

**LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE  
DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA:  
EVALUACIÓN DE ALGORITMOS**

CARLOS DAVID FERREIRA SEQUEDA  
SERGIO ANDRÉS MARTÍNEZ GUTIÉRREZ

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

2010

**LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE  
DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA:  
EVALUACIÓN DE ALGORITMOS**

CARLOS DAVID FERREIRA SEQUEDA  
SERGIO ANDRÉS MARTÍNEZ GUTIÉRREZ

Trabajo de grado para optar por el título 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 Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Bucaramanga

2010

*A mi Señor y padre Jesucristo que ha sido mi camino en mi vida, y que se que me guiará aún más allá de esta vida.*

*A mi madre y mi hermana que han sido ese apoyo incondicional durante mi vida.*

*A mis amigos y compañeros con quienes he podido compartir.*

*Carlos David Ferreira Sequeda*

*A mi madre, mi abuela y mi hermana que siempre han estado a mi lado brindandome su apoyo, amor y comprensión.*

*A todos mis amigos que han sido como otra familia y me han brindado su incondicional apoyo.*

*Sergio Andrés Martínez Gutiérrez.*

# Agradecimientos

Queremos expresar nuestra gratitud y agradecimientos al Dr. Gilberto Carrillo Caicedo, por su dirección, asesoría y colaboración en la elaboración de nuestro trabajo de grado.

Al Ingeniero Electricista, M.Sc.(c) Iván David Serna Suárez que gracias a su apoyo incondicional y orientación se hizo posible la culminación de este proyecto.

A nuestros compañeros y profesores quienes nos apoyaron en nuestro desarrollo profesional y humano a lo largo de la carrera.

# Índice General

<b>Agradecimientos</b>	<b>8</b>
<b>Índice General</b>	<b>14</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>18</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>20</b>
<b>Introducción</b>	<b>23</b>
<b>1. Descripción de los Métodos</b>	<b>25</b>
1.1. Método Algorítmico de Ratan Das . . . . .	25
1.1.1. Detección e Identificación del tipo de falla . . . . .	26
1.1.2. Adquisición de Datos . . . . .	27
1.1.3. Estimación de la Sección Fallada . . . . .	27
1.1.4. Desarrollo de un Sistema Radial Equivalente . . . . .	29
1.1.5. Modelado de las Cargas . . . . .	30
1.1.5.1. Selección de un Modelo de Carga: . . . . .	31
1.1.5.2. Estimación de las Tensiones y Corrientes de Prefalla .	32
1.1.5.3. Estimación de las Constantes de Carga . . . . .	34
1.1.6. Estimación de las Tensiones y Corrientes en el Nodo remoto N y en la Falla . . . . .	35
1.1.7. Estimación de la Localización de la Falla . . . . .	39
1.1.7.1. Fallas Monofásicas a Tierra: . . . . .	39
1.1.7.2. Fallas Bifásicas y Bifásicas a Tierra . . . . .	42
1.1.7.3. Fallas Trifásicas Balanceadas . . . . .	42
1.2. Método Algorítmico de Saha . . . . .	43
1.2.1. Estimación del nodo de falla . . . . .	44

1.2.1.1.	Cálculo de $Z_k^m$ con Medidas en el Alimentador Fallado:	44
1.2.1.2.	Cálculo de $Z_k^m$ con Medidas en la Subestación . . . . .	46
1.2.2.	Estimación de la Distancia a la Falla . . . . .	48
1.2.2.1.	Falla Monofásica . . . . .	49
1.2.2.2.	Falla Fase-Fase (Falla Bifásica, Falla Bifásica a Tierra o Falla Trifásica Balanceada) . . . . .	52
1.3.	Método de Morales . . . . .	55
1.3.1.	Equivalente del Sistema para Casos de Múltiple Estimación . .	55
1.3.2.	Cálculo de $m$ en Caso de Falla Monofásica: . . . . .	56
1.3.3.	Cálculo de $m$ en Caso de Falla Bifásica o Bifásica a Tierra: . . . .	58
1.3.4.	Cálculo de $m$ en Caso de Falla Trifásica Balanceada: . . . . .	59
1.3.5.	Selección del Lateral Fallado . . . . .	60
<b>2.</b>	<b>Implementación de los Métodos</b>	<b>62</b>
2.1.	Introducción . . . . .	62
2.2.	Herramienta MBM-SC1 . . . . .	63
2.2.1.	Función Topología . . . . .	63
2.2.2.	Función Integradora "Pratandas" . . . . .	64
2.2.2.1.	Subfunción Determinación de Falla . . . . .	64
2.2.2.2.	Subfunción Reactancia . . . . .	64
2.2.2.3.	Subfunción Busca Sección . . . . .	65
2.2.2.4.	Subfunción Prefalla . . . . .	65
2.2.2.5.	Subfunción Posfalla . . . . .	66
2.2.2.6.	Subfunción "Determinador de la Distancia 's'" . . . .	66
2.2.2.7.	Subfunción "Escritor" . . . . .	66
2.2.3.	Función Interfaz Principal "Ratandas" . . . . .	67
2.3.	Herramienta MBM-SC2 . . . . .	67
2.3.1.	Función Topología . . . . .	67
2.3.2.	Función Integradora "Psaha" . . . . .	68
2.3.2.1.	Subfunción Determinación de Falla . . . . .	68
2.3.2.2.	Subfunción "Estimación Sección" . . . . .	68
2.3.2.3.	Subfunción Reduce Secciones . . . . .	69
2.3.2.4.	Subfunción Estima Distancia . . . . .	69
2.3.2.5.	Subfunción "Escritor" . . . . .	69
2.3.3.	Función Interfaz Principal "Saha" . . . . .	70

2.4. Herramienta MME-SC . . . . .	70
2.4.1. Función Topología . . . . .	70
2.4.2. Función Integradora “Pmorales” . . . . .	71
2.4.2.1. Subfunción Lectura Archivo . . . . .	71
2.4.2.2. Subfunción Reduce Secciones . . . . .	71
2.4.2.3. Subfunción Flujo hasta Sección . . . . .	71
2.4.2.4. Subfunción “Ponderación Morales” . . . . .	72
2.4.2.5. Subfunción “Escritor” . . . . .	72
2.4.3. Función Interfaz Principal “Morales” . . . . .	73
<b>3. Validación y Resultados de las Herramientas</b>	<b>74</b>
3.1. Introducción . . . . .	74
3.2. Validación con el Circuito Modelo de 25 kV . . . . .	74
3.2.1. Validación Realizada a la Herramienta MBM-SC1 . . . . .	75
3.2.2. Validación Realizada a la Herramienta MBM-SC2 . . . . .	77
3.2.3. Validación Realizada a la Herramienta MME-SC . . . . .	79
3.3. Pruebas con el Circuito Alban de 34.5 kV Modelado 1 . . . . .	84
3.3.1. Resultados de la Herramienta MBM-SC1 . . . . .	86
3.3.2. Resultados de la Herramienta MBM-SC2 . . . . .	92
3.3.3. Resultados de la Herramienta MME-SC . . . . .	98
3.3.3.1. Aplicado a la Herramienta MBM-SC1 . . . . .	98
3.3.3.2. Aplicado a la Herramienta MBM-SC2 . . . . .	99
3.4. Pruebas con el Circuito Alban de 34.5 kV Modelado 2 . . . . .	101
3.4.1. Resultados de la Herramienta MBM-SC1 . . . . .	101
3.4.2. Resultados de la Herramienta MBM-SC2 . . . . .	104
3.5. Resultados a partir de las Medidas en la Cabecera del Circuito Alban 34.5 kV . . . . .	106
<b>4. Conclusiones</b>	<b>109</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>112</b>
<b>Anexos</b>	<b>115</b>

<b>A. Variabilidad de la Reactancia de Falla Vista desde la Cabecera debido a la Resistencia de Falla</b>	<b>116</b>
<b>B. Manual del Usuario</b>	<b>122</b>
B.1. Introducción . . . . .	122
B.2. Instalación y Ejecución de las Herramientas . . . . .	122
B.2.1. Instalación . . . . .	122
B.2.2. Ejecución . . . . .	123
B.3. Herramienta MBM-SC1 (RATANDAS) . . . . .	124
B.3.1. Ventana Principal . . . . .	124
B.3.2. Barra de Menú . . . . .	125
B.3.2.1. Archivo . . . . .	126
B.3.2.2. Opciones . . . . .	126
B.3.2.3. Ayuda . . . . .	126
B.3.3. Carga de la Topología del Sistema . . . . .	127
B.3.3.1. Pestaña para los Datos de las Secciones . . . . .	127
B.3.3.2. Pestaña para los Datos de las Cargas . . . . .	128
B.3.3.3. Pestaña para los Nodos Finales . . . . .	129
B.3.3.4. Carga del Archivo de Topología . . . . .	129
B.3.4. Carga de las Mediciones en la Cabecera . . . . .	130
B.3.4.1. Carga desde el “Prompt” de Matlab . . . . .	131
B.3.4.2. Carga desde la Matriz Manual . . . . .	132
B.3.4.3. Carga desde la Hoja de Fallas . . . . .	133
B.3.5. Datos en la Interfaz Principal y Corrida de la Herramienta . . . . .	134
B.3.5.1. Datos de Trabajo de la Interfaz . . . . .	134
B.3.5.2. Corrida de la Herramienta . . . . .	135
B.3.6. Hoja de Resultados . . . . .	135
B.4. Herramienta MBM-SC2 (SAHA) . . . . .	136
B.4.1. Ventana Principal . . . . .	136
B.4.2. Barra de Menú . . . . .	137
B.4.2.1. Archivo . . . . .	137
B.4.2.2. Opciones . . . . .	138
B.4.2.3. Ayuda . . . . .	138
B.4.3. Carga de la Topología del Sistema . . . . .	139
B.4.3.1. Pestaña para los Datos de las Secciones . . . . .	139

B.4.3.2.	Pestaña para los Datos de las Cargas . . . . .	140
B.4.3.3.	Pestaña para los Nodos Finales . . . . .	141
B.4.3.4.	Carga del Archivo de Topología . . . . .	142
B.4.4.	Carga de las Mediciones en la Cabecera . . . . .	142
B.4.4.1.	Carga desde el “Prompt” de Matlab . . . . .	143
B.4.4.2.	Carga desde la Matriz Manual . . . . .	143
B.4.4.3.	Carga desde la Hoja de Fallas . . . . .	144
B.4.5.	Datos en la Interfaz Principal y Corrida de la Herramienta . . .	145
B.4.5.1.	Datos de Trabajo de la Interfaz . . . . .	145
B.4.5.2.	Corrida de la Herramienta . . . . .	146
B.4.6.	Hoja de Resultados . . . . .	146
B.5.	Herramienta MME-SC (MORALES) . . . . .	148
B.5.1.	Ventana Principal . . . . .	148
B.5.2.	Barra de Menú . . . . .	148
B.5.2.1.	Archivo . . . . .	149
B.5.2.2.	Ayuda . . . . .	149
B.5.3.	Carga de la Topología del Sistema . . . . .	150
B.5.3.1.	Pestaña para los Datos de las Secciones . . . . .	150
B.5.3.2.	Pestaña para los Datos de las Cargas . . . . .	151
B.5.3.3.	Pestaña para los Nodos Finales . . . . .	152
B.5.3.4.	Carga del Archivo de Topología . . . . .	152
B.5.4.	Carga de las Mediciones en la Cabecera . . . . .	153
B.5.4.1.	Carga desde el “Prompt” de Matlab . . . . .	153
B.5.4.2.	Carga desde la Matriz Manual . . . . .	154
B.5.5.	Datos en la Interfaz Principal y Corrida de la Herramienta . . .	155
B.5.5.1.	Datos de Trabajo de la Interfaz . . . . .	155
B.5.5.2.	Corrida de la Herramienta . . . . .	156
B.5.6.	Hoja de Resultados . . . . .	156

# Índice de Figuras

1.1. Diagrama lógico para identificación del tipo de falla y fases falladas . . .	26
1.2. Sistema de distribución radial original . . . . .	30
1.3. Sistema de distribución equivalente con falla en F . . . . .	30
1.4. Sistema de distribución equivalente con falla en F1 . . . . .	30
1.5. Sección de línea de distribución entre los nodos M y R . . . . .	32
1.6. Flujo de corrientes en el nodo R . . . . .	33
1.7. Tensiones y corrientes de prefalla en los nodos X y N . . . . .	34
1.8. Tensiones y corrientes en el nodo F y N durante la falla . . . . .	36
1.9. Medidas tomadas en el alimentador fallado . . . . .	45
1.10. Medidas tomadas en la subestación. a) Estado prefalla. b) Estado pos- falla . . . . .	46
1.11. Equivalente del circuito fallado hasta el nodo K falla monofásica . . . .	49
1.12. Elementos comprendidos en la resistencia residual $\Delta Z_f$ falla monofá- sica . . . . .	50
1.13. Equivalente del circuito hasta el nodo K falla fase-fase . . . . .	53
1.14. Elementos comprendidos en la resistencia residual $\Delta Z_f$ falla fase-fase .	54
1.15. Equivalente para casos de múltiple estimación . . . . .	56
1.16. Caso falla monofásica . . . . .	57
1.17. Caso falla Bifásica y Bifásica a tierra . . . . .	58
1.18. Caso falla trifásica balanceada . . . . .	59
2.1. Diagrama de flujo de la implementación de las herramientas . . . . .	62
3.1. Circuito modelo 25 kV . . . . .	75
3.2. Fallas monofásicas validación herramienta MBM-SC1 . . . . .	76
3.3. Fallas bifásicas validación herramienta MBM-SC1 . . . . .	76
3.4. Fallas bifásicas a tierra validación herramienta MBM-SC1 . . . . .	77
3.5. Fallas trifásicas validación herramienta MBM-SC1 . . . . .	77

3.6. Fallas monofásicas validación herramienta MBM-SC2 . . . . .	78
3.7. Fallas bifásicas validación herramienta MBM-SC2 . . . . .	78
3.8. Fallas bifásicas a tierra validación herramienta MBM-SC2 . . . . .	79
3.9. Fallas trifásicas validación herramienta MBM-SC2 . . . . .	79
3.10. Errores en la localización de fallas, considerando falla fase a tierra en cada uno de los laterales 1(a) y 2(b). . . . .	80
3.11. Errores en la localización de fallas, considerando falla fase a fase en cada uno de los laterales 1(a) y 2(b). . . . .	81
3.12. Errores en la localización de fallas, considerando falla fase - fase a tierra en cada uno de los laterales 1(a) y 2(b). . . . .	81
3.13. Errores en la localización de fallas, considerando falla trifásica en cada uno de los laterales 1(a) y 2(b). . . . .	82
3.14. Circuito Alban de 34.5 kV sin subterránea ni red compacta. . . . .	85
3.15. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas monofásicas. Carga nominal	86
3.16. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas monofásicas. 60 % carga nominal . . . . .	86
3.17. Resultados herramienta MBM-SC1 monofásicas. 120 % carga nominal .	87
3.18. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas. Carga nominal . . .	87
3.19. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas. 60 % carga nominal	88
3.20. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas. 120 % carga nominal	88
3.21. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas a tierra. Carga nominal . . . . .	89
3.22. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas fallas bifásicas a tierra. 60 % carga nominal . . . . .	89
3.23. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas a tierra. 120 % carga nominal . . . . .	90
3.24. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas trifásicas. Carga nominal . . .	90
3.25. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas trifásicas. 60 % carga nominal	91
3.26. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas trifásicas. 120 % carga nominal	91
3.27. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas monofásicas. Carga nominal	92
3.28. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas monofásicas. 60 % carga nominal . . . . .	92
3.29. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas monofásicas. 120 % carga nominal . . . . .	93
3.30. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas. Carga nominal . . .	93

3.31. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas. 60 % carga nominal	94
3.32. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas. 120 % carga nominal	94
3.33. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas a tierra. Carga nominal . . . . .	95
3.34. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas a tierra. 60 % carga nominal . . . . .	95
3.35. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas a tierra. 120 % carga nominal . . . . .	96
3.36. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas trifásicas. Carga nominal . . .	96
3.37. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas trifásicas. 60 % carga nominal	97
3.38. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas trifásicas. 120 % carga nominal	97
3.39. Circuito Alban de 34.5 kV con subterránea y red compacta. . . . .	102
3.40. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas monofásicas . . . . .	102
3.41. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas . . . . .	103
3.42. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas a tierra . . . . .	103
3.43. Resultados herramienta MBM-SC1 fallas trifásicas. . . . .	104
3.44. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas monofásicas . . . . .	104
3.45. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas . . . . .	105
3.46. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas a tierra . . . . .	105
3.47. Resultados herramienta MBM-SC2 fallas trifásicas . . . . .	106
3.48. Registros de tensiones y corrientes en la cabecera del circuito. Falla fase C a tierra. . . . .	108
3.49. Registros de tensiones y corrientes en la cabecera del circuito. Falla fases A-B. . . . .	108
A.1. Circuito equivalente del sistema que se ve desde la cabecera cuando ocurre una falla . . . . .	116
A.2. Circuito equivalente del sistema que se ve desde la cabecera con la $Z_{edf}$ reducida. . . . .	117
A.3. Reactancia aportada a la reactancia hasta el punto de falla cuando la falla es en nodos iniciales . . . . .	119
A.4. Reactancia aportada a la reactancia hasta el punto de falla cuando la falla es en nodos medios . . . . .	120
A.5. Reactancia aportada a la reactancia hasta el punto de falla cuando la falla es en nodos finales . . . . .	121

B.1. Instalación del directorio de la herramienta (RATANDAS). . . . .	123
B.2. Cambio del directorio en Matlab a la herramienta a usar (SAHA) . . .	124
B.3. Ventana principal de la herramienta (RATANDAS) . . . . .	125
B.4. Barra de menú de la herramienta. . . . .	125
B.5. Cuadro del efecto impedancia (RATANDAS) . . . . .	127
B.6. Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de <i>secciones</i> . . . . .	128
B.7. Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de <i>cargas</i> . . . . .	129
B.8. Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de <i>odosfinales</i> . . . . .	130
B.9. Subventana para carga del archivo de topología . . . . .	130
B.10. Carga de la matriz de falla desde el “prompt” . . . . .	131
B.11. Resultados Interfaz comunicativa entre ATP y la herramienta (RATANDAS). . . . .	132
B.12. Matriz de carga manual de la interfaz principal . . . . .	133
B.13. Archivo de fallas registradas para ingreso a la herramienta (RATANDAS) . . . . .	133
B.14. Subventana para carga del archivo de fallas . . . . .	134
B.15. Aviso mostrado al finalizar el análisis de la falla . . . . .	135
B.16. Archivo de resultados de la herramienta (RATANDAS) . . . . .	136
B.17. Ventana principal de la herramienta (SAHA) . . . . .	137
B.18. Barra de menú de la herramienta. . . . .	138
B.19. Cuadro del efecto impedancia (SAHA) . . . . .	139
B.20. Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de <i>secciones</i> . . . . .	140
B.21. Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de <i>cargas</i> . . . . .	141
B.22. Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de <i>odosfinales</i> . . . . .	141
B.23. Subventana para carga del archivo de topología . . . . .	142
B.24. Carga de la matriz de falla desde el “prompt” . . . . .	143
B.25. Matriz de carga manual de la interfaz principal . . . . .	144
B.26. Archivo de fallas registradas para ingreso a la herramienta (SAHA) . .	144
B.27. Subventana para carga del archivo de fallas . . . . .	145
B.28. Aviso mostrado al finalizar el análisis de la falla . . . . .	146
B.29. Archivo de resultados de la herramienta . . . . .	147
B.30. Ventana principal de la herramienta (MORALES) . . . . .	148
B.31. Barra de menú de la herramienta. . . . .	149
B.32. Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de <i>secciones</i> . . . . .	150
B.33. Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de <i>cargas</i> . . . . .	151

B.34. Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de <i>odosfinales</i> . . . . .	152
B.35. Subventana para carga del archivo de topología . . . . .	153
B.36. Carga de la matriz de falla desde el “prompt” . . . . .	154
B.37. Matriz de carga manual de la interfaz principal . . . . .	155
B.38. Aviso mostrado al finalizar el análisis de la falla . . . . .	156
B.39. Archivo de resultados de la herramienta . . . . .	157

# Índice de Tablas

1.1. Selección de una fase de referencia para diferentes tipos de falla . . . .	35
3.1. Nodos seleccionados para validación de la herramienta MBM-SC1 . .	76
3.2. Nodos seleccionados para validación de la herramienta MBM-SC2 . .	78
3.3. Resultados de la localización en el sistema de laterales con impedancias mutuas diferenciadas. . . . .	83
3.4. Resultados de la localización en el sistema de laterales con impedancias mutuas semejantes. . . . .	83
3.5. Resultados de la localización en el sistema de laterales con impedancias mutuas diferenciadas y cargas homogéneas. . . . .	84
3.6. Nodos seleccionados para simulaciones en el Alban de 34.5 kV. . . .	85
3.7. Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC1. Fallas monofásicas . . . . .	98
3.8. Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC1. Fallas bifásicas . . . . .	99
3.9. Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC1. Fallas bifásicas a tierra . . . . .	99
3.10. Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC1. Fallas trifásicas . . . . .	99
3.11. Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC2. Fallas monofásicas . . . . .	100
3.12. Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC2. Fallas bifásicas . . . . .	100
3.13. Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC2. Fallas bifásicas a tierra . . . . .	100
3.14. Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC2. Fallas trifásicas. . . . .	101

3.15. Resultados herramienta MBM-SC1 a partir de medidas en la cabecera.	107
3.16. Resultados herramienta MBM-SC2 a partir de medidas en la cabecera.	107

## RESUMEN

### **TÍTULO:**

LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA: EVALUACIÓN DE ALGORITMOS<sup>1</sup>

### **AUTORES:**

CARLOS DAVID FERREIRA SEQUEDA  
SERGIO ANDRÉS MARTÍNEZ GUTIÉRREZ<sup>2</sup>

### **PALABRAS CLAVE:**

Localización de fallas, continuidad del suministro de energía eléctrica, sistemas de potencia, calidad de potencia, EMTP, ATPDraw, programación Matlab.

### **DESCRIPCIÓN:**

Este documento evalúa el comportamiento y desempeño en un ambiente real de las técnicas de localización de fallas RATAN DAS y SAHA, técnicas que se basan en análisis circuital para hallar la ubicación de las fallas dentro de los sistemas de distribución de energía eléctrica. Debido a que estas técnicas buscan encontrar la sección fallada mediante la comparación de las reactancias de cada uno de los ramales del sistema con la reactancia medida en la cabecera del circuito, los resultados de estas técnicas muestran múltiples estimaciones del sitio de falla. Por tanto, para eliminar esta múltiple estimación este trabajo evalúa la técnica MORALES que intenta reconocer el verdadero lugar de la falla por medio de la comparación de los errores de la estimación de la distancia (de falla) en cada sección.

Estas tres técnicas son evaluadas en un circuito modelo y en un circuito real probándose bajo todo tipo de fallas en un ambiente de simulación, luego son evaluadas con registros reales de fallas obtenidas mediante el medidor puesto en la cabecera del circuito real.

---

<sup>1</sup>Proyecto de Grado

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

## ABSTRACT

**TITLE:**

FAULT LOCATION IN SYSTEMS ELECTRIC POWER DISTRIBUTION: EVALUATION OF ALGORITHMS<sup>1</sup>

**AUTHORS:**

CARLOS DAVID FERREIRA SEQUEDA

SERGIO ANDRÉS MARTÍNEZ GUTIÉRREZ <sup>2</sup>

**KEY WORDS:**

Fault Location, electric energy service continuity, power systems, power quality, EMTP, ATPDraw, programming on Matlab.

**DESCRIPTION:**

This paper evaluates the behavior and performance in a real environment of the faults location techniques RATAN DAS and SAHA, techniques that are based on circuital analysis to find the location of faults within the distribution systems of electric power. Because these techniques seek to find the section failed by comparing the reactance of each one of the branches of the system with the reactance measured at the head of the circuit, the results of these techniques show multiple estimates of the fault. Therefore, to eliminate the multiple estimation this paper evaluates The MORALES Technique that attempts to recognize the true location of the fault by comparing the errors of the estimated distance (of fault) in each section.

These three techniques are evaluated on a circuit model and on a real circuit and are tested under all types of faults in a simulation environment. Then, the techniques are evaluated with actual fault records produced by the meter placed on the head of the real circuit.

---

<sup>1</sup>Degree Project

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

# Introducción

Los sistemas de distribución eléctrica son los medios por los cuales la mayor parte de la energía generada es entregada a los usuarios finales. Por lo mismo, la calidad y la eficiencia de la energía se encuentran directamente ligadas al mejoramiento del suministro y la disminución de los tiempos de interrupción en dichos sistemas.

Los sistemas de distribución poseen características que los diferencian de los sistemas de transmisión. En los sistemas de transmisión, por ser mallados, puede colocarse un equipo localizador en cada extremo de la línea de transmisión, mientras que, en los sistemas de distribución el equipo usualmente está localizado sólo en cabecera, esto es, en la subestación. Además, los sistemas de distribución a diferencia de los de transmisión son generalmente de forma ramificada y de secciones no homogéneas [SRI05].

Dadas las diferencias entre los sistemas de transmisión y distribución, es ineficiente implementar técnicas de localización de fallas usadas en sistemas de transmisión para los de distribución. Entonces, se hace necesario incurrir en nuevos métodos diseñados teniendo en cuenta las características de los sistemas de distribución.

Hasta el momento se ha abordado este problema básicamente desde dos puntos de vista, los métodos basados en el conocimiento *MBC* y los métodos basados en el modelo *MBM*. Los métodos basados en el conocimiento utilizan herramientas como las máquinas de soporte vectorial *SVM* [RS06, IGR05], la combinación de la lógica difusa con redes neuronales *LAMDA* [BN06, MG06] y métodos estadísticos como las mezclas finitas en combinación con técnicas de clustering o agrupamiento (a saber la técnica de los *k* vecinos más cercanos) [CA06, LR07, ST06] entre otras. Por otra parte los métodos basados en el modelo utilizan los parámetros de la topología del circuito para la localización de las fallas.

Teniendo en cuenta lo anterior y conociendo la existencia del gran número de técnicas de localización basadas en el modelo para sistemas de distribución, y el poco

conocimiento de su comportamiento en circuitos reales, este trabajo de grado busca aplicar los métodos algorítmicos de Ratan Das [Das98] y Saha [SRI05, SR02] en un circuito real (Alban) y con ayuda de algunos registros reales de fallas observar su desempeño. Debido a que estos dos métodos algorítmicos y la mayoría de las demás técnicas basadas en el modelo no determinan una única ubicación de la falla cuando el sistema se encuentra muy ramificado, este trabajo introdujo la evaluación de la metodología de Morales [MEMFVT09] que busca eliminar las múltiples estimaciones del lugar de la falla.

Por tal motivo, se creó basándose en la filosofía principal de cada uno de estos métodos las herramienta “software” MBM-SC1 (Adaptación método algorítmico de Ratan DAS), MBM-SC2 (Adaptación método algorítmico de Saha) y MME-SC<sup>1</sup> (Adaptación metodología de Morales) de uso sencillo y capaz de trabajar con cualquier sistema de distribución <sup>2</sup>. Estas herramientas hacen uso de una interfaz para adquirir los datos de la topología de los sistemas y para realizar la carga de los mismos a las herramientas, además de poseer interfaces de comunicación con el simulador ATP y los registros de falla del circuito Alban.

Las validaciones de las herramientas se realizaron simulando en ATP el circuito modelo enunciado en la tesis doctoral de Ratan Das, y realizándole los diferentes tipos de fallas; luego las herramientas son evaluadas bajo simulación en el circuito real y con algunos registros reales de falla.

El documento está organizado en 4 capítulos y 2 anexos. En el primer capítulo se describen los métodos aquí usados. El segundo capítulo trata la implementación de los métodos describiendo ordenadamente las estructuras usadas en la creación de las herramientas. El tercer capítulo contiene las pruebas y resultados obtenidos de la evaluación de los métodos para cada tipo de falla. El cuarto presenta las conclusiones y observaciones de este trabajo.

Finalmente se presentan el anexo A que muestra un análisis del método de la reactancia y el anexo B en el cual se presenta el manual del usuario para cada una de las herramientas (a este manual se puede acceder directamente desde cada una de las herramientas).

---

<sup>1</sup>Las siglas *MBM* hacen referencia a que estos son Métodos Basados en el Modelo. La sigla *MME* hace referencia a que este es un Metodología que pretende eliminar la Múltiple Estimación. Las siglas finales *SC* hacen referencia a los autores.

<sup>2</sup>Los trabajos adelantados hasta el momento no han tenido en cuenta esto, debido a las dificultades que trae el agrupamiento de carga y reducción de los circuitos.

# 1. Descripción de los Métodos

En este capítulo se hace una descripción detallada de las principales características de los métodos propuestos en [Das98], [SR02] y [MEMFVT09]. Tanto el algoritmo propuesto por Ratan Das como el propuesto por Saha son empleados para hacer una estimación del lugar donde ocurrió la falla. Según la topología del circuito la estimación realizada por los algoritmos puede ser múltiple, problema que se intenta solucionar con la metodología propuesta por Morales.

Los métodos de localización de fallas que serán revisados en este capítulo hacen uso de señales de tensión y corriente a frecuencia fundamental en estado estable y valores eficaces de prefalla<sup>1</sup> y posfalla<sup>2</sup> en la cabecera del circuito, así como de los parámetros de la red para determinar la localización de la falla por medio de un análisis circuital [QB05].

## 1.1. Método Algorítmico de Ratan Das

Esta técnica iterativa permite la localización de fallas en sistemas de distribución radiales que contengan laterales, cargas derivadas y líneas no homogéneas. Estima la localización de la falla utilizando tensiones y corrientes a frecuencia fundamental medidos en la cabecera de la red. Con ayuda de los fasores de tensiones y corrientes se calcula una impedancia, y a partir de la componente reactiva de esta impedancia se obtiene una estimación del lugar de la falla [Das98]. Lo anteriormente mencionado será detallado a continuación.

---

<sup>1</sup>Prefalla es definido como el estado estable del circuito antes de suceder la falla.

<sup>2</sup>Posfalla es definido como el momento en que los valores de tensión y corriente se estabilizan después de ocurrida la falla.

### 1.1.1. Detección e Identificación del tipo de falla

La corriente de línea estimada durante una falla contiene tanto la corriente de la carga como la componente de corriente debida a la falla. Si una o más de las corrientes de línea  $I_{amr}$ ,  $I_{bmr}$ ,  $I_{cmr}$  son mayores a una corriente umbral<sup>3</sup>  $I_t$  estimada, entonces se considera que una falla ha ocurrido. Adicionalmente, es posible calcular el fasor de corriente de secuencia cero, como se muestra en la ecuación 1.1, y una vez que este supera  $I_t$  se determina que la falla es a tierra [Das98].

$$I_{0mr} = \frac{I_{amr} + I_{bmr} + I_{cmr}}{3} \quad (1.1)$$

Para identificar el tipo de falla se realiza una serie de comparaciones que son expresadas en la figura 1.1.

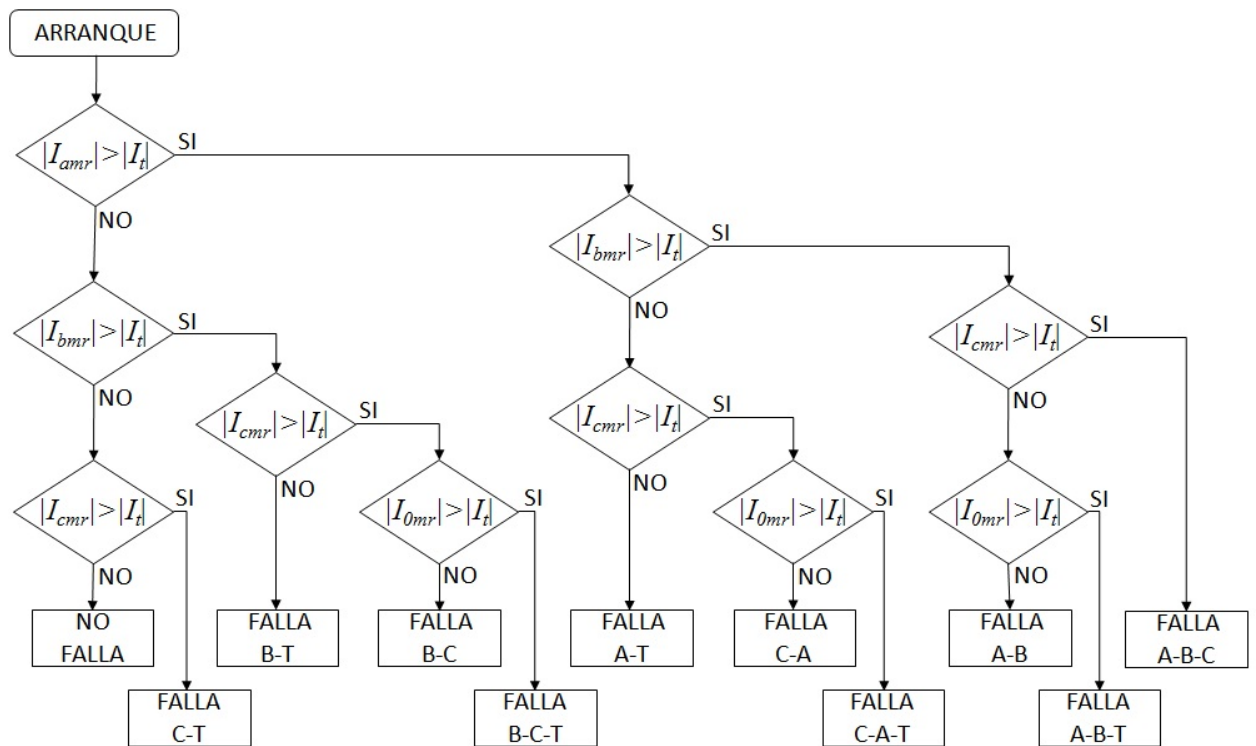


FIGURA 1.1.: Diagrama lógico para identificación del tipo de falla y fases falladas

<sup>3</sup>La selección de la corriente umbral se hace de acuerdo a un estudio previo de corto circuito.

### 1.1.2. Adquisición de Datos

Una vez detectada la incidencia de una falla se debe proceder a guardar los valores de tensión y corriente de prefalla y posfalla, los cuales serán posteriormente utilizados para estimar el lugar donde ocurrió. Los datos de prefalla y posfalla se deben tomar de tal forma que se garantice sólo componentes de estado estable [Das98]. Con los datos obtenidos anteriormente se deben calcular los siguientes fasores:

$V_{amr}$ ,  $V_{bmr}$  y  $V_{cmr}$  respectivamente tensiones a tierra fase A, fase B y fase C medidas en  $M$ .

$I_{amr}$ ,  $I_{bmr}$  y  $I_{cmr}$  respectivamente corrientes de línea fase A, fase B y fase C medidas en  $M$ .

$M$  nodo donde se toman las medidas en la cabecera del circuito.

$R$  nodo inmediatamente siguiente al nodo  $M$ .

### 1.1.3. Estimación de la Sección Fallada

En el proceso de localización de la falla, primero se encuentra la sección de la línea donde ocurrió. Para esto se hace una comparación entre la reactancia aparente y la reactancia modificada. Es importante aclarar que en este proceso se desprecia los efectos de las cargas y la magnetización de las líneas [QB05].

Si la reactancia modificada  $X_{mr}^m$  es mas pequeña que la reactancia aparente, entonces la falla se encuentra en una sección posterior al nodo  $R$ . Por lo tanto se calcula nuevamente la reactancia modificada de esta nueva sección y se adiciona la reactancia modificada de la sección anterior. Si esta nueva reactancia modificada sigue siendo menor que la reactancia aparente, se vuelve a repetir el proceso anterior para la nueva sección, hasta que ésta sea mayor. Caso en el cual la falla se encuentra en la sección comprendida entre los nodos  $X$  y  $X + 1$  [Das98].

Dependiendo del tipo de falla la reactancia aparente y la reactancia modificada se calculan de la siguiente manera:

- Falla Monofásica a Tierra:

Fase A a tierra:

$$Z_{ml} = \frac{V_{am}}{I_{amr}} \quad (1.2)$$

$$X_{ml} = \text{Im}(Z_{ml}) \quad (1.3)$$

Donde:

$Z_{ml}$  es la impedancia aparente entre el nodo  $M$  y la falla.

$X_{ml}$  es la reactancia aparente entre el nodo  $M$  y la falla.

La reactancia modificada  $X_{mr}^m$  para la primera sección entre los nodos  $M$  y  $R$ , se calcula así:

$$X_{mr}^m = X_{1mr} + \frac{X_{0mr} - X_{1mr}}{3} \quad (1.4)$$

Donde:

$X_{0mr}$  es la reactancia de secuencia cero de la sección entre los nodos  $M$  y  $R$ .

$X_{1mr}$  es la reactancia de secuencia positiva de la sección entre los nodos  $M$  y  $R$ .

El proceso para calcular la reactancia modificada en cada una de las secciones del resto del circuito es igual al expuesto entre los nodos  $M$  y  $R$ .

La determinación de la sección donde ocurrió la falla monofásica a tierra en el caso de fase B o C se hace de forma similar.

- Falla Bifásica Línea-Línea a Tierra

Para falla Bifásica fases B-C a tierra

$$Z_{m2g} = \frac{V_{bm} - V_{cm}}{I_{bmr} - I_{cmr}} \quad (1.5)$$

$$X_{m2g} = \text{Im}(Z_{m2g}) \quad (1.6)$$

Donde:

$Z_{m2g}$  es la impedancia aparente entre el nodo  $M$  y la falla.

$X_{m2g}$  es la reactancia aparente entre el nodo  $M$  y la falla.

Para este caso la reactancia modificada  $X_{mr}^m$  para la primera sección entre los nodos  $M$  y  $R$  es:

$$X_{mr}^m = X_{1mr}$$

El proceso para calcular la reactancia modificada en cada una de las secciones del resto del circuito es igual al expuesto entre los nodos  $M$  y  $R$ .

La determinación de la sección donde ocurrió la falla bifásica a tierra en el caso de las fases A-B a tierra o C-A a tierra se hace de forma similar.

- Falla Bifásica Linea-Linea

El procedimiento para estimar la reactancia aparente y la reactancia modificada es igual al hecho en el caso anterior.

- Falla Trifásica:

$$Z_{m3} = \frac{V_{1m}}{I_{1mr}} \quad (1.7)$$

$$X_{m3} = \text{Im}(Z_{m3}) \quad (1.8)$$

Donde:

$V_{1m}$  es la tensión de secuencia positiva en el nodo  $M$ .

$I_{1mr}$  es la corriente de línea de secuencia positiva en el nodo  $M$ .

$Z_{m3}$  es la impedancia aparente de secuencia positiva entre el nodo  $M$  y la falla.

$X_{m3}$  es la reactancia aparente de secuencia positiva entre  $M$  y la falla.

En este ultimo caso la reactancia modificada  $X_{mr}^m$  se calcula igual que en el caso de falla bifásicas línea-línea.

#### 1.1.4. Desarrollo de un Sistema Radial Equivalente

Una vez estimada la sección donde ocurrió la falla entre los nodos  $X$  y  $X + 1$ , se debe realizar un equivalente del sistema de distribución radial con laterales a uno sin laterales. Si nuestro sistema es el mostrado en la figura 1.2 y suponemos que la falla ocurrió en  $F$  entonces el sistema radial equivalente será el mostrado en la figura 1.3, en el cual las cargas ubicadas en los laterales  $K$  y  $L$  se concentran en el nodo  $X + 1$  y las cargas en  $N - 1$  se concentran en una sola. Suponiendo ahora la falla  $F1$  que ocurrió en un lateral, el sistema radial equivalente será el mostrado en la figura 1.4, donde la carga en el nodo  $K$  se concentra en el nodo  $J$  y las cargas ubicadas entre los nodos  $X - 1$  y  $N$  se consolidan como una sola, ubicada en  $X - 1$  [Das98].

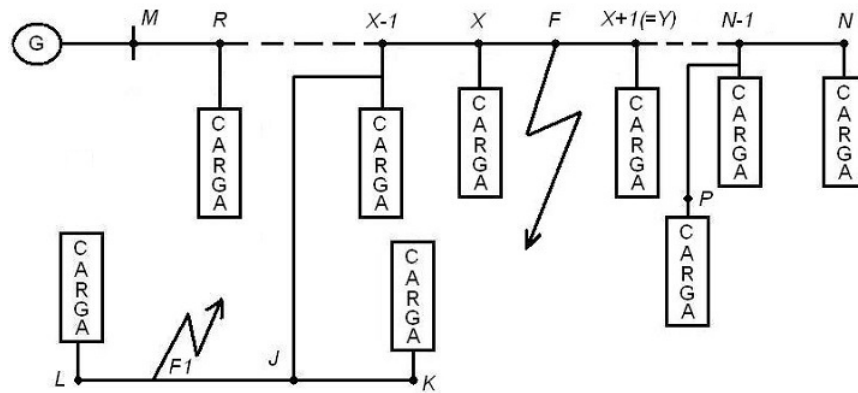


FIGURA 1.2.: Sistema de distribución radial original

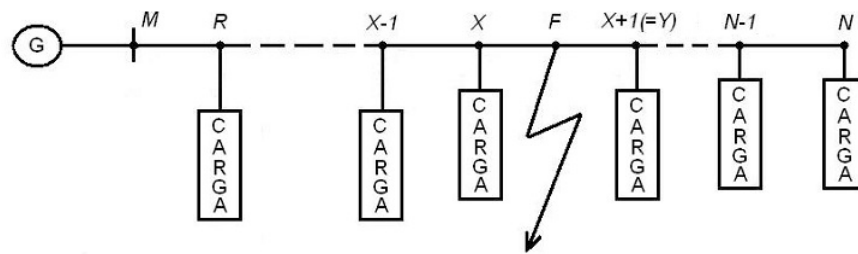


FIGURA 1.3.: Sistema de distribución equivalente con falla en F

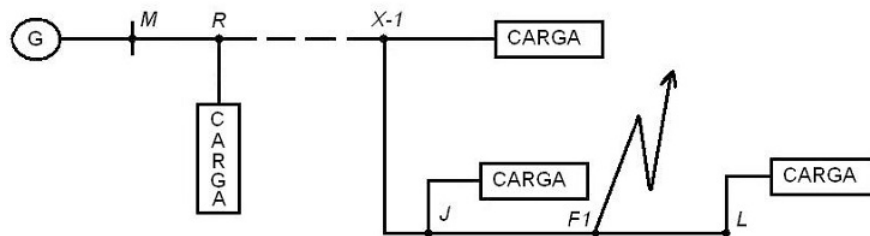


FIGURA 1.4.: Sistema de distribución equivalente con falla en F1

### 1.1.5. Modelado de las Cargas

Las cargas localizadas en cada uno de los nodos son modeladas como dependientes de la tensión aplicada a cada una de ellas. Las constantes que describen la relación entre la tensión y la admitancia son estimadas de las tensiones y corrientes de carga en prefalla [Das98]. El proceso consiste en los siguientes pasos:

1. Selección de un modelo de carga.
2. Estimación de la tensiones y corrientes de prefalla en todos los nodos hasta el

nodo  $X$  y en el nodo  $N$ .

3. Estimación de la constantes de carga.

#### 1.1.5.1. Selección de un Modelo de Carga:

Varios modelos de cargas no lineales se han sugerido para representar cargas en estudios de sistemas de transmisión. Similares conceptos se aplican en estudios relacionados con sistemas de distribución. Se utilizará un modelo de respuesta estática, para el cual las cargas son representadas como impedancias variables respecto al valor de la tensión del nodo al que están conectadas [Das98], como se muestra en la ecuación 1.9:

$$Y_r = G_r |V_r|^{np-2} + jB_r |V_r|^{nq-2} \quad (1.9)$$

Donde:

$Y_r$  es la admitancia de la carga.

$G_r$  constante proporcional a la conductancia de la carga.

$B_r$  constante proporcional a la susceptancia de la carga.

Los valores de  $np$  y  $nq$  según el tipo carga son:

$np = nq = 0$  para cargas de potencia constante.

$np = nq = 1$  para cargas de corriente constante.

$np = nq = 2$  para cargas de impedancia constante.

Adicionalmente se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones dependiendo si la carga es monofásica, bifásica o trifásica.

- Carga Monofásica:

Una carga monofásica se modela como una falla monofásica a tierra, con impedancias de falla igual a la impedancia de carga.

- Carga Bifásica:

Una carga bifásica se modela como una falla bifásica, con impedancias de falla igual a la impedancia de carga.

- Carga trifásica:

Una carga trifásica se asume como una carga balanceada y se modela como una falla trifásica, con impedancia de falla igual a la impedancia de carga.

### 1.1.5.2. Estimación de las Tensiones y Corrientes de Prefalla

Las tensiones y corrientes en la sección de línea mostrada en la figura 1.5, son expresadas mediante [Das98]:

$$\begin{bmatrix} V_r \\ I_{rm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -B_{mr} \\ C_{mr} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ I_{mr} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

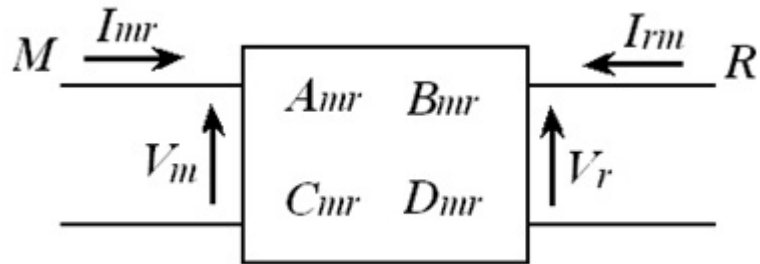


FIGURA 1.5.: Sección de línea de distribución entre los nodos M y R

Utilizando la ecuación 1.10 podemos obtener las tensiones y corrientes de secuencia en prefalla para el nodo R. Las corrientes de carga en prefalla del nodo R se obtienen mediante el siguiente proceso [Das98]:

- Carga Monofásica:

La impedancia de carga en prefalla, se calcula a partir de la potencia aparente de la carga  $S_r$ , así:

$$|Z_r| = \frac{|V_r|^2}{|S_r|} \quad (1.11)$$

Si no se conoce el factor de potencia de la carga, se asume un valor entre 0.8 y 0.88 en atraso para cargas con motores de inducción. La admitancia de carga en prefalla  $Y_r$  y la corriente de secuencia se estiman usando las ecuaciones 1.12 y 1.13 [Das98].

$$Y_r = \frac{1}{Z_r} \quad (1.12)$$

$$I_{0r} = I_{1r} = I_{2r} = \frac{V_{0r} + V_{1r} + V_{2r}}{3Z_r} \quad (1.13)$$

■ Carga Bifásica:

La corriente de prefalla  $I_r$ , de una carga conectada entre las fases B y C en el nodo  $R$ , esta dado por:

$$I_r = \frac{V_{rBC}}{Z_r} \quad (1.14)$$

Las corrientes de secuencia en prefalla para la carga se calculan a partir de las corrientes de línea, las cuales se obtienen a partir de las corrientes de carga [Das98].

■ Carga Trifásica:

Las cargas trifásicas se asumen balanceadas. La admitancia de carga se calcula de manera similar a la usada para carga monofásica. Las corrientes de secuencia en prefalla de una carga trifásica conectada en el nodo  $R$  se definen como [Das98]:

$$I_{0r} = \frac{V_{0r}}{Z_r}, I_{1r} = \frac{V_{1r}}{Z_r} \text{ y } I_{2r} = \frac{V_{2r}}{Z_r} \quad (1.15)$$

En la figura 1.6 se observa las corrientes que salen del nodo  $R$ , incluyendo la corriente que fluye de este al siguiente nodo.

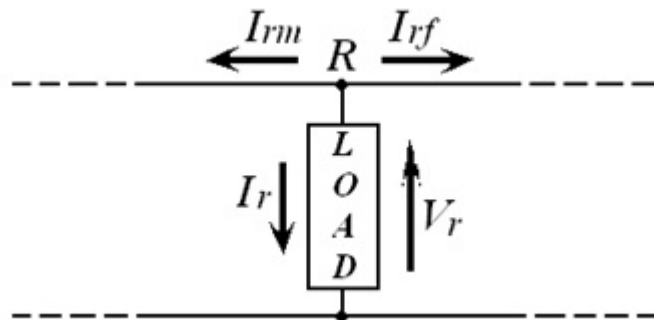


FIGURA 1.6.: Flujo de corrientes en el nodo R

$$I_{rf} = -I_{rm} - I_r \quad (1.16)$$

Donde:

$I_{rf}$  es la corriente que fluye hacia la falla desde el nodo  $R$ .

$I_r$  es la corriente de la carga en el nodo  $R$ .

El cálculo de las tensiones y corrientes de secuencia en prefalla para cada uno de los nodos hasta el nodo  $X$ , se hace mediante el uso de la ecuaciones 1.10 y 1.16. Para el cálculo de las tensiones y corrientes de secuencia en prefalla de el nodo remoto  $N$ , se asume que todos los nodos siguientes al nodo  $X$  se consolidan como una sola carga localizada en  $N$ , tal como se muestra en la figura 1.7 [Das98].

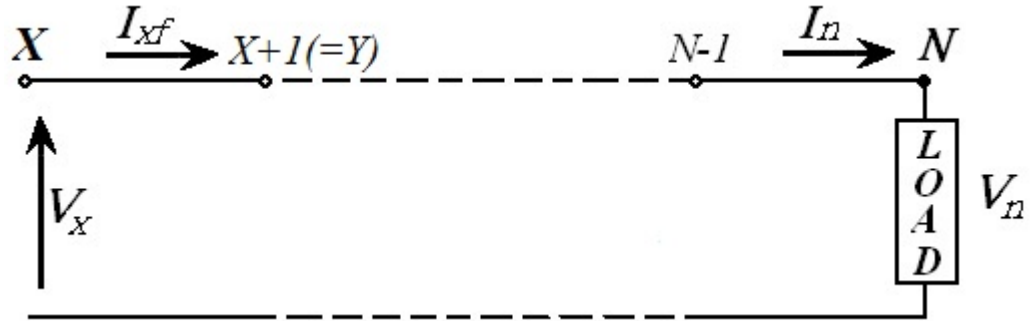


FIGURA 1.7.: Tensiones y corrientes de prefalla en los nodos  $X$  y  $N$

Por medio de la siguientes ecuaciones podemos calcular las tensiones y corrientes de secuencia en el nodo  $N$ .

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_e & -B_e \\ C_e & -A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Donde:

$V_n$  y  $V_x$  son tensiones en los nodos  $N$  y  $X$ .

$I_n$  y  $I_{xf}$  son las corrientes en los nodos  $N$  y  $X$ .

$A_e$ ,  $B_e$ ,  $C_e$  y  $D_e$  son los parámetros equivalentes de las secciones de líneas comprendidas entre los nodos  $X + 1$  y  $N$ .

Las admitancias de secuencia son calculadas según:

$$Y_n = \frac{I_n}{V_n} \quad (1.18)$$

### 1.1.5.3. Estimación de las Constantes de Carga

Para cada uno de los nodos hasta el nodo  $X$ , las constantes de carga  $G_r$  y  $B_r$ , se calculan a partir de las tensiones de prefalla, la admitancia de carga y las constante

$np$  y  $nq$ . En el caso de la carga consolidada en el nodo remoto  $N$ , estas constantes se calculan utilizando las tensiones y admitancias obtenidas en las ecuaciones 1.9, 1.17 y 1.18 [Das98].

### 1.1.6. Estimación de las Tensiones y Corrientes en el Nodo remoto $N$ y en la Falla

Antes de estimar las tensiones y corrientes de secuencia en la falla y el nodo  $N$ , se deben calcular las tensiones y corrientes correspondientes al nodo  $X$ . Por lo tanto, comenzamos calculando las tensiones y corrientes de secuencia en falla para el nodo  $R$ , valiéndonos de las medidas tomadas en el nodo  $M$  y la ecuación 1.10. Las corrientes de secuencia en la carga del nodo  $R$ , durante la falla, son calculadas utilizando un modelo de carga monofásico, bifásico o trifásico según sea el caso. Las admitancias de carga e impedancias se calculan utilizando las ecuaciones 1.9 y 1.12. Las corrientes que fluyen al siguiente nodo son obtenidas con ayuda de la ecuación 1.16. Repitiendo este proceso para cada uno de los nodos hasta obtener las tensiones y corrientes de secuencia del nodo  $X$  [Das98].

Las tensiones y corrientes de secuencia en el nodo  $X$  son estimados con la fase A como referencia sin importar el tipo de falla, sin embargo, dependiendo del tipo de falla estas tensiones y corrientes son convertidos a la referencia necesaria. La referencia de fases usada para diferentes tipos de fallas es mostrada en la tabla 1.1 [Das98].

Fase A como referencia	Fase B como referencia	Fase C como referencia
A a tierra	B a tierra	C a tierra
B y C a tierra	C y A a tierra	A y B a tierra
B y C	C y A	A y B
Trifásica Balanceada		

TABLA 1.1.: Selección de una fase de referencia para diferentes tipos de falla

Las tensiones y corrientes de secuencia en la falla son estimados asumiendo que todas las cargas después del nodo  $X$  son consolidadas con la carga en el nodo  $N$ . Esto se muestra en la figura 1.8 [Das98].

Las tensiones y corrientes en la falla se calculan así:

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_{fx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -sB_{xy} \\ sC_{xy} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

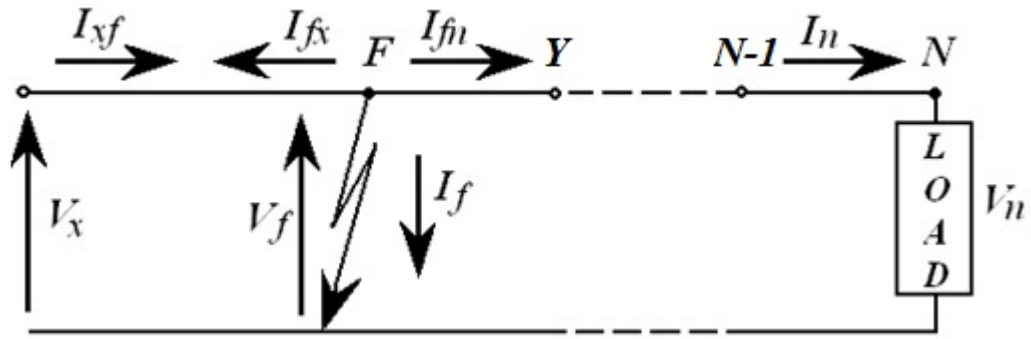


FIGURA 1.8.: Tensiones y corrientes en el nodo F y N durante la falla

Donde:

$s$  es la distancia a la falla desde el nodo X, expresada como una fracción de la sección comprendida entre los nodos X y X + 1 (= Y), en la cual la longitud de esta es:

$$l_{xf} = sL_{xf} \quad (1.20)$$

$B_{xy}$  y  $C_{xy}$  son las constantes de sección de línea comprendida entre los nodos X y X + 1 (= Y).

El cálculo de las tensiones y corrientes en el nodo N se hace mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_e & -B_e \\ C_e & -A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -(1-s)B_{xy} \\ -(1-s)C_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fn} \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Reacomodando la ecuación obtenemos:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fn} \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Donde las  $K$ 's son constantes complejas definidas como:

$$\begin{aligned}
 K_a &= D_e + B_e C_{xy}, \\
 K_b &= -B_e C_{xy}, \\
 K_c &= -B_e - D_e B_{xy}, \\
 K_d &= D_e B_{xy}, \\
 K_e &= C_e + A_e C_{xy}, \\
 K_f &= -A_e C_{xy}, \\
 K_g &= -A_e - C_e B_{xy} \text{ y} \\
 K_h &= C_e B_{xy}
 \end{aligned} \tag{1.23}$$

$$\begin{aligned}
 K_g &= -A_e - C_e B_{xy} \text{ y} \\
 K_h &= C_e B_{xy}
 \end{aligned}$$

La corriente  $I_{fn}$  mostrada en la figura 1.8 esta dada por:

$$I_{fn} = -I_{fx} - I_f \tag{1.24}$$

Sustituyendo  $I_{fn}$  de la ecuación 1.24 en la ecuación 1.22 se obtiene:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ -I_{fx} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_f \end{bmatrix}$$

Ahora reemplazando en esta ultima, la ecuación 1.19, y reacomodando la expresión

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -sB_{xy} \\ -sC_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} - I_f \begin{bmatrix} K_c + sK_d \\ K_g + sK_h \end{bmatrix} \tag{1.25}$$

Cambiando  $I_n$  por su equivalente en la ecuación 1.18, la ecuación 1.25 se puede reescribir como:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -V_n Y_n \end{bmatrix} + I_f \begin{bmatrix} K_c + sK_d \\ K_g + sK_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -sB_{xy} \\ -sC_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \tag{1.26}$$

Ordenando y despreciando los términos de segundo orden y orden superior de la ecuación 1.26, se obtiene la ecuación:

$$\begin{bmatrix} 1 & K_c + sK_d \\ -Y_n & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_i & K_c + sK_j \\ K_e + sK_k & K_g + sK_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \tag{1.27}$$

Donde  $K_i$  a  $K_l$  son constantes complejas y están dadas por:

$$\begin{aligned}
 K_i &= K_b - K_c C_{xy}, \\
 K_j &= K_d - K_a B_{xy}, \\
 K_k &= K_f - K_g C_{xy} y \\
 K_l &= K_h - K_e B_{xy}
 \end{aligned} \tag{1.28}$$

Reacomodando la ecuación anterior se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_f \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} K_g + sK_h & -K_c - sK_d \\ Y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_a + sK_i & K_c + sK_j \\ K_e + sK_k & K_g + sK_t \end{bmatrix}}{K_g + sK_h + Y_n (K_c + sK_d)} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \tag{1.29}$$

Despreciando nuevamente los términos de segundo orden y orden superior, podemos reescribir la ecuación 1.29 así:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_f \end{bmatrix} = \frac{1}{K_v + sK_w} \begin{bmatrix} K_m + sK_n & sK_p \\ K_q + sK_r & K_v + sK_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \tag{1.30}$$

Donde las  $K'$ s son constantes complejas definidas como:

$$\begin{aligned}
 K_m &= K_g K_a - K_c K_e \\
 K_n &= K_h K_a + K_g K_i - K_d K_e - K_c K_k \\
 K_p &= K_h K_c + K_g K_j - K_d K_g - K_c K_l \\
 K_q &= Y_n K_a - K_e \\
 K_r &= Y_n K_i - K_k \\
 K_u &= Y_n K_j - K_l \\
 K_v &= Y_n K_c - K_g \\
 K_w &= Y_n K_d - K_h
 \end{aligned} \tag{1.31}$$

Los parámetros calculados anteriormente son utilizados para determinar las tensiones en el nodo  $N$  y las corrientes de falla en  $F$ . Las tensiones y corrientes de secuencia en  $F$ , así como las tensiones de secuencia en  $N$  son obtenidos por medio de las ecuaciones 1.19 y 1.30 de la siguiente forma [Das98]:

$$\begin{aligned}
 V_{0f} &= V_{0x} - sB_{0xy}I_{0xy}, \\
 V_{1f} &= V_{1x} - sB_{1xy}I_{1xy}, \\
 V_{2f} &= V_{2x} - sB_{2xy}I_{2xy}, \\
 I_{0f} &= \frac{1}{K_{0v} + sK_{0w}} \{ V_{0x} (K_{0q} + sK_{0r}) + I_{0xf} (K_{0v} + sK_{0u}) \}, \\
 I_{1f} &= \frac{1}{K_{1v} + sK_{1w}} \{ V_{1x} (K_{1q} + sK_{1r}) + I_{1xf} (K_{1v} + sK_{1u}) \} \text{ y} \\
 I_{2f} &= \frac{1}{K_{2v} + sK_{2w}} \{ V_{2x} (K_{2q} + sK_{2r}) + I_{2xf} (K_{2v} + sK_{2u}) \}
 \end{aligned} \tag{1.32}$$

$$\begin{aligned}
 V_{0n} &= \frac{1}{K_{0v} + sK_{0w}} \{ V_{0x} (K_{0m} + sK_{0n}) + sK_{0p}I_{0xf} \}, \\
 V_{1n} &= \frac{1}{K_{1v} + sK_{1w}} \{ V_{1x} (K_{1m} + sK_{1n}) + sK_{1p}I_{1xf} \} \text{ y} \\
 V_{2n} &= \frac{1}{K_{2v} + sK_{2w}} \{ V_{2x} (K_{2m} + sK_{2n}) + sK_{2p}I_{2xf} \}
 \end{aligned} \tag{1.33}$$

### 1.1.7. Estimación de la Localización de la Falla

A continuación se describe el procedimiento usado para la estimación de  $s$ , la distancia desde el nodo  $X$  al nodo  $F$ , como fracción de la longitud de la línea localizada entre el nodo  $X$  y el nodo  $X + 1 (= Y)$  [Das98].

#### 1.1.7.1. Fallas Monofásicas a Tierra:

El valor de la tensión de la fase fallada  $V_f$  es dada por la siguiente ecuación:

$$V_f = I_f R_f \tag{1.34}$$

Donde:

$I_f$  es la corriente de falla.

$R_f$  es la resistencia de falla.

Expresando la tensión  $V_f$  y la corriente de falla  $I_f$  en componentes de secuencia, y reacomodando se obtiene la siguiente expresión para  $R_f$ :

$$R_f = \frac{V_{0f} + V_{1f} + V_{2f}}{I_{0f} + I_{1f} + I_{2f}} \quad (1.35)$$

Igualando la parte imaginaria de ambos lados de la ecuación 1.35.

$$Im \left( \frac{V_{0f} + V_{1f} + V_{2f}}{I_{0f} + I_{1f} + I_{2f}} \right) = 0 \quad (1.36)$$

Reemplazando los valores de las tensiones y corrientes de secuencia dados en la ecuación 1.32, racionalizando y despreciando los términos de segundo orden y orden superior, se llega a la siguiente expresión:

$$Im \left( \frac{K_A + sK_B}{K_C + sK_D} \right) = 0 \quad (1.37)$$

Donde  $K_A$  a  $K_D$  son constantes complejas dadas por:

$$\begin{aligned} K_A &= (V_{0x} + V_{1x} + V_{2x}) (K_{0v}K_{1v}K_{2v}), \\ K_B &= [(V_{0x} + V_{1x} + V_{2x}) \{K_{1v} (K_{2v}K_{0w} + K_{2w}K_{0v}) + (K_{1w}K_{0v}K_{2v})\}] - \\ &\quad [(B_{oxy}I_{0xf} + B_{1xy}I_{1xf} + B_{2xy}I_{2xf}) (K_{0v}K_{1v}K_{2v})], \end{aligned} \quad (1.38)$$

$$\begin{aligned} K_C &= [(K_{1v}K_{2v}) (K_{0q}V_{0x} + K_{0v}I_{0xf})] + \\ &\quad [(K_{2v}K_{0v}) (K_{1q}V_{1x} + K_{1v}I_{1xf})] + \\ &\quad [(K_{0v}K_{1v}) (K_{2q}V_{2x} + K_{2v}I_{2xf})] \text{ y} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_D &= [(K_{1v}K_{2v}) (K_{0r}V_{0x} + K_{0u}I_{0xf}) + (K_{1v}K_{2w} + K_{1w}K_{2v}) (K_{0q}V_{0x} + K_{0v}I_{0xf})] + \\ &\quad [(K_{2v}K_{0v}) (K_{1r}V_{1x} + K_{1u}I_{1xf}) + (K_{2v}K_{0w} + K_{2w}K_{0v}) (K_{1q}V_{1x} + K_{1v}I_{1xf})] + \\ &\quad [(K_{0v}K_{1v}) (K_{2r}V_{2x} + K_{2u}I_{2xf}) + (K_{0v}K_{1w} + K_{0w}K_{1v}) (K_{2q}V_{2x} + K_{2v}I_{2xf})] \end{aligned}$$

Estos parámetros complejos se pueden ser expresados mediante su parte real e imaginaria como se muestra:

$$K_A = K_{AR} + jK_{AI}, K_B = K_{BR} + jK_{BI}, K_C = K_{CR} + jK_{CI} \quad (1.39)$$

Sustituyendo 1.39 en la ecuación 1.37 y racionalizando llegamos a la siguiente expresión:

$$\text{Im} \left( \left[ \frac{[(K_{AR} + sK_{BR}) + j(K_{AI} + sK_{BI})][(K_{CR} + sK_{DR}) - j(K_{CI} + sK_{DI})]}{[(K_{CR} + sK_{DR}) + j(K_{CI} + sK_{DI})][(K_{CR} + sK_{DR}) - j(K_{CI} + sK_{DI})]} \right] \right) = 0 \quad (1.40)$$

Despejando el valor de  $s$  de la ecuación 1.40, y despreciando los términos de orden 2 y superior se obtiene:

$$s = \frac{K_{AR}K_{CI} - K_{AI}K_{CR}}{(K_{CR}K_{BI} - K_{CI}K_{BR}) + (K_{DR}K_{AI} - K_{DI}K_{AR})} \quad (1.41)$$

El valor de  $s$  se calcula siguiendo el siguiente proceso iterativo:

1. Los parámetros  $K_m$ ,  $K_n$  y  $K_p$  se determinan a partir de la ecuación 1.31.
2. Los parámetros  $K_q$  a  $K_w$  definidos en la ecuación 1.31, se calculan usando la admitancia de prefalla, resultado de la concentración de las cargas en el nodo  $N$ .
3. Los parámetros  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $K_C$  y  $K_D$  definidos en la ecuación 1.38, se calculan usando los valores de  $K_q$ ,  $K_r$ ,  $K_u$ ,  $K_v$  y  $K_w$  calculados en el paso 2.
4. El valor de  $s$  es calculado mediante la ecuación 1.41 a partir de los valores  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $K_C$  y  $K_D$  calculados en el paso 3.
5. La tensión en el nodo  $N$  se obtiene empleando la ecuación 1.33, los parámetros calculados en los paso 1-2 y el valor de  $s$  determinado en el paso 4.
6. La nueva tensión en el nodo  $N$  y la ecuación 1.9, son usadas para obtener las admitancias de secuencia actualizadas de la carga consolidada.
7. Los parámetros  $K_q$ ,  $K_r$ ,  $K_u$ ,  $K_v$  y  $K_w$  se actualizan a partir de los nuevos valores de la admitancia consolidada en el nodo  $N$ , calculada en el paso 6.
8. Los parámetros  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $K_C$  y  $K_D$  se actualizan empleando los valores de  $K_q$ ,  $K_r$ ,  $K_u$ ,  $K_v$  y  $K_w$  determinados en el paso 7.
9. El valor de  $s$  se obtiene empleando la ecuación 1.41 y los valores actualizados de los parámetros  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $K_C$  y  $K_D$  calculados en el paso 8.
10. La convergencia del valor de  $s$  es chequeada en cada iteración. Si la solución no converge entonces se actualiza la tensión en el nodo  $N$ . Empleando los parámetros determinados en los pasos 1 a 7 y los valores de  $s$  calculados en el paso 9. El procedimiento es repetido desde el paso 6, hasta obtener la solución.

### 1.1.7.2. Fallas Bifásicas y Bifásicas a Tierra

La resistencia de falla  $R_f$ , cuando existe una falla bifásica a tierra puede ser expresada como:

$$\frac{V_{1f} - V_{2f}}{I_{1f} - I_{2f}} = R_f \quad (1.42)$$

Cuando la falla es bifásica  $R_f$  se expresa como:

$$\frac{V_{1f} - V_{2f}}{I_{1f} - I_{2f}} = \frac{R_f}{2} \quad (1.43)$$

Asumiendo  $R_f$  resistiva, las ecuaciones 1.42 y 1.43 proporcionan la siguiente expresión:

$$Im \left( \frac{V_{1f} - V_{2f}}{I_{1f} - I_{2f}} \right) = 0 \quad (1.44)$$

Sustituyendo las tensiones y corrientes de secuencia dadas en la ecuación 1.32, y despreciando los términos de orden 2 y superior, se obtiene la siguiente expresión:

$$Im \left( \frac{K_{A2} + sK_{B2}}{K_{C2} + sK_{D2}} \right) = 0 \quad (1.45)$$

Donde los parámetros  $K_{A2}$  a  $K_{D2}$  son parámetros complejos definidos así:

$$\begin{aligned} K_{A2} &= (V_{1x} - V_{2x}) (K_{1v}K_{2v}), \\ K_{B2} &= (V_{1x} - V_{2x}) (K_{1v}K_{2w} + K_{1w}K_{2v}) - (B_{1xy}I_{1xf} - B_{2xy}I_{2xf}) (K_{1v}K_{2v}), \\ K_{C2} &= K_{2v} (K_{1q}V_{1x} + K_{1v}I_{1xf}) - K_{1v} (K_{2q}V_{2x} + K_{2v}I_{2xf}) \text{ y} \\ K_{D2} &= \{ K_{2v} (K_{1r}V_{1x} + K_{1u}I_{1xf}) + K_{2w} (K_{1q}V_{1x} + K_{1v}I_{1xf}) \} - \\ &\quad \{ K_{1v} (K_{2r}V_{2x} + K_{2u}I_{2xf}) + K_{1w} (K_{2q}V_{2x} + K_{2v}I_{2xf}) \} \end{aligned} \quad (1.46)$$

Se halla el valor de  $s$  siguiendo el mismo proceso iterativo que en el caso de falla monofásica a tierra.

### 1.1.7.3. Fallas Trifásicas Balanceadas

La resistencia de falla  $R_f$ , cuando existe una falla trifásica balanceada puede ser expresada como:

$$\frac{V_{1f}}{I_{1f}} = R_f \quad (1.47)$$

Suponiendo que  $R_f$  es resistiva pura:

$$Im \left( \frac{V_{1f}}{I_{1f}} \right) = 0 \quad (1.48)$$

Reemplazando las tensiones y corrientes definidas en la ecuación 1.32, y despreciando los términos mayores a los de primer orden, se llega a la siguiente ecuación:

$$Im \left( \frac{K_{A3} + sK_{B3}}{K_{C3} + sK_{D3}} \right) = 0 \quad (1.49)$$

Donde las  $K'$ s son parámetros complejos que se obtienen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} K_{A3} &= V_{1x}K_{1v}, \\ K_{B3} &= V_{1x}K_{1w} - B_{1xy}I_{1xf}K_{1v}, \\ K_{C3} &= K_{1q}V_{1x} + K_{1v}I_{1xf} \mathcal{Y} \\ K_{D3} &= K_{1r}V_{1x} + K_{1u}I_{1xf} \end{aligned} \quad (1.50)$$

Siguiendo el mismo procedimiento iterativo que para fallas monofásicas a tierra, se logra estimar el valor de  $s$ .

## 1.2. Método Algorítmico de Saha

Este método se vale del cálculo de la impedancia equivalente para localizar la sección donde ocurrió la falla. Una vez encontrada ésta, con ayuda de un análisis circuital se llega a una ecuación cuadrática que permite determinar en que parte de la sección ocurrió la falla, encontrando así finalmente la distancia a la falla desde el lugar donde se tomaron las medidas. Se tienen en cuenta líneas no homogéneas, cargas intermedias y laterales de la red de distribución [SR02]. Adicionalmente se requiere tener una base de datos con los valores promedios de las cargas a lo largo del circuito, tipo de carga y topología de la red [TR09].

A continuación se llevará a cabo una explicación mas detallada del método.

### 1.2.1. Estimación del nodo de falla

Después de la detección e identificación de la falla<sup>4</sup>, se calcula la impedancia equivalente  $Z_{eqk}$  para cada uno de los nodos  $M$  de red, y se encuentra el nodo de falla cuando se cumple la condición dada en la expresión 1.51.

$$Im(Z_{eqk}) \geq 0, k = 1, 2, \dots, M \quad (1.51)$$

En general la impedancia equivalente  $Z_{eqk}$  resulta de comparación entre la impedancia  $Z_{1k}^f$  de secuencia positiva y la impedancia  $Z_k^m$  obtenida a través de las medidas de tensión y corriente, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Z_{eqk} = Z_{1k}^f - Z_k^m \quad (1.52)$$

Donde:

$Z_{1k}^f$  es la impedancia de secuencia positiva en el nodo  $K$  fallado. Se calcula de forma sucesiva para cada nodo donde se asume la falla, suponiendo la resistencia de falla igual a cero y hallando el equivalente visto desde el lugar de las medidas al nodo  $K$  mediante arreglos paralelos y series entre las impedancias de secuencia positiva de las líneas y las cargas [TR09].

$Z_k^m$  se calcula dependiendo del tipo de falla y el lugar donde se tomen las medidas.

#### 1.2.1.1. Cálculo de $Z_k^m$ con Medidas en el Alimentador Fallado:

En este caso las medidas son tomadas según la figura 1.9 y el cálculo de la impedancia  $Z_k^m$  se realiza dependiendo del tipo de falla [SRI05].

- Falla Monofásica:

$$Z_k^m = Z_k - k_I Z_{0k}^f \quad (1.53)$$

Donde:

$Z_k$  es la impedancia calculada a través de medidas de tensión y corriente.

<sup>4</sup>Esto se hace con ayuda de las comparaciones expuestas previamente en la figura 1.1 [TR09].

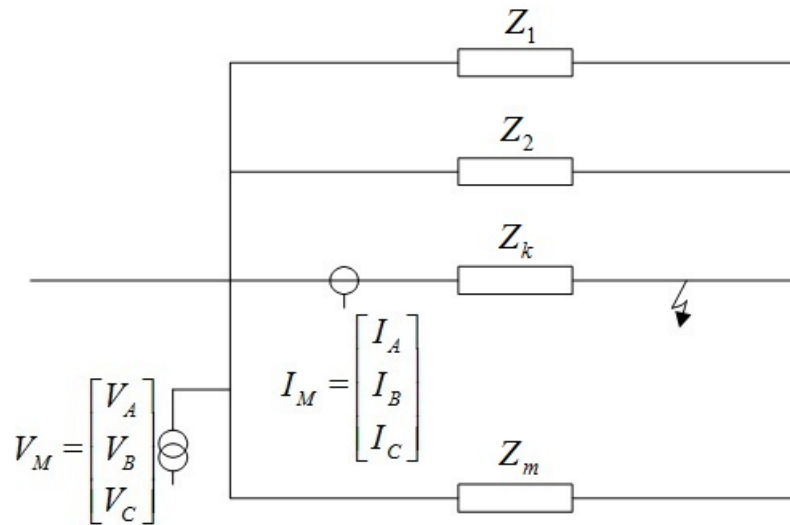


FIGURA 1.9.: Medidas tomadas en el alimentador fallado

$$Z_k = \frac{V_p}{I_p - k_{kN} I_{pN}} \quad (1.54)$$

$V_p$  es la tensión en la fase fallada.

$I_p$  es la corriente en la fase fallada.

$$k_{kN} = \frac{Z'_0 - Z'_1}{3Z'_1} \quad (1.55)$$

$Z'_0$  y  $Z'_1$  son la impedancias de secuencia positiva y cero por unidad de longitud.

$I_{pN} = I_N = I_A + I_B + I_C$  es la corriente de secuencia cero.

$Z_{0k}^f$  es la impedancia de secuencia cero en el nodo  $K$  fallado. Se calcula de la misma forma que  $Z_{1k}^f$ .

$k_I$  es un factor de la impedancia de secuencia cero.

$$k_I = \frac{I_p}{3I_p - I_{pN}} \quad (1.56)$$

$k_I Z_{0k}^f$  es una impedancia que se le resta a la impedancia  $Z_k$  de tal forma que se obtenga solo la impedancia de secuencia positiva vista desde el lugar donde se tomaron las medidas.

- Falla Fase-Fase (Falla Bifásica, Falla Bifásica a Tierra o Falla Trifásica Balanceada):

$$Z_k^m = \frac{V_{pp}}{I_{pp}} \quad (1.57)$$

Donde:

$V_{pp}$  es la tensión fase-fase del circuito fallado. Ejemplo:  $V_{pp} = V_A - V_B$

$I_{pp}$  es la corriente fase-fase del circuito fallado. Ejemplo:  $I_{pp} = I_A - I_B$

### 1.2.1.2. Cálculo de $Z_k^m$ con Medidas en la Subestación

En este caso se asume que el alimentador fallado está identificado. Posteriormente se transforma todo el sistema radial, a un equivalente tal como se muestra en la figura 1.10, en el cual  $Z_L$  representa el equivalente de secuencia positiva de todos los alimentadores que no están en falla ( $1/Z_L = 1/Z_1 + 1/Z_2 + \dots + Z_m$ ) y  $Z_{Lk}$  representa la secuencia positiva del alimentador fallado en condición de prefalla [SRI05].

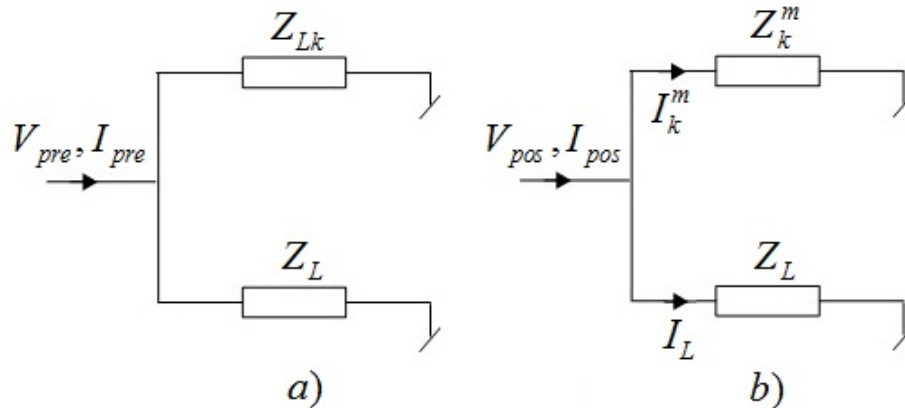


FIGURA 1.10.: Medidas tomadas en la subestación. a) Estado prefalla. b) Estado posfalla

- Falla Monofásica:

Para este caso el cálculo de la impedancia  $Z_k^m$  se realiza partiendo de la ecuación 1.53, en la cual se hacen los ajustes respectivos a  $Z_k$  y  $k_I$  debido a las corrientes de secuencia cero que fluyen a través de los capacitores de los alimentadores no fallados, que son también incluidas en las medidas hechas en la subestación [SR02, SRI05]. Obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$Z_k = \frac{V_p}{I'_p - k_{kN} I'_{pN}} \quad (1.58)$$

Donde:

$$I'_p = I_p - (1 - k_{zk}) \frac{V_p - V_0}{Z_{pre}}$$

$$Z_{pre} = \frac{V_{pre}}{I_{pre}}$$

$I_p$  y  $V_p$  son la corriente y la tensión en la fase fallada.

$I_{pre}$  y  $V_{pre}$  son la corriente y tensión en prefalla.

$$k_{zk} = \frac{Z_{pre}}{Z_{Lk}} = \frac{S_{Lk}}{S_{\Sigma}}$$

$Z_{Lk}$  es la impedancia del alimentador que fallo vista desde la subestación en prefalla.

$S_{Lk}$  y  $S_{\Sigma}$  son respectivamente la potencia en el alimentador fallado y en todas las líneas bajo la condición de prefalla.

$$V_0 = \frac{V_A + V_B + V_C}{3}$$

$$I'_{pN} = I_N - \frac{(1 - k_{z0}) V_0}{-jX_{C0}}$$

$$k_{z0} = \frac{X_{C0}}{X_{C0k}} = \frac{C_{C0k}}{C_{C0}}$$

$C_{C0k}$  y  $C_{C0}$  son respectivamente la capacitancia de secuencia cero del alimentador fallado y de toda la red.

$$k_I = \frac{I'_{pN}}{3I'_p - I_{pN}} \quad (1.59)$$

Finalmente podemos calcular  $Z_k^m = Z_k - k_I Z_{0k}^f$  reemplazando los valores obtenidos en las ecuaciones 1.58 y 1.59.

- Falla Fase-Fase (Falla Bifásica, Falla Bifásica a Tierra o Falla Trifásica Balanceada):

Partiendo de la figura 1.10 se puede obtener bajo la condición de prefalla, la siguiente expresión:

$$Z_{pre} = \frac{Z_L Z_{Lk}}{Z_L + Z_{Lk}} = \frac{V_{pre}}{I_{pre}} \quad (1.60)$$

Analizando el circuito en condiciones de posfalla encontramos que:

$$Z_m = \frac{Z_L Z_k^m}{Z_L + Z_k^m} = \frac{V_{pp}}{I_{pp}} \quad (1.61)$$

Despejando  $Z_L$  de la ecuación 1.60, reemplazando este valor en la ecuación 1.61 y despejando el valor de  $Z_k^m$ , se tiene:

$$Z_k^m = \frac{Z_m Z_{pre}}{Z_{pre} - (1 - k_{zk}) Z_m} \quad (1.62)$$

Donde:

$$k_{zk} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_{Lk}} = \frac{Z_{pre}}{Z_{Lk}} = \frac{S_{Lk}}{S_{\Sigma}}$$

Finalmente reemplazando 1.61 en 1.62, y reacomodando los términos se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_k^m = \frac{V_{pp}}{I_{pp} - (1 - k_{zk}) \frac{V_{pp}}{Z_{pre}}} \quad (1.63)$$

### 1.2.2. Estimación de la Distancia a la Falla

Una vez que se encuentra el nodo en falla, se debe calcular la distancia a la falla desde el lugar de la medidas. Para conseguir esto se cuenta con dos tipos de algoritmos dependiendo del tipo de falla que se presente [SRI05, TR09].

### 1.2.2.1. Falla Monofásica

Primero se realiza un equivalente del circuito fallado como se muestra en la figura 1.11, donde:

$Z_{1k}^{1f}$  es la impedancia equivalente serie que representa las líneas hasta el nodo K.

$Z_{1k}^{2f}$  es la impedancia equivalente paralelo que representa las cargas hasta el nodo K.

$\Delta Z_f$  es la impedancia residual debida a la resistencia de falla  $R_f$ .

$m$  es un parámetro entre 0 y 1.

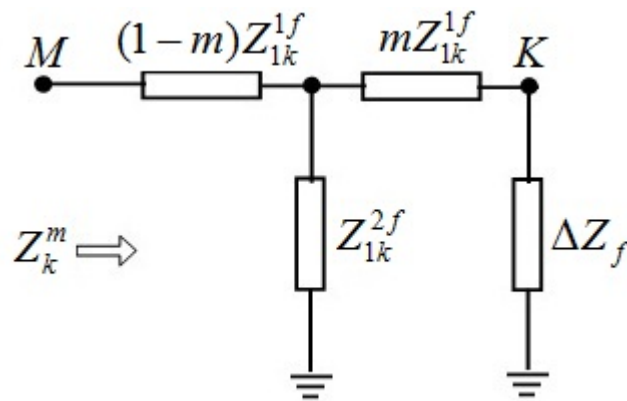


FIGURA 1.11.: Equivalente del circuito fallado hasta el nodo K falla monofásica

Suponiendo que la resistencia de falla es igual a cero, encontramos la siguiente relación:

$$Z_{1k}^f = (1 - m) Z_{1k}^{1f} + \frac{m Z_{1k}^{1f} Z_{1k}^{2f}}{m Z_{1k}^{1f} + Z_{1k}^{2f}} \quad (1.64)$$

Conocidos los valores de  $Z_{1k}^f$ ,  $Z_{1k}^{1f}$  y  $Z_{1k}^{2f}$ , podemos encontrar el valor de  $m$  con ayuda de la ecuación 1.64 [SRI05].

Teniendo en cuenta ahora la resistencia residual  $\Delta Z_f$ :

$$Z_k^m = (1 - m) Z_{1k}^{1f} + \frac{(m Z_{1k}^{1f} + \Delta Z_f) Z_{1k}^{2f}}{m Z_{1k}^{1f} + \Delta Z_f + Z_{1k}^{2f}} \quad (1.65)$$

Despejando  $\Delta Z_f$  de la ecuación (1.65) y reacomodando los términos se tiene:

$$\Delta Z_f = \frac{(Z_{1k}^{f1} - Z_k^m) (mZ_{1k}^{f1} + Z_{1k}^{f2}) - (mZ_{1k}^{f1})^2}{mZ_{1k}^{f1} - Z_{1k}^{f2} - (Z_{1k}^{f1} - Z_k^m)} \quad (1.66)$$

Revisando la figura 1.12, se puede escribir también la siguiente expresión para  $\Delta Z_f$ :

$$\Delta Z_f = \frac{Z_{ek} \left( xZ_{eL} + \frac{R_f \left( (1-x) Z_{eL} + Z_{e(k+1)}^u \right)}{R_f + (1-x) Z_{eL} + Z_{e(k+1)}^u} \right)}{Z_{ek} + xZ_{eL} + \frac{R_f \left( (1-x) Z_{eL} + Z_{e(k+1)}^u \right)}{R_f + (1-x) Z_{eL} + Z_{e(k+1)}^u}} \quad (1.67)$$

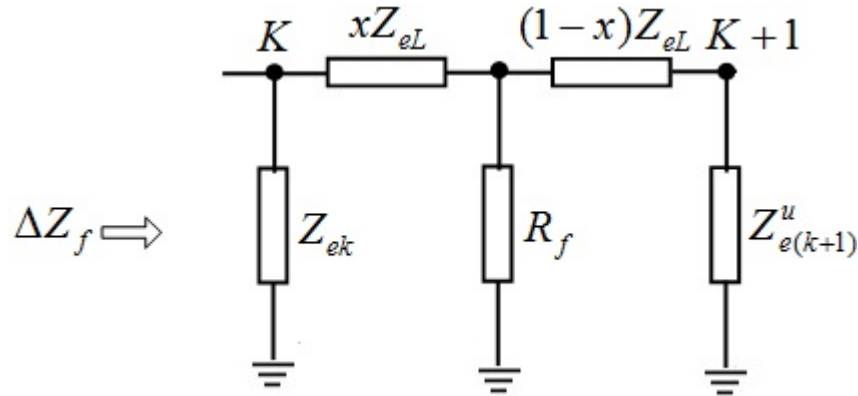


FIGURA 1.12.: Elementos comprendidos en la resistencia residual  $\Delta Z_f$  falla monofásica

Dado que es una falla monofásica, se deben tener en cuenta para el equivalente de  $\Delta Z_f$  las componentes de secuencia positiva y cero. Este efecto se ve reflejado en la impedancias  $Z_{ek}$ ,  $Z_{eL}$  y  $Z_{e(k+1)}^u$ .

$$Z_{ek} = \frac{2Z_{1k} + Z_{0k}}{3}$$

$$Z_{eL} = \frac{2Z_{1L} + Z_{0L}}{3}$$

$$Z_{e(k+1)}^u = \frac{2Z_{1(k+1)}^u + Z_{0(k+1)}^u}{3}$$

Donde:

$Z_{1k}$  Es la impedancia de secuencia positiva de la carga en el nodo  $K$ .

$Z_{0k}$  Es la impedancia de secuencia cero de la carga en el nodo  $K$ .

$Z_{1L}$  Es la impedancia de secuencia positiva de la sección de línea entre los nodos  $K$  y  $K + 1$ .

$Z_{0L}$  Es la impedancia de secuencia positiva de la sección de línea entre los nodos  $K$  y  $K + 1$ .

$Z_{1(k+1)}^u$  Es la impedancia de secuencia positiva del equivalente de la red vista desde el nodo  $K + 1$  hasta el final del alimentador.

$Z_{0(k+1)}^u$  Es la impedancia de secuencia cero del equivalente de la red vista desde el nodo  $K + 1$  hasta el final del alimentador.

$R_f$  Es la resistencia de falla.

$x$  Es un valor entre 0 y 1, que indica la fracción de la sección donde ocurrió la falla.

Despejando el valor de  $R_f$  de la ecuación 1.67, reorganizando y valiéndose del valor de  $\Delta Z_f$  según la ecuación 1.66, se consigue la siguiente expresión:

$$R_f = Ax^2 - Bx + C \quad (1.68)$$

Donde:

$$A = \frac{Z_{eL}^2 (Z_{ek} - \Delta Z_f)}{M}$$

$$B = \frac{Z_{eL} (M + 2\Delta Z_f Z_{ek})}{M}$$

$$C = \frac{\Delta Z_f Z_{ek} (Z_{eL} + Z_{e(k+1)}^u)}{M}$$

$$M = (Z_{ek} - \Delta Z_f) (Z_{eL} + Z_{e(k+1)}^u) - \Delta Z_f Z_{ek}$$

Asumiendo que  $R_f$  toma solo valores reales encontramos que:

$$Im(R_f) = A_i x^2 - B_i x + C_i = 0 \quad (1.69)$$

Donde:

$$A_i = \text{Im}(A), B_i = \text{Im}(B) \text{ y } C_i = \text{Im}(C)$$

Resolviendo la ecuación cuadrática 1.69 encontramos dos soluciones para  $x$ :

$$x_1 = \frac{B_i + \sqrt{B_i^2 - 4A_iC_i}}{2A_i}, \quad x_2 = \frac{B_i - \sqrt{B_i^2 - 4A_iC_i}}{2A_i}$$

El valor que satisface las condiciones es  $x = x_2$ .

Finalmente podemos calcular la distancia a la falla según la siguiente ecuación.

$$d_f = d + xl_{k-k+1}$$

Donde:

$d$  es la longitud desde la subestación hasta el nodo  $K$ .

$l_{k-k+1}$  es la longitud de la sección entre los nodos  $K$  y  $K + 1$ .

#### 1.2.2.2. Falla Fase-Fase (Falla Bifásica, Falla Bifásica a Tierra o Falla Trifásica Balanceada)

Primero se realiza un equivalente del circuito fallado como se muestra en la figura 1.13, donde:

$Z_{1k}^{1f}$  es la impedancia equivalente serie que representa las líneas hasta el nodo  $K$ .

$Z_{1k}^{2f}$  es la impedancia equivalente paralelo que representa las cargas hasta el nodo  $K$ .

$\Delta Z_f$  es la impedancia residual debida a la resistencia de falla  $R_f$ .

$m$  es un parámetro entre 0 y 1.

Suponiendo que la resistencia de falla es igual a cero, encontramos la siguiente relación:

$$Z_{1k}^f = (1 - m) Z_{1k}^{1f} + \frac{m Z_{1k}^{1f} Z_{1k}^{2f}}{m Z_{1k}^{1f} + Z_{1k}^{2f}} \quad (1.70)$$

Conocidos los valores de  $Z_{1k}^f$ ,  $Z_{1k}^{1f}$  y  $Z_{1k}^{2f}$ , podemos encontrar el valor de  $m$  con ayuda de la ecuación 1.70 [SRI05].

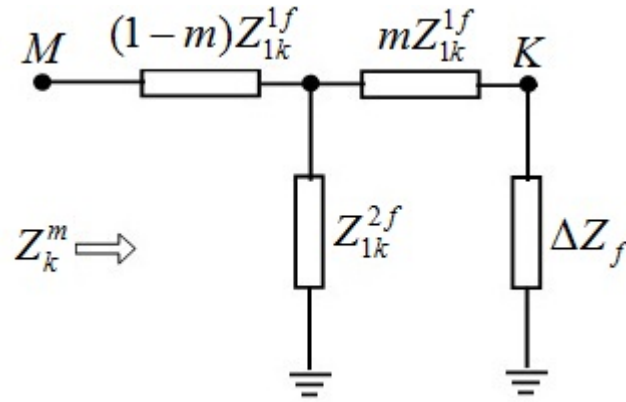


FIGURA 1.13.: Equivalente del circuito hasta el nodo K falla fase-fase

Teniendo en cuenta ahora la resistencia residual  $\Delta Z_f$ :

$$Z_k^m = (1 - m) Z_{1k}^{1f} + \frac{(mZ_{1k}^{1f} + \Delta Z_f) Z_{1k}^{2f}}{mZ_{1k}^{1f} + \Delta Z_f + Z_{1k}^{2f}} \quad (1.71)$$

Despejando  $\Delta Z_f$  de la ecuación 1.71 y reacomodando los términos se tiene:

$$\Delta Z_f = \frac{(Z_{1k}^{f1} - Z_k^m) (mZ_{1k}^{f1} + Z_{1k}^{f2}) - (mZ_{1k}^{f1})^2}{mZ_{1k}^{f1} - Z_{1k}^{f2} - (Z_{1k}^{f1} - Z_k^m)} \quad (1.72)$$

Revisando la figura 1.14, se puede escribir también la siguiente expresión para  $\Delta Z_f$ :

$$\Delta Z_f = \frac{Z_{1k} \left( xZ_L + \frac{R_f \left( (1 - x) Z_L + Z_{1(k+1)}^u \right)}{R_f + (1 - x) Z_L + Z_{1(k+1)}^u} \right)}{Z_{1k} + xZ_L + \frac{R_f \left( (1 - x) Z_L + Z_{1(k+1)}^u \right)}{R_f + (1 - x) Z_L + Z_{1(k+1)}^u}} \quad (1.73)$$

Donde:

$Z_{1k}$  Es la carga conectada en el nodo K.

$Z_L$  Es la impedancia de la sección de línea entre los nodos K y K + 1.

$R_f$  Es la resistencia de falla.

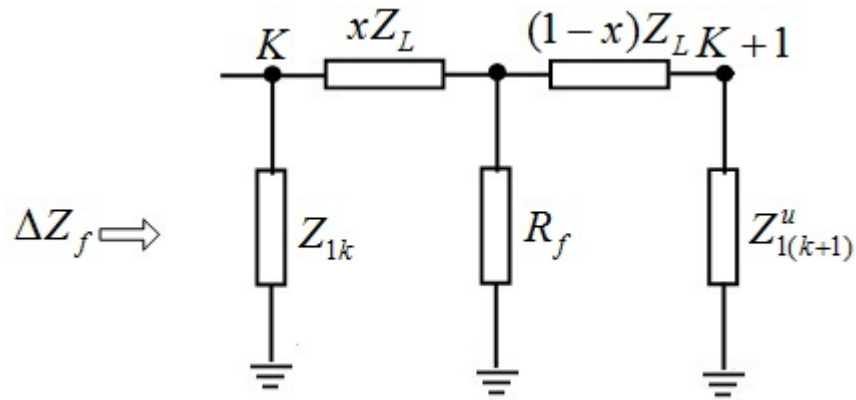


FIGURA 1.14.: Elementos comprendidos en la resistencia residual  $\Delta Z_f$  falla fase-fase

$x$  Es un valor entre 0 y 1, que indica la fracción de la sección donde ocurrió la falla.

$Z_{1(k+1)}^u$  Es la impedancia equivalente de la red vista desde el nodo  $K + 1$  hasta el final del alimentador.

$Z_{1(k+1)}^u$  se puede calcular en condiciones de estado estable para cada uno de los nodos de forma similar que  $Z_{1k}^f$ .

Despejando el valor de  $R_f$  de la ecuación 1.73, reorganizando y valiéndose del valor de  $\Delta Z_f$  según la ecuación 1.72, se consigue la siguiente expresión:

$$R_f = Ax^2 - Bx + C \quad (1.74)$$

Donde:

$$A = \frac{Z_L^2 (Z_{1k} - \Delta Z_f)}{M}$$

$$B = \frac{Z_L (M + 2\Delta Z_f Z_{1k})}{M}$$

$$C = \frac{\Delta Z_f Z_{1k} (Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{M}$$

$$M = (Z_{1k} - \Delta Z_f) (Z_L + Z_{1(k+1)}^u) - \Delta Z_f Z_{1k}$$

Asumiendo que  $R_f$  toma solo valores reales encontramos que:

$$Im(R_f) = A_i x^2 - B_i x + C_i = 0 \quad (1.75)$$

Donde:

$$A_i = Im(A), B_i = Im(B) \text{ y } C_i = Im(C)$$

Resolviendo la ecuación cuadrática 1.75 encontramos dos soluciones para  $x$ :

$$x_1 = \frac{B_i + \sqrt{B_i^2 - 4A_i C_i}}{2A_i}, \quad x_2 = \frac{B_i - \sqrt{B_i^2 - 4A_i C_i}}{2A_i}$$

El valor que satisface las condiciones es  $x = x_2$ .

Finalmente podemos calcular la distancia a la falla según la siguiente ecuación.

$$d_f = d + x l_{k-k+1}$$

Donde:

$d$  es la longitud desde la subestación hasta el nodo  $K$ .

$l_{k-k+1}$  es la longitud de la sección entre los nodos  $K$  y  $K + 1$ .

## 1.3. Método de Morales

Los métodos de localización de fallas basados en el calculo de la impedancia vista desde la subestación, debido a la topología de la red pueden presentar múltiple estimación del lugar donde ocurrió la falla. Una solución a este problema consiste en realizar para cada una de los laterales donde se presenta la múltiple estimación: un flujo de cargas aguas arriba, posteriormente el calculo de la distancia de falla  $m$  teniendo cuenta tanto la(s) fase(s) fallada(s) como la(s) que no, y finalmente realizando el calculo del  $Error_i$  a partir de todos los valores de  $m$  obtenidos previamente. Seleccionando como único lugar de falla el que presente un menor  $Error_i$  [MEMFVT09].

### 1.3.1. Equivalente del Sistema para Casos de Múltiple Estimación

Una vez se presenta el caso de múltiple estimación, asumimos el equivalente entre los nodos  $N$  y  $N + 1$  mostrado en la figura 1.15, en el cual se tienen en cuenta todos

los laterales presentes en la múltiple estimación. Para incluir el desbalance natural del sistema de distribución, se realiza un análisis por fases. Donde la impedancia de la línea  $Z_{linea}$  en el lateral  $i^5$  ubicado entre los nodos  $N$  y  $N + 1$ , y el equivalente de la impedancia de carga<sup>6</sup>  $Z_{carga}$  ubicado en el nodo  $N + 1$ , son dados por la siguientes ecuaciones:

$$Z_{linea} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (1.76)$$

$$Z_{carga} = \begin{bmatrix} Z_{La} & Z_{Lab} & Z_{Lac} \\ Z_{Lba} & Z_{Lb} & Z_{Lbc} \\ Z_{Lca} & Z_{Lcb} & Z_{Lc} \end{bmatrix} \quad (1.77)$$

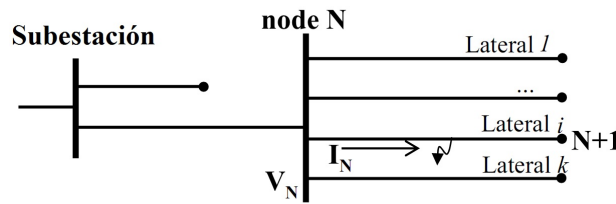


FIGURA 1.15.: Equivalente para casos de múltiple estimación

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores se puede calcular para cada lateral según el tipo de falla, los valores de  $m$ , considerando las tres fases y las cargas en las fases no falladas, como se mostrara a continuación [MEMFVT09].

### 1.3.2. Cálculo de $m$ en Caso de Falla Monofásica:

Revisando la condición de falla monofásica presente en la figura 1.16, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mZ_{aa} + R_f & mZ_{ab} & mZ_{ac} \\ mZ_{ba} & Z_{bb} + Z_{Lb} & Z_{bc} + Z_{Lbc} \\ mZ_{ca} & Z_{cb} + Z_{Lcb} & Z_{cc} + Z_{Lc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.78)$$

<sup>5</sup> $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ; donde  $k$  es el numero total de laterales, que es igual al numero de múltiples estimaciones.

<sup>6</sup>Incluye todas las cargas desde el nodo  $N + 1$  hasta el final del lateral.

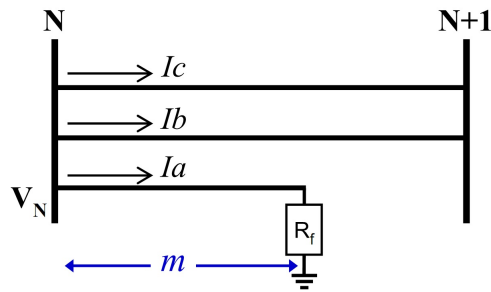


FIGURA 1.16.: Caso falla monofásica

Teniendo en cuenta solo la fase fallada, analizamos la primera fila de la ecuación 1.78 encontrando el siguiente valor para  $m$ :

$$m = \frac{Im \left( \frac{V_a}{I_a} \right)}{Im \left( Z_{aa} + Z_{ab} \frac{I_b}{I_a} + Z_{ac} \frac{I_c}{I_a} \right)} \quad (1.79)$$

Analizando también las fases no falladas, y partiendo de la ecuación 1.78 se puede obtener los siguiente valores de  $m$ :

Si se realiza la operación *fila 1 – fila 2 + fila 3* y se despeja  $m$ , se obtiene:

$$m_1 = \frac{Im \left( \frac{V_a - V_b + V_c}{I_a} + B \frac{I_b}{I_a} + C \frac{I_c}{I_a} \right)}{Im (Z_{aa} - Z_{ba} + Z_{ca} + A)} \quad (1.80)$$

Ahora si se realiza la operación *fila 1 + fila 2 – fila 3* y se despeja  $m$ .

$$m_2 = \frac{Im \left( \frac{V_a + V_b - V_c}{I_a} - B \frac{I_b}{I_a} - C \frac{I_c}{I_a} \right)}{Im (Z_{aa} + Z_{ba} - Z_{ca} + A)} \quad (1.81)$$

Donde los valores de  $A$ ,  $B$  y  $C$  son:

$$A = Z_{ab} \frac{I_b}{I_a} + Z_{ac} \frac{I_c}{I_a}$$

$$B = Z_{bb} + Z_{Lb} - Z_{cb} - Z_{Lcb}$$

$$C = Z_{bc} + Z_{Lbc} - Z_{cc} - Z_{Lc}$$

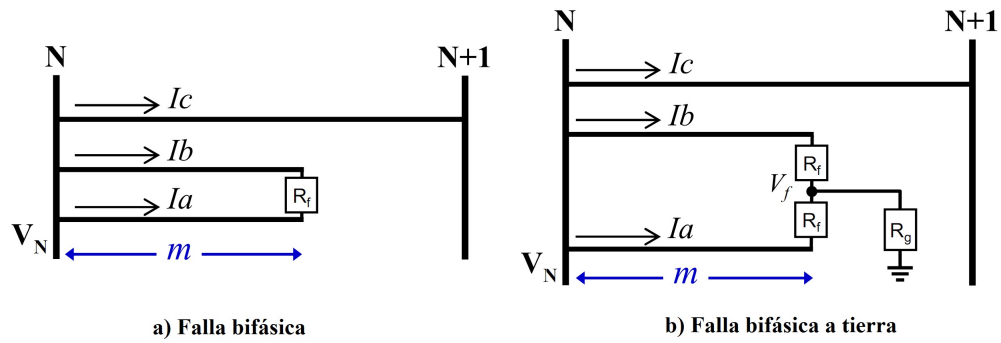


FIGURA 1.17.: Caso falla Bifásica y Bifásica a tierra

Las ecuaciones anteriores y posteriores que permitan hallar los posibles valores de  $m$  tiene en cuenta solo la parte imaginaria, porque ésta es menos sensible a variaciones de  $R_f$  [MEMFVT09].

### 1.3.3. Cálculo de $m$ en Caso de Falla Bifásica o Bifásica a Tierra:

Realizando un análisis para el caso de falla bifásica a tierra, de la figura 1.17 podemos escribir la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_a - V_f \\ V_b - V_f \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mZ_{aa} + R_f & mZ_{ab} & mZ_{ac} \\ mZ_{ba} & mZ_{bb} + R_f & mZ_{bc} \\ mZ_{ca} & mZ_{cb} & Z_{cc} + Z_{Lc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.82)$$

Teniendo en cuenta solo las fases falladas, si realizamos la operación *fila 1 – fila 2* de la ecuación 1.82 y se despeja el valor de  $m$ , se tiene:

$$m = \frac{Im \left( \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} \right)}{Im \left( \frac{DI_a + EI_b + FI_c}{I_a - I_b} \right)} \quad (1.83)$$

Por otro lado para tener en cuenta la fase no fallada, se debe realizar la operación *fila 1 – fila 2 – fila 3* en la ecuación 1.82 y despejar el valor de  $m$ , obteniendo:

$$m_1 = \frac{Im \left( \frac{V_a - V_b - V_c}{I_a - I_b} + (Z_{cc} + Z_{Lc}) \frac{I_c}{I_a - I_b} \right)}{Im \left( \frac{(D - Z_{ca}) I_a + (E - Z_{cb}) I_b + FI_c}{I_a - I_b} \right)} \quad (1.84)$$

Donde las constantes  $D$ ,  $E$  y  $F$  se definen así:

$$D = Z_{aa} - Z_{ba}$$

$$E = Z_{ab} - Z_{bb}$$

$$F = Z_{ac} - Z_{bc}$$

Las ecuaciones 1.83 y 1.84 son igualmente validas para el caso de falla bifásica, debido a que la resistencia  $R_g$  no influye en el calculo.

### 1.3.4. Cálculo de $m$ en Caso de Falla Trifásica Balanceada:

A partir de la figura 1.18, podemos escribir la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_a - V_f \\ V_b - V_f \\ V_c - V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mZ_{aa} + R_f & mZ_{ab} & mZ_{ac} \\ mZ_{ba} & mZ_{bb} + R_f & mZ_{bc} \\ mZ_{ca} & mZ_{cb} & mZ_{cc} + R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.85)$$

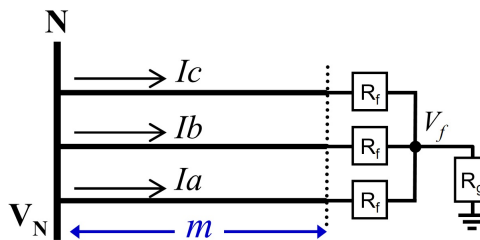


FIGURA 1.18.: Caso falla trifásica balanceada

Al realizar las siguientes operaciones *fila 1 – fila 2*, *fila 2 – fila 3* y *fila 3 – fila 1* en la ecuación 1.85, y despejando de cada una  $m$ , se tiene respectivamente:

$$m_1 = \frac{Im \left( \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} \right)}{Im \left( \frac{DI_a + EI_b + FI_c}{I_a - I_b} \right)}$$

$$m_2 = \frac{Im \left( \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} \right)}{Im \left( \frac{GI_a + HI_b + JI_c}{I_b - I_c} \right)}$$

$$m_3 = \frac{Im \left( \frac{V_c - V_a}{I_c - I_a} \right)}{Im \left( \frac{KI_a + LI_b + MI_c}{I_c - I_a} \right)}$$

Donde las contantes  $G, H, J, K, L$  y  $M$  están dados por:

$$G = Z_{ba} - Z_{ca}$$

$$H = Z_{bb} - Z_{cb}$$

$$J = Z_{bc} - Z_{cc}$$

$$K = Z_{ca} - Z_{aa}$$

$$L = Z_{cb} - Z_{ab}$$

$$M = Z_{cc} - Z_{ac}$$

Finalmente se obtiene un valor promedio de  $m$  así:

$$m = \frac{1}{3} (m_1 + m_2 + m_3)$$

### 1.3.5. Selección del Lateral Fallado

Según el tipo de falla que se presenta, se hallan los valores de  $m$  para cada uno de los laterales en los cuales puede estar la falla. Posteriormente se calcula el error en la estimación del lugar de la falla que se hizo para cada lateral, según la siguiente ecuación [MEMFVT09]:

$$Error_i = \frac{1}{n} \frac{\sum_{j=1}^n |m - m_j|}{|m|}$$

Donde:

$n$  es el número adicional de estimaciones de  $m$ . Para caso monofásico  $n = 2$ , bifásico  $n = 1$  y trifásico  $n = 3$ .

$m_j$  es  $m_1$  o  $m_2$  o  $m_3$  según sea el caso.

Finalmente se escoge como más probable al lateral fallado que presente un menor valor de  $Error_i$  [MEMFVT09].

## 2. Implementación de los Métodos

### 2.1. Introducción

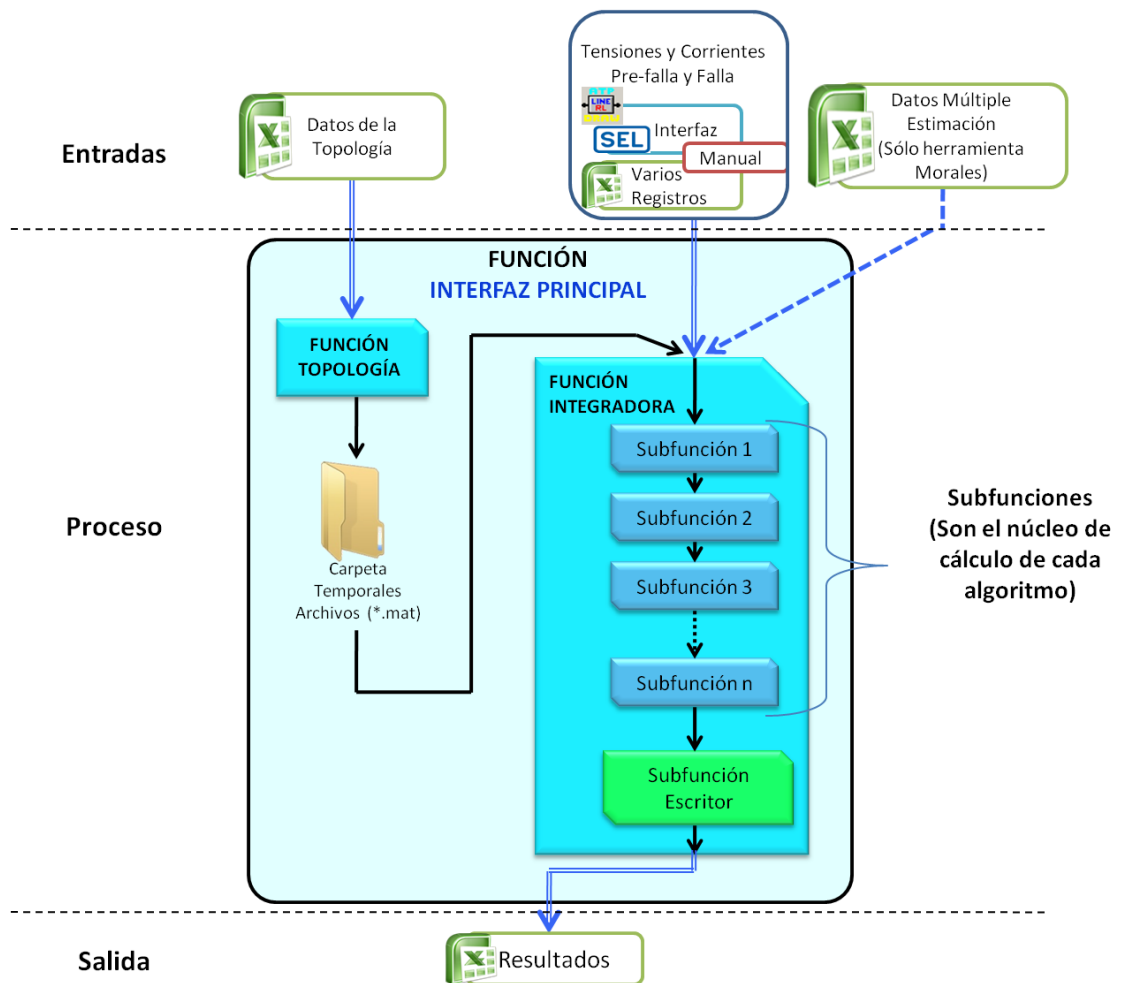


FIGURA 2.1.: Diagrama de flujo de la implementación de las herramientas

Las dos métodos algorítmicos de localización de fallas y la metodología de eliminación de la múltiple estimación fueron implementadas cada uno en una herramienta

independiente usando la estructura básica del diagrama de la figura 2.1. Estas herramientas llamadas MBM-SC1, MBM-SC2 y MME-SC<sup>1</sup> fueron desarrolladas basándose en las técnicas originales de los autores [Das98],[SR02] y [MEMFVT09] respectivamente. Asimismo, fueron diseñadas en la plataforma de Matlab con comunicación al programa de hojas de calculo “Microsoft Office Excel”, lo cual permite la organización de los datos de entrada del circuito a trabajar, la escritura de los resultados de forma ordenada, y un fácil y comprensible uso de la herramienta.

El presente capítulo ofrece una sucinta descripción de las principales funciones de cada herramienta.

## 2.2. Herramienta MBM-SC1

La herramienta “software” MBM-SC1 es la implementación del algoritmo Ratan Das. La metodología básica del algoritmo se realiza a través de las subfunciones como se muestra en la figura 2.1 que son integradas por la función “pratas”.

### 2.2.1. Función Topología

Cumple la función de leer la hoja de cálculo donde se describe la topología de cualquier circuito de distribución ramal y crea un archivo (\*.mat) que contiene la información de este en forma de *circuitos caminos*<sup>2</sup>.

Esta función toma de una hoja de calculo los datos del circuito a cargar; diseñado así para hacer muy sencilla la introducción de un circuito a la memoria de la herramienta. Cargados los valores de las impedancias de la líneas y las cargas en cada nodo, se conforman los llamados *circuitos caminos* que son compuestos por los diferentes ramales del sistema, en los cuales se acumulan los laterales y cargas sumando su potencia. Posteriormente, adjunta la información necesaria de la topología para las diferentes etapas de la herramienta.

---

<sup>1</sup>Las siglas *MBM* hacen referencia a que estos son Métodos Basados en el Modelo. La sigla *MME* hace referencia a que este es un Metodología que pretende eliminar la Múltiple Estimación. Las siglas finales *SC* hacen referencia a los autores.

<sup>2</sup>*Circuitos caminos* son los términos usados para describir la identificación de un ramal en el cual sus laterales se consideran como cargas

Esta función hace uso de los archivos de memoria (\*.mat) de Matlab para asegurar la confiabilidad de los datos, evitando tener que hacer uso de la memoria modificable 'Workspace' lo que asegura la topología, sin importar el número de fallas que se requiera analizar una tras otra.

### **2.2.2. Función Integradora “Pratandas”**

Es la función organizadora de los procesos de las demás funciones para hacer de todas un organismo sistemático de fácil comprensión.

Recibe como entradas la matriz que contiene las tensiones y corrientes de prefalla y falla, matriz que puede contener la información de varios sucesos que, a su vez, serán analizados uno a uno en una sola corrida de la implementación. Esta función integra todas las funciones necesarias para hacer un completo análisis de la falla y al final escribe los resultados del análisis en una hoja de cálculo dirigida a un directorio especificado por el usuario.

#### **2.2.2.1. Subfunción Determinación de Falla**

Como su nombre lo indica, realiza la identificación del tipo de falla sucedida y habilita a las demás funciones para que usen la metodología correspondiente.

Esta función se basa en la identificación del tipo de falla según la descripción realizada en el método algorítmico de Ratan Das [Das98], a partir de una comparación de las magnitudes de las corrientes en falla con la corriente umbral estimada del circuito.

#### **2.2.2.2. Subfunción Reactancia**

Esta función se encarga de medir la reactancia vista desde la cabecera del circuito en el momento en que sucede la falla, para esto hace uso de las tensiones y corrientes en falla así como de la identificación del tipo de falla para aplicar la metodología correspondiente y, finalmente, obtiene la impedancia estimada hasta el punto de falla.

### 2.2.2.3. Subfunción Busca Sección

Esta se encuentra encargada de hacer la búsqueda de las secciones donde se cumple la condición de la impedancia de falla, además de adjuntar la información del *circuito camino* y la longitud hasta el punto de la sección en falla.

Esta función toma como dato el tipo de falla sucedida para escoger en que tipos de caminos realizar el análisis, a partir de allí, comienza a comparar entre la impedancia estimada de falla y la impedancia acumulada hasta la sección a analizar; si la impedancia acumulada de la sección es menor que la impedancia estimada se avanza una sección mas en el mismo *circuito camino* hasta que la impedancia acumulada sea mayor o igual que la estimada. Este proceso se realiza en todos los *circuitos caminos* admitidos según el tipo de falla, pero se activan aquellos que logren la condición anterior.

Además de crear una matriz con la información de las secciones en que puede encontrarse la falla, en las filas correspondientes a cada sección la función les adjunta los datos obtenidos como: el *circuito camino*, la longitud hasta la sección, la longitud de la sección y una primera estimación de la posición de la falla en la sección, entre otros.

### 2.2.2.4. Subfunción Prefalla

Determinadas las secciones de posible falla, se debe realizar un flujo de cargas radial en prefalla hasta dichas secciones; con el fin de determinar las impedancias de las cargas en los nodos anteriores a la sección en falla y la carga acumulada en el final del *circuito camino*  $N^3$ .

Esta función bajo la condición de que cada *circuito camino* inicia en el nodo de cabecera, realiza un sencillo flujo de cargas en secuencia, haciendo uso de las tensiones y corrientes de prefalla obtenidas en la cabecera del circuito. Con el fin de realizar el flujo en los *circuitos caminos* activados en la función anterior, los ramales se reducen a cargas equivalentes (a la suma de potencia consumida). Las cargas luego de la sección considerada en falla se concentran al final del *circuito camino*  $N$ .

---

<sup>3</sup> $N$  es el último nodo del camino critico

#### 2.2.2.5. Subfunción Posfalla

Esta función se encarga de realizar el flujo de carga radial con los valores de tensión y corriente en falla hasta el último nodo del *circuito camino*.

El flujo en esta función se realiza de igual forma que en la función prefalla. La razón para hacer el flujo de prefalla es que éste se utiliza para calcular impedancias de carga.

#### 2.2.2.6. Subfunción “Determinador de la Distancia 's'”

Esta función determina la distancia que existe entre el primer nodo y la ubicación de la falla, esto dentro de las secciones consideradas como posibles lugares de falla; proveyendo una ubicación de la falla con mayor precisión.

Esta función realiza esta estimación con la ayuda de los parámetros del *circuito camino* posteriores a la sección en falla, y con éstos hallar los parámetros iniciales  $k_a$  a  $k_p$ .

Luego, haciendo uso de la admitancia acumulada en el nodo final  $N$  y los parámetros  $np$  y  $nq$ ,<sup>4</sup> se hallan los parámetros  $k_q$  a  $k_w$ . Tomando estos últimos y las tensiones y corrientes en el nodo inicial de la sección en falla, se hallan los parámetros finales  $k_A$  a  $k_D$ , obteniéndose de ellos un estimado de la distancia 's'. Además, se obtienen nuevas tensiones en el nodo final  $N$  para la actualización de la admitancia del mismo nodo. Este proceso se repite hasta que la distancia 's' tenga un error menor a un error estimado ó hasta un número de iteraciones suficientes.

#### 2.2.2.7. Subfunción “Escritor”

Es aquélla que se encarga de escribir los resultados de una forma fácil y comprensible al usuario final. Hace uso de las hojas de cálculo para la organización de resultados, y escribe en un archivo direccionado según las especificaciones del usuario. Entre otra información, esta función imprime: el tipo de herramienta utilizada, el tipo de falla detectada, los *circuitos caminos* analizados, las secciones consideradas dentro del análisis y la distancia de falla estimada.

---

<sup>4</sup> $np$  y  $nq$  son las constantes que hacen las cargas variables con la tensión.

### 2.2.3. Función Interfaz Principal “Ratandas”

Esta función crea la interfaz gráfica de la herramienta, la cual integra en un único paquete todas las demás funciones, permitiendo un sencillo uso de la herramienta. Esta sola función es capaz de manejar la carga de la topología, la carga de los datos de prefalla y falla de tres formas distintas.

El manejo de esta función se encuentra descrito en el anexo B del manual del usuario.

## 2.3. Herramienta MBM-SC2

La herramienta “software” MBM-SC2 es la implementación del algoritmo Saha. La metodología básica del algoritmo se realiza a través de las subfunciones como se muestra en la figura 2.1 que son integradas por la función “psaha”.

### 2.3.1. Función Topología

Semejante a la función creada para la anterior herramienta, cumple el objetivo de traducir la topología de cualquier circuito de distribución ramal a un archivo (\*.mat) que contiene la información de este, en forma eficiente para la evaluación de las fallas.

Esta función toma de una hoja de calculo los datos de la topología del circuito a cargar, se diseño así para hacer sencilla la introducción de un circuito a la memoria de la herramienta. Esta función crea los denominados *circuitos caminos*, que son compuestos por los diferentes ramales del sistema. A diferencia de la herramienta anterior, esta función no acumula las cargas de los ramales por su potencia sino por su impedancia, incluyendo las líneas de los ramales. Posteriormente, adjunta la información necesaria de la topología para las diferentes etapas de la herramienta.

Esta función hace uso de los archivos de memoria (\*.mat) de Matlab para asegurar la confiabilidad de los datos, lo cual evita hacer uso de la memoria modificable ‘Workspace’ para mantener la topología, sin importar el numero de fallas que se requiera analizar una tras otra.

### 2.3.2. Función Integradora “Psaha”

Similar a la función análoga en la herramienta MBM-SC1, ésta realiza la organización de los procesos de las demás funciones para hacer de todas un organismo sistemático de fácil comprensión.

Las entradas de tensión y corriente sólo pertenecen al estado de falla, las cuales son ingresadas como una matriz que puede contener la información de varios sucesos. Estos sucesos de falla a su vez son analizados uno a uno en una sola corrida de la implementación. Esta función integra todas las funciones necesarias para hacer un completo análisis de la falla y al final escribe los resultados del análisis en una hoja de calculo dirigida a un directorio especificado por el usuario.

#### 2.3.2.1. Subfunción Determinación de Falla

Esta función cumple el mismo cometido que su análoga en la herramienta MBM-SC1, es decir realiza la identificación del tipo de falla sucedida y habilita a las demás funciones para que usen la metodología correspondiente.

#### 2.3.2.2. Subfunción “Estimación Sección”

Esta es una variante de la aplicación del método de la reactancia, es decir, se encarga de medir la reactancia vista desde la cabecera del circuito en el momento en que sucede la falla, y luego, de hacer la búsqueda de las secciones donde se cumpla la condición de la impedancia equivalente.

Esta función hace uso de las tensiones y corrientes durante la falla y del tipo de falla sucedida. A partir de allí, comienza a crear una impedancia equivalente en la que busca que su parte imaginaria sea mayor que o igual a cero. Este proceso se hace en todos los *circuitos caminos* según el tipo de falla y se activan aquellos que logren la condición anterior.

Esta función, además de activar aquellas secciones en las que puede encontrarse la falla, a cada una de estas, le adjunta datos como el *circuito camino*, la longitud hasta la sección, la longitud de la sección y demás datos necesarios para el manejo de las ecuaciones de despeje de la distancia de falla, usados en la función estima distancia.

### 2.3.2.3. Subfunción Reduce Secciones

Debido a que los *circuitos caminos* pueden compartir secciones que causen una estimación repetida, se debe hacer una búsqueda y eliminación de estas dobles estimaciones con el propósito de disminuir el tiempo de análisis.

Entonces, esta función se alimenta con los resultados de la función estimación sección y hace un análisis de las repitencias de secciones. Para finalmente y de forma automática, eliminar las secciones repetidas.

### 2.3.2.4. Subfunción Estima Distancia

Al igual que su análoga en la herramienta MBM-SC1, esta función se encarga de determinar la distancia que existe entre el primer nodo y la ubicación de la falla, Esto se hace para las secciones consideradas como posibles lugares de falla, con el fin de ir disminuyendo el error en la estimación del punto de falla con respecto al método de la reactancia.

Esta función hace uso del conocimiento de las impedancias antes de la sección en falla y las impedancias vistas desde la sección en falla. Esta función usa una ecuación compleja en la cual la distancia del primer nodo de la sección en falla al punto de falla es una variable para despejar, aún desconociendo la resistencia a tierra  $R_f$ <sup>5</sup>.

Este mismo proceso se repite para todas las secciones estimadas como posibles lugares de fallas.

### 2.3.2.5. Subfunción “Escritor”

En forma similar a su análoga en la herramienta MBM-SC1, esta función se encarga de escribir los resultados de una forma fácil y comprensible al usuario final.

Esta función hace uso de las hojas de cálculo para la organización de resultados, entregados en un archivo direccionado según las especificaciones del usuario. Entre otra información, esta función imprime: el tipo de herramienta utilizada, el tipo de falla detectada, los *circuitos caminos* analizados, las secciones consideradas dentro del análisis y la distancia de falla estimada.

---

<sup>5</sup> $R_f$  Resistencia de falla ó resistencia a tierra

### 2.3.3. Función Interfaz Principal “Saha”

Ésta en forma similar a su análoga de MBM-SC1, crea la interfaz gráfica de la herramienta, la cual cumple con el cometido de integrar en un solo paquete toda las demás funciones, permitiendo un sencillo uso de la herramienta. Esta sola función es capaz de manejar la carga de la topología, la carga de los datos de falla de tres formas distintas, entre otras opciones.

El manejo de esta función se encuentra descrito en el anexo B del manual del usuario.

## 2.4. Herramienta MME-SC

La herramienta “software” MME-SC es la implementación de la metodología Morales. Esta metodología se realiza a través de las subfunciones como se muestra en la figura 2.1 que son integradas por la función “pmorales”.

### 2.4.1. Función Topología

En forma similar a las funciones creadas para las herramientas anteriores, es necesario para la herramienta MME-SC conocer la topología del circuito de distribución de una forma sencilla y segura a través de los archivos (\*.mat), todo ello para la evaluación de la múltiple estimación.

Al igual que en sus análogos de MBM-SC1 y MBM-SC2, esta función toma los datos de la topología de una hoja de cálculo, conformando los *circuitos caminos*, compuestos por los diferentes ramales del sistema. Semejante a la herramienta MBM-SC2, esta función acumula las cargas de los ramales por su impedancia incluyendo las líneas de los ramales y, posteriormente, adjunta información para la ejecución de los pasos necesarios de la metodología.

Esta función también hace uso de los archivos de memoria (\*.mat) de Matlab, para asegurar la topología, sin importar el número múltiples estimaciones analizadas una tras otra.

## 2.4.2. Función Integradora “Pmorales”

Esta función es la encargada de organizar los procesos de las demás funciones para hacer de todas un organismo sistemático de fácil comprensión. Recibe como entradas la matriz que contiene las tensiones y corrientes de falla y la hoja de resultados de cualquiera de las herramientas MBM-SC1 o MBM-SC2, a partir de allí, integra todas las funciones necesarias para hacer un completo análisis de las múltiples estimaciones y, al final, escribe los resultados del análisis en una hoja de cálculo direccionada según las especificaciones del usuario.

### 2.4.2.1. Subfunción Lectura Archivo

Esta función esta encargada de obtener los datos de la múltiple estimación a partir de las hojas de resultados de las herramientas. Debido a que la hoja de resultados de las herramientas MBM-SC1 y MBM-SC2 difieren en su organización, esta función debe conocer a que tipo de herramienta corresponden los resultados a analizar. Sobre esta base, esta función extrae datos como: el tipo de falla, los *circuitos caminos* y las secciones en falla, poniéndolos a disposición de los siguientes procesos.

### 2.4.2.2. Subfunción Reduce Secciones

Debido a que la herramienta MBM-SC1 debe estimar cada *circuito camino* para su análisis, y a que esto puede generar una estimación repetida de la sección, se requiere en la herramienta MME-SC disminuir el tiempo de análisis buscando y eliminando las repeticiones de las secciones.

Entonces, esta función se alimenta con los datos que extrae la función lectura archivo y hace un análisis de las repeticiones de sección. Finalmente, esta función reescribe las secciones a analizar eliminando automáticamente las repeticiones de sección.

### 2.4.2.3. Subfunción Flujo hasta Sección

Debido a que la herramienta MME-SC hace uso de las tensiones y corrientes en fase en el primer nodo de cada una de las secciones implicadas en la múltiple estimación, se debe hacer un flujo de cargas aguas arriba con las medidas de falla que se tienen en la cabecera.

Así entonces, esta función carga y hace uso de los *circuitos caminos* creados en la función topología, de los cuales va deduciendo las tensiones y corrientes que fluirían para cada una de las secciones consideradas en falla. Este cálculo lo realiza restando a los datos de la cabecera, las caídas de tensión en las secciones y, las corrientes que van por cada uno de los ramales adjuntos al *circuito camino*, creando así un vector registro por cada una de las secciones consideradas en falla.

#### 2.4.2.4. Subfunción “Ponderación Morales”

Es la función que realiza aplicación directa de la metodología de Morales para intentar eliminar la múltiple estimación. Para ello, hace uso de las tensiones y corrientes de falla halladas en el primer nodo de cada una de las secciones estimadas, del tipo de falla y de las impedancias equivalentes vistas desde las secciones estimadas. Las impedancias equivalentes de las secciones se hallan usando una pequeña subfunción, encargada de hallar las impedancia de fase de cada sección y las impedancias de carga equivalentes, estas últimas corresponden a la reducción del circuito desde el último nodo de la sección hasta el final del circuito.

Con base en estos datos y teniendo en cuenta el tipo de falla, esta función aplica a cada caso una metodología para despejar la distancia a la que ocurre la falla dentro de la sección. La distancia de falla es despejada en más de una forma en cada caso, con lo cual es posible obtener valores del error en la estimación de la distancia para cada una de las secciones.

Debido a que las tensiones y corrientes en falla tomadas en la cabecera del circuito obtendrán el menor error sólo en la sección en la que ocurrió la falla, entonces, se logra ordenar las secciones de acuerdo con la probabilidad que cada una tiene, de ser la sección en falla.

#### 2.4.2.5. Subfunción “Escritor”

De manera similar a las funciones de las herramientas MBM-SC1 y MBM-SC2, ésta se encarga de escribir los resultados de una forma fácil y comprensible al usuario final. Para esto, la función hace uso de las hojas de cálculo para la organización de resultados, escribe este archivo en una dirección especificada por el usuario e imprime información como: la herramienta que realizó el análisis, el tipo de falla que

analizó, los *circuitos caminos* usados y las secciones con su respectiva ordenación de probabilidad.

### **2.4.3. Función Interfaz Principal “Morales”**

Esta función se realiza para crear una interfaz gráfica de la metodología con el objetivo de hacer sencillo el uso de la herramienta. De tal forma, la función integra en un sólo paquete toda las funciones y opciones de la misma. Esta sola función maneja la carga de la topología, la carga de los datos de falla de dos formas distintas y la carga de los resultados con múltiple estimación de cualquiera de las herramientas MBM-SC1 o MBM-SC2, entre otras.

El manejo de esta función se encuentra descrito en el anexo B del manual del usuario.

## 3. Validación y Resultados de las Herramientas

### 3.1. Introducción

Las herramientas implementadas se sometieron a diferentes tipos de pruebas que permitieran validar su correcto funcionamiento. Como primera medida se comenzó con el circuito modelo de 25 kV mencionado en la tesis doctoral de Ratan Das[Das98]. Posteriormente se realizaron pruebas en el circuito Alban de 34.5 kV, en las cuales se utilizaron 2 modelados diferentes, en busca que se pudiera obtener una mejor perspectiva del funcionamiento de las herramientas. Cada una de las simulaciones se realizaron con ayuda de los programas ATP, Matlab y la herramienta simRF[JF06].

### 3.2. Validación con el Circuito Modelo de 25 kV

Estas pruebas se hicieron con el fin de verificar el correcto funcionamiento de las herramientas y apreciar la sensibilidad en la estimación del punto falla de los mismos, ante variaciones en la resistencia de falla  $R_f$ . Para tal motivo se simularon fallas monofásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y trifásicas en diferentes nodos del circuito tomando como valores de resistencia de falla  $0.5\Omega$ ,  $1\Omega$ ,  $10\Omega$  y  $40\Omega$ .

El sistema de 25 kV que se muestra en la figura 3.1 posee un único alimentador principal, laterales trifásicos, múltiple tipo de conductores, cargas trifásicas y monofásicas. Esta compuesto por 21 nodos, entre los nodos 1 y 11 existen 37 km de longitud. Esta línea está compuesta por diferentes tipos de conductores. Se instalaron cargas de diferentes tipos en los nodos del sistema excepto en los nodos 3, 4, 5,10 y 20. Los nodos 3, 4 y 5 forman parte de una sección de 16 km. El nodo 20 divide en dos sec-

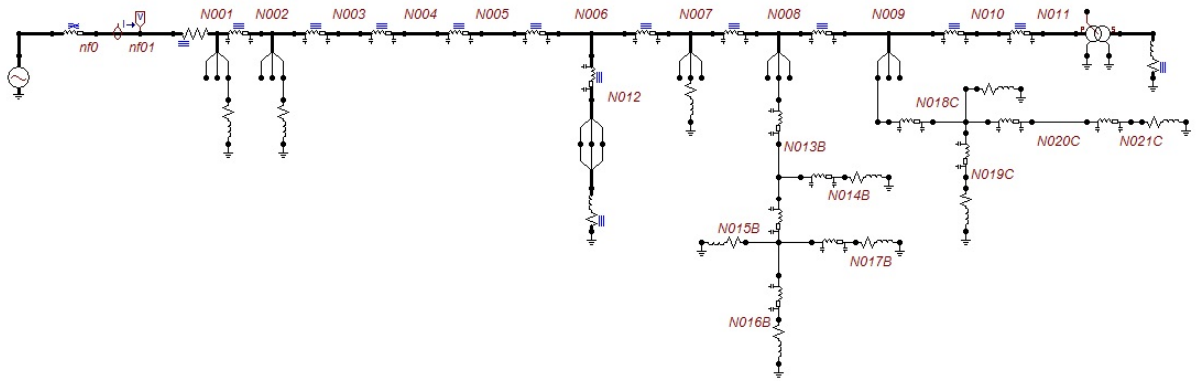


FIGURA 3.1.: Circuito modelo 25 kV

ciones la sección entre 18 y 21. El nodo 10 es la unión de dos secciones de diferente tipo de conductor.

Con el motivo de medir la fiabilidad de los algoritmos se definirá en la siguiente ecuación el *%Error* como un indicador.

$$\%Error = \frac{D_E - D_R}{D_R} * 100 \% \quad (3.1)$$

Donde:

$D_E$  es la distancia estimada por el localizador.

$D_R$  es la distancia real donde ocurrió la falla.

De aquí en adelante se utilizara el error definido en 3.1 para cada una de las pruebas realizadas.

### 3.2.1. Validación Realizada a la Herramienta MBM-SC1

Del circuito modelo de 25 kV se seleccionaron nodos que permitieran ver el desempeño de la herramienta MBM-SC1. Los nodos seleccionados así como la distancia real donde se encuentran, se muestran a continuación.

NODO	DISTANCIA REAL (km)
2	2,414
4	10,46
6	18,506
8	27,679
11	37,013
14	32,507
18	32,507

TABLA 3.1.: Nodos seleccionados para validación de la herramienta MBM-SC1

Los resultados de las pruebas realizadas se muestran en las siguientes figuras.



FIGURA 3.2.: Fallas monofásicas validación herramienta MBM-SC1

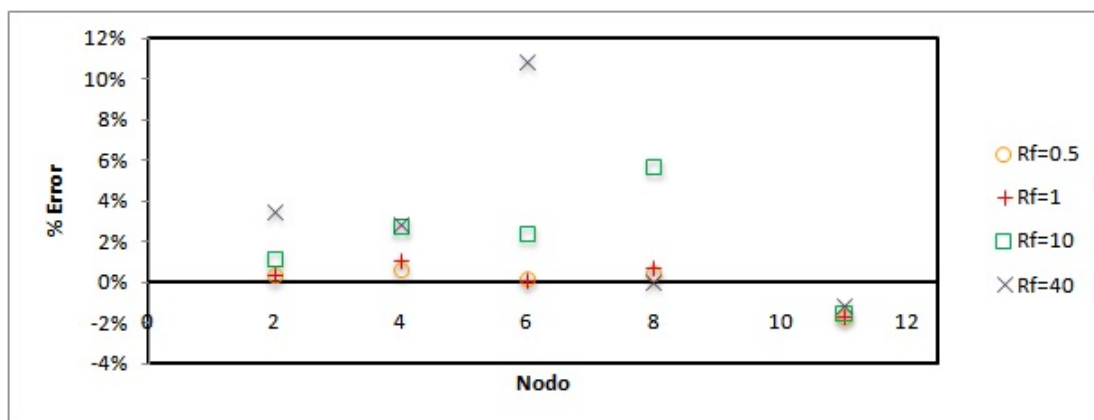


FIGURA 3.3.: Fallas bifásicas validación herramienta MBM-SC1

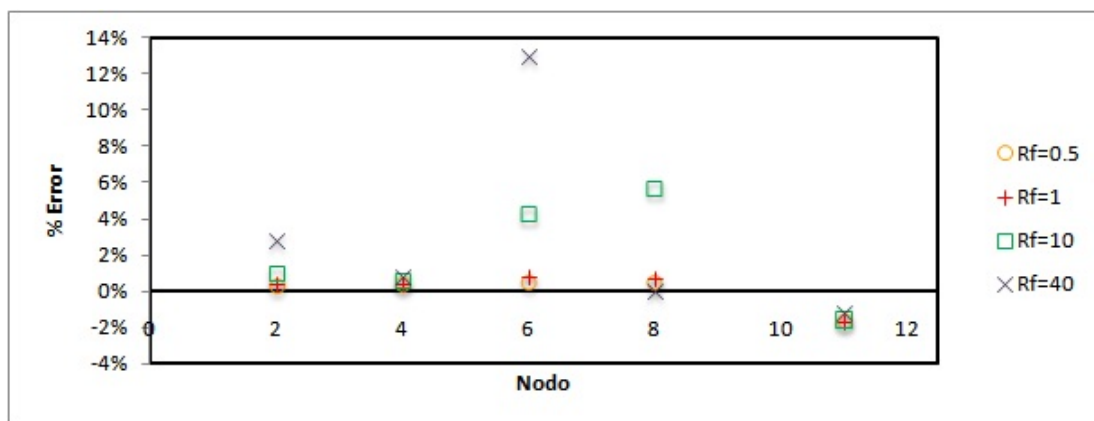


FIGURA 3.4.: Fallas bifásicas a tierra validación herramienta MBM-SC1

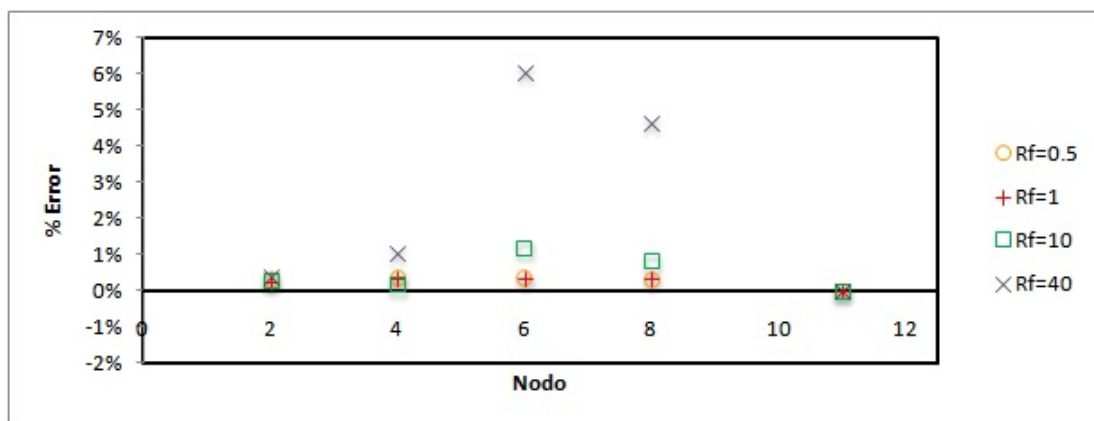


FIGURA 3.5.: Fallas trifásicas validación herramienta MBM-SC1

En las figuras 3.2 a la 3.5 se puede apreciar que en general la herramienta tiene un desempeño muy bueno y a medida que aumenta la resistencia de falla aumenta el %Error debido a que su valor empieza a ser considerable con respecto a la carga del circuito. Adicionalmente se logró verificar el correcto funcionamiento de la herramienta implementada.

### 3.2.2. Validación Realizada a la Herramienta MBM-SC2

Para este caso los nodos seleccionados en el circuito modelo de 25 kV y la distancia real donde se ubican son:

NODO	DISTANCIA REAL (km)
2	2,414
6	18,506
11	37,013
14	32,507
18	32,507

TABLA 3.2.: Nodos seleccionados para validación de la herramienta MBM-SC2

Una vez realizadas las respectivas pruebas se obtuvieron los resultados presentados en las siguientes figuras.

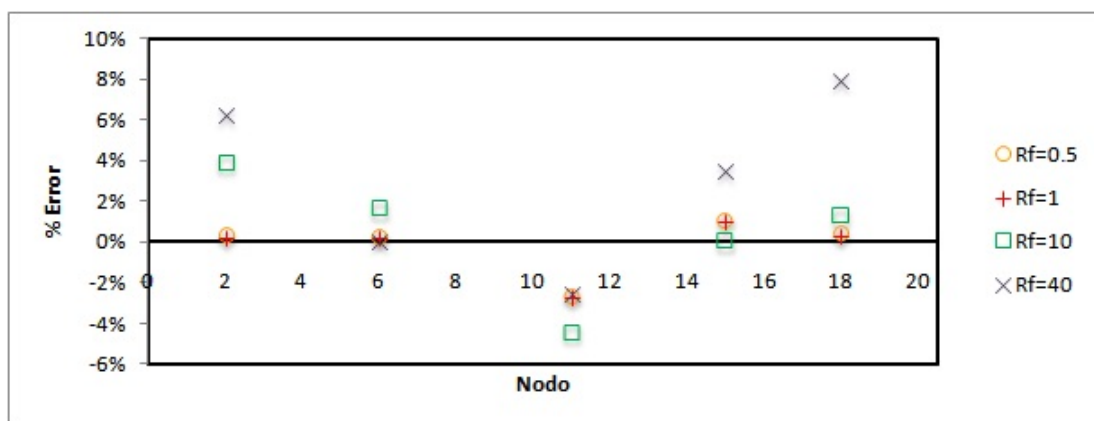


FIGURA 3.6.: Fallas monofásicas validación herramienta MBM-SC2

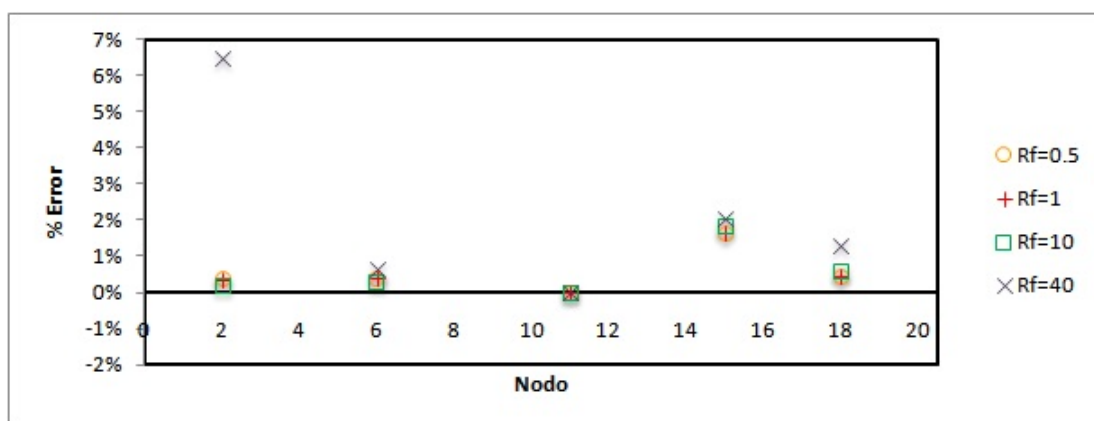


FIGURA 3.7.: Fallas bifásicas validación herramienta MBM-SC2

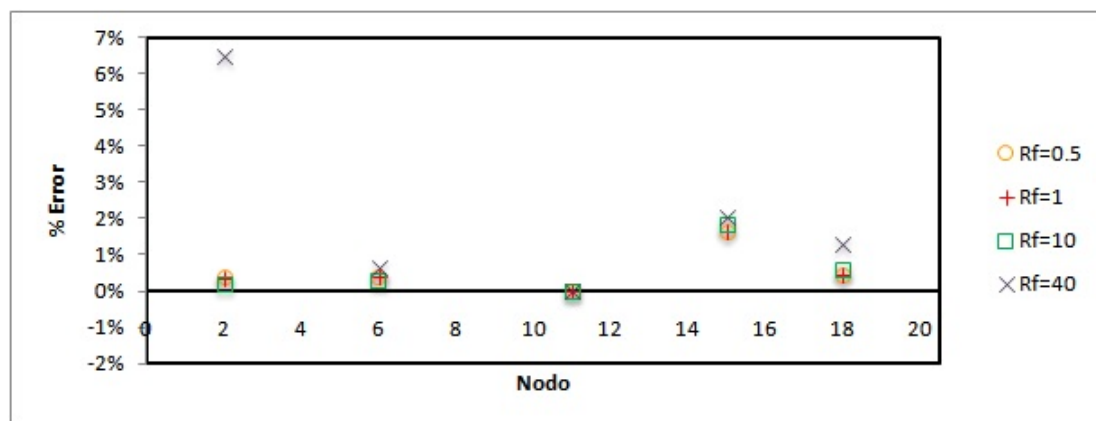


FIGURA 3.8.: Fallas bifásicas a tierra validación herramienta MBM-SC2

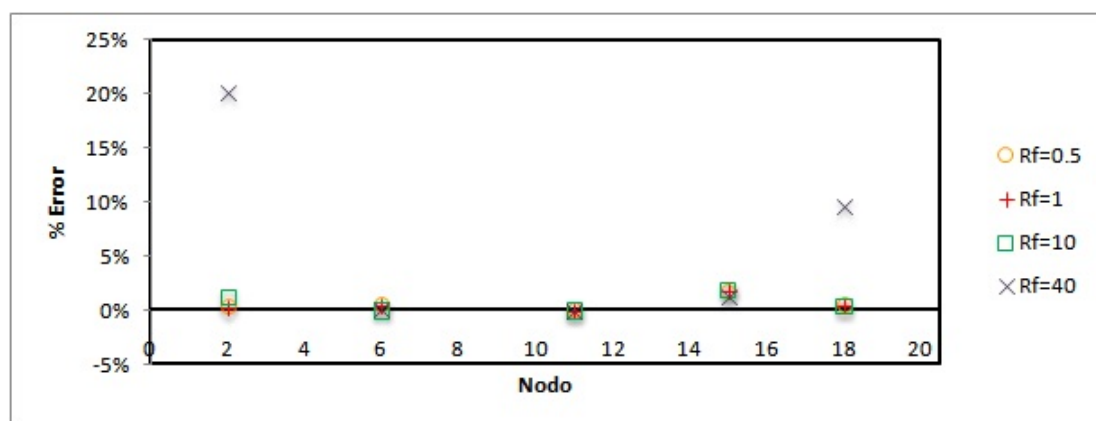


FIGURA 3.9.: Fallas trifásicas validación herramienta MBM-SC2

Para las figuras 3.6 a la 3.9 se tiene una dependencia entre la resistencia de falla y el %Error similar al visto anteriormente en la herramienta MBM-SC1, y se logra verificar el correcto funcionamiento de la herramienta MBM-SC2.

### 3.2.3. Validación Realizada a la Herramienta MME-SC

Uno de los casos que se puede considerar de difícil solución para esta herramienta es cuando los laterales considerados parten de un mismo nodo, debido a que las tensiones y corrientes en estado estable son las mismas para el nodo inicial de las secciones, impidiendo que sea clara la diferencia entre el lateral fallado y los no fallados. En el circuito usado existen secciones diferenciadas en sus configuraciones,

lo que provoca una impedancia de línea diferentes pero impedancias mutuas muy similares, para esta prueba se hace uso de las mismas configuraciones con impedancias mutuas diferenciadas.

Se realizaron cinco situaciones de fallas en cada uno de los dos laterales (fallas desde el 20 % hasta el 100 % de las secciones) con valor de resistencia de falla igual a cero para cada uno de los tipos de falla considerados, falla fase a tierra, falla fase a fase, falla fase - fase a tierra y falla trifásica. Los resultados de las fallas fase a tierra (A-T) son presentados en la figura 3.10, donde los literales a y b presentan el error en los casos de falla del lateral 1 y 2 respectivamente (el error es presentado en escala logarítmica). Cada literal de la figura muestra los errores cuando se considera la falla en cada lateral, donde las marcas de cruces (+) representan el error cuando se supone la falla en el lateral 1 y las marcas con (\*) representan el error cuando se supone la falla en el lateral 2. Para cada literal se observa que el menor error pertenece a la localización real de la falla validándose así la herramienta.

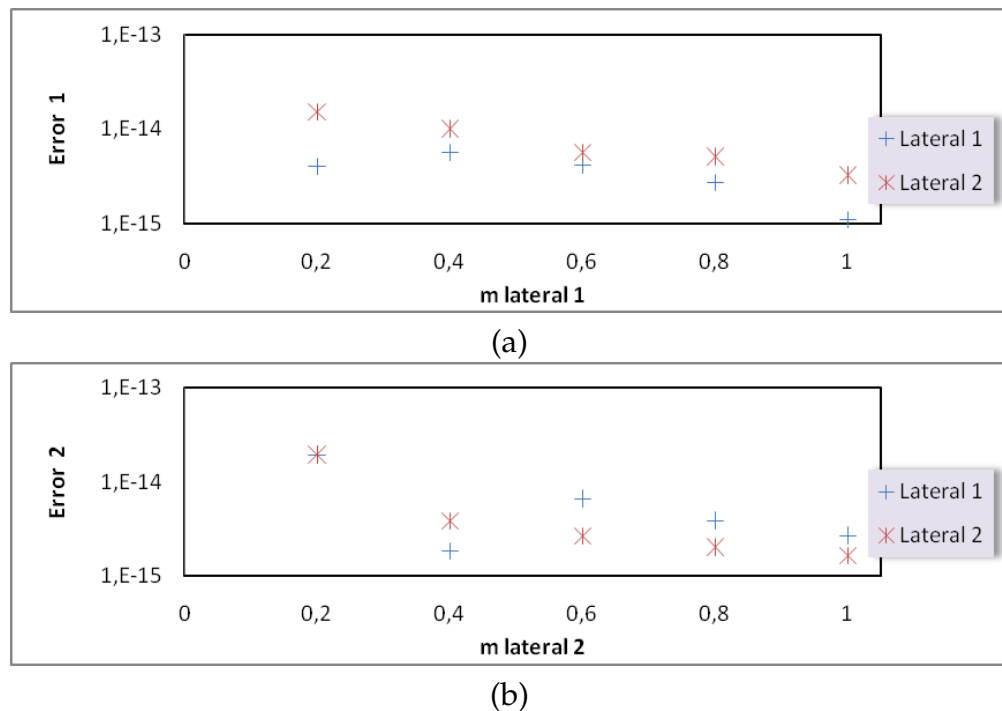
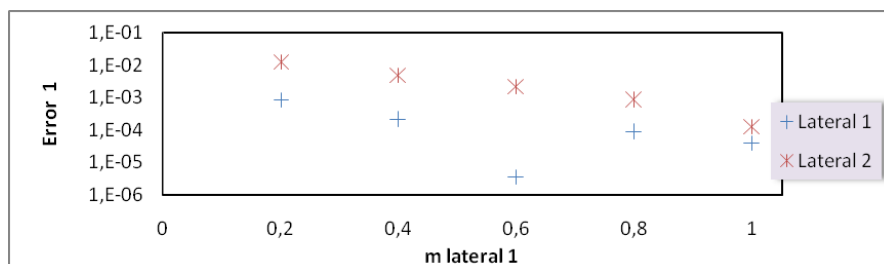
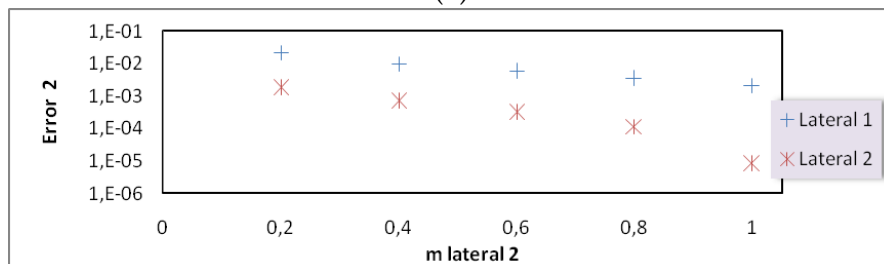


FIGURA 3.10.: Errores en la localización de fallas, considerando falla fase a tierra en cada uno de los laterales 1(a) y 2(b).

Un comportamiento similar al presentado previamente es obtenido para los demás casos de falla presentados en las figuras 3.11, 3.12 y 3.13.

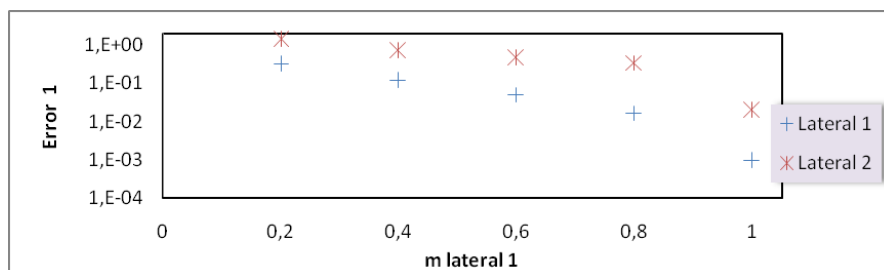


(a)

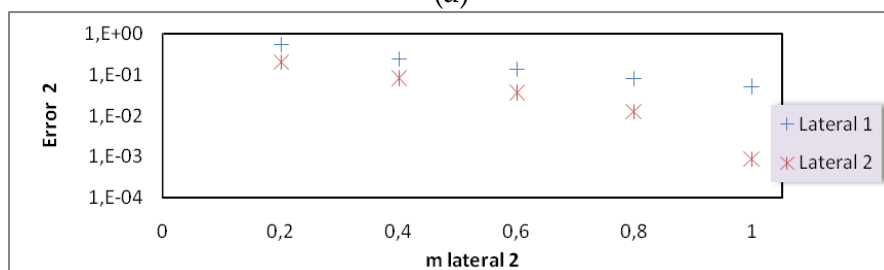


(b)

FIGURA 3.11.: Errores en la localización de fallas, considerando falla fase a fase en cada uno de los laterales 1(a) y 2(b).



(a)



(b)

FIGURA 3.12.: Errores en la localización de fallas, considerando falla fase - fase a tierra en cada uno de los laterales 1(a) y 2(b).

Los dos errores cometidos en la falla monofásica y trifásica respectivamente se consideran dentro de lo aceptable por la dificultad de los laterales analizados, además del

desprecio que hace la herramienta del efecto de las impedancias mutuas y la carga luego del punto de falla.

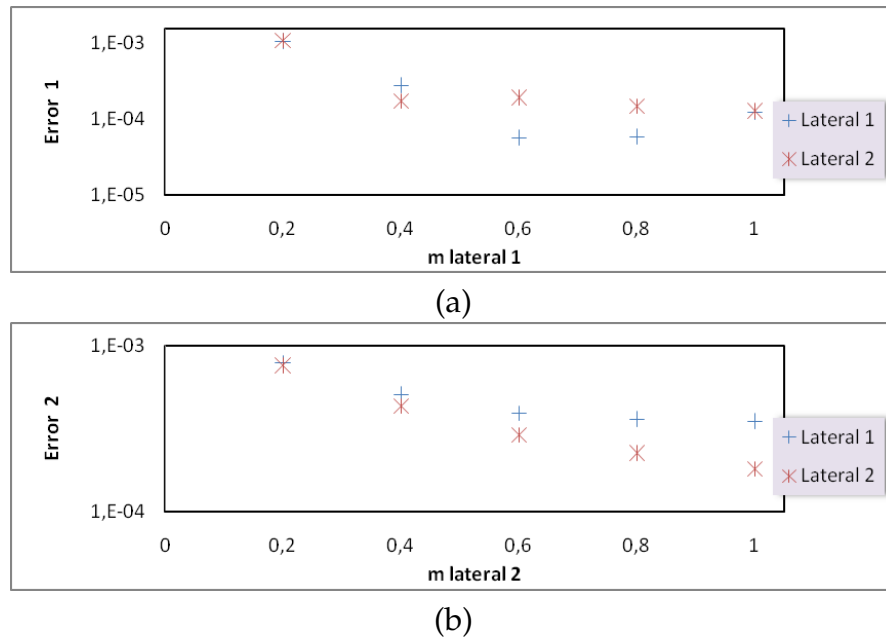


FIGURA 3.13.: Errores en la localización de fallas, considerando falla trifásica en cada uno de los laterales 1(a) y 2(b).

Debido a que la herramienta hace uso de las diferencias que existen entre las impedancias de las líneas y las cargas acumuladas al final de las secciones consideradas en falla, para estimar la sección en la cual la falla acomoda mejor; es esencial que el circuito que se analiza sea lo menos homogéneo posible en estos parámetros.

Como es posible observar en la tabla 3.3 un sistema en el cual las impedancias mutuas de las secciones en falla son de valores diferentes, permite a la herramienta identificar con buena precisión la verdadera sección en falla. Cuando la sección en falla fue estimada erróneamente es resaltada con color amarillo y se indica la verdadera resaltándola con color verde, de esta misma forma se realiza en las demás tablas.

A diferencia de la tabla 3.3 la tabla 3.4 muestra los resultados que se obtienen del mismo sistema cuando las impedancias mutuas son de valores muy semejantes entre las secciones consideradas en falla.

Un segundo caso que logra afectar la precisión de la herramienta es la forma en que se distribuya la carga dentro del sistema. Si se usa el sistema que posee valores de

impedancia mutuas diferenciadas, pero al mismo se le distribuye la carga de sus nodos en forma homogénea en cada una de las fases, no permitirá a la herramienta tomar una apreciación correcta del lugar verdadero de falla como se logra observar en la tabla 3.5.

Localización Real de la Falla		Estimación 1		Estimación 2		Estimación 3	
Sección	Falla	Sección	Error	Sección	Error	Sección	Error
09-10	A-T	18 - 20	3,387E-16	09 - 10	4,389E-16	15 - 16	3,410E-15
	A-B	09 - 10	4,289E-05	15 - 16	1,662E-04	18 - 20	4,959E-04
	A-B-T	09 - 10	9,223E-04	15 - 16	2,591E-02	18 - 20	4,149E-02
	A-B-C	09 - 10	1,492E-04	18 - 20	3,128E-04	15 - 16	9,367E-04
15-16	A-T	15 - 16	1,539E-15	09 - 10	2,866E-15	18 - 20	5,013E-15
	A-B	15 - 16	1,384E-05	09 - 10	4,495E-03	18 - 20	1,114E-02
	A-B-T	15 - 16	1,424E-03	09 - 10	9,670E-02	18 - 20	8,444E-01
	A-B-C	15 - 16	4,164E-04	09 - 10	5,817E-04	18 - 20	4,699E-03
18-20	A-T	18 - 20	1,309E-15	10 - 11	1,662E-15	15 - 16	5,055E-15
	A-B	18 - 20	1,839E-05	15 - 16	1,874E-04	10 - 11	8,274E-04
	A-B-T	18 - 20	1,481E-03	10 - 11	1,737E-02	15 - 16	2,740E-02
	A-B-C	18 - 20	1,160E-04	10 - 11	2,086E-04	15 - 16	8,958E-04

TABLA 3.3.: Resultados de la localización en el sistema de laterales con impedancias mutuas diferenciadas.

Localización Real de la Falla		Estimación 1		Estimación 2		Estimación 3	
Sección	Falla	Sección	Error	Sección	Error	Sección	Error
09-10	A-T	18 - 20	1,334E-15	15 - 16	1,824E-15	09 - 10	1,878E-15
	A-B	15 - 16	2,364E-05	09 - 10	2,802E-05	18 - 20	3,634E-04
	A-B-T	09 - 10	7,069E-04	15 - 16	2,731E-03	18 - 20	3,538E-02
	A-B-C	09 - 10	1,049E-04	18 - 20	6,290E-04	15 - 16	1,203E-03
15-16	A-T	09 - 10	1,035E-16	15 - 16	3,200E-15	18 - 20	3,261E-15
	A-B	09 - 10	8,853E-06	15 - 16	1,519E-05	18 - 20	4,311E-04
	A-B-T	09 - 10	1,797E-04	15 - 16	1,425E-03	18 - 20	3,546E-02
	A-B-C	09 - 10	3,571E-04	15 - 16	3,843E-04	18 - 20	1,112E-03
18-20	A-T	15 - 16	7,878E-16	18 - 20	1,654E-15	10 - 11	3,719E-15
	A-B	18 - 20	1,165E-05	15 - 16	2,334E-04	10 - 11	3,009E-03
	A-B-T	18 - 20	1,125E-03	15 - 16	2,629E-02	10 - 11	7,941E-02
	A-B-C	18 - 20	1,552E-04	10 - 11	2,365E-04	15 - 16	1,439E-03

TABLA 3.4.: Resultados de la localización en el sistema de laterales con impedancias mutuas semejantes.

Localización Real de la Falla		Estimación 1		Estimación 2		Estimación 3	
Sección	Falla	Sección	Error	Sección	Error	Sección	Error
09-10	A-T	09 - 10	1,372E-15	15 - 16	1,649E-15	18 - 20	2,593E-15
	A-B	18 - 20	2,887E-04	15 - 16	3,003E-04	09 - 10	3,018E-03
	A-B-T	09 - 10	2,398E-02	18 - 20	2,427E-02	15 - 16	2,995E-02
	A-B-C	09 - 10	4,713E-05	15 - 16	5,859E-05	18 - 20	6,007E-05
15-16	A-T	15 - 16	7,512E-16	09 - 10	1,739E-15	18 - 20	2,439E-15
	A-B	18 - 20	1,809E-04	15 - 16	2,635E-04	09 - 10	1,622E-03
	A-B-T	18 - 20	1,985E-02	09 - 10	2,191E-02	15 - 16	3,278E-02
	A-B-C	09 - 10	6,540E-05	15 - 16	9,317E-05	18 - 20	9,735E-05
18-20	A-T	15 - 16	9,068E-16	18 - 20	1,810E-15	10 - 11	4,174E-15
	A-B	15 - 16	3,222E-04	18 - 20	3,223E-04	10 - 11	3,862E-03
	A-B-T	18 - 20	2,489E-02	10 - 11	2,863E-02	15 - 16	2,967E-02
	A-B-C	15 - 16	5,175E-05	18 - 20	5,285E-05	10 - 11	6,592E-05

TABLA 3.5.: Resultados de la localización en el sistema de laterales con impedancias mutuas diferenciadas y cargas homogéneas.

### 3.3. Pruebas con el Circuito Alban de 34.5 kV Modelado 1

Una vez verificado el correcto funcionamiento de las herramientas implementadas, se procedió a realizarles las respectivas pruebas en el circuito Alban de 34.5 kV. En este primer acercamiento no se tuvieron en cuenta los efectos de un tramo subterráneo y cuatro tramos de red compacta que se reemplazaron por líneas aéreas de la misma longitud. Además en busca de tener en cuenta el efecto que tiene la variación de la carga en cada uno de los algoritmos de localización, se hicieron pruebas bajo la suposición de carga nominal, 60 % de carga nominal y 120 % de carga nominal. El circuito mencionada es mostrado en la figura 3.14.

En el circuito anterior se simularon fallas monofásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y trifásicas, en la cuales la resistencia de falla tomo valores de  $0.5\Omega$ ,  $10\Omega$ ,  $20\Omega$ ,  $30\Omega$ . Se seleccionaron 13 nodos en todo el circuito, los cuales se especifican con sus respectivas distancias reales en la tabla 3.6.

Para cada una de las figuras mostradas a continuación se no se incluyeron los resultados del %Error en los nodos iniciales cuando superaban el 50 %, con el propósito de mostrar de forma mas clara el desempeño dentro de su rango óptimo (considerado entre el -10 % y 10 %).

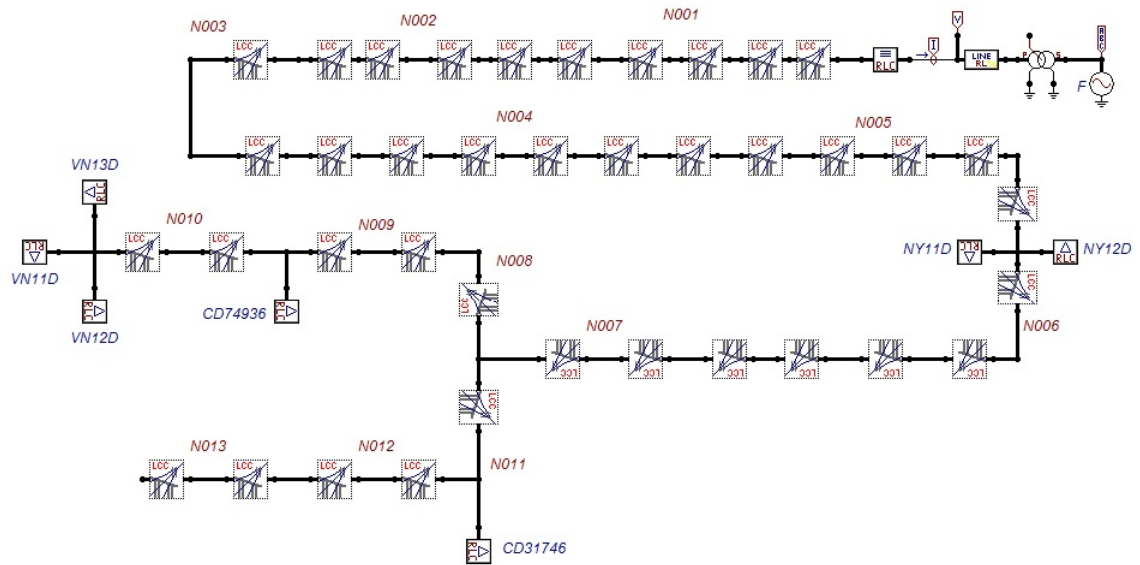


FIGURA 3.14.: Circuito Alban de 34.5 kV sin subterránea ni red compacta.

NODO	DISTANCIA REAL (km)
1	0,766
2	1,647
3	2,576
4	3,814
5	9,426
6	14,943
7	16,248
8	17,713
9	22,274
10	28,986
11	16,591
12	22,181
13	26,693

TABLA 3.6.: Nodos seleccionados para simulaciones en el Alban de 34.5 kV.

### 3.3.1. Resultados de la Herramienta MBM-SC1

Las siguientes figuras presentan los resultados obtenidos por la herramienta MBM-SC1 bajo simulación considerando los diferentes tipos de fallas, variando la carga del circuito y la resistencia de falla.

- Fallas Monofásicas

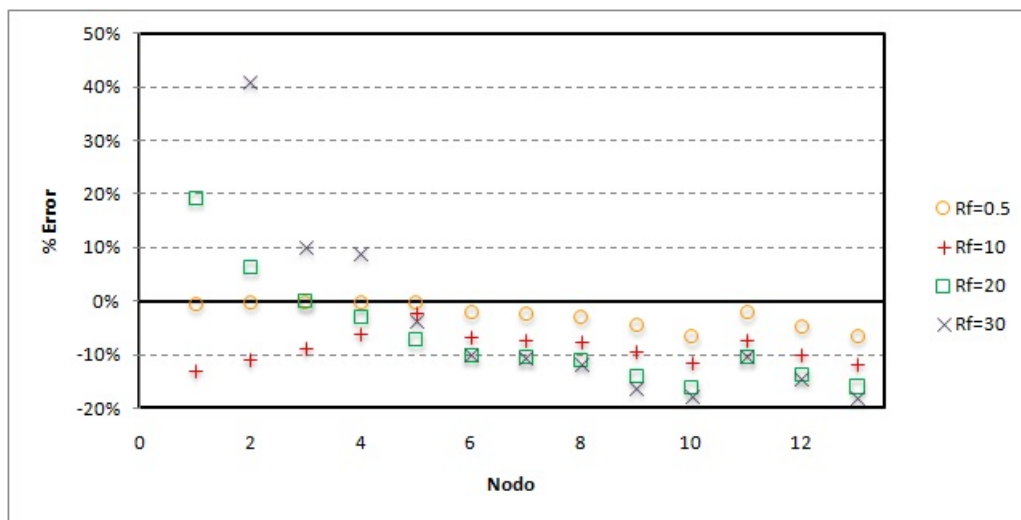


FIGURA 3.15.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas monofásicas. Carga nominal

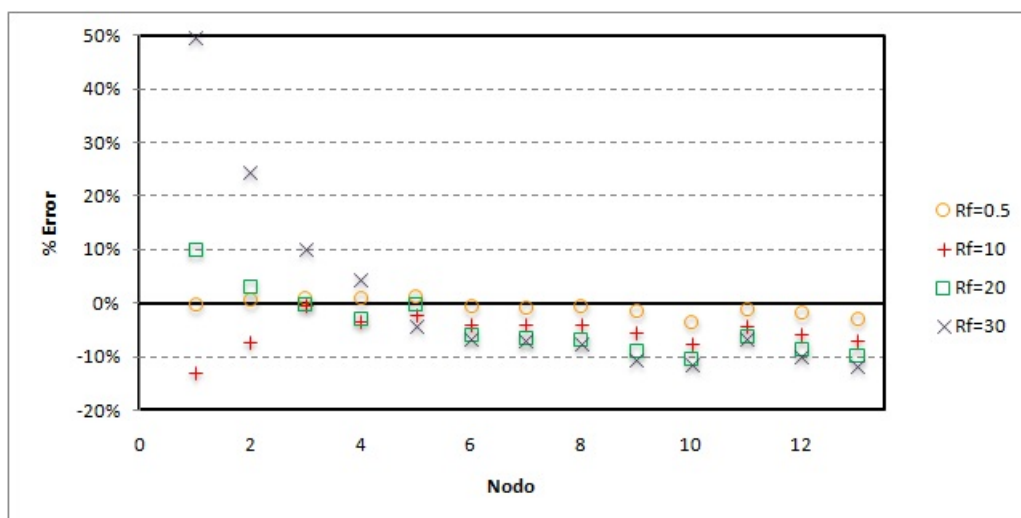


FIGURA 3.16.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas monofásicas. 60 % carga nominal

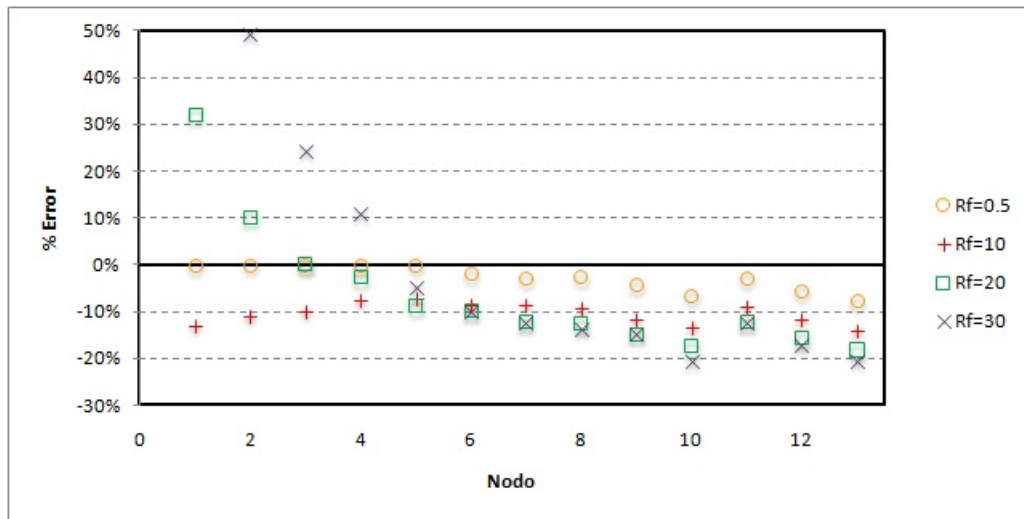


FIGURA 3.17.: Resultados herramienta MBM-SC1 monofásicas. 120 % carga nominal

■ Fallas Bifásicas

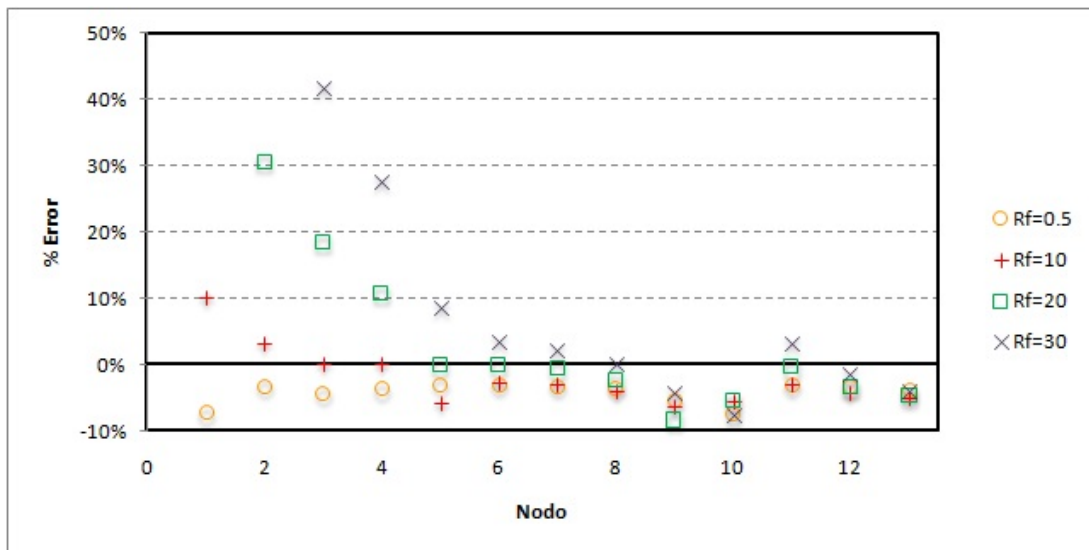


FIGURA 3.18.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas. Carga nominal

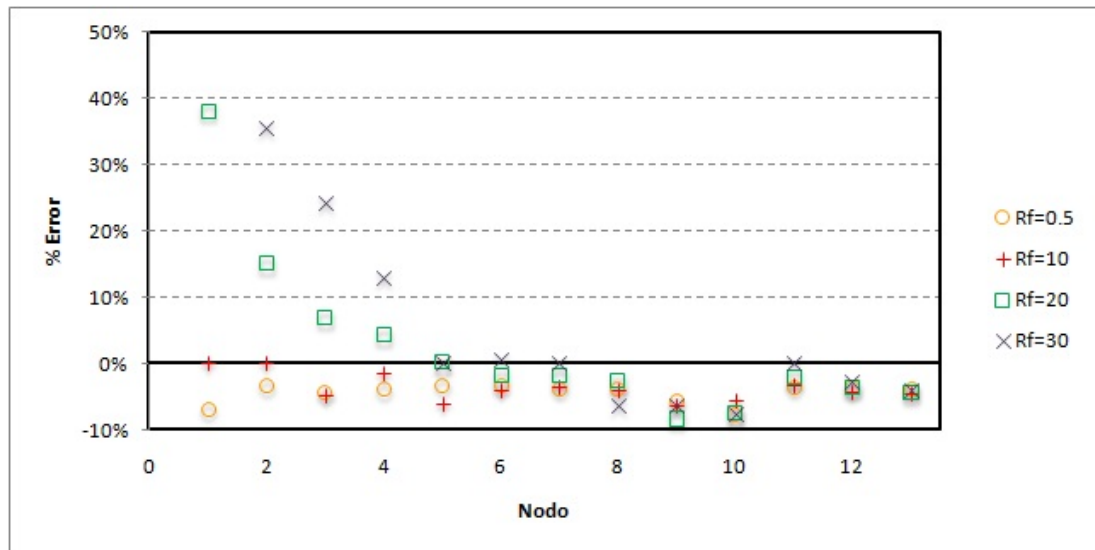


FIGURA 3.19.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas. 60 % carga nominal

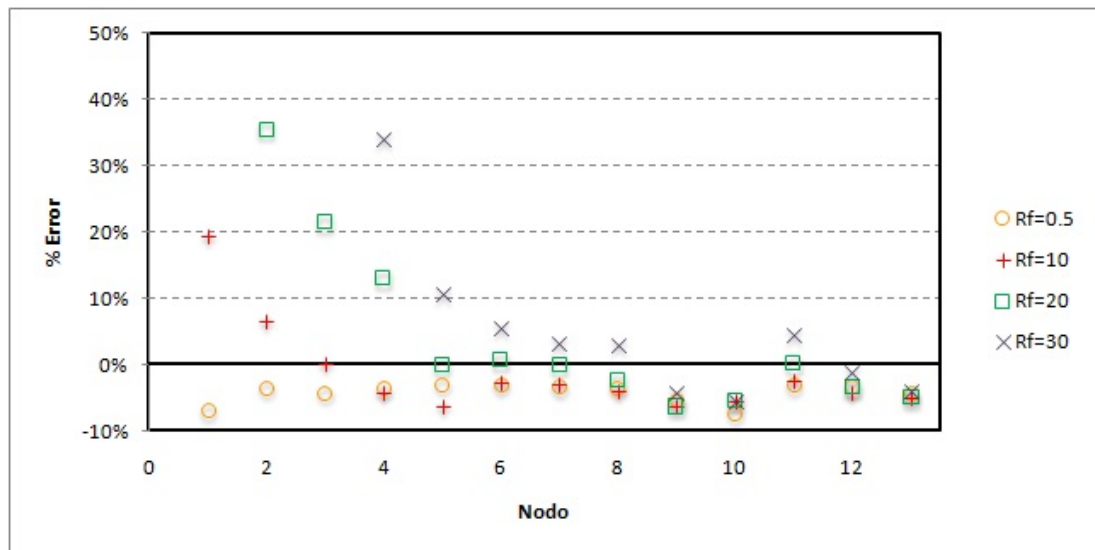


FIGURA 3.20.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas. 120 % carga nominal

■ Fallas Bifásicas a Tierra

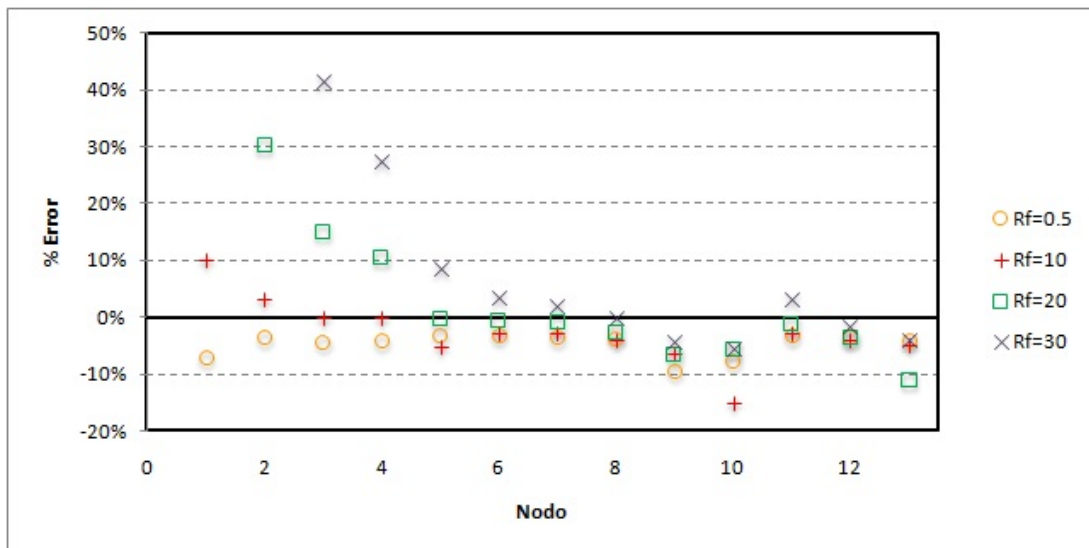


FIGURA 3.21.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas a tierra. Carga nominal

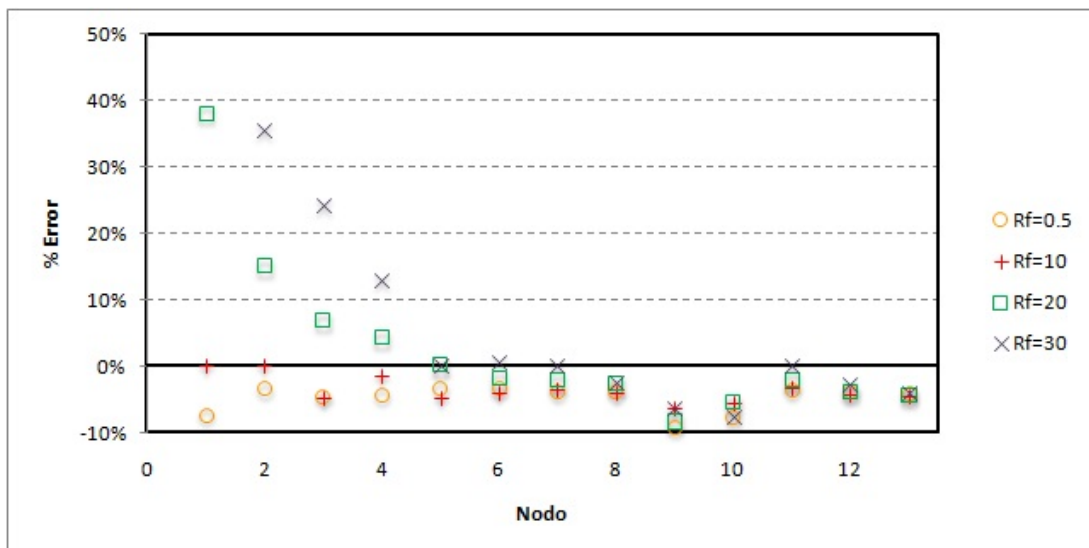


FIGURA 3.22.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas a tierra. 60% carga nominal

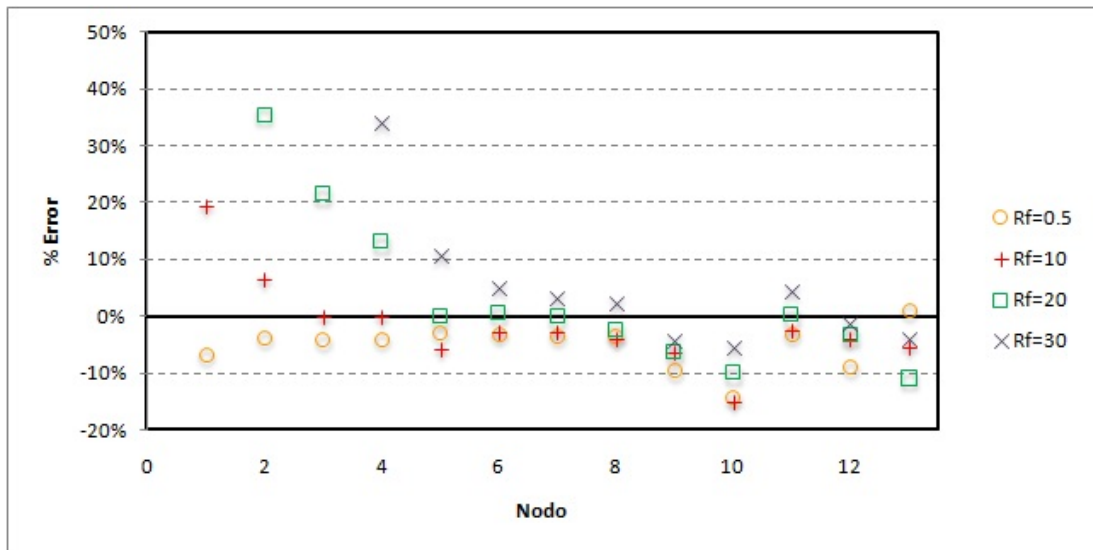


FIGURA 3.23.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas a tierra. 120 % carga nominal

■ Fallas Trifásicas

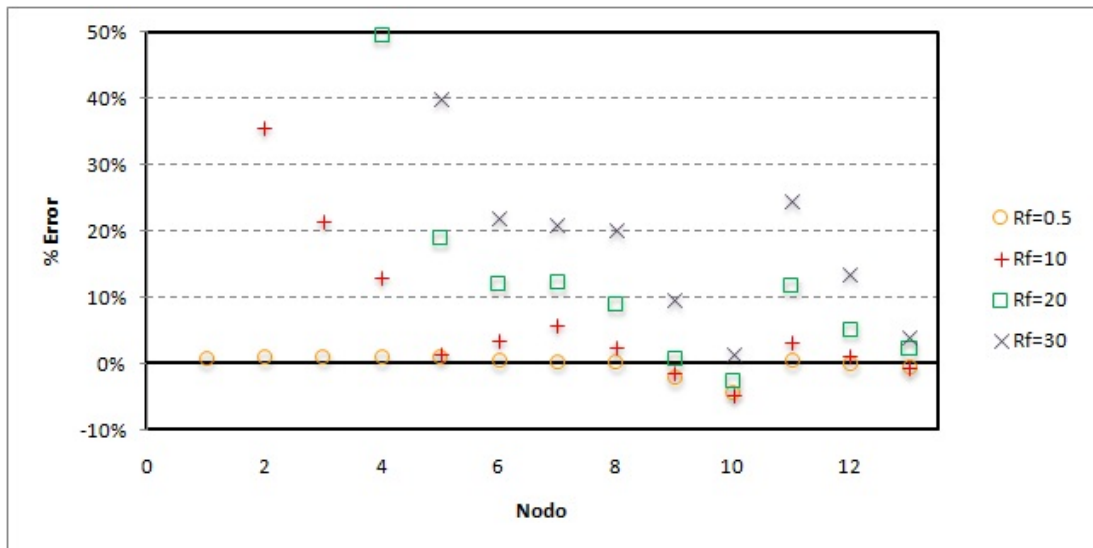


FIGURA 3.24.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas trifásicas. Carga nominal

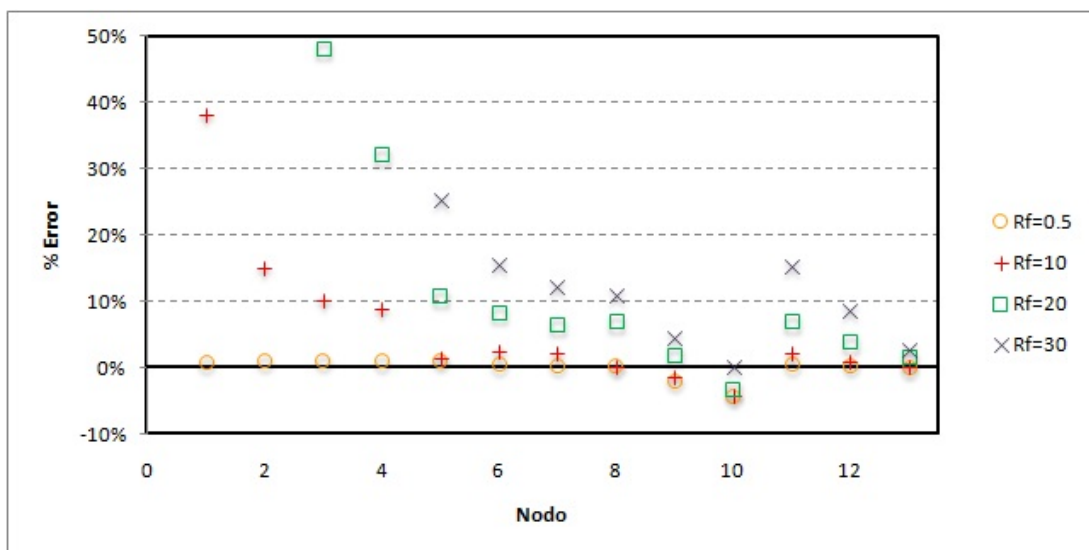


FIGURA 3.25.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas trifásicas. 60 % carga nominal

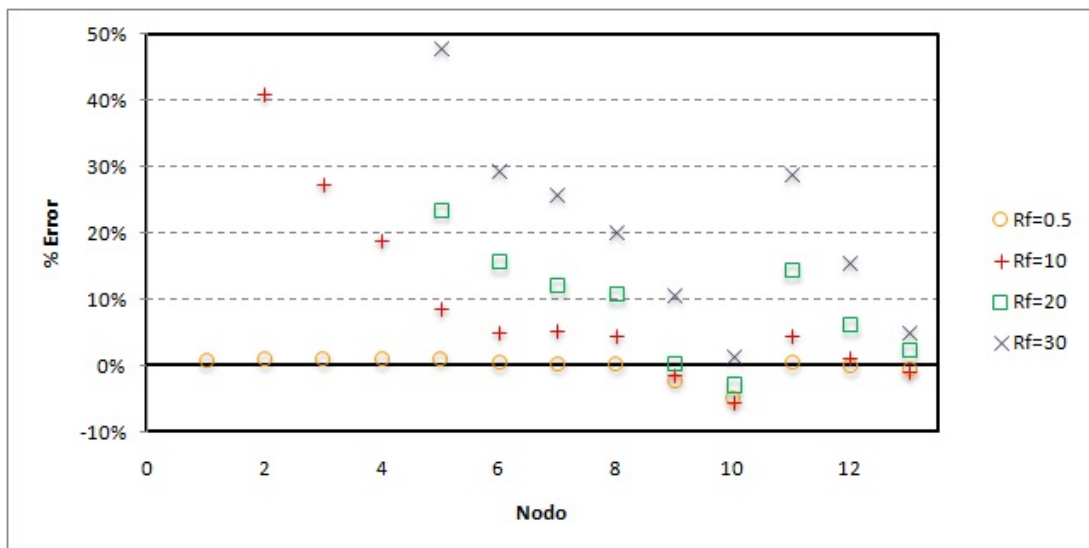


FIGURA 3.26.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas trifásicas. 120 % carga nominal

De todas los resultados observados anteriormente se logra apreciar que la variación de la carga no afecta considerablemente la estimación del lugar de la falla realizada por la herramienta MBM-SC1 para la topología presentada en este circuito y la variación en la resistencia de falla solo afecta considerablemente en los nodos iniciales.

### 3.3.2. Resultados de la Herramienta MBM-SC2

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos por la herramienta MBM-SC2 bajo simulación considerando los diferentes tipos de fallas, variando la carga del circuito y la resistencia de falla.

■ Fallas Monofásicas

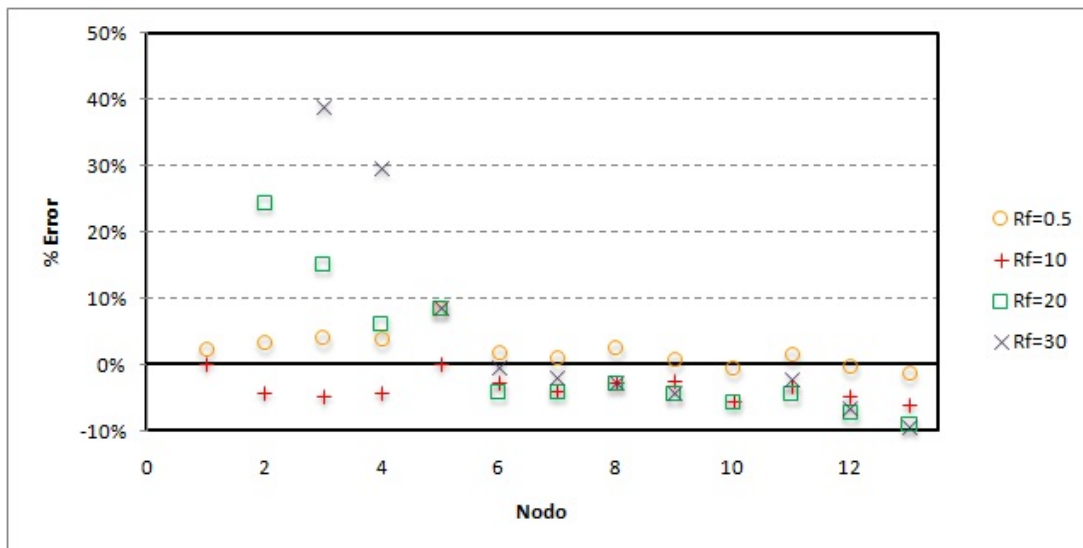


FIGURA 3.27.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas monofásicas. Carga nominal

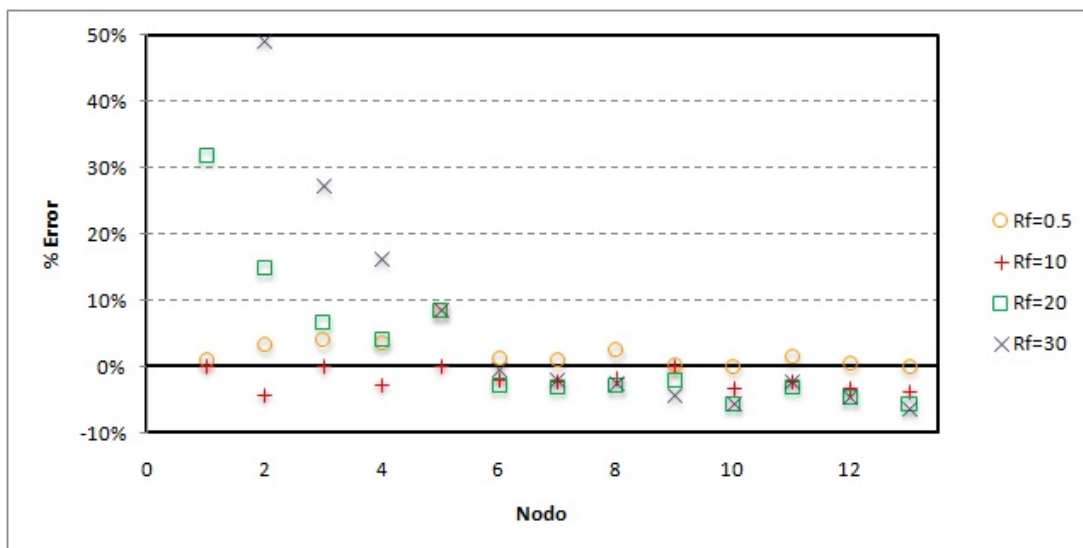


FIGURA 3.28.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas monofásicas. 60% carga nominal

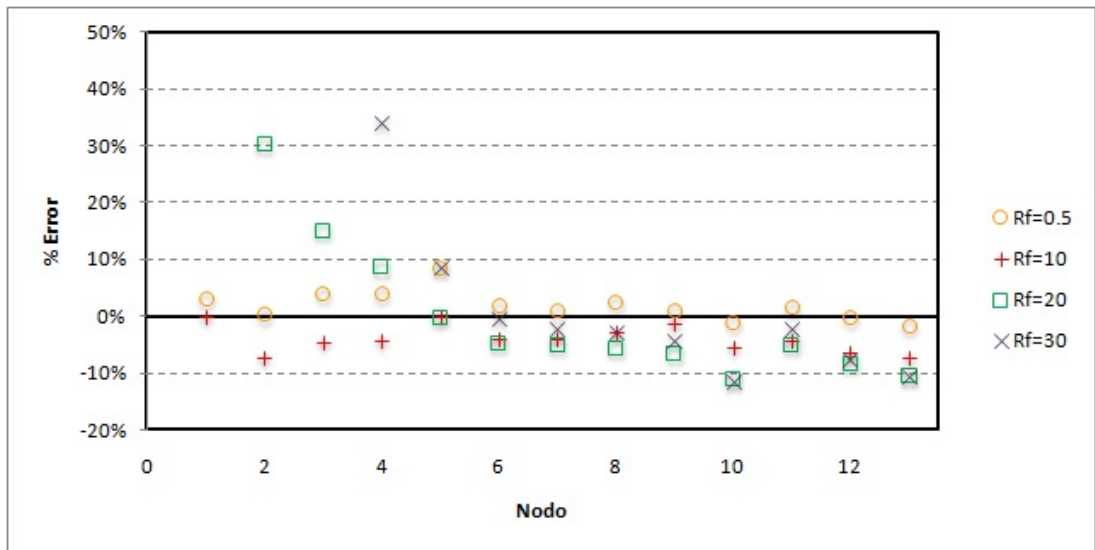


FIGURA 3.29.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas monofásicas. 120 % carga nominal

■ Fallas Bifásicas

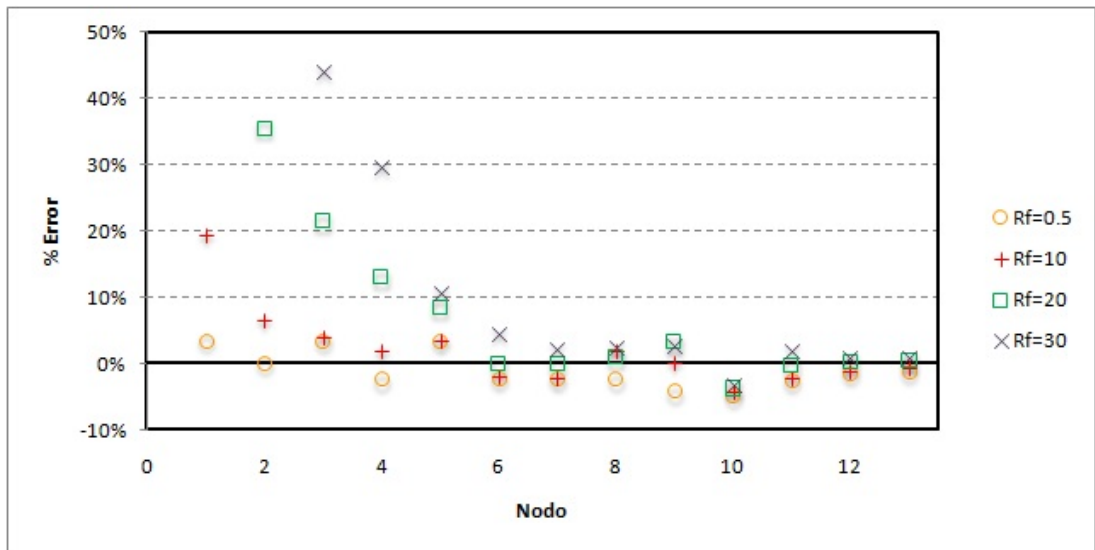


FIGURA 3.30.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas. Carga nominal

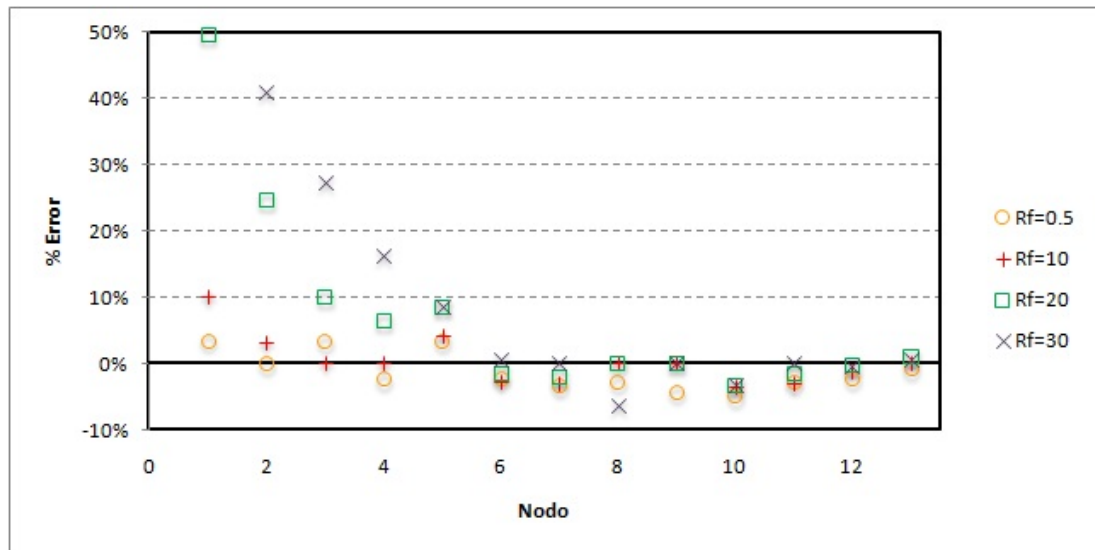


FIGURA 3.31.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas. 60 % carga nominal

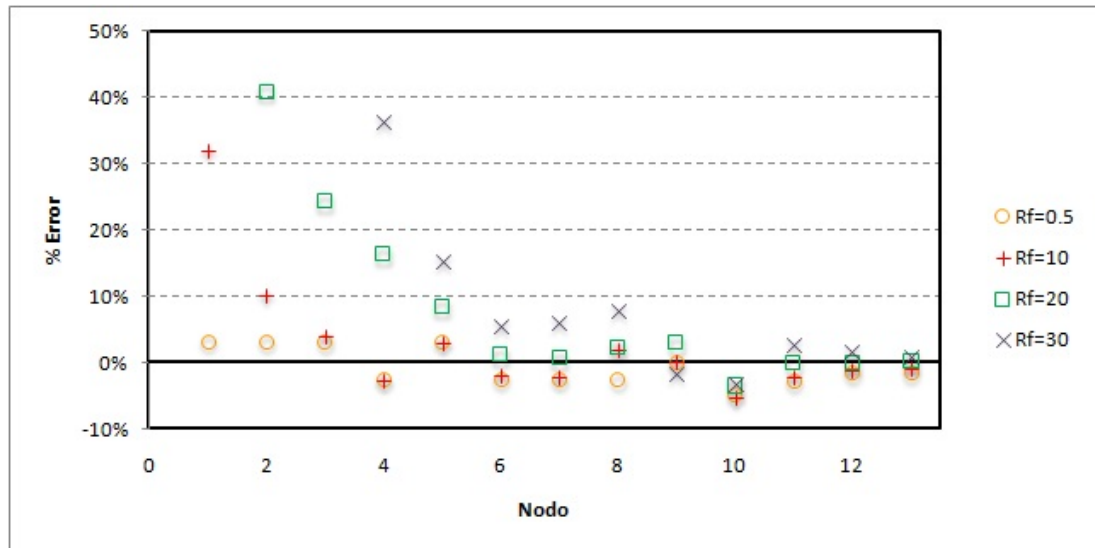


FIGURA 3.32.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas. 120 % carga nominal

■ Fallas Bifásicas a Tierra

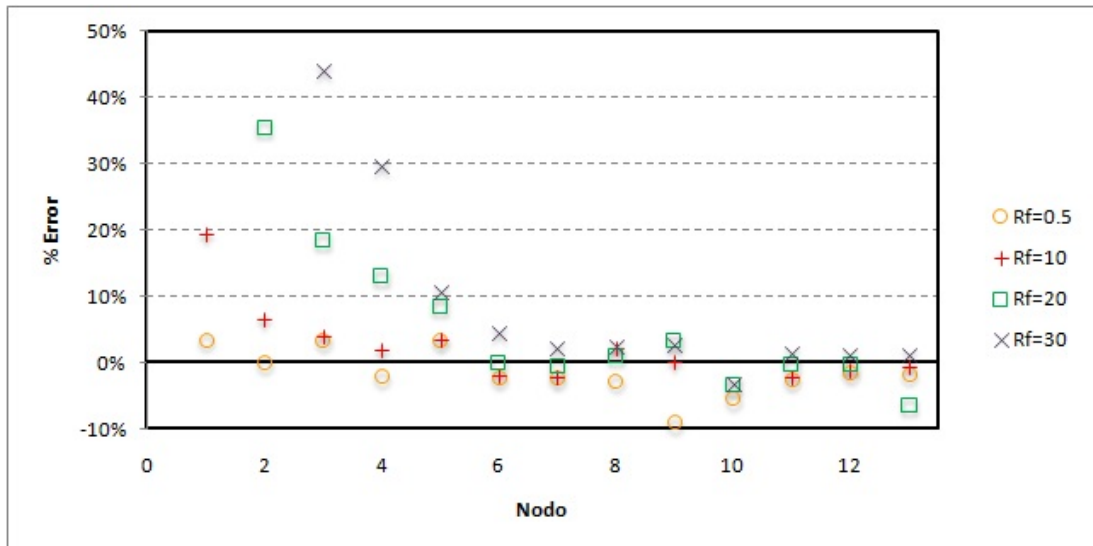


FIGURA 3.33.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas a tierra. Carga nominal

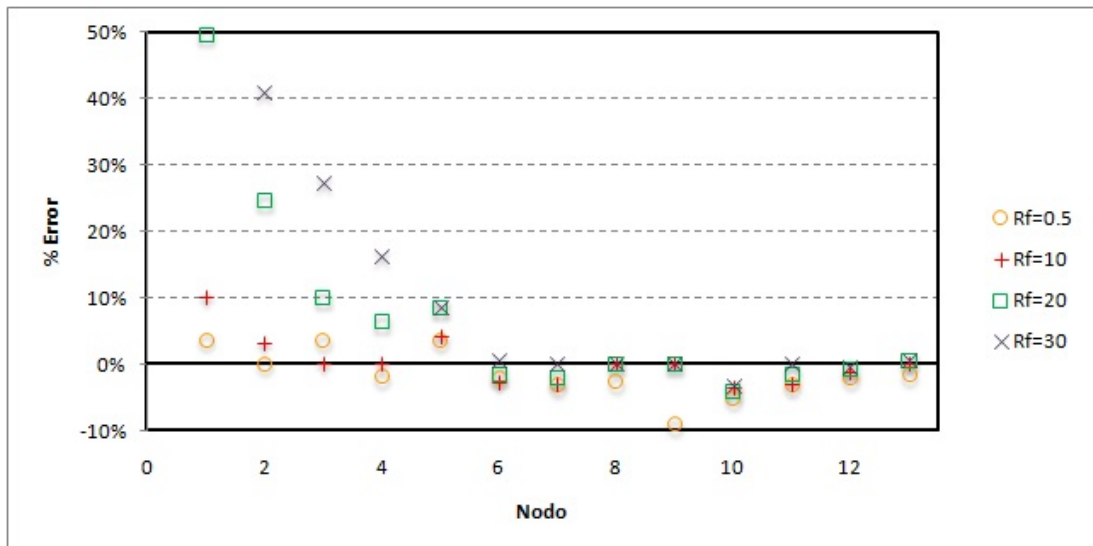


FIGURA 3.34.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas a tierra. 60% carga nominal

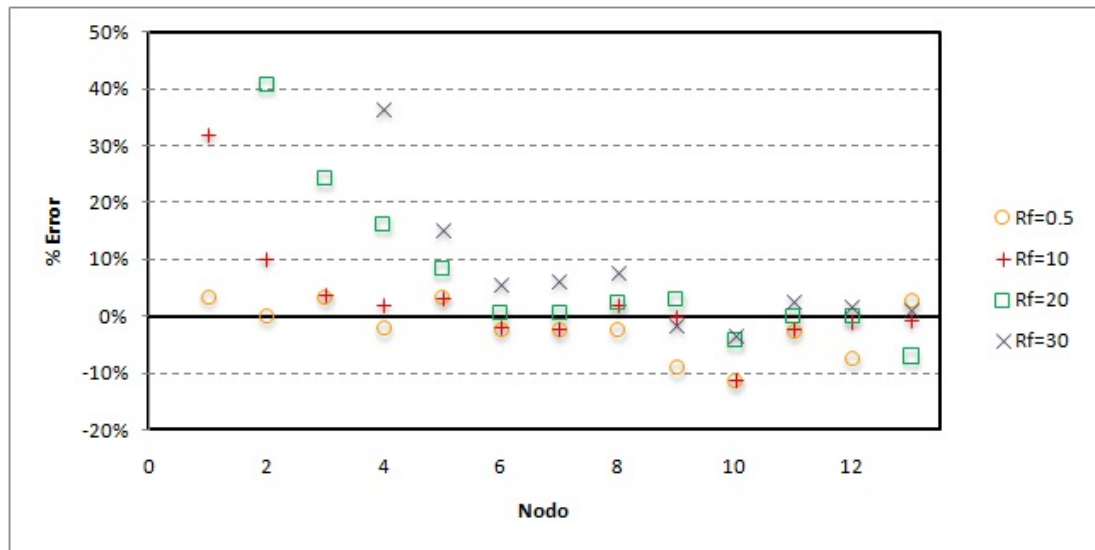


FIGURA 3.35.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas a tierra. 120 % carga nominal

■ Fallas Trifásicas

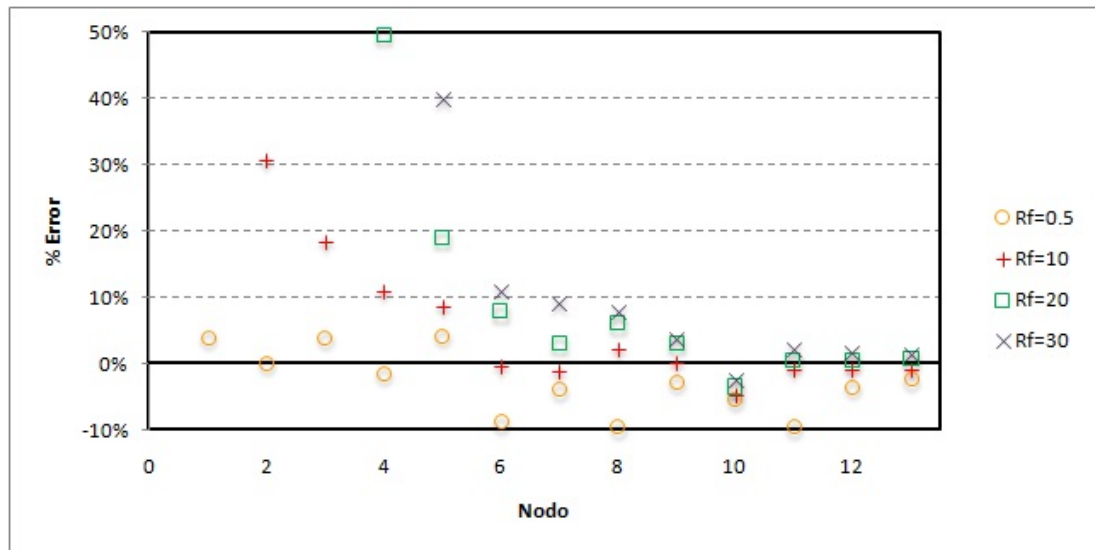


FIGURA 3.36.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas trifásicas. Carga nominal

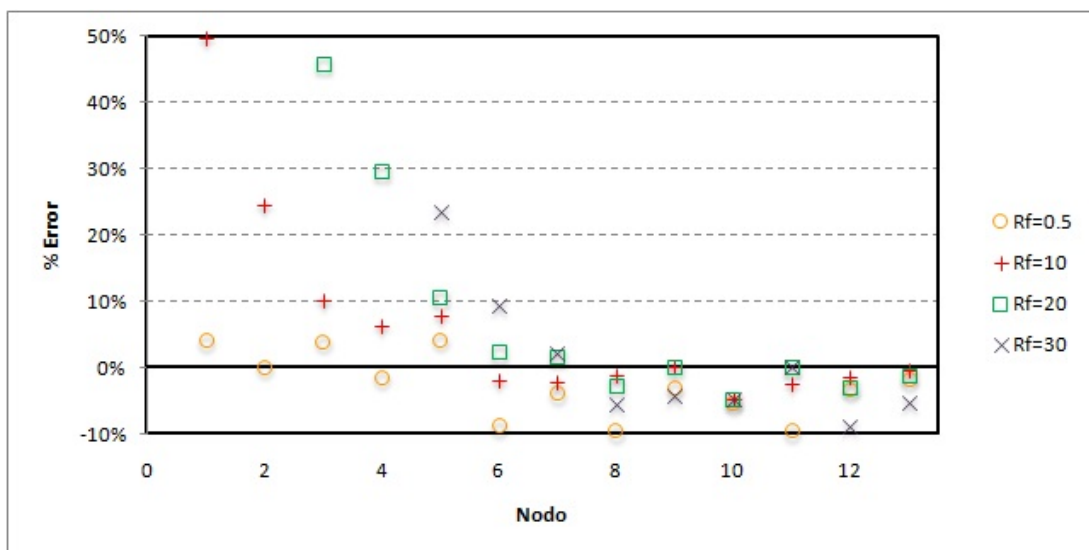


FIGURA 3.37.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas trifásicas. 60 % carga nominal

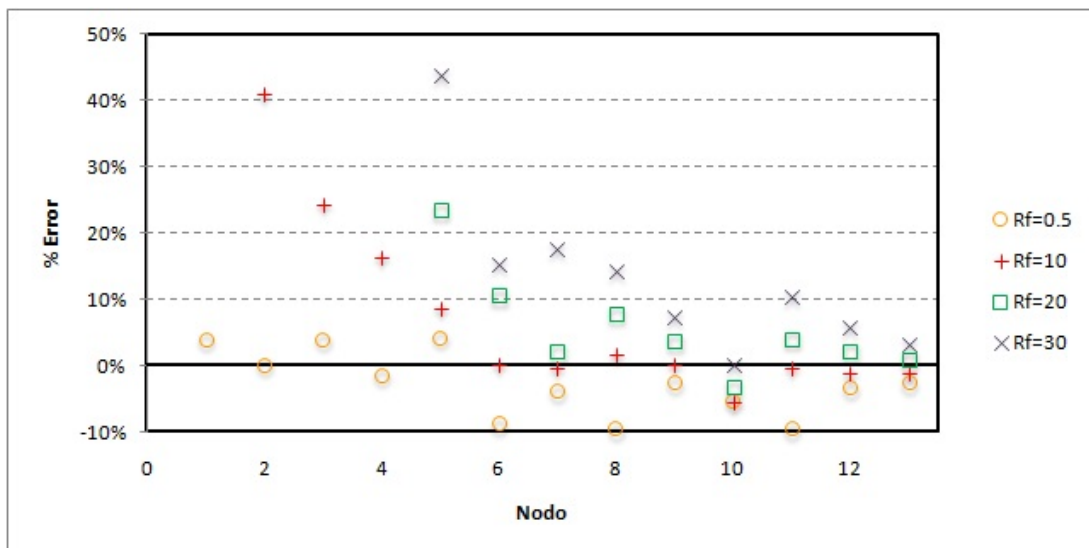


FIGURA 3.38.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas trifásicas. 120 % carga nominal

De todas los resultados observados anteriormente se logra apreciar que la variación de la carga no afecta considerablemente la estimación del lugar de la falla realizada por la herramienta MBM-SC2 y la variación en la resistencia de falla solo afecta considerablemente en los nodos iniciales para la topología presentada en este circuito.

### 3.3.3. Resultados de la Herramienta MME-SC

En el circuito Alban de 34.5 kV después del nodo 7 se presenta una bifurcación del circuito ocasionando que se produzcan múltiples estimaciones del lugar de la falla para nodos posteriores a éste. Por tal motivo se utilizó la herramienta MME-SC en las estimaciones hechas del lugar de la falla para los nodos 8, 9, 10, 11, 12 y 13, intentando reducir las múltiples estimaciones a una sola. En los resultados que se muestran en las tablas siguientes, se resaltaron las filas en color verde para indicar los casos en los cuales la herramienta MME-SC acertó en su ponderación del lateral donde ocurrió la falla.

#### 3.3.3.1. Aplicado a la Herramienta MBM-SC1

En las tablas mostradas a continuación se logra ver un bajo desempeño en la eliminación de las múltiples estimaciones realizadas por la herramienta MME-SC, debido a que las cargas a lo largo del circuito son trifásicas balanceadas y las impedancias mutuas después de la bifurcación para cada uno de los ramales del circuito son similares.

Nodo	%Error	
	Lateral correcto	Lateral incorrecto
8	5,513E-15	3,673E-15
9	2,309E-15	2,631E-14
10	1,139E-14	9,363E-15
11	8,309E-15	-
12	2,154E-15	1,104E-14
13	7,860E-15	5,358E-15

TABLA 3.7.: Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC1. Fallas monofásicas

Nodo	%Error	
	Lateral correcto	Lateral incorrecto
8	1,079E-04	1,211E-05
9	5,907E-04	1,229E-03
10	3,077E-03	1,423E-03
11	1,186E-02	-
12	1,067E-03	3,362E-04
13	1,237E-03	3,020E-04

TABLA 3.8.: Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC1. Fallas bifásicas

Nodo	%Error	
	Lateral correcto	Lateral incorrecto
8	7,503E-05	4,112E-03
9	5,797E-02	2,693E-02
10	7,269E-02	4,087E-02
11	3,754E-03	-
12	3,214E-02	5,410E-03
13	3,326E-02	3,416E-03

TABLA 3.9.: Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC1. Fallas bifásicas a tierra

Nodo	%Error	
	Lateral correcto	Lateral incorrecto
8	2,733E+01	2,189E+01
9	2,854E+00	9,960E+00
10	5,637E+00	-
11	6,162E+01	2,136E+01
12	9,575E+00	2,350E+00
13	4,998E+00	6,837E+00

TABLA 3.10.: Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC1. Fallas trifásicas

### 3.3.3.2. Aplicado a la Herramienta MBM-SC2

Los resultados al aplicar la herramienta MME-SC a las múltiples estimaciones realizadas por la herramienta MBM-SC2 son expuestos en las tablas 3.11, 3.12, 3.13 y

3.14, en las cuales se observó un desempeño similar al visto al ser aplicado a la herramienta MBM-SC1.

Nodo	%Error	
	Lateral correcto	Lateral incorrecto
8	6,046E-15	1,550E-15
9	2,312E-14	3,645E-15
10	1,802E-14	-
11	9,266E-14	2,604E-14
12	1,528E-14	4,199E-15
13	6,323E-15	7,727E-16

TABLA 3.11.: Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC2. Fallas monofásicas

Nodo	%Error	
	Lateral correcto	Lateral incorrecto
8	8,980E-03	6,447E-02
9	2,517E-02	3,025E-03
10	1,183E-03	-
11	6,642E-02	-
12	1,972E-03	4,666E-03
13	2,168E-03	3,993E-03

TABLA 3.12.: Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC2. Fallas bifásicas

Nodo	%Error	
	Lateral correcto	Lateral incorrecto
8	2,542E+00	2,569E-01
9	9,584E-02	1,372E-01
10	5,934E-02	-
11	2,214E-01	-
12	6,052E-02	7,462E-02
13	6,981E-02	6,604E-02

TABLA 3.13.: Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC2. Fallas bifásicas a tierra

Nodo	%Error	
	Lateral correcto	Lateral incorrecto
8	1,130E+00	1,130E+00
9	2,854E+00	1,842E+00
10	3,750E+00	-
11	1,138E+00	-
12	1,761E+00	2,350E+00
13	2,209E+00	3,640E+00

TABLA 3.14.: Resultados herramienta MME-SC a la múltiple estimación de la herramienta MBM-SC2. Fallas trifásicas.

### 3.4. Pruebas con el Circuito Alban de 34.5 kV Modelado 2

Se decidieron realizar pruebas ahora con un modelado del circuito mas complejo, el cual posee un comportamiento eléctrico muy similar al presente en la realidad, para esto se agregaron los efectos de los tramos de red subterránea y compacta como se muestra en la figura 3.39. Los resultados obtenidos para cada una de las herramientas MBM-SC1 y MBM-SC2 son presentados en las figuras a continuación.

#### 3.4.1. Resultados de la Herramienta MBM-SC1

En las figuras 3.40, 3.41, 3.42 y 3.43 se logra apreciar que el cambio en el modelado del circuito no afecto en forma significativa el desempeño de la herramienta, debido a que los tramos de red subterránea y compacta son muy pequeños comparados con el total del líneas aéreas.

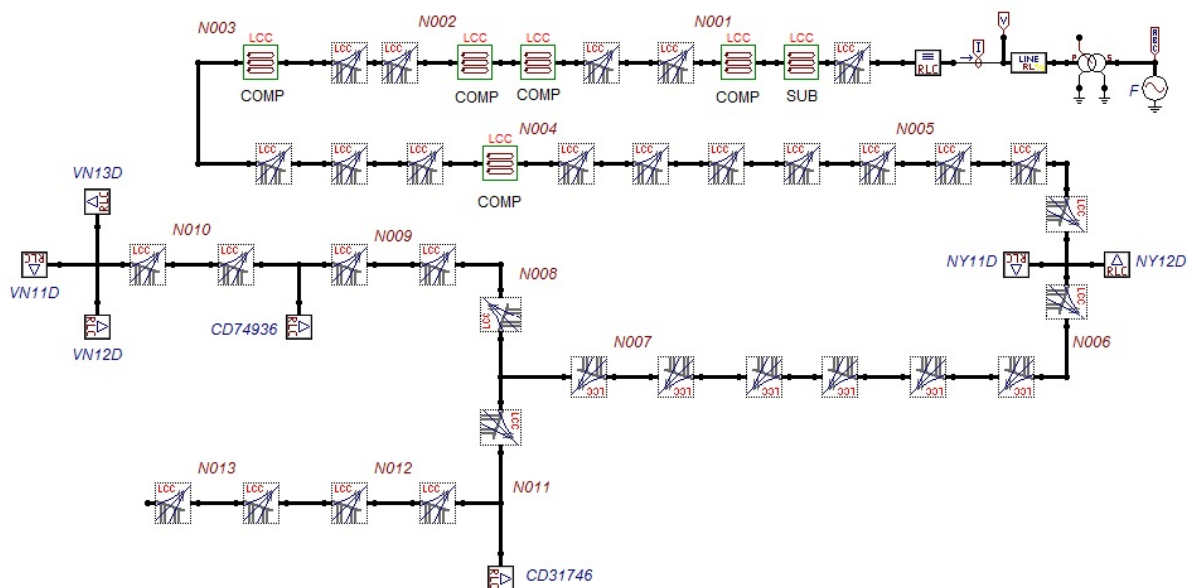


FIGURA 3.39.: Circuito Alban de 34.5 kV con subterránea y red compacta.

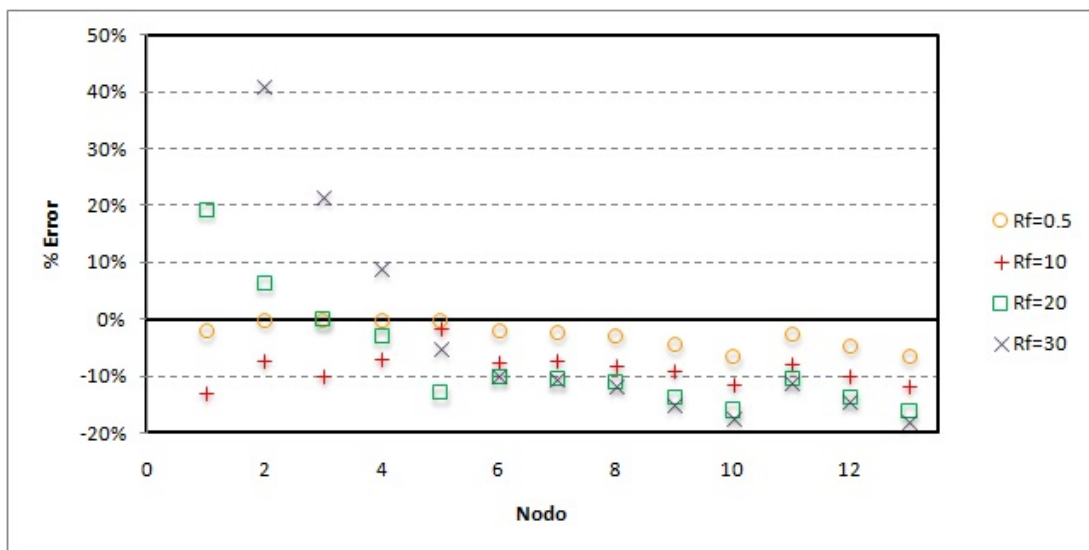


FIGURA 3.40.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas monofásicas

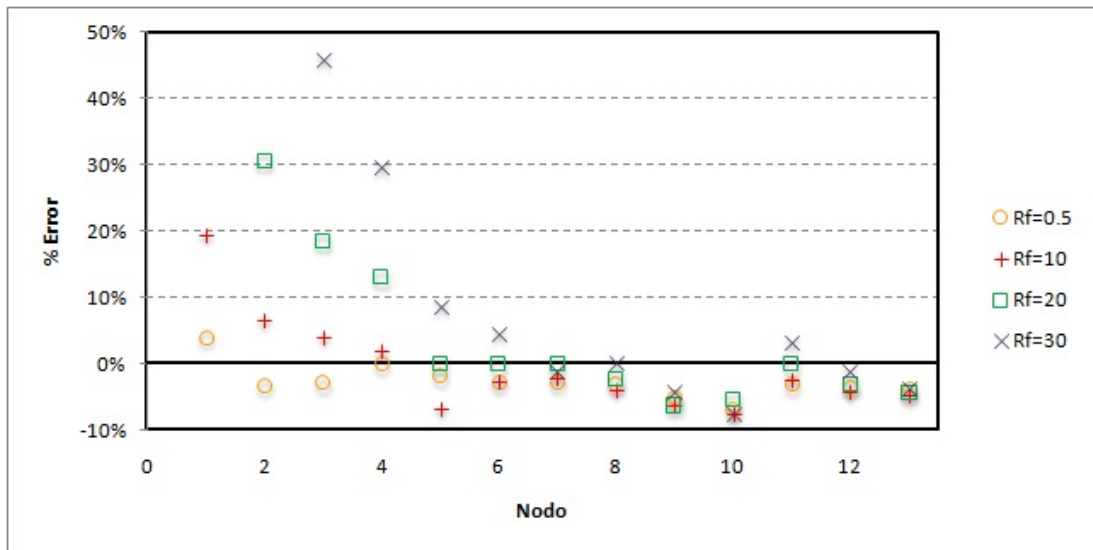


FIGURA 3.41.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas

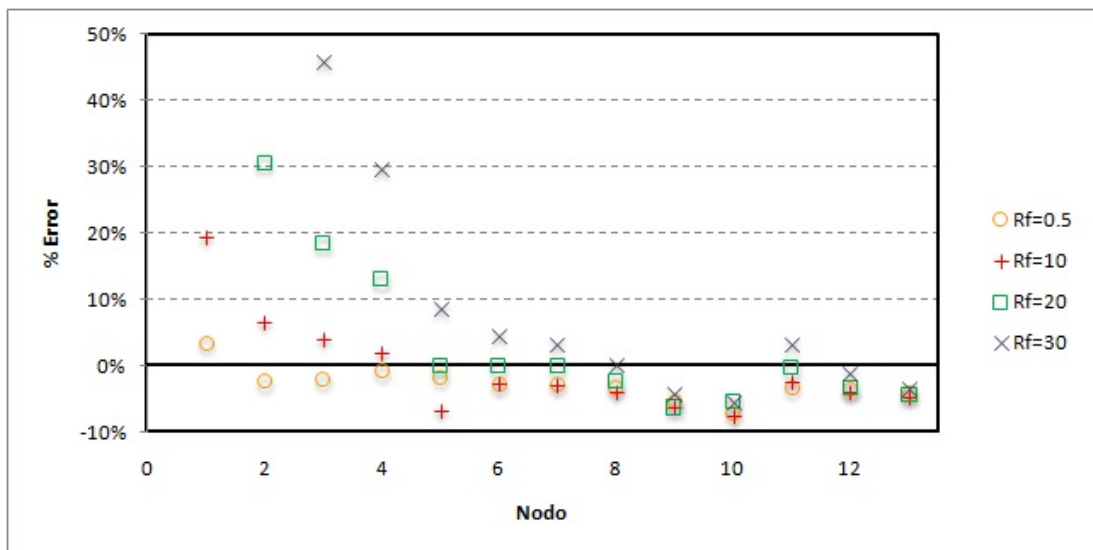


FIGURA 3.42.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas bifásicas a tierra

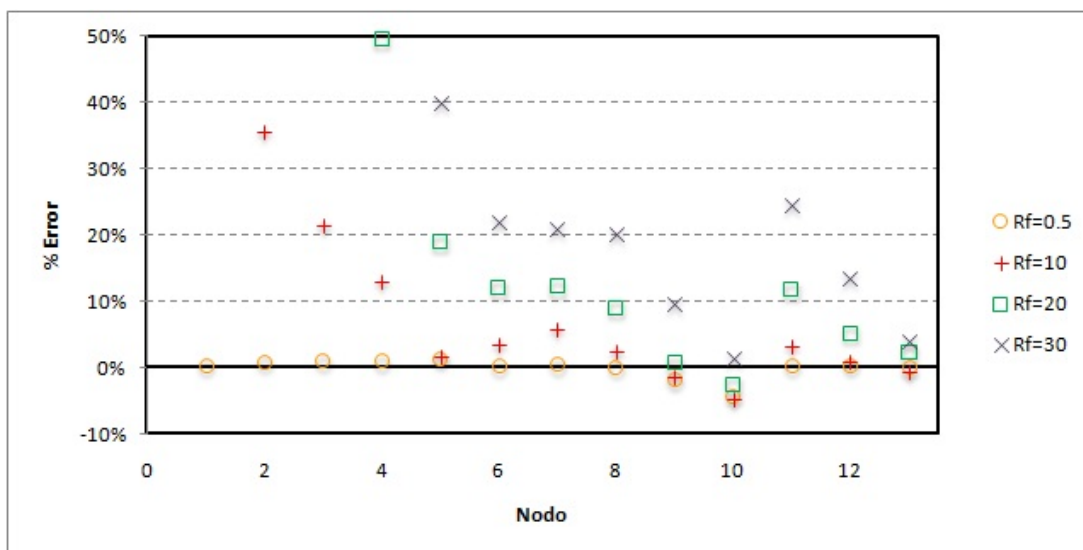


FIGURA 3.43.: Resultados herramienta MBM-SC1 fallas trifásicas.

### 3.4.2. Resultados de la Herramienta MBM-SC2

Los resultados expuestos en la figuras 3.44, 3.45, 3.46 y 3.47 presentan similitud a los encontrados por la herramienta cuando se llevaron a cabo las pruebas en el modelo 1 (sin tramos de red subterránea y compacta).

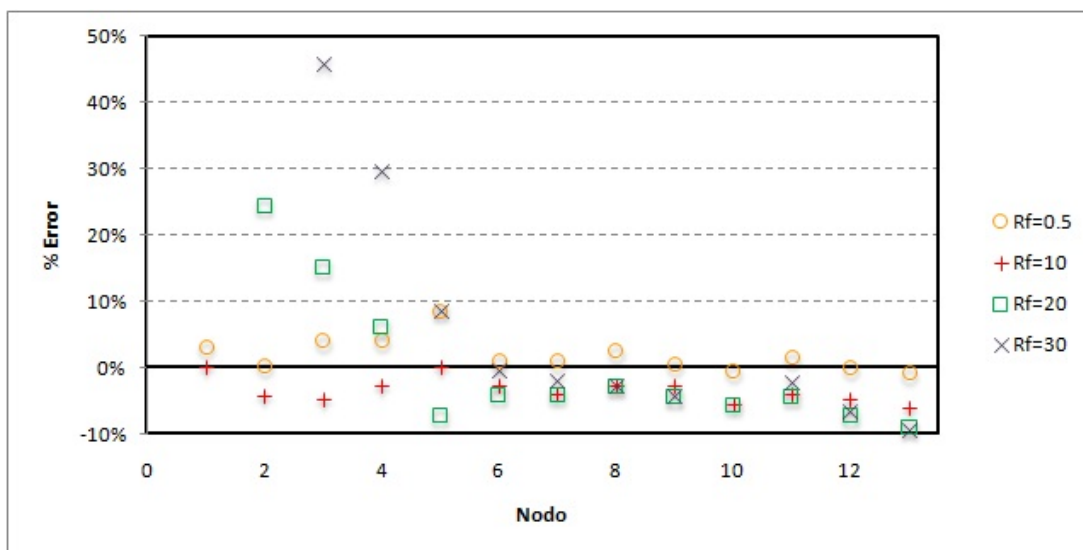


FIGURA 3.44.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas monofásicas

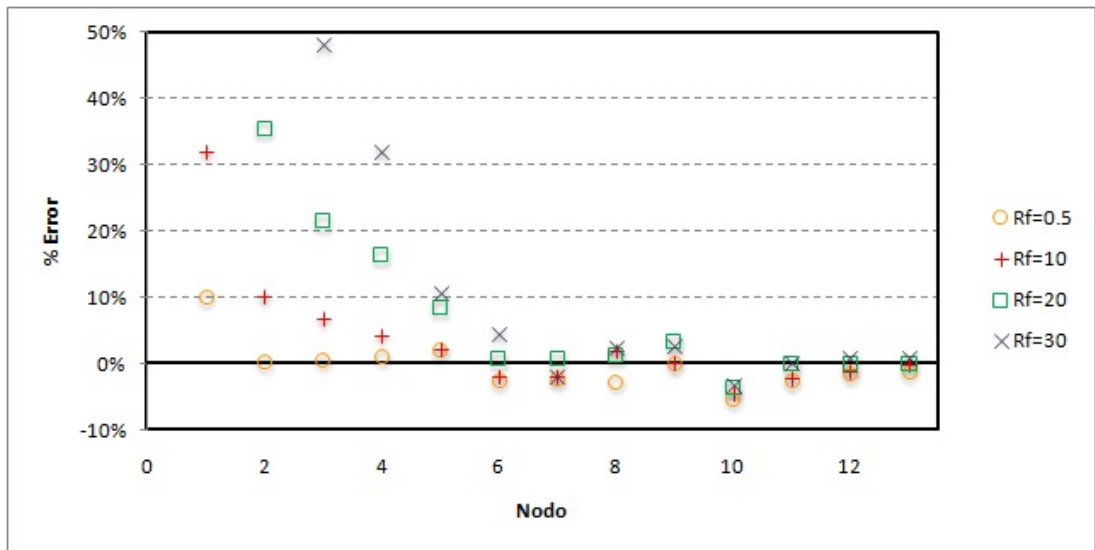


FIGURA 3.45.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas

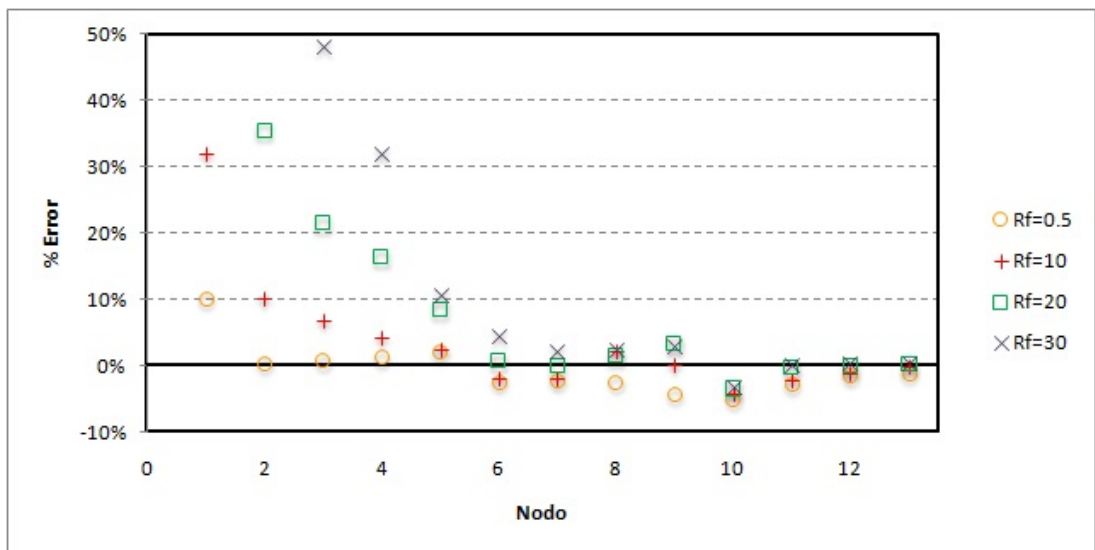


FIGURA 3.46.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas bifásicas a tierra

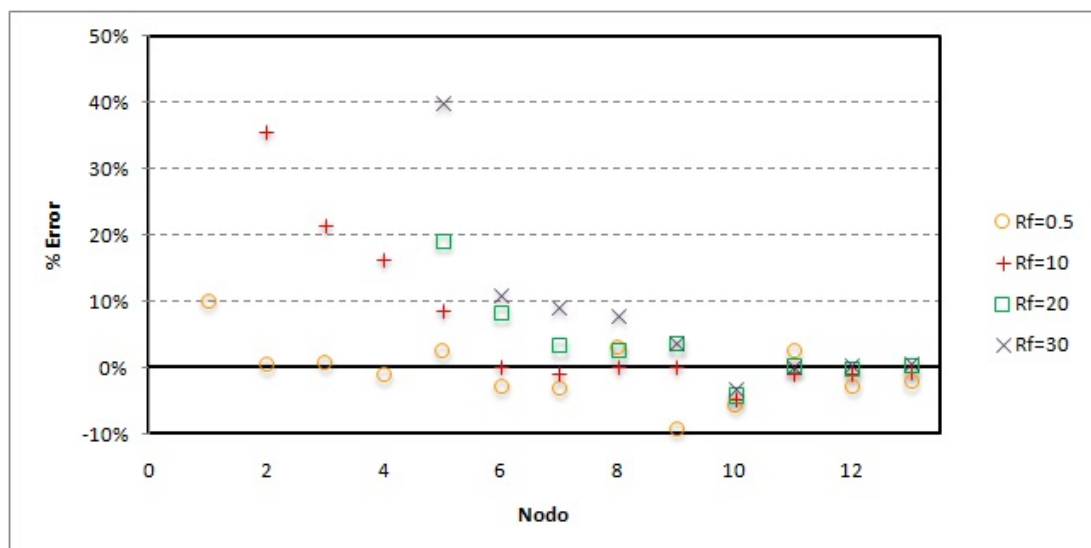


FIGURA 3.47.: Resultados herramienta MBM-SC2 fallas trifásicas

### 3.5. Resultados a partir de las Medidas en la Cabecera del Circuito Alban 34.5 kV

Para llevar a cabo estas estimaciones del lugar de la falla se utilizaron los registros de tensiones y corrientes en estado de prefalla y posfalla tomados en la cabecera del circuito por un relé electrónico (capaz de tomar 16 muestras por ciclo). Además se empleo el modelado del circuito con tramos de red subterránea y compacta, debido a que su comportamiento eléctrico era mas parecido al real. Solo se pudo contar con la localización real de dos lugares de falla. Los resultados arrojados por las herramientas MBM-SC1 y MBM-SC2 son mostrados respectivamente para cada uno en las tablas 3.15 y 3.16.

TIPO DE FALLA	DISTANCIA REAL (km)	DISTANCIA ESTIMADA (km)	%ERROR
C-T	12,929	14,344	10,95%
A-B	3,759	5,201	38,35%
B-C	-	2,150	-
A-B	-	11,815	-
A-T	-	20,443	-
B-T	-	17,495	-

TABLA 3.15.: Resultados herramienta MBM-SC1 a partir de medidas en la cabecera.

TIPO DE FALLA	DISTANCIA REAL (km)	DISTANCIA ESTIMADA (km)	%ERROR
C-T	12,929	14,868	15,00%
A-B	3,759	5,251	39,70%
B-C	-	2,181	-
A-B	-	12,050	-
A-T	-	20,171	-
B-T	-	17,823	-

TABLA 3.16.: Resultados herramienta MBM-SC2 a partir de medidas en la cabecera.

De los resultados se puede apreciar que para la estimación de la falla ocurrida a una distancia de 12,929 km se presentó un desempeño ligeramente mejor en la herramienta MBM-SC1, mientras que para la falla ocurrida a una distancia de 3,759 km se presentó un desempeño similar en ambas herramientas, con un gran %Error. Los cuales son consecuencia de la no transposición de las líneas que ocasionan desbalances en las tensiones[And73]. Los desbalances mencionados anteriormente se pueden apreciar en los registros de tensiones y corrientes mostrados en las figuras 3.48 y 3.49.

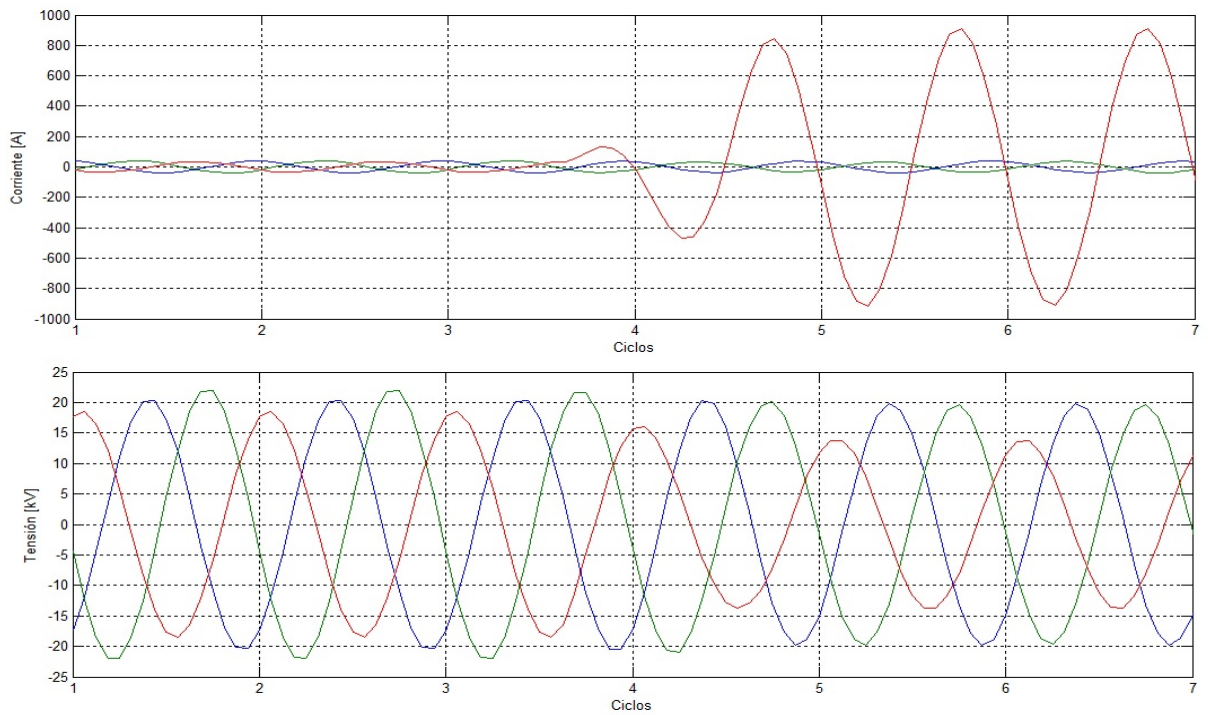


FIGURA 3.48.: Registros de tensiones y corrientes en la cabecera del circuito. Falla fase C a tierra.

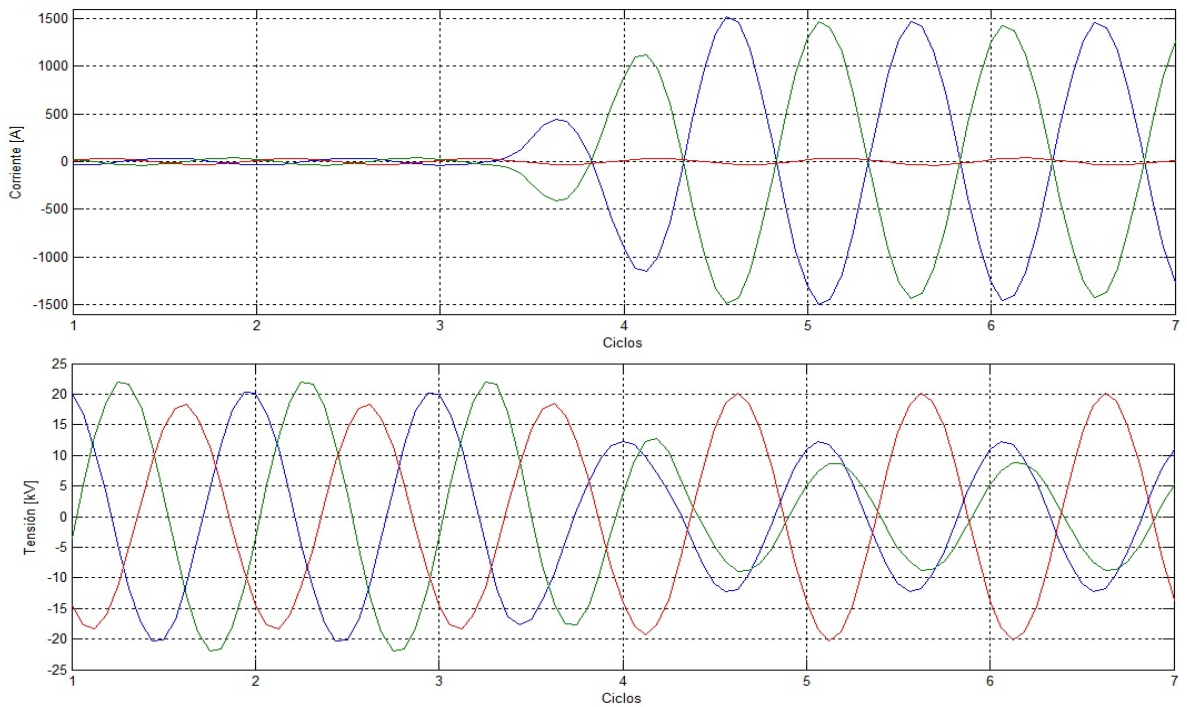


FIGURA 3.49.: Registros de tensiones y corrientes en la cabecera del circuito. Falla fases A-B.

## 4. Conclusiones

Para este trabajo se implementaron los métodos algorítmicos de localización de fallas propuestos por Ph.D. Murari Saha y Ph.D. Ratan Das, los cuales trabajando bajo dos metodologías diferentes, estiman primero las posibles secciones en falla y posteriormente la distancia a la falla en la sección fallada. Debido a que estos dos métodos algorítmicos no determinan una única ubicación de la falla cuando el sistema es muy ramificado, se implementó adicionalmente el método propuesto por M.Sc. Germán Morales que busca eliminar las múltiples estimaciones del sitio de la falla.

Se crearon tres herramientas “software” independientes en la plataforma Matlab a partir de los principios de las metodologías originales. Estas herramientas se trataron de hacer modulares para que sean de un uso similar. Las herramientas emplean una interfaz que hace práctica la introducción de la topología del circuito a trabajar, los datos de registro de tensiones y corrientes desde distintas fuentes, y una presentación ordenada y clara de los resultados.

Las funciones que trabajan la metodología de las herramientas realizan de sencillos cálculos matriciales, que posibilitan plantearlas para otros tipos de plataformas o lenguajes de programación.

Se elaboró el manual del usuario de las herramientas “software”, haciendo mas práctica la instalación, ejecución y uso de las herramientas.

Las dos herramientas de localización de fallas desarrolladas en este trabajo mostraron bajo simulación resultados muy aceptables ante la variación de la resistencia de falla. Esto ocurrió tanto en el circuito modelo de validación como en el circuito real (Alban). Por la tendencia que tiene el  $\%Error$  se logra observar que la localización de las fallas se hace mas precisa a medida que éstas se alejan del nodo de cabecera y que el  $\%Error$  de la localización disminuye conforme la resistencia de falla se hace mas cercana a cero. Una excepción a estos resultados son las fallas de alta impedancia cercanas al nodo de cabecera.

Los resultados arrojados por la simulación mediante las herramientas implementadas mostraron gran robustez ante variaciones de la carga en el circuito Alban, lo cual es muy interesante debido a que es difícil obtener la información detallada acerca de las cargas en el instante de la falla.

La herramienta de eliminación de la múltiple estimación MME-SC mostró ser bastante efectiva en la identificación de la sección en falla cuando se probó en el circuito modelo de validación, determinando con una certeza superior al 90 % en todos los tipos de fallas, aun en la condición de secciones que parten de un mismo nodo. Esta misma herramienta mostró no ser tan efectiva en topologías como la del circuito real (Alban), debido a que esta posee todas sus cargas trifásicas balanceadas y la escasa diferencia de las impedancias mutuas entre las secciones en que ocurre la múltiple estimación, condiciones desfavorables para la identificación utilizando esta metodología.

Los resultados obtenidos por las herramientas MBM-SC1 y MBM-SC2 a partir de los registros tensiones y corrientes tomados en la cabecera del circuito Alban mostraron resultados muy interesantes para la localización de una falla pues su *%Error* estuvo dentro de los rangos aceptables de desempeño. Aunque en otra estimación se tuvieron *%Error* cercanos al 40 %, debidos a desbalances en las tensiones producidos por la no transposición de las líneas.

Los resultados obtenidos de la evaluación de las herramientas MBM-SC1 y MBM-SC2 muestran un comportamiento similar al localizar fallas, con lo cual se logra apreciar que los modelos de línea utilizados por Ratan Das (Parámetros distribuidos) y Saha (Parámetros concentrados) no afectan de forma significativa los resultados.

Cuando se implementen estos tipos de localizadores de fallas en circuitos reales es importante contar una base de datos que cuente con información clara, ordenada y confiable acerca de las longitudes, configuraciones y tipos de conductores de cada una de las secciones, así como información acerca del tipo de cargas que están distribuidas a lo largo del circuito.

Se propone probar estas herramientas en mas circuitos reales que tengan ramificaciones y cargas no homogéneas ubicadas a lo largo del mismo. Esto permitiría averiguar el comportamiento de las mismas en dichos tipos de sistemas, y de proporcionar una topología mas propicia para la metodología de Morales.

Se recomienda montar otros algoritmos de localización de fallas y métodos de eli-

minación de múltiple estimación haciendo uso de la estructura de programación ya lograda en este proyecto (Función topología: lee y forma los circuitos caminos que tienen los datos de la topología).

Se sugiere la implementación de métodos de localización de fallas que tengan en cuenta los desbalances de las tensiones que aparecen en los circuitos no transpuestos.

# Bibliografía

- [And73] Paul M. Anderson. *Analysis of Faulted Power Systems*. The Iowa State University Press / Ames, 1973.
- [BN06] Victor A. Barrera-Núñez. *Sistemas de Distribución: Metodología para la Localización de Fallas Mediante la Aplicación de Inteligencia Artificial*. Tesis de Maestría Dirigida por Gilberto Carrillo Caicedo y Gabriel Ordóñez Plata. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [CA06] Jorge A. Cormane-Angarita. *Modelo Estadístico para la Localización de Fallas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*. Tesis de Maestría Dirigida por Hermann Raúl Vargas y Gabriel Ordóñez Plata. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [Das98] Ratan Das. *Determining the Locations of Faults in Distribution Systems*. Doctoral Tesis, Department of Electrical Engineering, University of Saskatchewan, Available on National Library of Canada, 1998.
- [JF06] Ronald J. Villar-Cruz & Felix A. Jaimes-Florez. *Caracterización de Circuitos de Distribución para Estudios de Calidad en Sistemas de Energía Eléctrica*. Trabajo de Grado Dirigido por Gabriel Ordoñez Plata, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [lGR05] Germán A. Morales-España & Álvaro Gómez-Ruiz. *Estudio e Implementación de una Herramienta Basada en Máquinas de Soporte Vectorial Aplicada a la Localización de Fallas en Sistemas de Distribución*. Trabajo de Grado Dirigido por Hermann Raúl Vargas y Juan Carlos Rodríguez Suárez. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2005.

- [LR07] Luis E. López-Ruiz. *Localización de Fallas: Herramienta de Clasificación Basada en Mezclas Finitas*. Trabajo de Grado Dirigido por Hermann Raúl Vargas Torres y Jorge Andres Cormane Angarita. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2007.
- [MEMFVT09] German Morales-España, Juan J. Mora-Flórez, and Hermann R. Vargas-Torres. Elimination of Multiple Estimation for Fault Location in Radial Power Systems by Using Fundamental Single-End Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24:1382–1389, 2009.
- [MG06] Cesar A. Rojas-Espinosa & Juan C. Martínez-Gutiérrez. *Localización de Fallas: Clasificación de Huecos de Tensión en Sistemas de Distribución Utilizando la Técnica LAMDA*. Trabajo de Grado Dirigido por Gilberto Carrillo Caicedo y Victor Barrera Núñez. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [QB05] Libardo Villamizar-Montes & Carlos A. Quiñones-Buitrago. *Implementación del Metodo de Ratan Das para Localización de Fallas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*. Trabajo de Grado Dirigido por Hermann Raúl Vargas Torres, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, 2005.
- [RS06] Juan Carlos Rodríguez-Suárez. *Detección y Localización de Fallas en los Sistemas de Energía Mediante la Técnica Máquinas de Soporte Vectorial (SVM)*. Tesis de Maestría Dirigida por Hermann Raúl Vargas y Juan José Mora Flórez. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [SR02] Murari Saha and Eugeniusz Rosolowski. Method and Device of Fault Location for Distribution Networks. *United States Patents*, Patent No. US 6.483.435 B2, 2002.
- [SRI05] Murari Saha, Eugeniusz Rosolowski, and Jan Izykowski. ATP-EMTP Investigation for Fault Location in Medium Voltage Networks. *Presented at the International Conference on Power Systems Transients (IPST05) in Montreal*, 2005.
- [ST06] Marco F. Suárez-Sánchez & Edwin Salamanca-Torres. *Localización de*

*fallas: Reconocimiento Estadístico de Patrones*. Trabajo de Grado Dirigido por Hermann Raúl Vargas Torres y Jorge Andrés Cormane. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.

- [TR09] Yeison L. Toro-Restrepo. *Localización de Fallas en Líneas de Distribución Mediante un Método Basado en la Estimación de la Impedancia Vista desde la Subestación*. Trabajo de Grado Dirigido por Juan José Mora Flórez, Programa de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingenierías, Universidad Tecnológica de Pereira, 2009.

# Anexos

# A. Variabilidad de la Reactancia de Falla Vista desde la Cabecera debido a la Resistencia de Falla

Los algoritmos tales como los de Ratan Das y Saha hacen uso de variaciones del método de la reactancia para realizar un primer paso en la localización, el cual consiste en estimar la sección de la falla. Esto lo logran asumiendo que la reactancia vista desde la cabecera en el momento de la falla es la reactancia de las líneas hasta el punto de falla, estimando que la de la resistencia de falla es baja. Por estas estimaciones el método de la reactancia pierde precisión a medida que la resistencia de falla aumenta. Para resistencias de falla grandes (en este estudio se consideraron mayores a  $25 \Omega$ ) los algoritmos estiman mal la sección en falla, lo que maximiza los errores del lugar de falla.

Los algoritmos de Ratan Das y Saha hacen uso de la construcción de circuitos caminos<sup>1</sup> como el mostrado en la figura A.1 para la aplicación de sus técnicas.

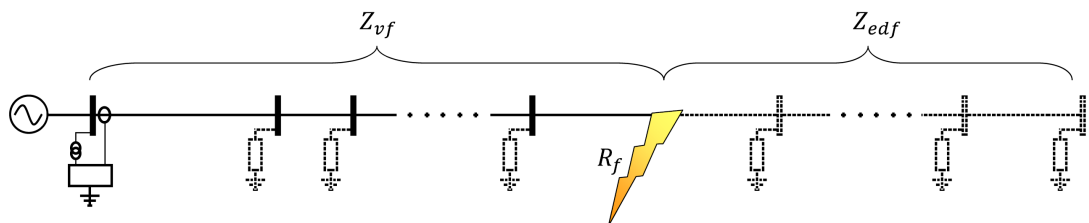


FIGURA A.1.: Circuito equivalente del sistema que se ve desde la cabecera cuando ocurre una falla

<sup>1</sup>Circuitos caminos son los términos usados para describir la identificación de un ramal en el cual sus laterales se consideran como cargas

Las impedancias involucradas en el circuito equivalente son:

$Z_{vf}$  es la impedancia de las líneas desde la cabecera hasta el punto de falla sin tomar en cuenta las cargas.

$Z_{edf}$  es la impedancia equivalente del sistema después del punto de falla tomando en cuenta las cargas.

$R_f$  es la resistencia de falla.

Debido a que  $Z_{edf}$  puede ser reducida a un solo valor de impedancia equivalente como se ve en la figura A.2, se puede lograr una ecuación de la impedancia vista desde la cabecera como se ve en la ecuación A.1.

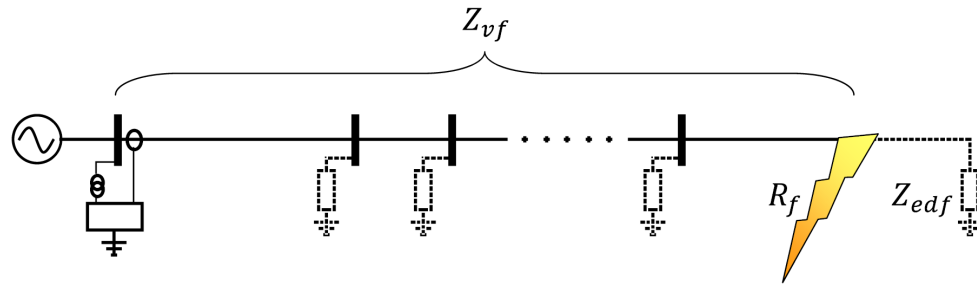


FIGURA A.2.: Circuito equivalente del sistema que se ve desde la cabecera con la  $Z_{edf}$  reducida.

$$Z_{cabecera} = \frac{V_{cabecera}}{I_{cabecera}} = Z_{vf} + (\mathbf{R}_f // \mathbf{Z}_{edf}) \quad (\text{A.1})$$

El termino en negrita de la ecuación A.1 deja de hacerse despreciable a medida que la  $R_f$  aumenta su valor, lo que hace que la reactancia vista desde la cabecera  $X_{cabecera} = \text{Imag}(Z_{cabecera})$  sea la reactancia de la impedancia de las líneas  $X_{vf} = \text{Imag}(Z_{vf})$  mas el valor de la reactancia aportada por el termino  $X_{R_f // Z_{edf}} = \text{Imag}(R_f // Z_{edf})$ . El valor de la reactancia aportada por el último termino puede ser hallada en función de la  $R_f$  como sigue:

$$Z_{R_f // Z_{edf}} = \frac{R_f \times (R_{edf} + X_{edf} j)}{R_f + R_{edf} + X_{edf} j} \quad (\text{A.2})$$

$$X_{R_f // Z_{edf}} = \text{imag}(Z_{R_f // Z_{edf}}) = \frac{R_f^2 \times X_{edf}}{(R_f + R_{edf})^2 + X_{edf}^2} \quad (\text{A.3})$$

Con el fin de observar la cantidad de reactancia aportada a la reactancia de las líneas hasta el punto de falla en razón de la magnitud de la resistencia de falla  $R_f$ , se realiza un análisis de los dos casos de impedancia en tres diferentes zonas del circuito. En uso del sistema de distribución usado en Ratan Das [Das98], se obtienen medidas de las impedancias  $Z_{vf}$  y  $Z_{edf}$  en las tres zonas según la distancia a la cabecera del circuito: la primera zona es aquella comprendida por los nodos más cercanos, la segunda zona son los nodos situados al medio del sistema y la tercera zona son los nodos en los finales del sistema.

En la zona de los nodos iniciales del sistema se obtiene un promedio de valores en las impedancias de:

$$Z_{vf} = 1 + 2,5j$$

$$Z_{edf} = 430 + 300j$$

En la figura A.3 se presenta de color verde la gráfica de la reactancia aportada a la reactancia de las líneas hasta el punto de falla, en razón de la magnitud de la resistencia de falla; la línea punteada de color azul es divisoria entre los casos de resistencias de falla considerados de baja y alta impedancia.

En dicha gráfica se puede observar un aporte de reactancia hasta de  $0,594\Omega$  para una  $R_f$  de baja impedancia cuando la reactancia de las líneas hasta el punto de falla es de  $2,5\Omega$ , el cual es un aporte relativamente apreciable que puede causar que el método de la reactancia estime la sección inmediatamente superior a la verdadera sección en falla; a medida que la  $R_f$  aumenta su valor, el aporte a la reactancia de las líneas logra fácilmente superar varias veces el verdadero valor de la reactancia hasta el punto de falla, lo cual causa un gran error en la estimación de la sección en falla.

En la zona de los nodos medios del sistema se obtiene un promedio de valores en las impedancias de:

$$Z_{vf} = 12,6 + 24,7j$$

$$Z_{edf} = 470 + 350j$$

En los nodos de esta zona, la gráfica en la figura A.4 muestra una reactancia aportada despreciable respecto de los  $24,7\Omega$  de la reactancia de las líneas hasta el punto de

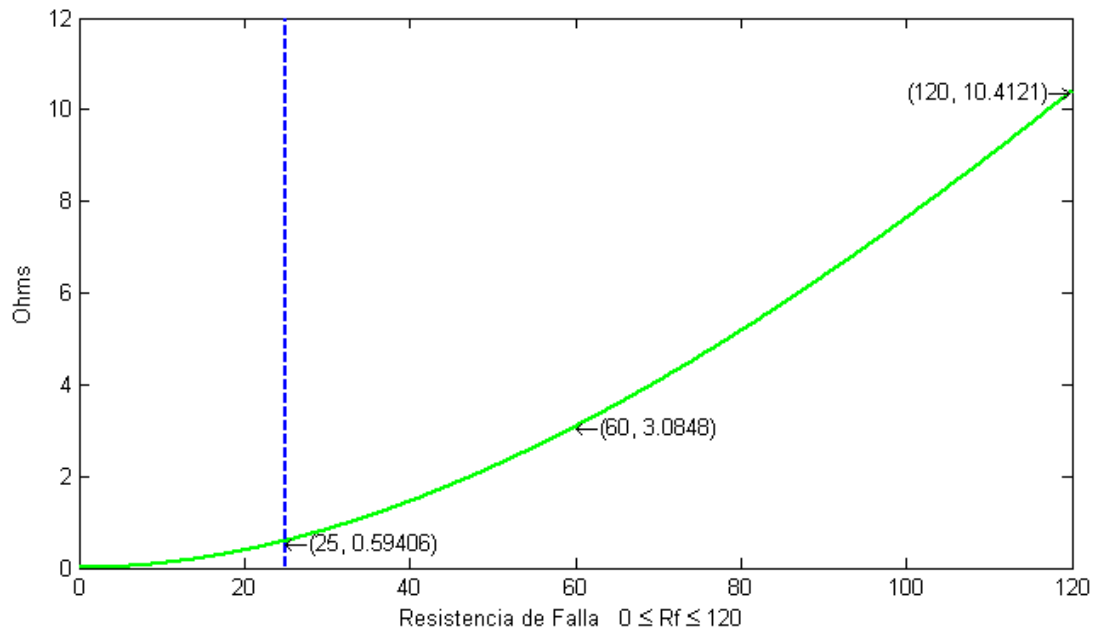


FIGURA A.3.: Reactancia aportada a la reactancia hasta el punto de falla cuando la falla es en nodos iniciales

falla cuando la  $R_f$  pertenece a valores de baja impedancia, haciendo del método de la reactancia un método bastante acertado para este caso. Cuando la  $R_f$  toma valores de alta impedancia, la reactancia aportada a su vez alcanza valores comparables a la magnitud de la reactancia de las líneas, lo que genera al método de la reactancia estimaciones erróneas de las secciones en falla, haciendo el caso de alta impedancia poco eficaz en esta zona.

En la zona de los nodos finales del sistema se obtiene un promedio de valores en las impedancias de:

$$Z_{vf} = 18 + 33j$$

$$Z_{edf} = 31900 + 8000j$$

En esta última zona, la figura A.5 muestra que los aportes de reactancia con respecto de la reactancia de las líneas hasta el punto de falla son realmente despreciables para los casos de baja y alta impedancia; considerando este último caso hasta una  $R_f = 120\Omega$ , lo que hace al método de la reactancia bastante preciso para fallas en la zona de nodos finales.

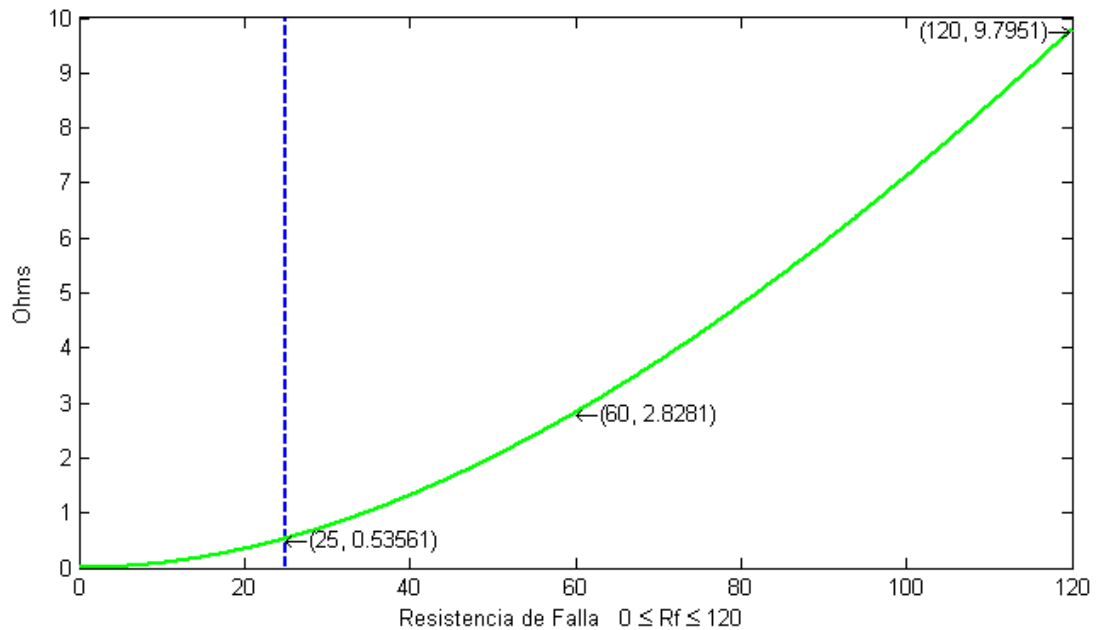


FIGURA A.4.: Reactancia aportada a la reactancia hasta el punto de falla cuando la falla es en nodos medios

De las tres zonas que se analizaron en este anexo acerca del método de la reactancia, se puede concluir fácilmente que si este método es usado de la forma convencional, su efectividad se verá limitada a los casos de fallas con  $R_f$  de baja impedancia.

El método de la reactancia podría mejorar para el caso de alta impedancia si se logra identificar la zona de la falla. Una combinación del conocimiento del circuito y de la zona donde sucede la falla, ayudará a estimar un factor de corrección para la reactancia agregada, lo que finalmente se traduce en una mejor estimación de la sección del circuito en falla.

Apéndice A. Variabilidad de la Reactancia de Falla Vista desde la Cabecera debido a la Resistencia de Falla

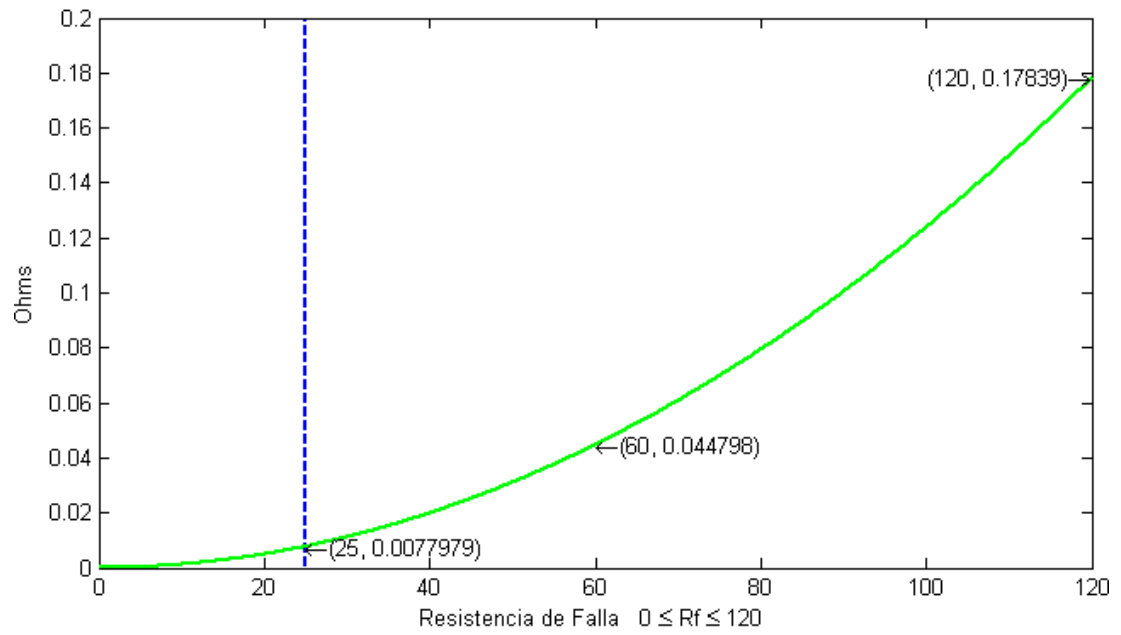


FIGURA A.5.: Reactancia aportada a la reactancia hasta el punto de falla cuando la falla es en nodos finales

## B. Manual del Usuario

### B.1. Introducción

Las herramientas aquí descritas corresponde a “software” desarrollado para la estimación y ponderación de la ubicación de fallas en sistemas de distribución radiales. Las herramientas MBM-SC1, MBM-SC2 y MME-SC<sup>1</sup> son aquí denominadas RATANDAS, SAHA y MORALES respectivamente en correspondencia con los nombres de los autores de los algoritmos y métodos básicos y fueron desarrolladas por Carlos David Ferreira S. y Sergio Andrés Martínez estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander como proyecto de pregrado.

Las herramientas RATANDAS y SAHA son algoritmos que hacen uso del conocimiento de la topología y de las medidas de tensiones y corrientes de pre-falla y falla en la cabecera del circuito, para hallar un estimado del lugar de la falla. Debido a que en estos algoritmos la múltiple estimación es muy común entre mayor sea el número de ramales en el circuito, se implementa la herramienta MORALES, con la cual se intenta determinar cuál de estas múltiples estimaciones es la que posee mayor probabilidad de ser el verdadero lugar de falla.

### B.2. Instalación y Ejecución de las Herramientas

#### B.2.1. Instalación

Para la instalación de las herramientas es necesario tener instalado la versión de Matlab 7.6 ó superior, Microsoft Office Excel 2007, y tener un espacio en disco supe-

---

<sup>1</sup>Las siglas *MBM* hacen referencia a que estos son Métodos Basados en el Modelo. La sigla *MME* hace referencia a que este es un Metodología que pretende eliminar la Múltiple Estimación. Las siglas finales *SC* hacen referencia a los autores.

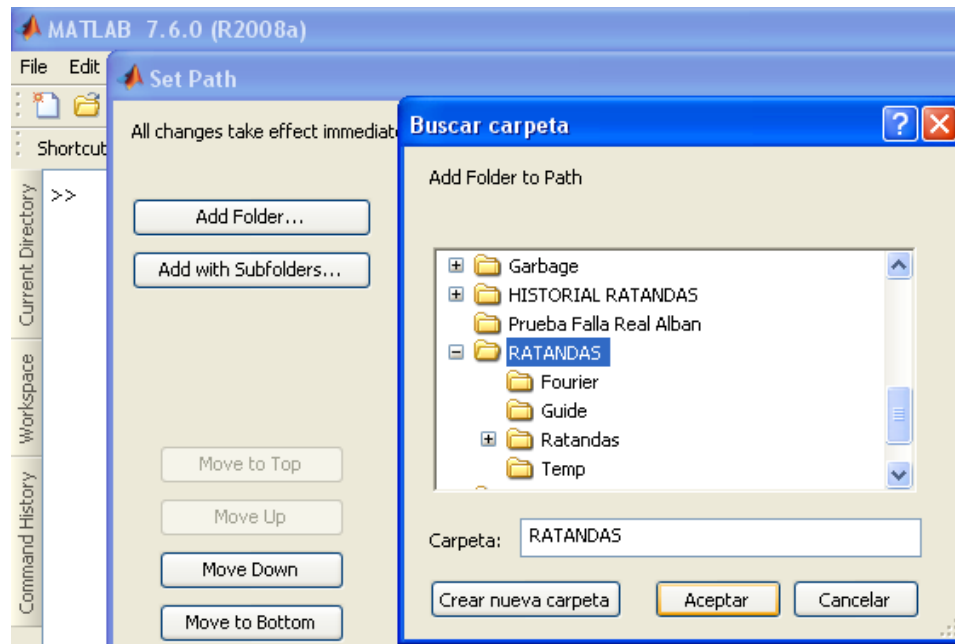


FIGURA B.1.: Instalación del directorio de la herramienta (RATANDAS).

rior a 15 MB.

Para instalar las herramientas en cualquier PC que cumple con los requerimientos anteriormente especificados, se copia la carpeta con el nombre de la herramienta a instalar que se encuentra en el CD instalador, luego se dirige al menú «file» de Matlab y elige la opción «Set Path», allí se oprime la opción «Add with Subfolders», en el directorio que se abre, se escoge la carpeta de la herramienta como se muestra en la figura B.1, luego de esto se oprime la opción «Save» seguido de «Close», de esta forma ha sido instalada la herramienta. En la carpeta se encuentran todas las funciones, figuras, imágenes y hojas de cálculo necesarias. Si por alguna circunstancia se producen errores por la inexistencia de un archivo o carpeta, se recomienda volver a copiar al disco toda la carpeta de la herramienta y repetir los pasos anteriores.

Para evitar posibles errores en la instalación de las herramientas, se debe tener en cuenta que cuando éstas son descargadas al disco duro del PC, no deben ser puestas dentro de carpetas con nombres similares al de la herramienta.

## B.2.2. Ejecución

Para la ejecución de las herramientas se deben seguir dos sencillos pasos:

1. Se ejecuta Matlab 7.6 ó superior.
2. Se digita en minúscula y sin espacios en la ventana de ejecución de Matlab el nombre de la herramienta a usar, comando que permite llamar y poner en ejecución aquella herramienta solicitada. La ejecución de la herramienta cambia automáticamente el directorio «Current Directory» por la dirección donde se encuentra la carpeta de la herramienta, como se muestra en la figura B.2.

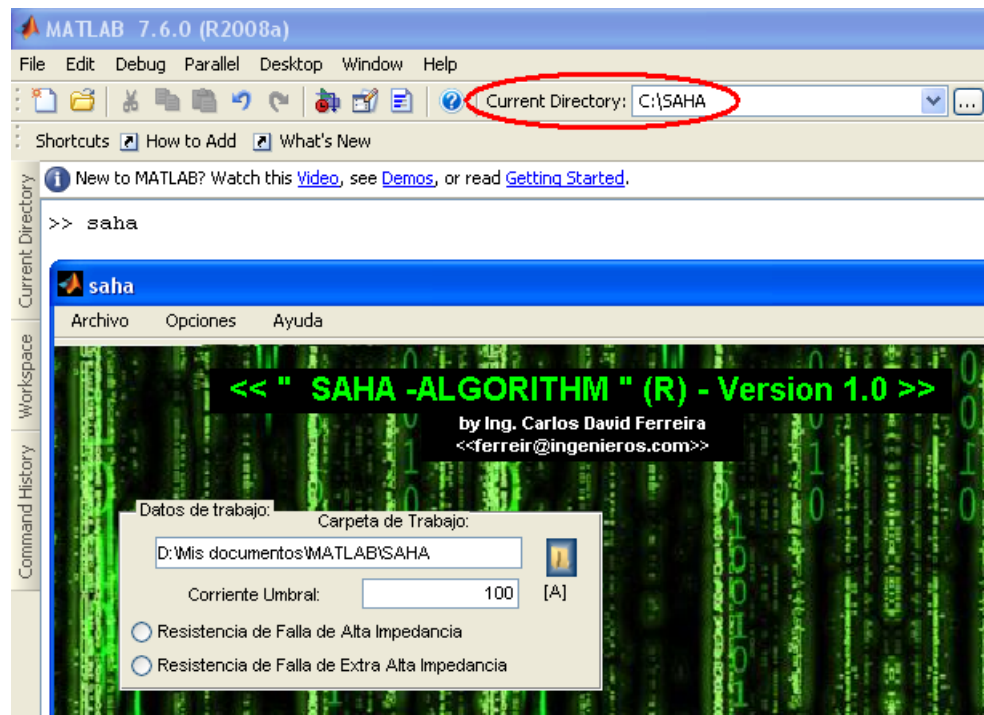


FIGURA B.2.: Cambio del directorio en Matlab a la herramienta a usar (SAHA)

## B.3. Herramienta MBM-SC1 (RATANDAS)

### B.3.1. Ventana Principal

Al ejecutarla llamándola desde el “prompt”, aparecerá en pantalla la ventana principal de la misma como se muestra en la figura B.3. La interfaz permitirá al usuario ingresar fácilmente datos de topología del circuito y datos de las medidas en la cabecera, con el fin de obtener la posible ubicación de la falla en su sistema.

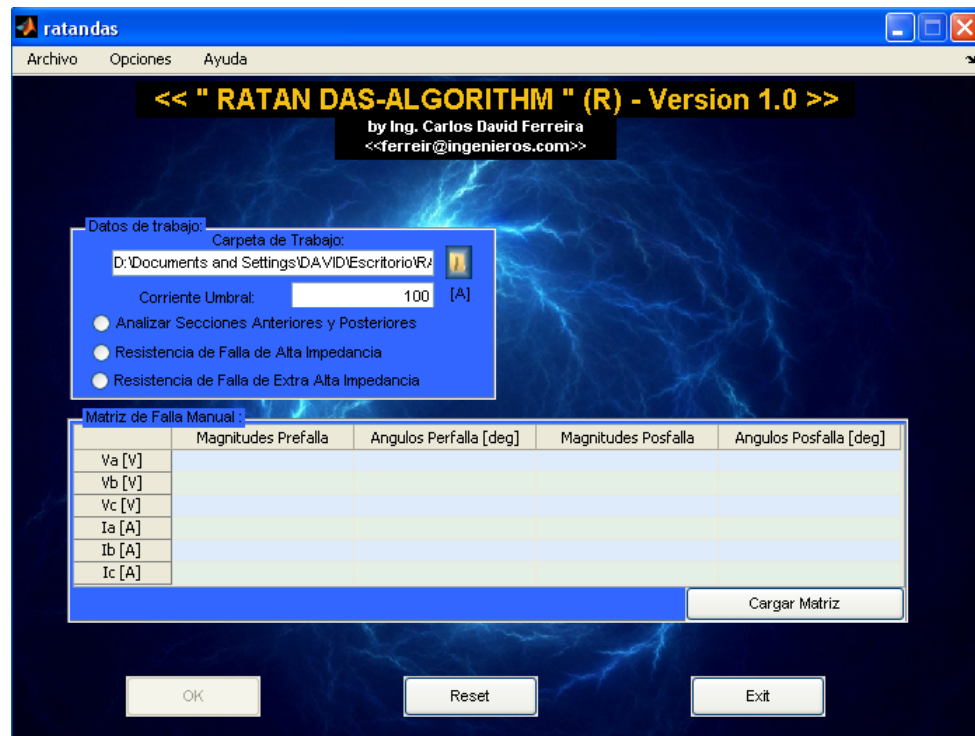


FIGURA B.3.: Ventana principal de la herramienta (RATANDAS)

### B.3.2. Barra de Menú

La barra de menú figura B.4 es aquella que aparece en la parte superior izquierda de la ventana principal y muestra diferentes opciones para el uso de la herramienta: archivo, opciones y ayuda.



FIGURA B.4.: Barra de menú de la herramienta.

### B.3.2.1. Archivo

El menú archivo está compuesto por las opciones que permiten abrir o cargar hojas de cálculo de la herramienta, tales como:

- *Abrir archivo de topología*: esta opción permite ver la hoja de cálculo donde está contenida la información de la topología con la que se va a trabajar la herramienta.
- *Abrir archivo de fallas*: esta opción permite ver la hoja de cálculo donde está contenida la información registrada de tensiones y corrientes de fallas del sistema.
- *Abrir archivo de resultados*: esta opción permite ver la hoja de cálculo donde se presentan los resultados del análisis de la herramienta.
- *Cargar archivo de topología*: esta opción permite a la herramienta obtener la topología del circuito con la que va a trabajar.
- *Cargar archivo de fallas*: esta opción permite a la herramienta obtener los valores de fallas registradas y realizar un análisis de cada una.
- *Cargar matriz de falla desde el prompt*: envía directamente al “prompt” de Matlab para que en este se puedan digitar los valores de la medición.

### B.3.2.2. Opciones

Este menú ofrece la opción de considerar el efecto impedancia, el cual es una experimentación para la mejora del método de la reactancia basado en el estudio que se realiza en el anexo de este trabajo. Tal como se presenta en la figura B.5, esta opción permite aplicar un factor para intentar corregir la reactancia vista desde la cabecera en los casos de falla con alta impedancia. En el momento de correr un análisis de falla se puede escoger el tipo de impedancia de falla en los datos de trabajo de la interfaz principal.

### B.3.2.3. Ayuda

Este menú contiene el acceso al manual del usuario así como información de la herramienta.



FIGURA B.5.: Cuadro del efecto impedancia (RATANDAS)

### B.3.3. Carga de la Topología del Sistema

La herramienta hace uso de una hoja de cálculo con tres pestañas llamadas *secciones*, *cargas* y *nodosfinales*, esto con el fin de ordenar y separar los datos de la topología del sistema que va a ser cargado. Es necesario conocer los datos acerca de las líneas en secuencia entre cada nodo y las cargas que se encuentran conectadas al sistema.

A continuación se presentan las principales características del archivo:

#### B.3.3.1. Pestaña para los Datos de las Secciones

Es la hoja donde se ingresan los datos de las líneas entre nodos, el orden en que se registren las secciones no tiene ninguna importancia. En la figura B.6 se observa un recorte de ésta, sus datos se ingresan así:

- *Nodo inicial x*: es la columna donde se ingresa el nodo más cerca al nodo de cabecera<sup>2</sup> de la sección a registrar.
- *Nodo final x + 1*: es la columna donde se ingresa el otro nodo de la sección registrada (el circuito debe ser numerado antes de entrar a la herramienta).
- *Longitud de la sección*: es la columna donde se ingresa la longitud en kilómetros de la sección.

<sup>2</sup>El nodo de la cabecera es aquel en que se toman las medidas de tensión y corriente, y debe ser denominado con el número 1.

<b>IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS DE SECUENCIA DEL CIRCUITO</b>										
Nodo Inicial "x"	Nodo Final "x+1"	Longitud de la Sección en [Km]	Impedancia Serie de la Sección en [Ohms/Km]				Admitancia Paralela de la Sección en [Mhos/Km]		Tipo de Sección [Automático]	Selección del Tipo de Sección
			Secuencia Positiva y Negativa		Secuencia Cero		Secuencia Positiva y Negativa	Secuencia Cero		
			Real	Imaginario	Real	Imaginario	Imaginario	Imaginario		
1	2	2,414	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040	3,740E-06	2,490E-06	1	Trifásico
2	3	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040	3,740E-06	2,490E-06	1	Trifásico
3	4	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040	3,740E-06	2,490E-06	1	Trifásico
4	5	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040	3,740E-06	2,490E-06	1	Trifásico
5	6	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040	3,740E-06	2,490E-06	1	Trifásico

FIGURA B.6.: Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de *secciones*

- *Impedancia serie de la sección*: son las columnas donde se ingresan los valores de las impedancias serie en  $[\Omega/km]$  de secuencia positiva, negativa y cero tal como se observa en la figura B.6.
- *Admitancia paralela de la sección*: son las columnas donde se ingresan los valores de las admitancias paralelas en  $[S/km]$  de secuencia positiva, negativa y cero tal como se observa en la figura B.6.
- *Selección del tipo de sección*: es la columna donde se escoge el tipo de línea a registrar, pudiendo escogerse entre trifásica, bifásica o monofásica y las fases que la componen [a,b,c]. Existen siete tipo de secciones, en el momento que es escogido el tipo de sección la columna anterior tomará un valor automáticamente (que lo representará).

### B.3.3.2. Pestaña para los Datos de las Cargas

Es la hoja donde se ingresan los datos de las cargas en los nodos, no es necesario ingresar los nodos donde no hay cargas. En la figura B.7 aparece un recorte de ésta pestaña, y sus datos se ingresan así:

- *Número del nodo*: esta es la columna donde se ingresa el número del nodo de la carga a registrar (el circuito debe ser numerado antes de entrar a la herramienta).
- *Carga conectada*: es la columna donde se ingresa la potencia de la carga a registrar en [kVA].
- *Composición de la carga*: son las columnas donde se determina el porcentaje del tipo de carga (Calefacción, iluminación y motor) de la carga a registrar como

<b>CARGAS CONECTADAS A CADA NODO</b>								
NÚMERO DE NODO	Carga conectada en [kVA]	Factor de Potencia [Automático]	Composición de la Carga en (%)			Tipo de Carga [Automático]	Selección del Tipo de Carga	Verificación porcentajes (debe ser 100%)
			Factores propios de las cargas					
			0,97	0,85	0,80			
			Calefacción	Iluminación	Motor			
1	15	0,97	99,8%	0,1%	0,1%	5	Monofásico fase A	100,0%
2	15	0,97	99,8%	0,1%	0,1%	5	Monofásico fase A	100,0%
3	0	0,00	0,0%	0,0%	0,0%			0,0%
4	0	0,00	0,0%	0,0%	0,0%			0,0%
5	0	0,00	0,0%	0,0%	0,0%			0,0%

FIGURA B.7.: Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de *cargas*

se observa en la figura B.7, los factores de potencia de cada uno de los tipos de carga pueden ser modificados por el usuario según su criterio. Luego que se determinen los porcentajes y los factores se calculará automáticamente un factor de potencia equivalente.

- *Selección del tipo de carga*: es la columna donde se escoge el tipo de carga a registrar, pudiendo escogerse entre trifásica, bifásica o monofásica y las fases que la componen [a,b,c]. Existen siete tipo de cargas, en el momento que es escogido el tipo de carga la columna anterior tomará un valor automáticamente (que lo representará).

### B.3.3.3. Pestaña para los Nodos Finales

Es la hoja donde se ingresan los nodos que se consideran finales de *circuitos caminos*<sup>3</sup>, es necesario hacer ingreso de todos los nodos finales. Un nodo final es aquel en que finaliza un ramal o el nodo en que cambia el tipo de circuito sin que exista otro camino para terminar. En la figura B.8 aparece un recorte de esta pestaña.

### B.3.3.4. Carga del Archivo de Topología

Es una subventana que posibilita cargar el archivo de topología a la herramienta, el nombre de su opción es «Carga del archivo de topología» y se encuentra ubicada en la barra de menú, en el menú archivo.

<sup>3</sup>*Circuitos caminos* son los términos usados para describir la identificación de un ramal en el cual sus laterales se consideran como cargas

<b>NODOS CONSIDERADOS FINALES DE</b>	
<b>Nodos Considerados Finales</b>	
	<b>12</b>
	<b>11</b>
	<b>16</b>
	<b>17</b>
	<b>14</b>

FIGURA B.8.: Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de *nodofinales*

Los datos que pide para realizar la carga del circuito son el número de filas llenas de cada pestaña de la hoja de cálculo y presenta la opción de imprimir los resultados de la carga en el “prompt” de Matlab, esta es opcional. Luego de esto se oprime «O.K.», si la carga es correcta se muestra un aviso como en la figura B.9, si hay algún problema en la carga del archivo el informe del error aparecerá en el “prompt”.



FIGURA B.9.: Subventana para carga del archivo de topología

### B.3.4. Carga de las Mediciones en la Cabecera

El algoritmo de RATANDAS necesita mediciones de las tensiones y corrientes en la cabecera del circuito en estado de pre-falla y falla para realizar la localización del

posible lugar de falla. Esta herramienta hace uso de tres diferentes opciones para cargar estos datos, la primera es una escritura en el “prompt” de Matlab, la segunda es la matriz manual en la interfaz de la herramienta y la tercera una hoja de cálculo.

A continuación se presentan las principales características que poseen las diferentes opciones de carga.

### B.3.4.1. Carga desde el “Prompt” de Matlab

El nombre de esta opción es «Carga de matriz de falla desde el prompt» y se encuentra ubicada en la barra de menú, en el menú archivo. Cuando se escoge esta opción dirige al usuario directamente al “prompt” mostrando un pantallazo como el que aparece en la figura B.10, en ella se muestra que la matriz debe ser escrita como dos vectores columna donde cada uno lleva los datos de pre-falla y falla en el orden mostrado.

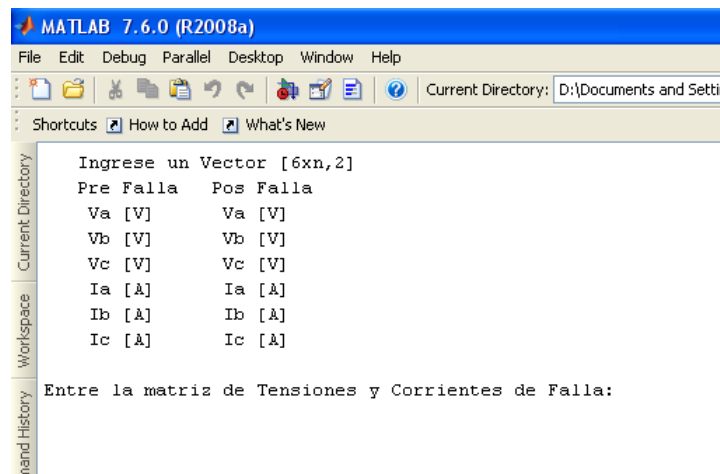


FIGURA B.10.: Carga de la matriz de falla desde el “prompt”

Debido a que muchas de las pruebas en la herramienta se hacen bajo simulación, esta herramienta posee una interfaz de comunicación entre los resultados de ATP y esta opción, para ello sólo es necesario escribir en la línea que espera la matriz, la palabra “fourier”, y dejará escoger el archivo (\*.mat), creado en ATP con la opción Pl42mat (los nodos de medida en ATP deben llamarse NF0 y NF01 como se indica en la herramienta simRF [JF06]). Como resultado de esta interfaz, se ingresarán automáticamente las tensiones y corrientes de pre-falla y pos-falla obtenidas en la

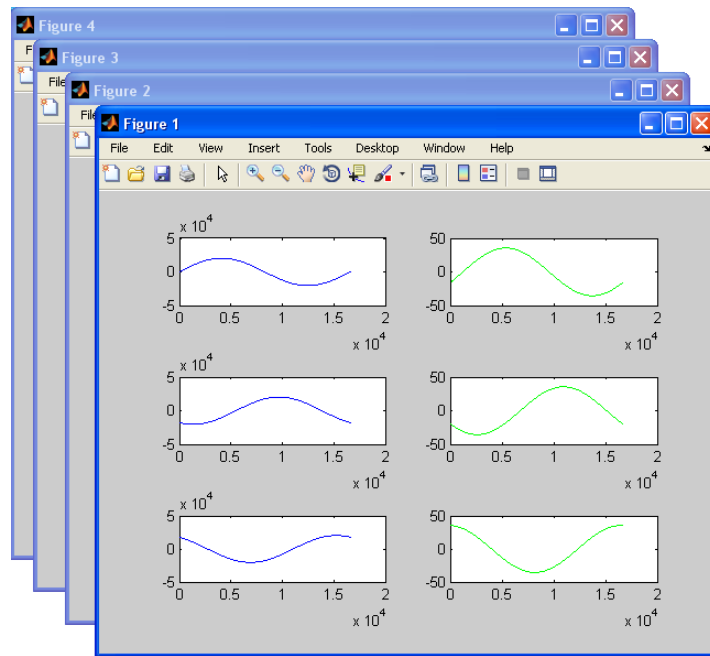


FIGURA B.11.: Resultados Interfaz comunicativa entre ATP y la herramienta (RATANDAS).

simulación, y aparecerán cuatro gráficas que permiten observar la validez de estos datos, así como se mostró en la figura B.11.

#### B.3.4.2. Carga desde la Matriz Manual

Es el recuadro con casillas en forma de hoja de cálculo que se encuentra en la parte inferior de la interfaz principal de la herramienta. Allí se indica el orden de los datos a ingresar y las unidades en que esto se debe hacer.

Cuando se hayan ingresado todos los datos, sólo se oprime el botón «Carga Matriz», esto ingresará los datos a la herramienta, y si los datos son validos se activará el botón «O.K.» de la interfaz principal como se ve el la figura B.12, esto también sucede al cargar los datos con alguna de las otras opciones.

	Magnitudes Prefalla	Angulos Prefalla [deg]	Magnitudes Posfalla	Angulos Posfalla [deg]
Va [V]	14402	-89.992	13746	90.004
Vb [V]	14403	150.01	14306	-28.782
Vc [V]	14403	30.009	14345	-149.86
Ia [A]	25.147	-117.38	452.86	28.246
Ib [A]	25.146	122.62	30.628	-67.66
Ic [A]	25.147	2.617	28.657	-162.16

FIGURA B.12.: Matriz de carga manual de la interfaz principal

### B.3.4.3. Carga desde la Hoja de Fallas

Es una hoja cálculo que se puede llamar con la opción «Abrir archivo de fallas» que se encuentra ubicada en la barra de menú, en el menú archivo. El ingreso de los datos allí es similar a la matriz manual de la interfaz. La ventaja de este archivo es que de esta forma se pueden cargar varias fallas a la vez para su análisis y que se pueden conservar para análisis posteriores.

ARCHIVO DE FALLAS PARA RATAN DAS					
		Datos Pre-Fallas		Datos Pos-Fallas	
Falla	Medida	Magnitud	Ángulo [deg]	Magnitud	Ángulo [deg]
1	Va [V]	14401	89,998	14308	-90,006
1	Vb [V]	14400	-30,015	14399	149,32
1	Vc [V]	14398	-150,01	14019	28,655
1	Ia [A]	24,876	60,385	29,691	-124,48
1	Ib [A]	26,841	-59,667	27,219	133,13
1	Ic [A]	27,326	179,59	324,35	-12,882

FIGURA B.13.: Archivo de fallas registradas para ingreso a la herramienta (RATANDAS)

Al igual que la carga del archivo de topología se realiza por medio de una subventana que aparece en la opción «Cargar archivo de fallas» que se encuentra ubicada en la barra de menú, en el menú archivo. Los datos que pide para realizar la carga del archivo son: la ubicación de archivo, el nombre de la pestaña a cargar, y el número de fallas a cargar. Luego de esto se oprime «O.K.», entonces aparecerá un aviso como en la figura B.14.



FIGURA B.14.: Subventana para carga del archivo de fallas

### B.3.5. Datos en la Interfaz Principal y Corrida de la Herramienta

Luego que la topología haya sido cargada, es el mejor momento para ingresar los datos de trabajo en la interfaz de la herramienta. Estos datos son los que permiten saber el análisis que se va hacer y el directorio donde se va ha escribir los resultados.

#### B.3.5.1. Datos de Trabajo de la Interfaz

Sus principales características son:

- *Carpeta de trabajo*: es un directorio modificable para escribir la hoja de resultados.
- *Corriente umbral*: es la magnitud de la mínima corriente en “rms” que vería la cabecera cuando existe una falla cualquiera en el circuito.
- *Analizar secciones anteriores y posteriores*: es un botón opcional, su función es hacer entrar en el análisis de distancia de falla la sección anterior y la sección posterior a la sección que se encontró en falla.
- *Botones Resistencia de Falla*: son opcionales y los dos últimos que aparecen en el panel «Datos de trabajo» como en la figura B.15, su función es activar los factores creados en el menú «Efecto de Impedancia» ubicado en la barra de

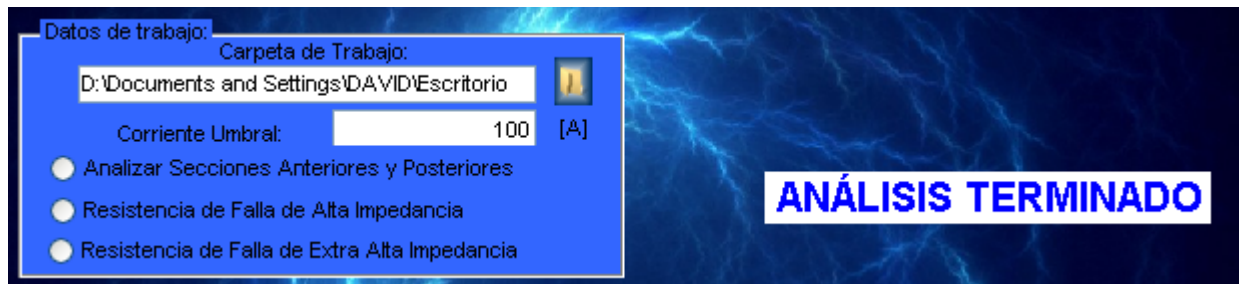


FIGURA B.15.: Aviso mostrado al finalizar el análisis de la falla

menú, en el menú Opciones. Esta es una propuesta para la mejorar la ubicación de fallas de alta impedancia.

### B.3.5.2. Corrida de la Herramienta

Luego que se han ingresado los datos en el panel de trabajo de la interfaz es el momento apropiado para ingresar los datos de la falla como se mostró en la sección B.3.4. Momentos después que los datos de la falla han sido ingresado el botón «O.K.» de la interfaz estará habilitado para hacer correr la herramienta, cuando la herramienta ha terminado el análisis de la falla aparecerá un aviso como el mostrado en la figura B.15.

### B.3.6. Hoja de Resultados

La herramienta hace uso de las hojas de cálculo de Microsoft Office Excel para imprimir los resultados del análisis como se ve la figura B.16, haciendo estos fáciles de entender, transportar, imprimir e usar nuevamente. La hoja se puede abrir directamente desde la herramienta con la opción «Abrir archivo de resultados» ubicado en la barra de menú, en el menú Archivo.

A continuación se hace explicación de las columnas de la hoja de resultados:

- *Tipo de circuito*: Es la columna que especifica las fases que componen el *circuito camino* donde se analizó la falla.
- *N° de tipo*: es el número que identifica el tipo de circuito.
- *Circuito camino*: es el número que identifica el *circuito camino* en que se analizó la falla.

<< " RATAN DAS - ALGORITHM " (R) - Version 1.0 >>												
Resultados del Análisis en Falla												
Copyright (c) 2009, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER - UIS												
by Ing. Carlos David Ferreira S.												
<<ferreir@ingenieros.com>>												
Tipo de Falla Sucedió: B-T												
Tipo de Circuito	Nº de Tipo	Circuito Camino	Sección en Falla		Longitud nodos en [km]		Método de la Reactancia		Método de Ratán Das		Nº de Iteraciones	
			Nodo "x"	Nodo "x+1"	"M-x"	"x-x+1"	Distancia "s"	Long [km]	Distancia "s"	Long [km]		
Trifásico	1	1	4	5	10,46	4,023	0,94505651	14,2619623	0,999	14,478977	2	
Trifásico	1	2	4	5	10,46	4,023	0,94505651	14,2619623	0,999	14,478977	2	
Monofásico I	6	1	4	5	10,46	4,023	0,94505651	14,2619623	0,99830949	14,4761991	2	
Monofásico I	6	2	4	5	10,46	4,023	0,94505651	14,2619623	0,99830949	14,4761991	2	
Monofásico I	6	3	4	5	10,46	4,023	0,94505651	14,2619623	0,999	14,478977	2	

FIGURA B.16.: Archivo de resultados de la herramienta (RATANDAS)

- *Sección falla*: especifica los nodos entre los cuales se halló la falla.
- *Longitud nodos*: especifica las distancias que existen entre la cabecera del circuito y las secciones en falla, y la longitud de las secciones en [km].
- *Método de la reactancia*: identifica la distancia en por unidad donde encontró la falla dentro de la sección y la distancia en [km] a la que se encuentra de la cabecera del circuito, todo esto bajo el método de la reactancia.
- *Método de ratan das*: identifica la distancia en por unidad donde encontró la falla dentro de la sección y la distancia en [km] a la que se encuentra de la cabecera del circuito, todo esto haciendo el recálculo que propone el algoritmo original de Ratan Das.

## B.4. Herramienta MBM-SC2 (SAHA)

### B.4.1. Ventana Principal

En el momento que se tiene instalada la herramienta y se ha ejecutado llamándola desde el “prompt”, aparecerá en pantalla la ventana principal de la misma como se muestra en la figura B.17.

Esta interfaz permite al usuario ingresar datos de topología del circuito a analizar y los datos de las medidas en la cabecera, con el fin de obtener la ubicación de la falla en su sistema.

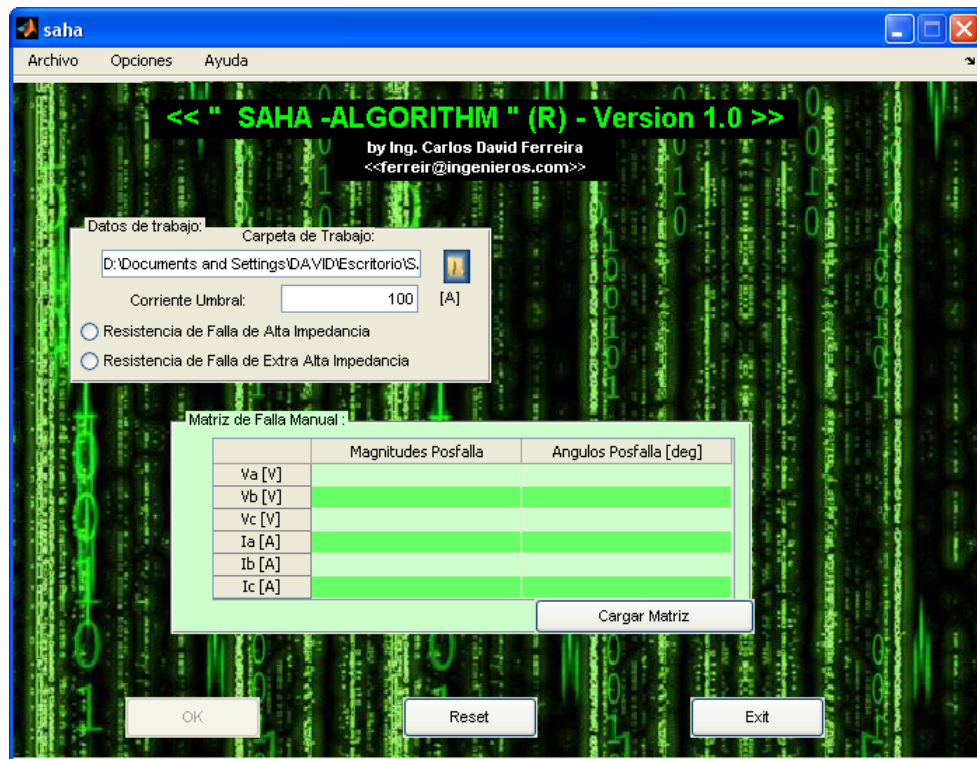


FIGURA B.17.: Ventana principal de la herramienta (SAHA)

## B.4.2. Barra de Menú

La barra de menú figura B.18 es aquella que aparece en la parte superior izquierda de la ventana principal y muestra diferentes opciones para el uso de la herramienta: archivo, opciones y ayuda.

### B.4.2.1. Archivo

El menú archivo está compuesto por las opciones que permiten abrir o cargar hojas de cálculo que pertenecen a la herramienta, tales como:

- *Abrir archivo de topología:* esta opción permite ver la hoja de cálculo donde está contenida la información de la topología con la que se va a trabajar la herramienta.
- *Abrir archivo de fallas:* esta opción permite ver la hoja de cálculo donde está contenida la información registrada de tensiones y corrientes de fallas del sistema.

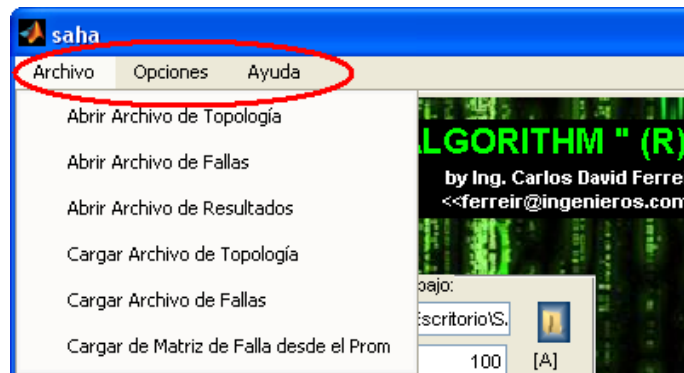


FIGURA B.18.: Barra de menú de la herramienta.

- *Abrir archivo de resultados*: esta opción permite ver la hoja de cálculo donde se presentan los resultados del análisis de la herramienta.
- *Cargar archivo de topología*: esta opción permite a la herramienta obtener la topología del circuito con la que va trabajar.
- *Cargar archivo de fallas*: esta opción permite a la herramienta obtener los valores de fallas registradas y realizar un análisis de cada una.
- *Cargar matriz de falla desde el prompt*: envía directamente al “prompt” de Matlab para que en este se puedan digitar los valores de la medición.

#### B.4.2.2. Opciones

Este menú ofrece la opción de considerar el efecto impedancia, el cual es una experimentación para la mejora del método de la reactancia basado en el estudio que se realiza en el anexo de este trabajo. Tal como se presenta en la figura B.19, esta opción permite escoger un criterio de parada para intentar considerar el efecto perjudicial en la medida de la reactancia en los casos de falla con alta impedancia. En el momento de correr un análisis de falla se puede escoger el tipo de impedancia de falla en los datos de trabajo de la interfaz principal.

#### B.4.2.3. Ayuda

Este menú contiene el acceso al manual del usuario así como información de la herramienta.



FIGURA B.19.: Cuadro del efecto impedancia (SAHA)

### B.4.3. Carga de la Topología del Sistema

La herramienta hace uso de una hoja de cálculo con tres pestañas llamadas *secciones*, *cargas* y *odosfinales*. Esto facilita ordenar y separar los datos de la topología del sistema, pero a diferencia de la herramienta RATANDAS, esta herramienta sólo trabaja con circuitos trifásicos de fases homogéneas, esto es así por el planteamiento que hace el autor al proponer el algoritmo. Es necesario conocer los datos acerca de las líneas en secuencia entre cada nodo y las cargas que se encuentran conectadas al sistema.

A continuación se presentan las principales características del archivo:

#### B.4.3.1. Pestaña para los Datos de las Secciones

Es la hoja donde se ingresan los datos de las líneas entre nodos, el orden en que se registren las secciones no tiene ninguna importancia. En la figura B.20 se observa un recorte de ésta, sus datos se ingresan así:

- *Nodo inicial x*: es la columna donde se ingresa el nodo más cerca al nodo de cabecera<sup>4</sup> de la sección a registrar.

<sup>4</sup>El nodo de la cabecera es aquel en que se toman las medidas de tensión y corriente, y debe ser denominado con el número 1.

<b>IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS DE SECUENCIA DEL CIRCUITO</b> <b>(Solo circuitos Trifásicos)</b>						
Nodo Inicial "x"	Nodo Final "x+1"	Longitud de la Sección en [Km]	Impedancia Serie de la Sección en [Ohms/Km]			
			Secuencia Positiva y Negativa		Secuencia Cero	
			Real	Imaginario	Real	Imaginario
1	2	2,414	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040
2	3	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040
3	4	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040
4	5	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040
5	6	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040

FIGURA B.20.: Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de *secciones*

- *Nodo final*  $x + 1$ : es la columna donde se ingresa el otro nodo de la sección registrada (el circuito debe ser numerado antes de entrar a la herramienta).
- *Longitud de la sección*: es la columna donde se ingresa la longitud en kilómetros de la sección registrada.
- *Impedancia serie de la sección*: son las columnas donde se ingresan los valores de las impedancias serie en  $[\Omega/km]$  de secuencia positiva, negativa y cero tal como se observa en la figura B.20.

#### B.4.3.2. Pestaña para los Datos de las Cargas

Es la hoja donde se ingresan los datos de las cargas en los nodos, no es necesario ingresar los nodos donde no hay cargas. En la figura B.21 aparece un recorte de ésta pestaña, y sus datos se ingresan así:

- *Número del nodo*: esta es la columna donde se ingresa el número del nodo de la carga a registrar (el circuito debe ser numerado antes de entrar a la herramienta).
- *Carga conectada*: es la columna donde se ingresa la potencia de la carga a registrar en  $[kVA]$ , en esta columna hay una casilla llamada Tensión nominal donde se debe definir el nivel de tensión nominal monofásica en  $[V]$  rms del circuito a cargar.
- *Composición de la carga*: son las columnas donde se determina el porcentaje del tipo de carga (Calefacción, iluminación y motor) de la carga a registrar como

<b>CARGAS CONECTADAS A CADA NODO</b> (Solo cargas Trifásicas)						
NÚMERO DE NODO	Carga conectada en [kVA]	Factor de Potencia [Automático]	Composición de la Carga en (%)			Verificación porcentajes (debe ser 100%)
	Tensión Nominal por fase [V] rms		Factores propios de las cargas			
	14434		0,97	0,85	0,80	
			Calefacción	Iluminación	Motor	
1	15	0,97	99,8%	0,1%	0,1%	100,0%
2	15	0,97	99,8%	0,1%	0,1%	100,0%
3	0	0,00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	0	0,00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	0	0,00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

FIGURA B.21.: Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de *cargas*

se observa en la figura B.21, los factores de potencia de cada uno de los tipos de carga pueden ser modificados por el usuario según su criterio. Luego que se determinen los porcentajes y los factores se calculará automáticamente un factor de potencia equivalente.

#### B.4.3.3. Pestaña para los Nodos Finales

Es la hoja donde se ingresan los nodos que se consideran finales de *circuitos caminos*, es necesario hacer ingreso de todos los nodos finales. Un nodo final es aquel en que finaliza un ramal. En la figura B.22 aparece un recorte de esta pestaña.

<b>NODOS CONSIDERADOS FINALES DE CIRCUITOS</b>
Nodos Considerados Finales
12
11
16
17
14

FIGURA B.22.: Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de *nodosfinales*

#### B.4.3.4. Carga del Archivo de Topología

Es una subventana que posibilita cargar el archivo de topología a la herramienta, el nombre de su opción es «Carga del archivo de topología» y se encuentra ubicada en la barra de menú, en el menú archivo.

Los datos que pide para realizar la carga del circuito son el número de filas llenas de cada pestaña de la hoja de cálculo y presenta la opción de imprimir los resultados de la carga en el “prompt” de Matlab, esta es opcional. Luego de esto se oprime «O.K.», si la carga es correcta se muestra un aviso como en la figura B.23, si hay algún problema en la carga del archivo el informe del error aparecerá en el “prompt”.



FIGURA B.23.: Subventana para carga del archivo de topología

#### B.4.4. Carga de las Mediciones en la Cabecera

El algoritmo de SAHA, a diferencia de RATANDAS, sólo necesita mediciones de las tensiones y corrientes en la cabecera del circuito en estado de falla para realizar la localización del posible lugar de falla. Esta herramienta hace uso de tres diferentes opciones para cargar estos datos, la primera es una escritura en el “prompt” de Matlab, la segunda es la matriz manual en la interfaz de la herramienta y la tercera una hoja de cálculo.

A continuación se presentan las principales características que poseen las diferentes opciones de carga.

#### B.4.4.1. Carga desde el “Prompt” de Matlab

El nombre de esta opción es «Carga de matriz de falla desde el prompt» y se encuentra ubicada en la barra de menú, en el menú archivo. Cuando se escoge esta opción dirige al usuario directamente al “prompt” mostrando un pantallazo como el que aparece en la figura B.24, en ella se muestra que la matriz debe ser escrita como dos vectores columna donde el primero es una columna de unos y el segundo lleva los datos de falla en el orden mostrado.

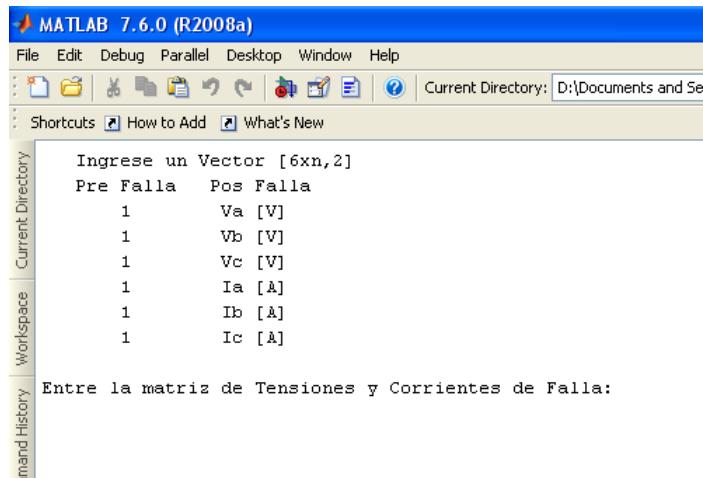


FIGURA B.24.: Carga de la matriz de falla desde el “prompt”

Debido a que muchas de las pruebas en la herramienta se hacen bajo simulación, esta herramienta posee una interfaz de comunicación entre los resultados de ATP y esta opción, para ello sólo es necesario escribir en la línea que espera la matriz, la palabra “fourier”, y dejará escoger el archivo (\*.mat), creado en ATP con la opción Pl42mat (los nodos de medida en ATP deben llamarse NF0 y NF01 como se indica en la herramienta simRF [JF06]). Como resultado de esta interfaz, se ingresarán automáticamente las tensiones y corrientes de pre-falla y pos-falla obtenidas en la simulación, y aparecerán cuatro gráficas que permiten observar la validez de estos datos, así como se mostró en la figura B.11.

#### B.4.4.2. Carga desde la Matriz Manual

Es el recuadro con casillas en forma de hoja de cálculo que se encuentra en la parte inferior de la interfaz principal de la herramienta. Allí se indica el orden de los datos

a ingresar y las unidades en que esto se debe hacer.

Cuando se hayan ingresado todos los datos, sólo se oprime el botón «Carga Matriz», esto ingresará los datos a la herramienta, y si los datos son validos se activará el botón «O.K.» de la interfaz principal como se ve el la figura B.25, esto también sucede al cargar los datos con alguna de las otras opciones .

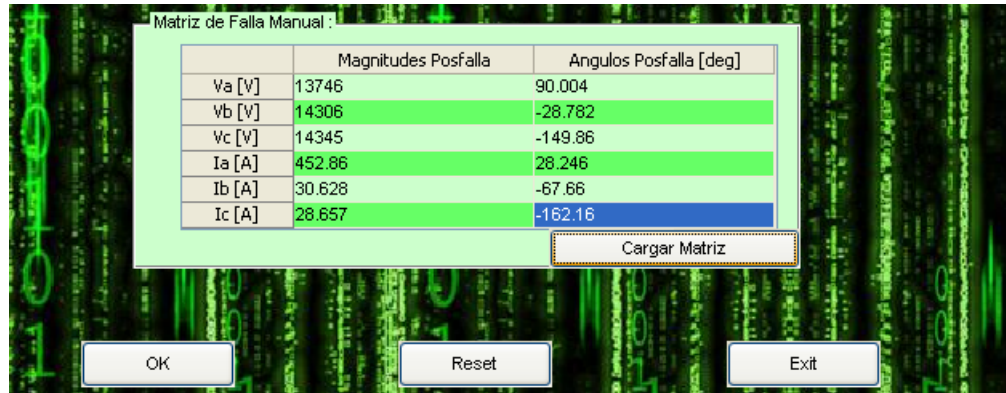


FIGURA B.25.: Matriz de carga manual de la interfaz principal

#### B.4.4.3. Carga desde la Hoja de Fallas

Es una hoja cálculo que se puede llamar con la opción «Abrir archivo de fallas» que se encuentra ubicada en la barra de menú, en el menú archivo. El ingreso de los datos allí es similar a la matriz manual de la interfaz, los datos de pre-falla no son necesarios en esta herramienta (Saha no hace uso de registros pre-falla). La ventaja de este archivo es que de esta forma se pueden cargar varias fallas a la vez para su análisis y que se pueden conservar para análisis posteriores.

ARCHIVO DE FALLAS PARA RATAN DAS					
		Datos Pre-Fallas		Datos Pos-Fallas	
Falla	Medida	Magnitud	Ángulo [deg]	Magnitud	Ángulo [deg]
1	Va [V]	1	1	14308	-90,006
1	Vb [V]	1	1	14399	149,32
1	Vc [V]	1	1	14019	28,655
1	Ia [A]	1	1	29,691	-124,48
1	Ib [A]	1	1	27,219	133,13
1	Ic [A]	1	1	324,35	-12,882

FIGURA B.26.: Archivo de fallas registradas para ingreso a la herramienta (SAHA)



FIGURA B.27.: Subventana para carga del archivo de fallas

Al igual que la carga del archivo de topología se realiza por medio de una subventana que aparece en la opción «Cargar archivo de fallas» que se encuentra ubicada en la barra de menú, en el menú archivo. Los datos que pide para realizar la carga del archivo son: la ubicación de archivo, el nombre de la pestaña a cargar, y el número de fallas a cargar. Luego de esto se oprime «O.K.», entonces aparecerá un aviso como en la figura B.27.

#### B.4.5. Datos en la Interfaz Principal y Corrida de la Herramienta

Luego que la topología haya sido cargada, es el mejor momento para ingresar los datos de trabajo en la interfaz de la herramienta. Estos datos son los que permiten saber el análisis que se va hacer y el directorio donde se va ha escribir los resultados.

##### B.4.5.1. Datos de Trabajo de la Interfaz

Sus principales características son:

- *Carpeta de trabajo*: es un directorio modificable para escribir la hoja de resultados.
- *Corriente umbral*: es la magnitud de la mínima corriente en “rms” que vería la cabecera cuando existe una falla cualquiera en el circuito.

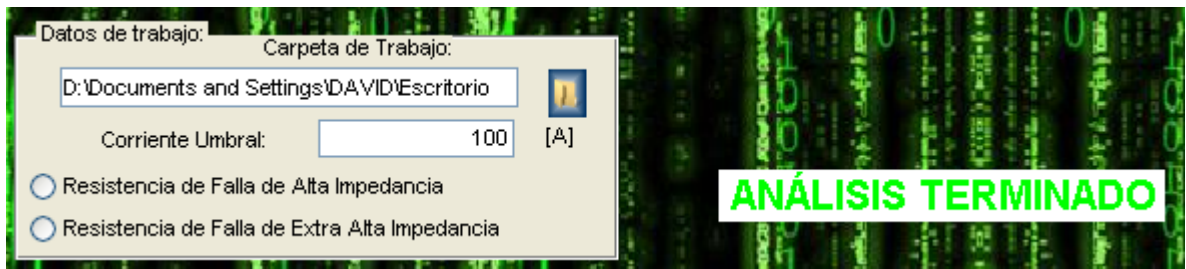


FIGURA B.28.: Aviso mostrado al finalizar el análisis de la falla

- *Botones Resistencia de Falla*: son opcionales y los dos últimos que aparecen en el panel «Datos de trabajo» como en la figura B.28, su función es activar los factores creados en el menú «Efecto de Impedancia» ubicado en la barra de menú, en el menú Opciones. Esta es una propuesta para la mejorar la ubicación de fallas de alta impedancia y esta descrito en el capítulo anterior.

#### B.4.5.2. Corrida de la Herramienta

Luego que se han ingresado los datos en el panel de trabajo de la interfaz es el momento apropiado para ingresar los datos de la falla como se mostró en la sección B.4.4. Momentos después que los datos de la falla han sido ingresado el botón «O.K.» de la interfaz estará habilitado para hacer correr la herramienta, cuando la herramienta ha terminado el análisis de la falla aparecerá un aviso como el mostrado en la figura B.28.

#### B.4.6. Hoja de Resultados

La herramienta hace uso de las hojas de cálculo de Microsoft Office Excel para imprimir los resultados del análisis como se ve la figura B.29, haciendo estos fáciles de entender, transportar, imprimir e usar nuevamente. La hoja se puede abrir directamente desde la herramienta con la opción «Abrir archivo de resultados» ubicado en la barra de menú, en el menú Archivo.

A continuación se hace explicación de las columnas de la hoja de resultados:

- *Circuito camino*: es el número que identifica el *circuito camino* en que se analizó la falla.



## B.5. Herramienta MME-SC (MORALES)

### B.5.1. Ventana Principal

En el momento que se tiene instalada la herramienta y se ha ejecutado llamándola desde el “prompt”, aparecerá en pantalla la ventana principal de la misma como se muestra en la figura B.30, la cual es una interfaz sencilla que permitirá al usuario ingresar fácilmente datos de topología del circuito a analizar, los datos de las medidas en la cabecera y los resultados tanto de RATANDAS como de SAHA, con el fin conocer cual de los posibles lugares de falla es real.

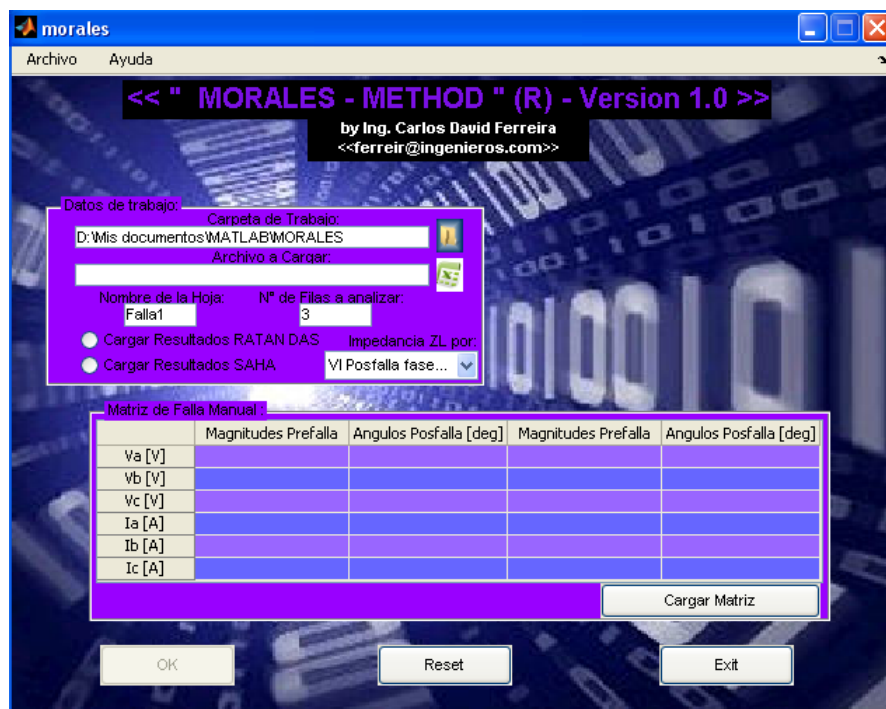


FIGURA B.30.: Ventana principal de la herramienta (MORALES)

### B.5.2. Barra de Menú

La barra de menú figura B.31 es aquella que aparece en la parte superior izquierda de la ventana principal y muestra opciones muy similares a la de las dos anteriores herramientas: archivo y ayuda.

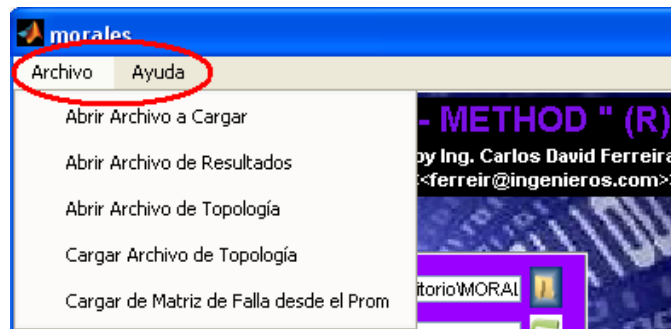


FIGURA B.31.: Barra de menú de la herramienta.

### B.5.2.1. Archivo

El menú archivo está compuesto por las opciones que permiten abrir ó cargar hojas de cálculo que pertenecen a la herramienta, tales como:

- *Abrir archivo a cargar*: esta opción permite ver la hoja de cálculo de resultados (RATANDAS o SAHA) que va ser cargada a la herramienta, esto solo se puede hacer luego de haber gestionado la dirección de este archivo en el panel de trabajo de la interfaz.
- *Abrir archivo de resultados*: esta opción permite ver la hoja de cálculo donde se presentan los resultados del análisis de la herramienta.
- *Cargar archivo de topología*: esta opción permite a la herramienta conocer la topología del circuito con la que va trabajar.
- *Cargar archivo de fallas*: esta opción permite a la herramienta obtener los valores de fallas registradas y realizar un análisis de cada una.
- *Cargar matriz de falla desde el prompt*: envía directamente al “prompt” de Matlab para que en este podamos digitar los valores de la medición tal como se indica.

### B.5.2.2. Ayuda

Este menú contiene el acceso al manual del usuario así como información de la herramienta.

<b>IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS DE SECUENCIA DEL CIRCUITO</b> <b>(Solo circuitos Trifásicos)</b>								
Nodo Inicial "x"	Nodo Final "x+1"	Longitud de la Sección en [Km]	Impedancia Serie de la Sección en [Ohms/Km]				Admitancia Paralela de la Sección en [Mhos/Km]	
			Secuencia Positiva y Negativa		Secuencia Cero		Secuencia Positiva y Negativa	Secuencia Cero
			Real	Imaginario	Real	Imaginario	Imaginario	Imaginario
1	2	2,414	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040	3,740E-06	2,490E-06
2	3	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040	3,740E-06	2,490E-06
3	4	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040	3,740E-06	2,490E-06
4	5	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040	3,740E-06	2,490E-06
5	6	4,023	0,3480	0,5166	0,5254	1,7040	3,740E-06	2,490E-06

FIGURA B.32.: Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de *secciones*

### B.5.3. Carga de la Topología del Sistema

La herramienta hace uso de una hoja de cálculo con tres pestañas llamadas *secciones*, *cargas* y *nodos finales*, esto con el fin de ordenar y separar los datos de la topología del sistema que va a ser cargado. Es necesario conocer los datos acerca de las líneas en secuencia entre cada nodo y las cargas que se encuentran conectadas al sistema.

A continuación se presentan las principales características del archivo:

#### B.5.3.1. Pestaña para los Datos de las Secciones

Es la hoja donde se ingresan los datos de las líneas entre nodos, el orden en que se registren las secciones no tiene ninguna importancia. En la figura B.32 se observa un recorte de ésta, sus datos se ingresan así:

- *Nodo inicial x*: es la columna donde se ingresa el nodo más cerca al nodo de cabecera<sup>7</sup> de la sección a registrar.
- *Nodo final x + 1*: es la columna donde se ingresa el otro nodo de la sección registrada (el circuito debe ser numerado antes de entrar a la herramienta).
- *Longitud de la sección*: es la columna donde se ingresa la longitud en kilómetros de la sección registrada.
- *Impedancia serie de la sección*: son las columnas donde se ingresan los valores de las impedancias serie en [ $\Omega/km$ ] de secuencia positiva, negativa y cero tal

<sup>7</sup>El nodo de la cabecera es aquel en que se toman las medidas de tensión y corriente, y debe ser denominado con el número 1.

<b>CARGAS CONECTADAS A CADA NODO</b>								
NÚMERO DE NODO	Carga conectada en [kVA]	Factor de Potencia [Automático]	Composición de la Carga en (%)			Tipo de Carga [Automático]	Selección del Tipo de Carga	Verificación porcentajes (debe ser 100%)
	Tensión Nominal por fase [V] rms		Factores propios de las cargas					
	14434		0,97	0,85	0,80			
			Calefacción	Iluminación	Motor			
1	15	0,97	99,8%	0,1%	0,1%	1	Trifásica	100,0%
2	15	0,97	99,8%	0,1%	0,1%	1	Trifásica	100,0%
7	15	0,97	99,8%	0,1%	0,1%	5	Monofásica A	100,0%
11	1000	0,80	0,1%	0,1%	99,8%	5	Monofásica A	100,0%
12	67,5	0,97	99,8%	0,1%	0,1%	3	Bifásica BC	100,0%

FIGURA B.33.: Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de *cargas*

como se observa en la figura B.32.

- *Admitancia paralela de la sección*: son las columnas donde se ingresan los valores de las admitancias paralelas en  $[S/km]$  de secuencia positiva, negativa y cero tal como se observa en la figura B.32.

### B.5.3.2. Pestaña para los Datos de las Cargas

Es la hoja donde se ingresan los datos de las cargas en los nodos, no es necesario ingresar los nodos donde no hay cargas. En la figura B.33 aparece un recorte de ésta pestaña, y sus datos se ingresan así:

- *Número del nodo*: esta es la columna donde se ingresa el número del nodo de la carga a registrar (el circuito debe ser numerado antes de entrar a la herramienta).
- *Carga conectada*: es la columna donde se ingresa la potencia de la carga a registrar en  $[kVA]$ , en esta columna hay una casilla llamada Tensión nominal donde se debe definir el nivel de tensión nominal monofásica en  $[V]$  rms del circuito a cargar.
- *Composición de la carga*: son las columnas donde se determina el porcentaje del tipo de carga (Calefacción, iluminación y motor) de la carga a registrar como se observa en la figura B.33, los factores de potencia de cada uno de los tipos de carga pueden ser modificados por el usuario según su criterio. Luego que se determinen los porcentajes y los factores se calculará automáticamente un factor de potencia equivalente.

<b>NODOS CONSIDERADOS FINALES DE CIRCUITOS</b>
<b>Nodos Considerados Finales</b>
<b>12</b>
<b>11</b>
<b>16</b>
<b>17</b>
<b>14</b>

FIGURA B.34.: Hoja de cálculo de la topología en la pestaña de *nodosfinales*

- *Selección del tipo de carga*: es la columna donde se escoge el tipo de carga a registrar, pudiendo escogerse entre trifásica, bifásica ó monofásica y las fases que la componen [a,b,c]. Existen siete tipo de cargas, en el momento que es escogido el tipo de carga la columna anterior tomará un valor automáticamente que lo representará.

### B.5.3.3. Pestaña para los Nodos Finales

Es la hoja donde se ingresan los nodos que se consideran finales de *circuitos caminos*, es necesario hacer ingreso de todos los nodos finales y además que estos se encuentren en igual orden con el archivo de topología herramienta de ubicación de fallas. Un nodo final es aquel en que finaliza un ramal. En la figura B.34 aparece un recorte de esta pestaña.

### B.5.3.4. Carga del Archivo de Topología

Es una subventana que posibilita cargar el archivo de topología a la herramienta, el nombre de su opción es «Carga del archivo de topología» y se encuentra ubicada en la barra de menú, en el menú archivo.

Los datos que pide para realizar la carga del circuito son el número de filas llenas de cada pestaña de la hoja de cálculo y presenta la opción de imprimir los resultados de la carga en el “prompt” de Matlab, esta es opcional. Luego de esto se oprime «O.K.», si la carga es correcta se muestra un aviso como en la figura B.35, si hay algún problema en la carga del archivo el informe del error aparecerá en el “prompt”.



FIGURA B.35.: Subventana para carga del archivo de topología

#### B.5.4. Carga de las Mediciones en la Cabecera

La metodología MORALES hace uso de las mediciones de tensiones y corrientes en la cabecera del circuito en estado de pre-falla y falla para intentar determinar cual de las múltiples estimaciones es la sección en falla. Esta herramienta hace uso de dos diferentes opciones para cargar estos datos, la primera es una escritura en el “prompt” de Matlab y la segunda es la matriz manual en la interfaz de la herramienta.

A continuación se presentan las principales características que poseen las diferentes opciones de carga.

##### B.5.4.1. Carga desde el “Prompt” de Matlab

El nombre de esta opción es «Carga de matriz de falla desde el prompt» y se encuentra ubicada en la barra de menú, en el menú archivo. Cuando se escoge esta opción dirige al usuario directamente al “prompt” mostrando un pantallazo como el que aparece en la figura B.36, en ella se muestra que la matriz debe ser escrita como dos vectores columna donde el primero es una columna de unos y el segundo lleva los datos de falla en el orden mostrado.

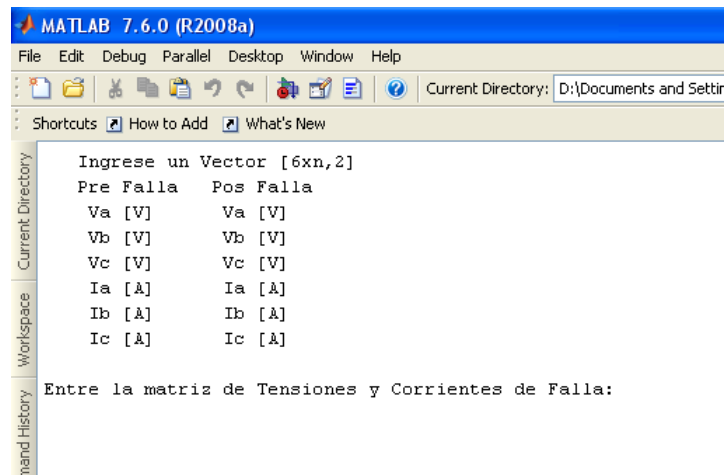


FIGURA B.36.: Carga de la matriz de falla desde el “prompt”

Debido a que muchas de las pruebas en la herramienta se hacen bajo simulación, esta herramienta posee una interfaz de comunicación entre los resultados de ATP y esta opción, para ello sólo es necesario escribir en la línea que espera la matriz, la palabra “fourier”, y dejará escoger el archivo (\*.mat), creado en ATP con la opción Pl42mat (los nodos de medida en ATP deben llamarse NF0 y NF01 como se indica en la herramienta simRF [JF06]). Como resultado de esta interfaz, se ingresarán automáticamente las tensiones y corrientes de pre-falla y pos-falla obtenidas en la simulación, y aparecerán cuatro gráficas que permiten observar la validez de estos datos, así como se mostró en la figura B.11.

#### B.5.4.2. Carga desde la Matriz Manual

Es el recuadro con casillas en forma de hoja de cálculo que se encuentra en la parte inferior de la interfaz principal de la herramienta. Allí se indica el orden de los datos a ingresar y las unidades en que esto se debe hacer.

Cuando se hayan ingresado todos los datos, sólo se oprime el botón «Carga Matriz,», esto ingresará los datos a la herramienta, y si los datos son validos se activará el botón «O.K.» de la interfaz principal como se ve el la figura B.37, esto también sucede al cargar los datos con la otra opción .

	Magnitudes Prefalla	Angulos Posfalla [deg]	Magnitudes Prefalla	Angulos Posfalla [deg]
Va [V]	14402	-89.99	13869	90.017
Vb [V]	14402	150.01	14323	-28.999
Vc [V]	14402	30.01	14354	-149.88
Ia [A]	25.279	-118.23	371.21	28.552
Ib [A]	25.279	121.77	29.1	-68.692
Ic [A]	25.279	1.77	29.018	-166.46

FIGURA B.37.: Matriz de carga manual de la interfaz principal

### B.5.5. Datos en la Interfaz Principal y Corrida de la Herramienta

Luego que la topología haya sido cargada, es el mejor momento para ingresar los datos de trabajo en la interfaz de la herramienta. Estos datos son los que permiten saber el análisis que se va hacer y el directorio donde se va ha escribir los resultados.

#### B.5.5.1. Datos de Trabajo de la Interfaz

Sus principales características son:

- *Carpeta de trabajo*: es un directorio modificable para escribir la hoja de resultados.
- *Archivo a cargar*: es la directorio donde debe ser ingresado el archivo de resultados que viene de los localizadores de falla.
- *Nombre de la hoja*: es el espacio permite ingresar el nombre de la pestaña de la hoja de resultados de donde van a ser cargados los datos.
- *Nº de filas a analizar*: en el espacio donde se ingresa el número de posibles lugares de falla que contiene el archivo de resultados a cargar.
- *Botones de tipos de archivo*: son las dos opciones que aparecen en el panel «Datos de trabajo» como en la figura B.38, su función es permitir a la herramienta conocer el localizador del cual proviene el archivo que va a ser cargado.
- *Impedancia ZL por*: es la opción desplegable del panel «Datos de trabajo», permite trabajar a la herramienta con diferentes flujos de carga para hallar las impedancias de carga en las secciones implicadas en la múltiple estimación.

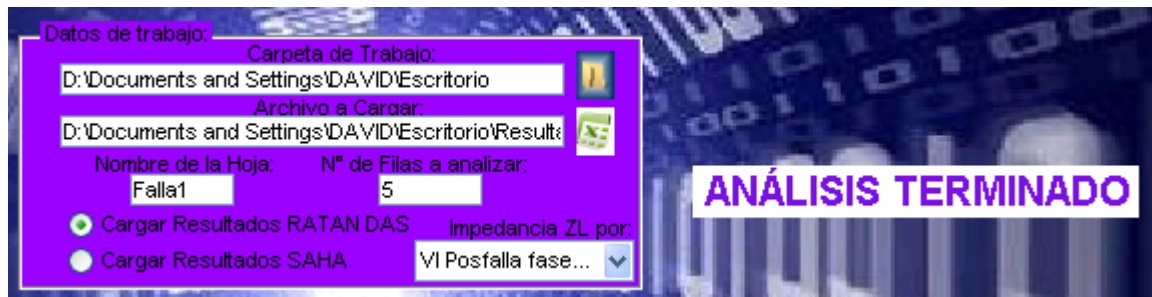


FIGURA B.38.: Aviso mostrado al finalizar el análisis de la falla

### B.5.5.2. Corrida de la Herramienta

Luego que se han ingresado los datos en el panel de trabajo de la interfaz es el momento apropiado para ingresar los datos de la falla como se mostró en la sección B.5.4. Momentos después que los datos de la falla han sido ingresado el botón «O.K.» de la interfaz estará habilitado para hacer correr la herramienta, cuando la herramienta ha terminado el análisis de la falla aparecerá un aviso como el mostrado en la figura B.38.

### B.5.6. Hoja de Resultados

La herramienta hace uso de las hojas de cálculo de Microsoft Office Excel para imprimir los resultados del análisis como se ve la figura B.39, haciendo estos fáciles de entender, transportar e imprimir, la hoja se puede abrir directamente desde la herramienta con la opción «Abrir archivo de resultados» ubicado en la barra de menú, en el menú Archivo.

A continuación se hace explicación de las columnas de la hoja de resultados:

- *Ponderación de sección*: identifica el orden de mayor a menor en la posibilidad de que esta sea la sección en falla.
- *Circuito camino*: es el número que identifica el *circuito camino* de la sección.
- *Sección falla*: especifica los nodos entre los cuales se analizó la posibilidad de falla.
- *Error  $i$  de estimación*: es el número que cuantifica el error que se comete al hallar la distancia de falla dentro de cada una de las secciones.

<< " MORALES - METHOD " (R) - Version 1.0 >>				
Resultados del Análisis de Múltiple Estimación				
Copyright (c) 2009, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER - UIS				
by Ing. Carlos David Ferreira S.				
<<ferreir@ingenieros.com>>				
Tipo de Falla Sucedió:				A-T
Ponderación	Circuito	Sección en Falla		Error < i > de
de Sección	Camino	Nodo "k"	Nodo "k+1"	Estimación
1	2	9	10	0,13357048
2	6	9	18	2,375563
3	3	13	15	3,70561145
4	5	13	14	9,26361161

FIGURA B.39.: Archivo de resultados de la herramienta