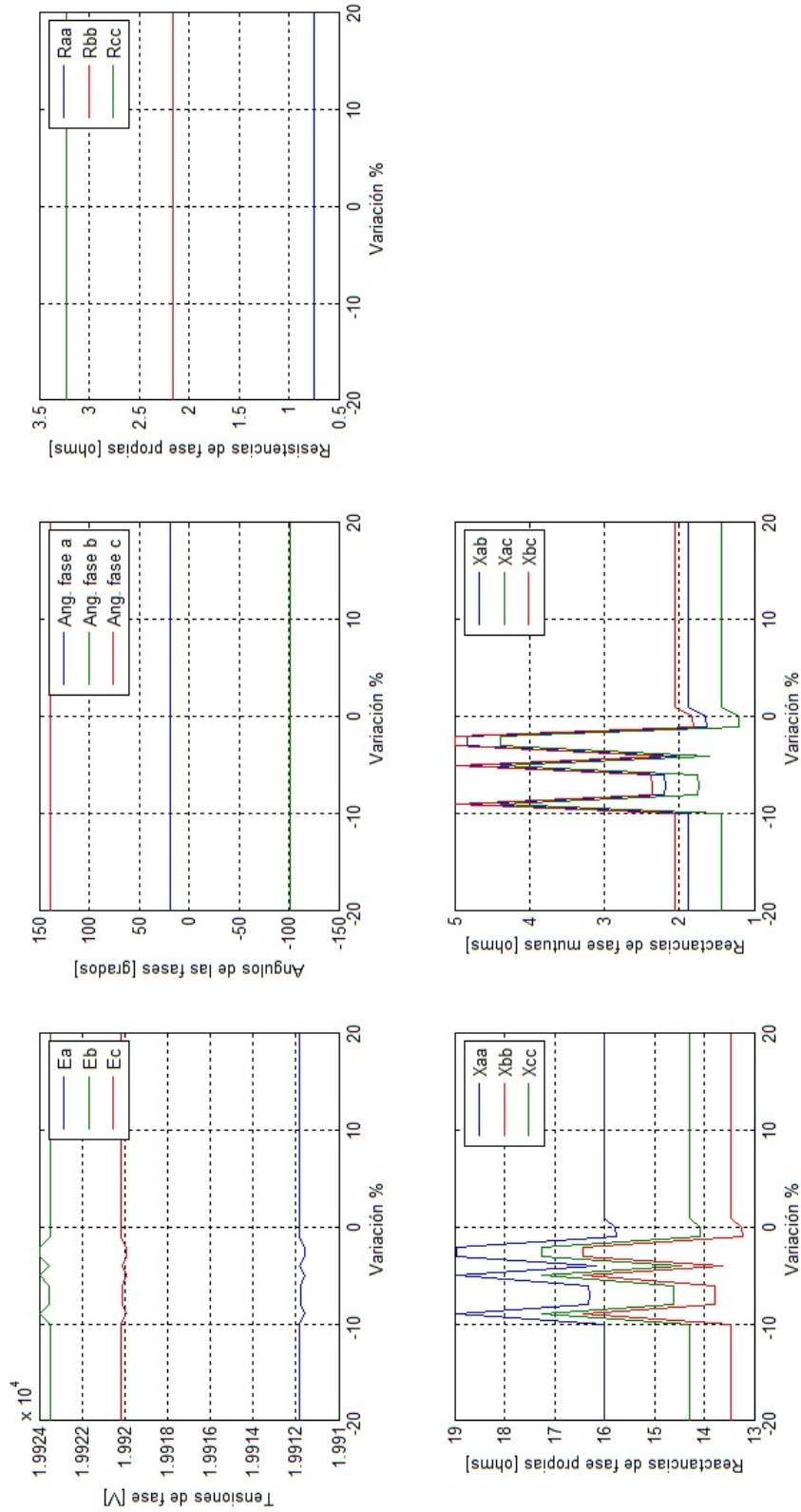


FIGURA C.1.: Resultados ante 41 variaciones en la tensión de la fase a

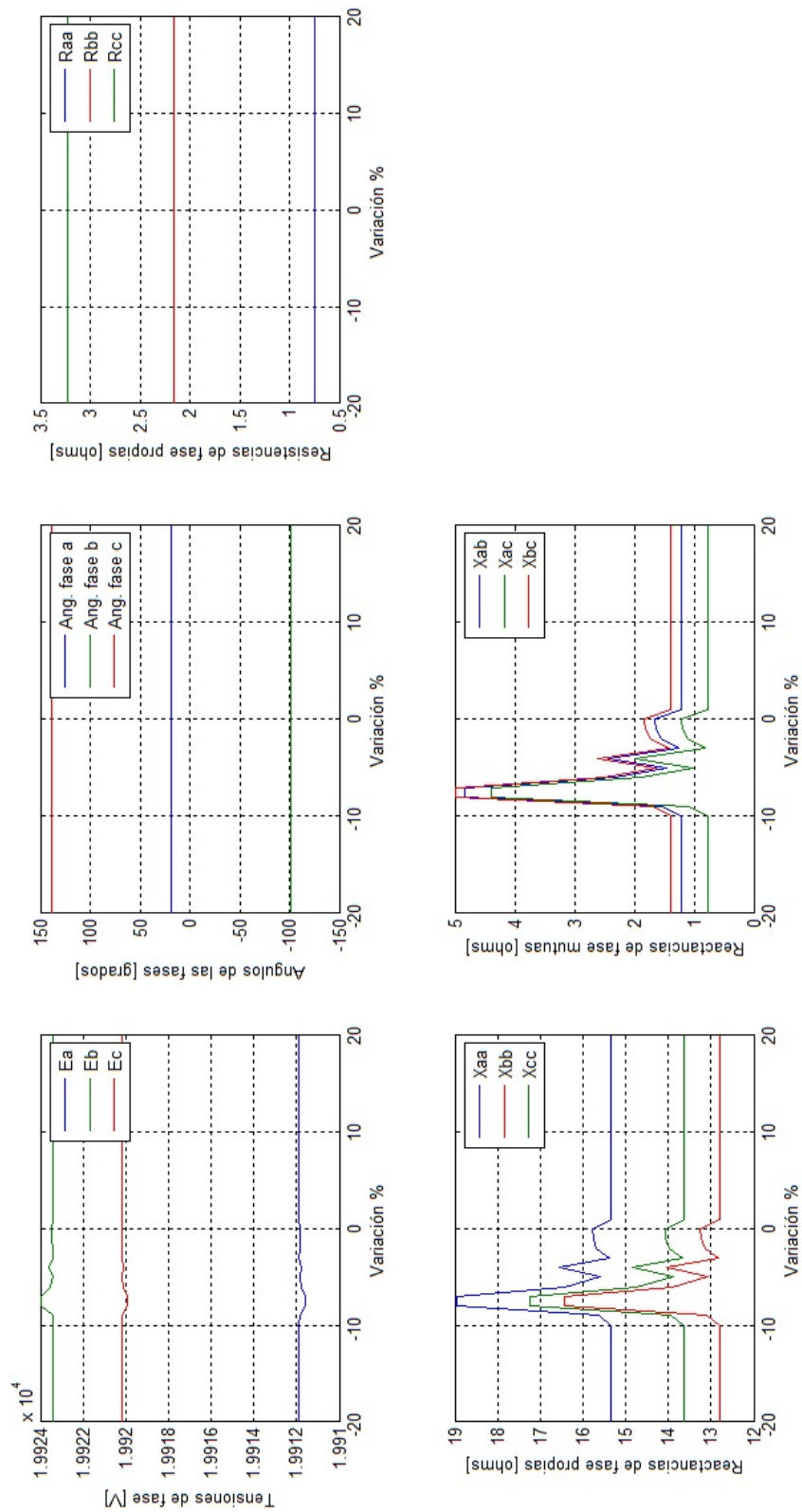


FIGURA C.2.: Resultados ante 41 variaciones en la tensión de la fase b

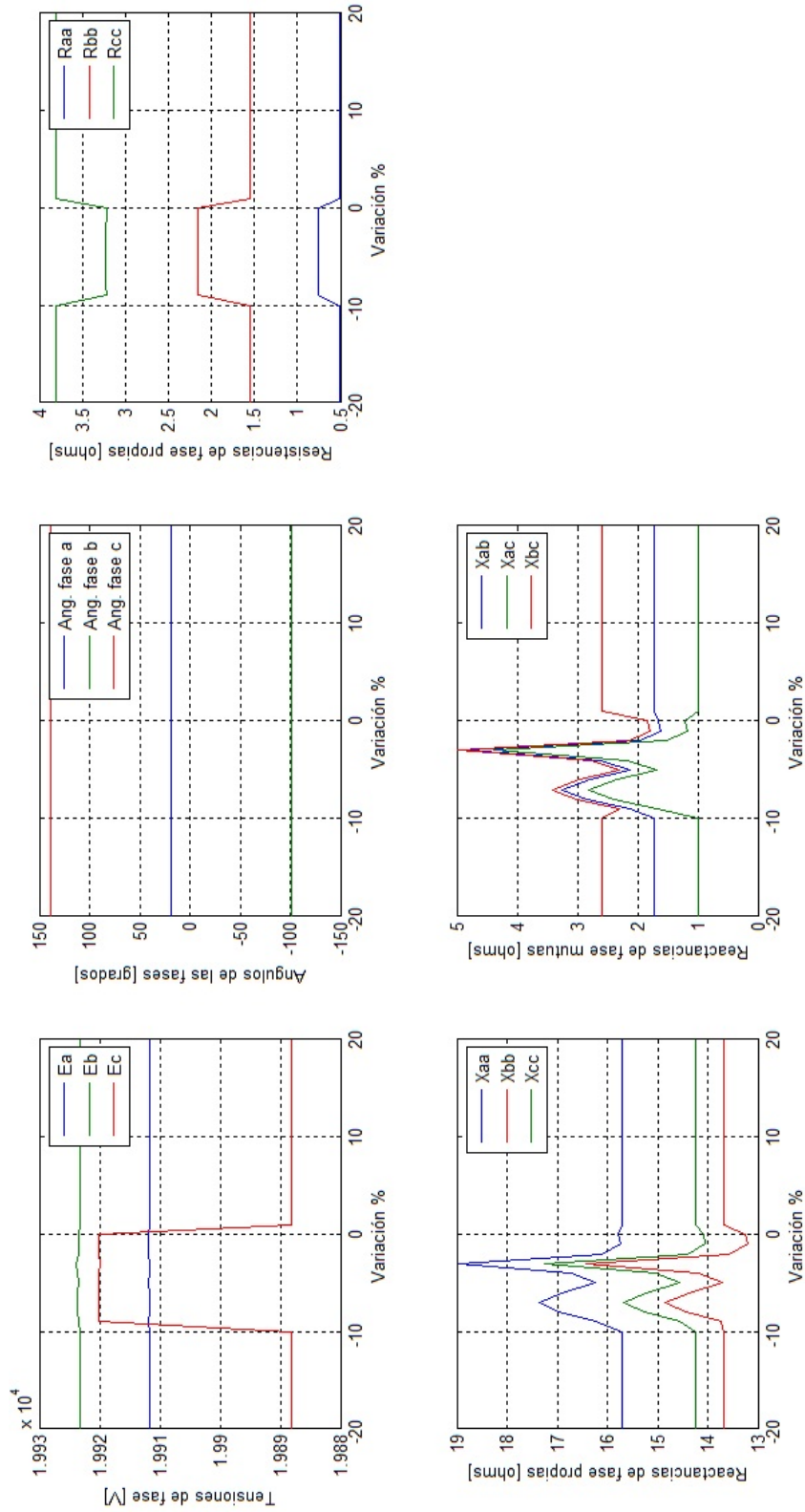


FIGURA C.3.: Resultados ante 41 variaciones en la tensión de la fase c

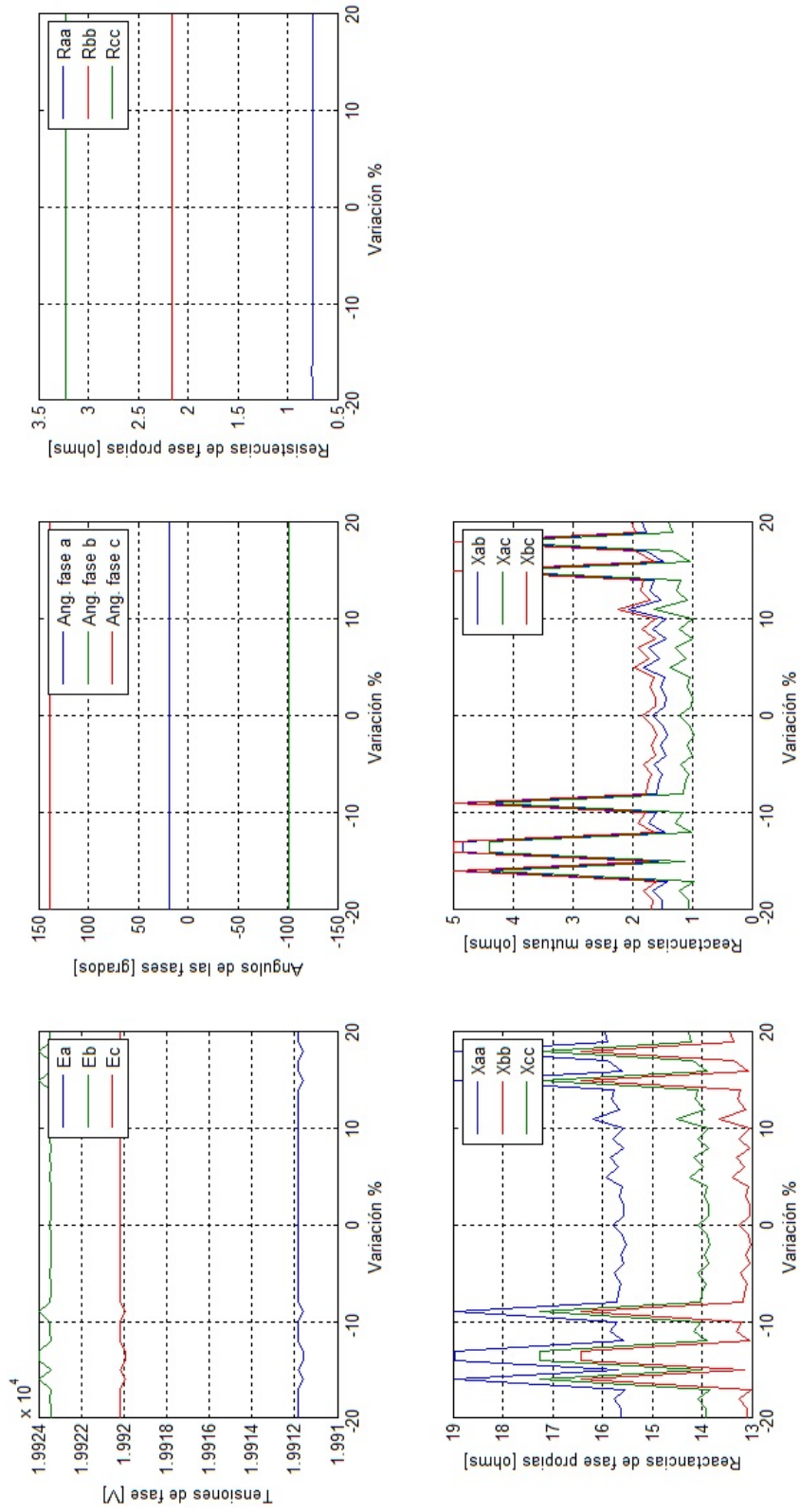


FIGURA C.4.: Resultados ante 41 variaciones en el ángulo de la fase a

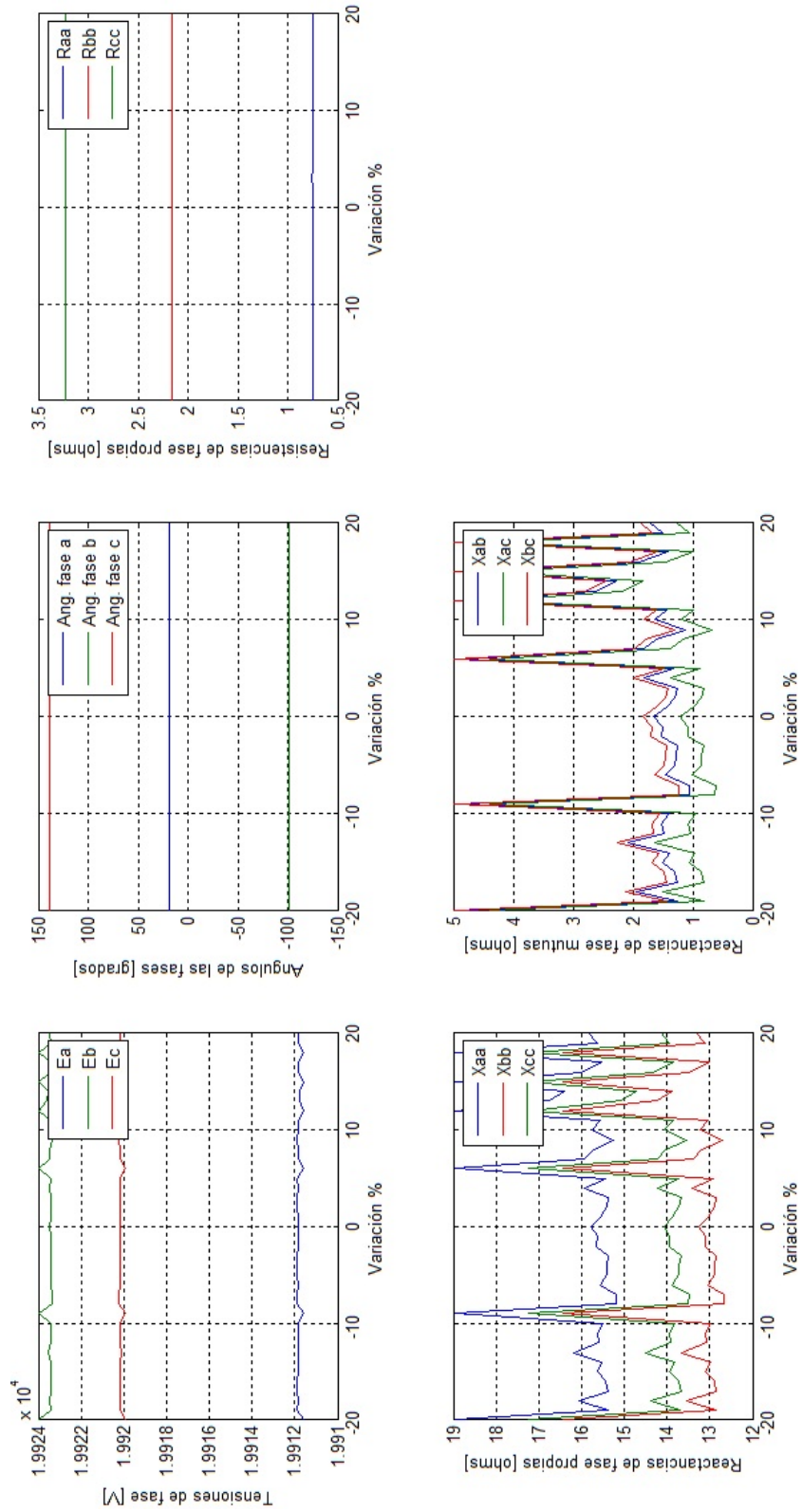


FIGURA C.5.: Resultados ante 41 variaciones en el ángulo de la fase b

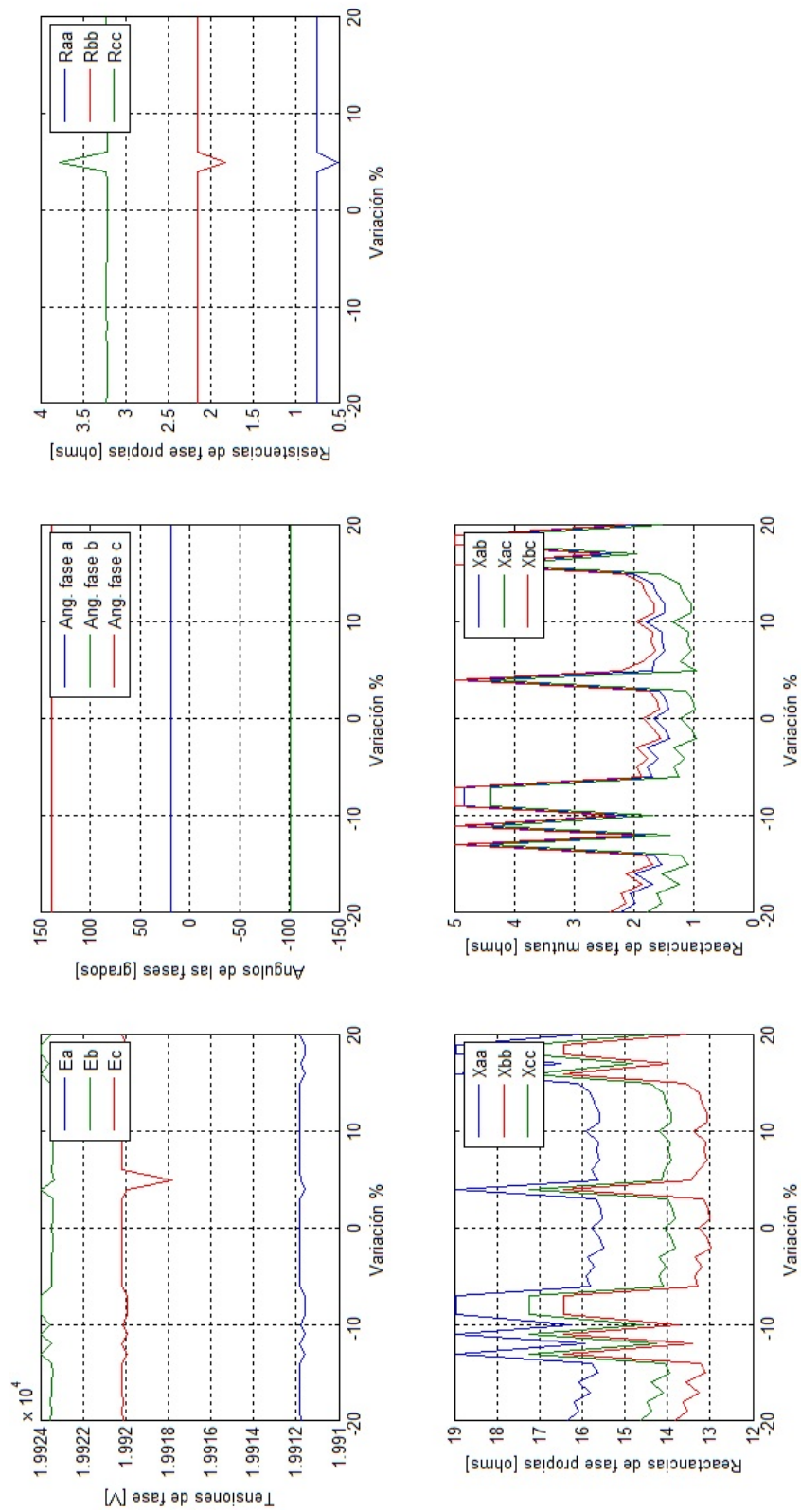


FIGURA C.6.: Resultados ante 41 variaciones en el ángulo de la fase c

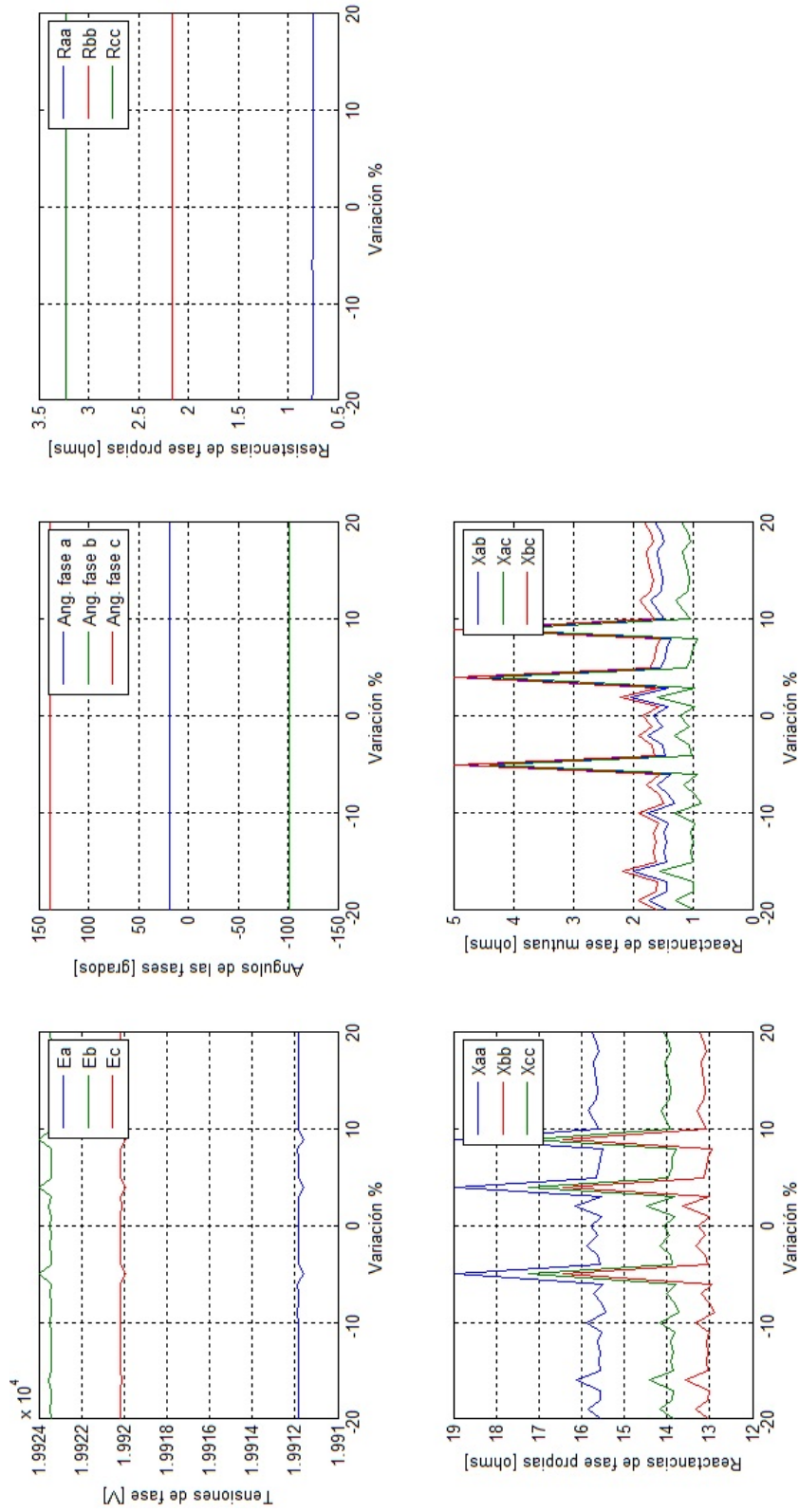


FIGURA C.7.: Resultados ante 41 variaciones en la resistencia propia de la fase a

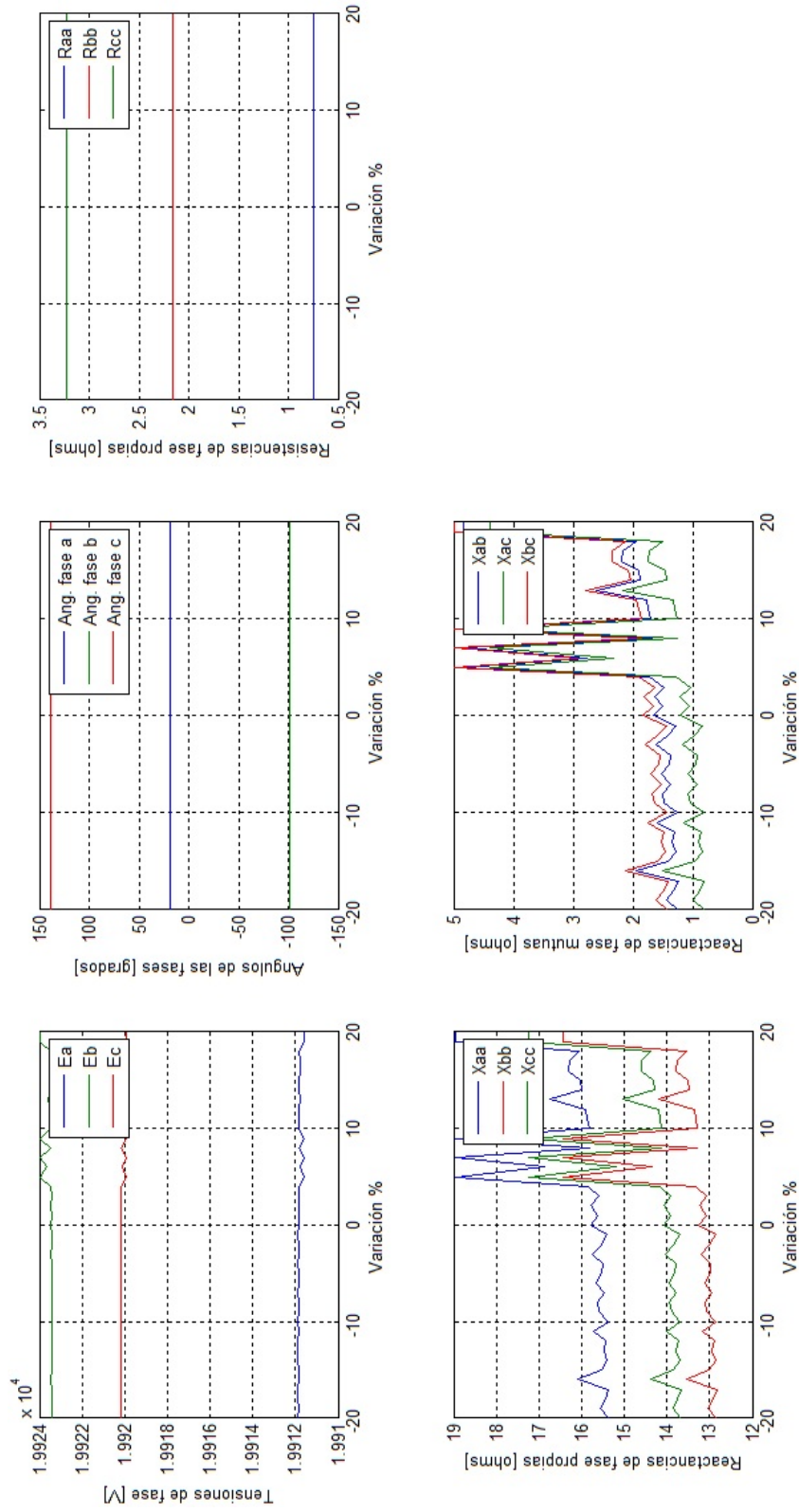


FIGURA C.8.: Resultados ante 41 variaciones en la reactancia propia de la fase a

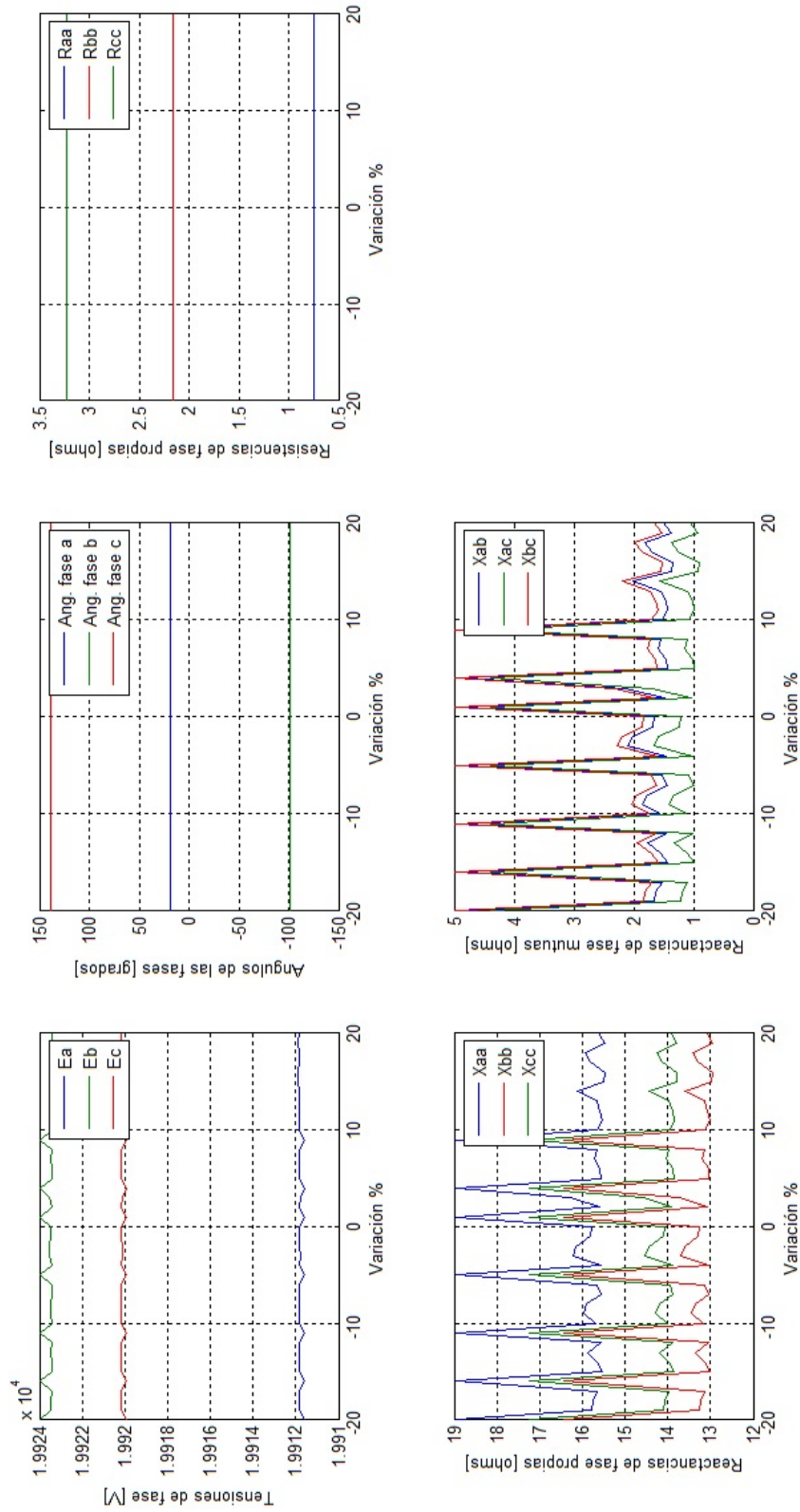


FIGURA C.9.: Resultados ante 41 variaciones en la resistencia propia de la fase b

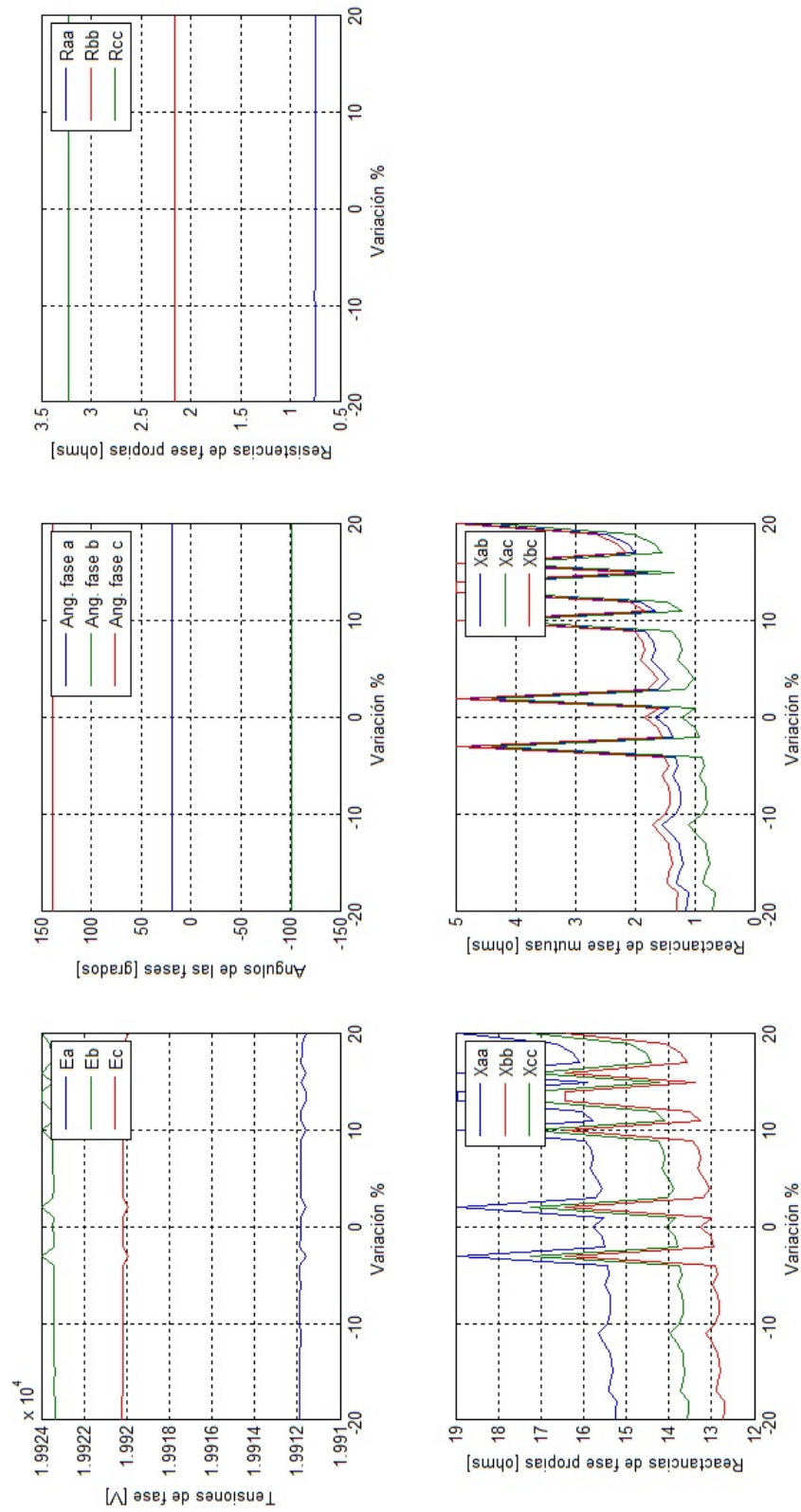


FIGURA C.10.: Resultados ante 41 variaciones en la reactancia propia de la fase b

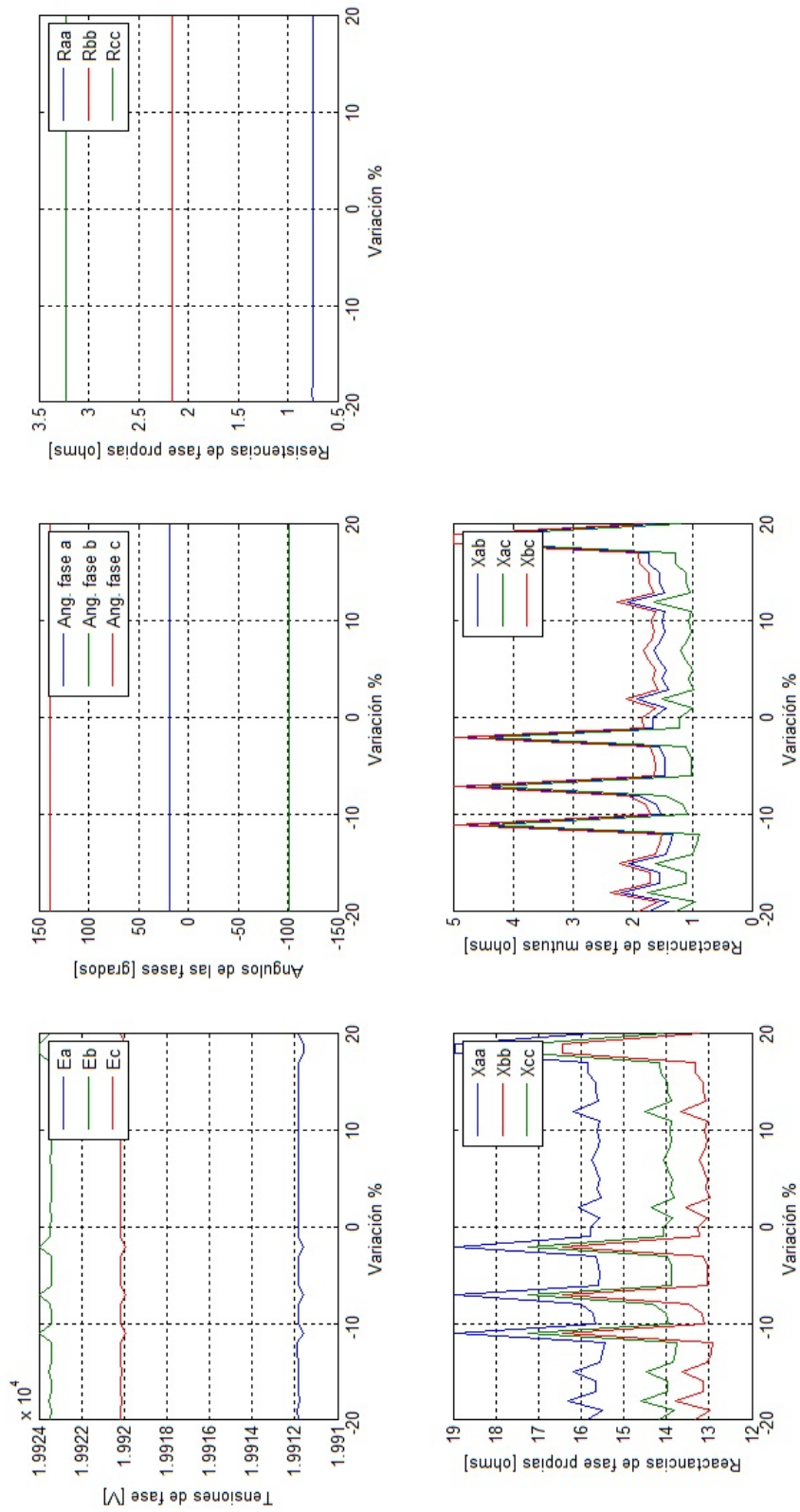


FIGURA C.11.: Resultados ante 41 variaciones en la resistencia propia de la fase c

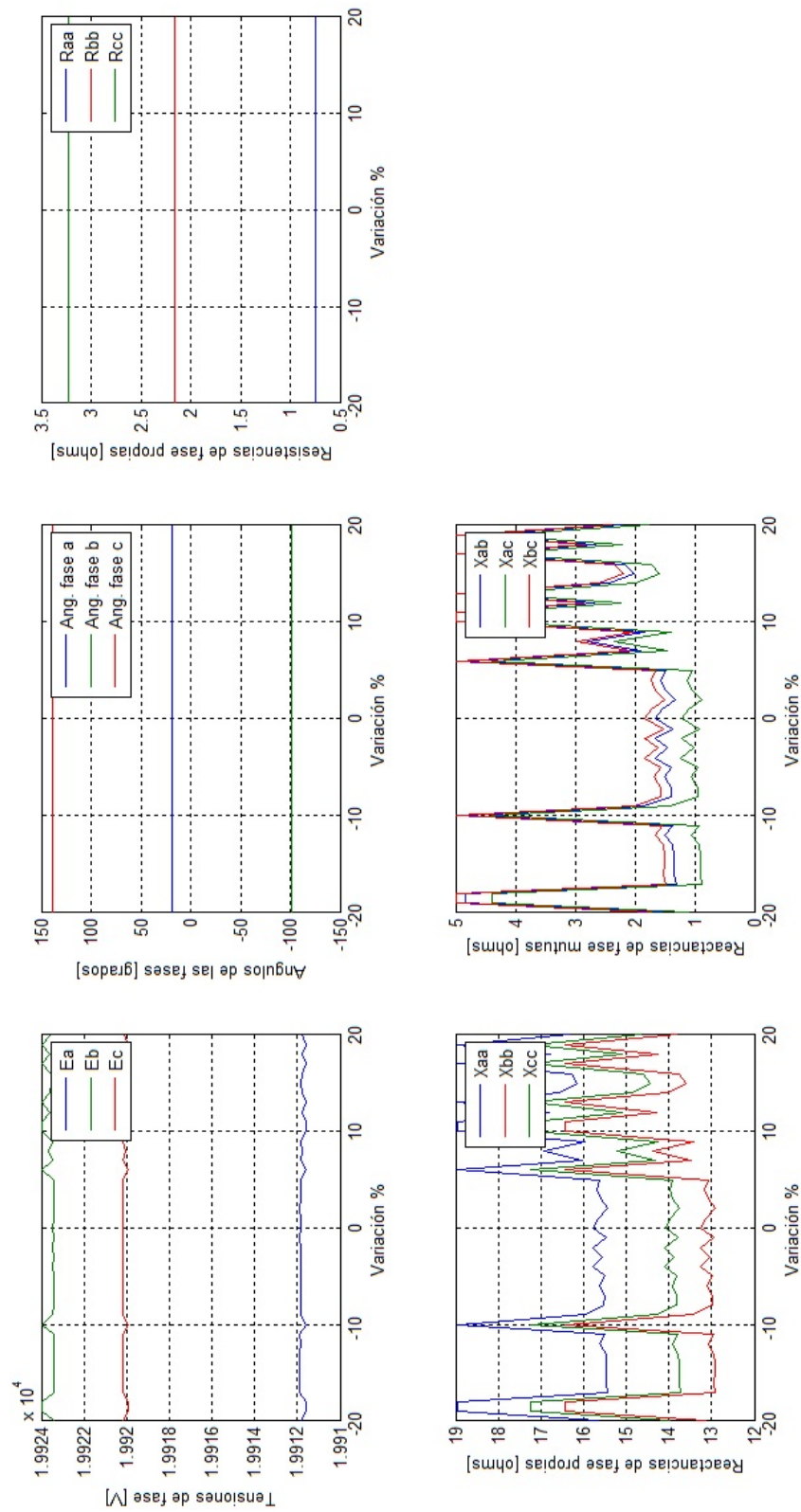


FIGURA C.12.: Resultados ante 41 variaciones en la reactancia propia de la fase c

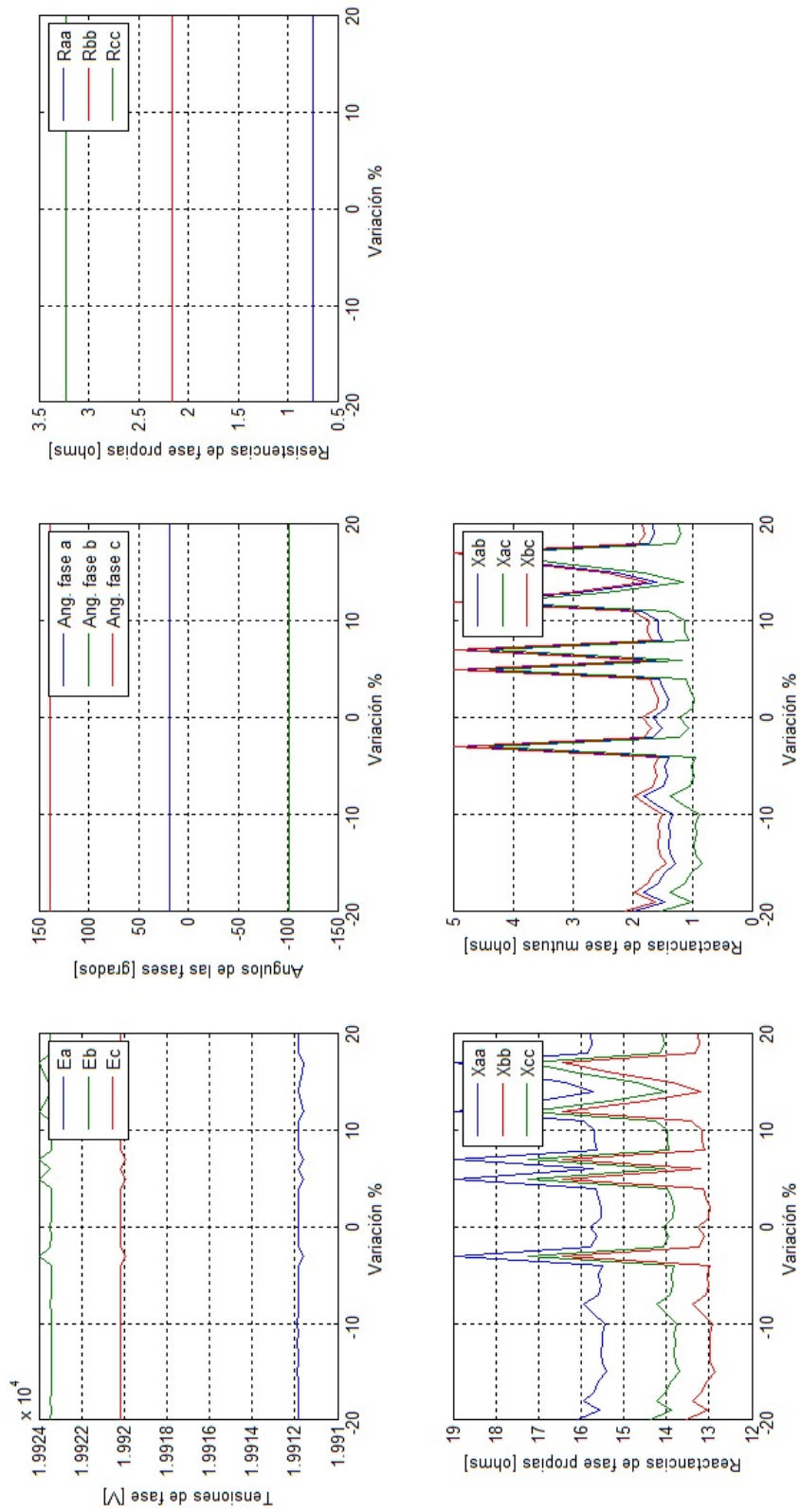


FIGURA C.13.: Resultados ante 41 variaciones en la reactancia mutua entre las fases a y b

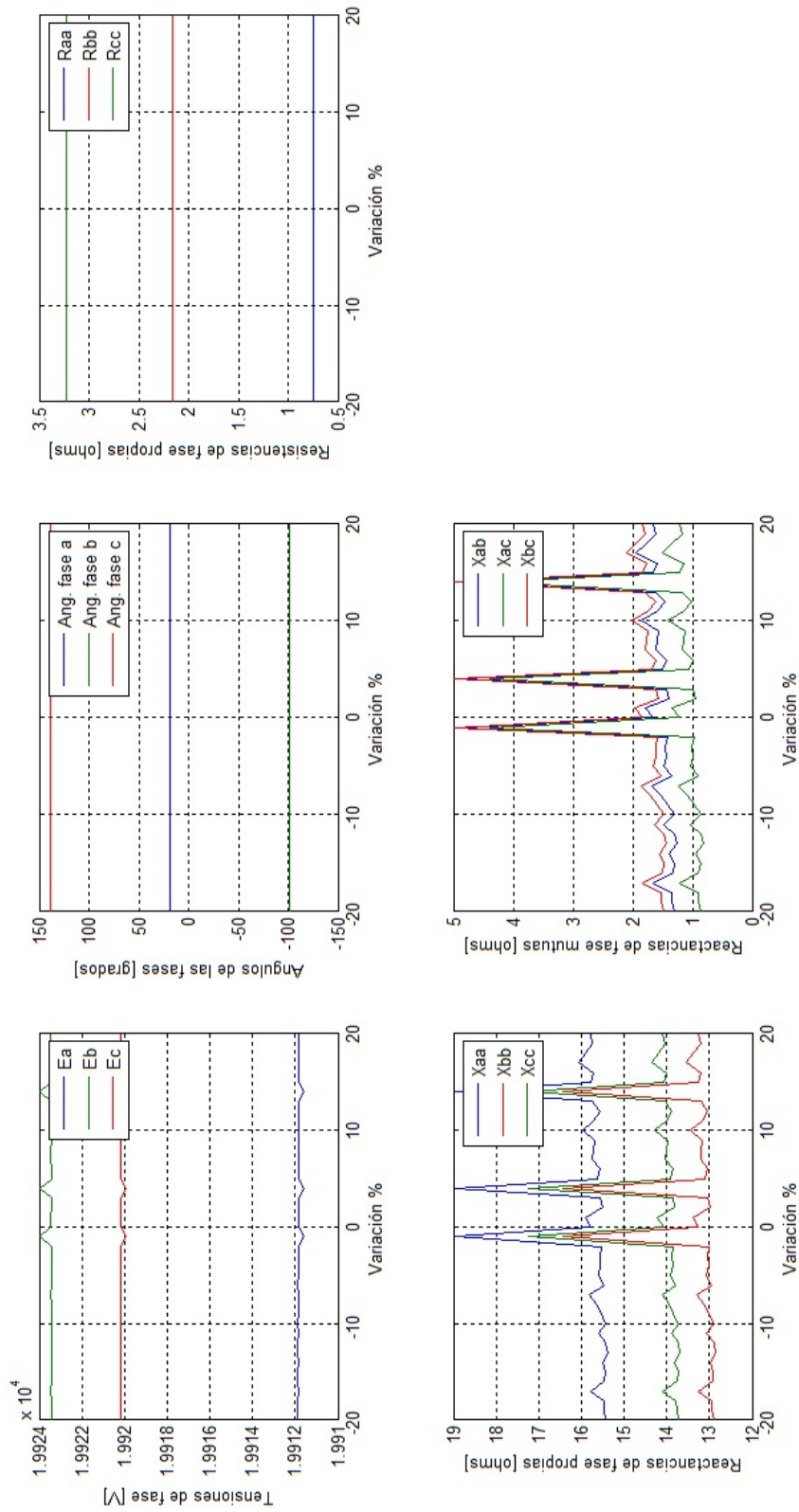


FIGURA C.14.: Resultados ante 41 variaciones en la reactancia mutua entre las fases a y c

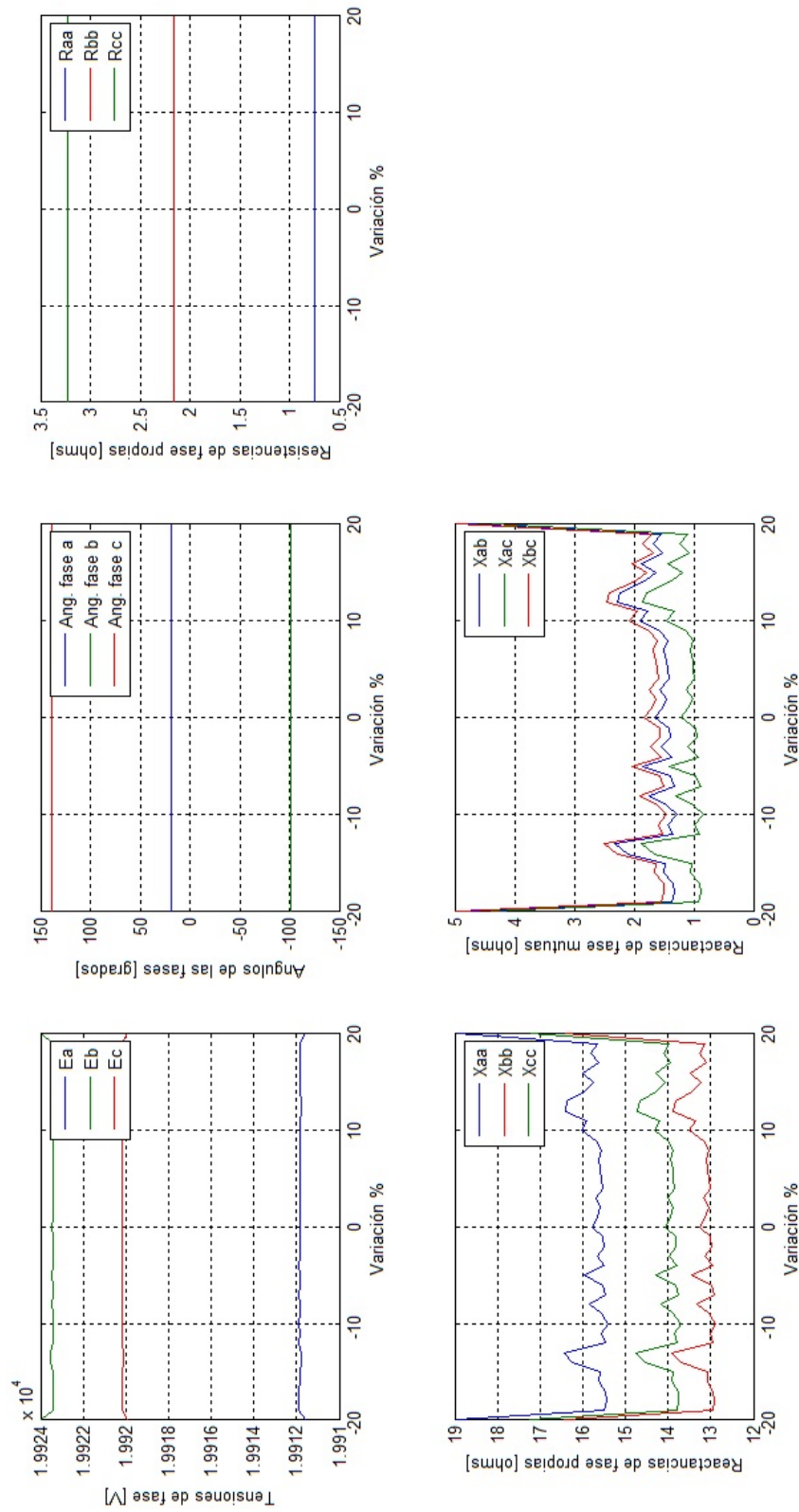


FIGURA C.15.: Resultados ante 41 variaciones en la reactancia mutua entre las fases b y c