

**VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE LÍNEAS EMPLEADOS EN
LA SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA**

**SERGIO IVÁN JOYA SUÁREZ
ALEXANDER PACHECO ARTEAGA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2010

**VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE LÍNEAS EMPLEADOS EN
LA SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA**

**SERGIO IVÁN JOYA SUÁREZ
ALEXANDER PACHECO ARTEAGA**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director
Hermann Raúl Vargas Torres
Doctor Ingeniero Electricista

Codirector
Iván David Serna Suárez
Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2010

A Dios quien ha sido mi guía a lo largo de mi vida.

A mis padres Reinaldo Joya y Raquel Suárez por su amor y apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida, por la formación que me dieron y por los sacrificios que hicieron para que esto sea posible.

A mi hermano Reinaldo Joya Suárez por el apoyo incondicional que me ha brindado y que ha contribuido a este logro, que se siempre estará ahí, lo admiro.

A todos mis amigos, compañeros y en general a todas las personas que han estado acompañándome en el transcurso de mi vida y que de una u otra forma contribuyeron a que esto sea posible.

Sergio

A Dios Altísimo por sus excelsas bendiciones y su infinita misericordia sin la cual nada fuese posible.

A María Santísima amparo y sostén de mi corazón.

A mis padres Silvio Pacheco y Beatriz Arteaga y demás familiares por su sacrificio invaluable.

A Leonardo Ramón gran varón de Dios y a mis hermanos en fe por su ayuda incondicional.

A todos aquellos que directa o indirectamente hicieron esto posible.

Alexander

Agradecimientos

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

El profesor Hermann Raúl Vargas Torres por su orientación y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Iván David Serna Suárez por su excelente orientación, compromiso y constante apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

Todos y cada uno de los profesores de Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por ser los gestores de nuestra formación profesional.

Índice general

Agradecimientos	8
Índice de figuras	13
Índice de tablas	16
Glosario	26
Resumen	28
Introducción	30
1. Modelos de líneas	33
1.1. Método de Carson	33
1.1.1. Ecuaciones de Carson modificadas	35
1.1.2. Matriz de impedancia primitiva de líneas aéreas	38
1.1.3. Matriz de impedancia de fase en líneas aéreas	38
1.2. Modelo Pi	41
1.3. Modelo Clarke	42
1.4. Modelo Bergeron	44
1.5. Modelo JMarti	47
1.5.1. Explicación física del modelo	49
1.5.2. Desarrollo matemático del modelo	50
1.5.3. Síntesis de la impedancia equivalente	52
1.5.4. Función de propagación y convolución	54
1.6. Modelo Noda	55
1.6.1. Modelo en el dominio de las fases	55
1.6.2. Modelo ARMA	59

2. Descripción herramienta software y sistemas de prueba	61
2.1. Selección del software de simulación	61
2.2. Descripción del software de simulación	62
2.2.1. Modelos de líneas	63
2.2.1.1. Parámetros concentrados	63
2.2.1.2. Parámetros distribuidos constantes	66
2.2.1.3. Parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia	68
2.2.1.4. Elemento LCC del ATP	70
2.3. Descripción del circuito de prueba inicial	72
2.4. Simulación del circuito de prueba inicial	74
2.4.1. Modelo Bergeron	74
2.4.1.1. Estado estable	76
2.4.1.2. Estado de falla	76
2.4.2. Modelo Pi	77
2.4.2.1. Estado estable	78
2.4.2.2. Estado de falla	78
2.4.3. Modelo JMarti	79
2.4.3.1. Estado estable	80
2.4.3.2. Estado de falla	80
2.4.4. Modelo Clarke	81
2.4.4.1. Estado estable	81
2.4.4.2. Estado de falla	82
2.4.5. Modelo Noda	83
2.5. Selección del circuito de prueba	83
2.5.1. Circuito Albán	84
2.5.2. Circuito Meissen	88
2.6. Simulación de los circuitos de prueba	91
2.6.1. Simulación del circuito Albán y Meissen	91
3. Pruebas y análisis de resultados	93
3.1. Circuito de prueba inicial	93
3.1.1. Estado estable	94
3.1.1.1. Modelo Pi	94
3.1.2. Estado de falla	97
3.1.2.1. Modelo Pi	97

3.2. Circuito Albán	99
3.2.1. Circuito Albán Estado estable	99
3.2.1.1. Modelo Pi	99
3.2.2. Circuito Albán Estado de falla	102
3.2.2.1. Modelo Pi	102
3.2.3. Circuito Albán con las variaciones al máximo	108
3.2.3.1. Modelo Pi	109
3.3. Validación circuito Albán con datos reales	111
3.3.1. Estado estable	112
3.3.1.1. Falla monofásica en la fase C	112
3.3.1.2. Falla bifásica entre las fases A y B	113
3.3.2. Estado de falla	115
3.3.2.1. Falla monofásica en la fase C	115
3.3.2.2. Falla bifásica entre las fases A y B	116
3.3.3. Explicación errores encontrados	117
3.4. Circuito Meissen	120
3.4.1. Circuito Meissen estado estable	121
3.4.1.1. Modelo Pi	121
3.4.2. Circuito Meissen estado de falla	122
3.4.2.1. Modelo Pi	122
4. Conclusiones	127
Bibliografía	130
Anexos	132
A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán	133
A.1. Circuito de prueba inicial	133
A.1.1. Estado estable	133
A.1.1.1. Modelo Bergeron	133
A.1.1.2. Modelo JMarti	135
A.1.1.3. Modelo Clarke	137
A.1.2. Estado de falla	139
A.1.2.1. Modelo Bergeron	139

A.1.2.2. Modelo JMarti	141
A.1.2.3. Modelo Clarke	143
A.2. Circuito Albán	145
A.2.1. Estado estable	145
A.2.1.1. Modelo Bergeron	145
A.2.1.2. Modelo JMarti	147
A.2.1.3. Modelo Clarke	149
A.2.2. Estado de falla	151
A.2.2.1. Modelo Bergeron	151
A.2.2.2. Modelo JMarti	159
A.2.2.3. Modelo Clarke	167
A.2.3. Circuito Albán con las variaciones al máximo	175
A.2.3.1. Modelo Bergeron	175
A.2.3.2. Modelo JMarti	178
A.2.3.3. Modelo Clarke	180
B. Resultados simulaciones circuito Meissen	183
B.1. Circuito Meissen	183
B.1.1. Estado estable	183
B.1.1.1. Modelo Bergeron	183
B.1.1.2. Modelo JMarti	184
B.1.2. Estado de falla	185
B.1.2.1. Modelo Bergeron	185
B.1.2.2. Modelo JMarti	189

Índice de figuras

1.1. Conductores y sus imágenes	33
1.2. Segmento de línea en estrella, de cuatro hilos. Tomada de [Kersting, 2002]	38
1.3. Segmento de modelo de línea trifásica. Tomada de [Kersting, 2002]	40
1.4. Modelo de línea Pi nominal.	41
1.5. Modelo de línea Pi exacto Tomada de [Checa, 2000].	42
1.6. Modelo de línea de Bergeron sin pérdidas. Tomada de [Watson and Arrillada, 2003]	44
1.7. Equivalente de la línea con resistencias localizadas. Tomada de [Watson and Arrillada, 2003]	45
1.8. Equivalente de la mitad de la línea.	46
1.9. Modelo de línea de Bergeron con pérdidas.	47
1.10. Funciones de peso. Tomada de [Marti, 1982]	49
1.11. Interpretación física de la función de propagación $a_1(t)$	50
1.12. Funciones de propagación $a_1(t)$ y $a_2(t)$ en el modelo JMarti. Tomada de [Marti, 1982]	50
1.13. Modelo de línea de JMarti.	52
1.14. Equivalente para síntesis de Z_{eq} . Tomada de [Marti, 1982]	53
1.15. Línea multifases de parámetros distribuidos.	56
1.16. Circuito equivalente en el dominio del tiempo. Tomada de [Noda et al., 1996]	58
1.17. Circuito equivalente en el dominio del tiempo. Tomada de [Noda et al., 1996]	59
2.1. Modelo π con parámetros concentrados.	64
2.2. Modelo π con line constans (LCC).	65
2.3. Modelo R-L con acople.	65

2.4. Modelo Bergeron con líneas constans (LCC).	66
2.5. Modelo Clarke para línea transpuesta.	67
2.6. Modelo K.C Lee para línea no transpuesta.	67
2.7. Modelo JMarti con líneas constans (LCC).	68
2.8. Modelo Semlyen con líneas constans (LCC).	69
2.9. Modelo T. Noda con líneas constans (LCC).	69
2.10. Datos de parámetros de las líneas LCC.	70
2.11. Sistema de prueba IEEE 4 Node Test Feeder.	73
2.12. Configuración de las líneas.	73
2.13. Montaje del circuito de prueba inicial en ATP para análisis en estado estable.	74
2.14. Montaje del circuito de prueba inicial en ATP para análisis en estado de falla.	74
2.15. Modelo Bergeron.	75
2.16. Datos de la línea.	75
2.17. Modelo Pi.	77
2.18. Modelo JMarti.	79
2.19. Modelo Clarke.	81
2.20. Configuración de línea Triangular asimétrica 1.	84
2.21. Configuración de línea Triangular asimétrica 2.	85
2.22. Configuración de línea vertical.	85
2.23. Configuración de línea horizontal suspensión dos estructuras.	86
2.24. Configuración de línea horizontal de paso dos estructuras.	86
2.25. Configuración de línea horizontal de paso tres estructuras.	87
2.26. Circuito Albán.	88
2.27. Configuración de línea horizontal de paso.	89
2.28. Configuración de línea horizontal en suspensión.	89
2.29. Configuración de línea horizontal en bandera.	90
2.30. Circuito Meissen.	90
2.31. Montaje del circuito Albán.	91
2.32. Montaje del circuito Meissen.	92
3.1. Cambio de configuración de la línea.	95
3.2. Errores modelo Pi al variar la configuración Albán en estado estable.	100
3.3. Errores en la longitud real del conductor.	101

3.4. Errores en la magnitud de las impedancias en estado de prefalla (falla monofásica).	112
3.5. Errores en los ángulo de las impedancias en estado de prefalla (falla monofásica).	113
3.6. Errores en la magnitud de las impedancias en estado de prefalla (falla bifásica).	114
3.7. Errores en el ángulo de las impedancias en estado de prefalla (falla bifásica).	114
3.8. Errores en la magnitud de las impedancias en estado de falla (falla monofásica).	115
3.9. Errores en el ángulo de las impedancias en estado de falla (falla monofásica).	115
3.10. Errores en la magnitud de las impedancias en estado de falla (falla bifásica).	116
3.11. Errores en el ángulo de las impedancias en estado de falla (falla bifásica).	117
3.12. Comparación entre ondas de tensión sin variación de la fuente y la impedancia.	118
3.13. Comparación entre ondas de corriente sin variación de la fuente y la impedancia.	119
3.14. Comparación entre ondas de tensión con variación de la fuente y la impedancia.	119
3.15. Comparación entre ondas de corriente con variación de la fuente y la impedancia	120

Índice de Tablas

2.1. Datos del transformador.	73
2.2. Errores modelo Bergeron en el circuito inicial en estado estable.	76
2.3. Errores modelo Bergeron en el circuito inicial en estado de falla.	77
2.4. Errores modelo Pi en el circuito inicial en estado estable.	78
2.5. Errores modelo Pi en el circuito inicial en estado de falla.	78
2.6. Errores modelo JMarti en el circuito inicial en estado estable.	80
2.7. Errores en el modelo JMarti en el circuito inicial en estado de falla.	80
2.8. Errores modelo Clarke en el circuito inicial en estado estable.	82
2.9. Errores modelo Clarke en el circuito inicial en estado de falla.	82
3.1. Errores modelo Pi del circuito inicial, variando la resistividad del terreno en estado estable.	94
3.2. Errores modelo Pi del circuito inicial, variando la distancia entre conductores estado estable.	95
3.3. Errores modelo Pi del circuito inicial al variar la configuración en estado estable.	96
3.4. Errores modelo Pi del circuito inicial al variar la longitud del conductor en estado estable.	96
3.5. Errores modelo Pi del circuito inicial al variar la resistividad del terreno en estado de falla.	97
3.6. Errores modelo Pi del circuito inicial al variar la distancia entre conductores en estado de falla.	97
3.7. Errores modelo Pi circuito inicial variación de la configuración estado de falla.	98
3.8. Errores modelo Pi del circuito inicial al variar la longitud del conductor estado de falla.	98

3.9. Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno Albán en estado estable.	99
3.10. Errores modelo Pi al variar de distancia entre conductores Albán en estado estable.	100
3.11. Errores modelo Pi al variar la longitud del conductor Albán en estado estable.	101
3.12. Errores modelo Pi al variar la resistividad en falla monofásica en el circuito Albán.	102
3.13. Errores modelo Pi al variar la resistividad en falla bifásica en el circuito Albán.	103
3.14. Errores modelo Pi al variar la resistividad en falla bifásica a tierra en el circuito Albán.	103
3.15. Errores modelo Pi al variar la resistividad en falla trifásica en el circuito Albán.	103
3.16. Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla monofásica en el circuito Albán.	104
3.17. Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla bifásica en el circuito Albán.	104
3.18. Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla bifásica a tierra en el circuito Albán.	104
3.19. Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla trifásica en el circuito Albán.	105
3.20. Errores modelo Pi al variar la configuración en falla monofásica en el circuito Albán.	105
3.21. Errores modelo Pi al variar la configuración en falla bifásica en el circuito Albán.	105
3.22. Errores modelo Pi al variar la configuración en falla bifásica a tierra en el circuito Albán.	106
3.23. Errores modelo Pi al variar la configuración en falla trifásica en el circuito Albán.	106
3.24. Errores modelo Pi al variar la longitud del conductor en falla monofásica en el circuito Albán.	106
3.25. Errores modelo Pi al variar la longitud del conductor en falla bifásica en el circuito Albán.	107

3.26. Errores modelo Pi al variar la longitud del conductor en falla bifásica a tierra en el circuito Albán.	107
3.27. Errores modelo Pi al variar la longitud del conductor en falla trifásica en el circuito Albán.	107
3.28. Errores modelo Pi al variar todos los parámetros en estado estable para el circuito Albán.	109
3.29. Errores modelo Pi al variar todos los parámetros en falla monofásica para el circuito Albán.	109
3.30. Errores modelo Pi al variar todos los parámetros en falla bifásica para el circuito Albán.	110
3.31. Errores modelo Pi al variar todos los parámetros en falla bifásica a tierra para el circuito Albán.	110
3.32. Errores modelo Pi al variar todos los parámetros en falla trifásica para el circuito Albán.	111
3.33. Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno en el circuito Meissen en estado estable.	121
3.34. Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en el circuito Meissen en estado estable.	121
3.35. Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno en falla monofásica en el circuito Meissen.	122
3.36. Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno en falla bifásica en el circuito Meissen.	123
3.37. Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno en falla bifásica a tierra en el circuito Meissen.	123
3.38. Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno en falla trifásica en el circuito Meissen.	124
3.39. Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores falla monofásica en el circuito Meissen.	124
3.40. Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla bifásica en el circuito en el circuito Meissen.	125
3.41. Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores falla bifásica a tierra en el circuito Meissen.	125
3.42. Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla trifásica en el circuito Meissen.	126

A.1. Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado estable	133
A.2. Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado estable	134
A.3. Errores modelo Bergeron variación de la configuración circuito de prueba inicial estado estable	134
A.4. Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado estable	135
A.5. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado estable	135
A.6. Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado estable	136
A.7. Errores modelo JMarti variación de la configuración circuito de prueba inicial estado estable	136
A.8. Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado estable	137
A.9. Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado estable	137
A.10. Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado estable	138
A.11. Errores modelo Clarke variación de la configuración circuito de prueba inicial estado estable	138
A.12. Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado estable	139
A.13. Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado de falla	139
A.14. Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado de falla	140
A.15. Errores modelo Bergeron variación de la configuración circuito de prueba inicial estado de falla	140
A.16. Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado de falla	141
A.17. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado de falla	141

A.18.Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado de falla	142
A.19.Errores modelo JMarti variación de la configuración circuito de prueba inicial estado de falla	142
A.20.Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado de falla	143
A.21.Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado de falla	143
A.22.Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado de falla	144
A.23.Errores modelo Clarke variación de la configuración circuito de prueba inicial estado de falla	144
A.24.Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado de falla	145
A.25.Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno Albán estado estable	145
A.26.Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores Albán estado estable	146
A.27.Errores modelo Bergeron variación de la configuración Albán estado estable	146
A.28.Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor Albán estado estable	147
A.29.Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno Albán estado estable	147
A.30.Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores Albán estado estable	148
A.31.Errores modelo JMarti variación de la configuración Albán estado estable	148
A.32.Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor Albán estado estable	149
A.33.Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno Albán estado estable	149
A.34.Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores Albán estado estable	150

A.35.Errores modelo Clarke variación de la configuración Albán estado estable	150
A.36.Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor Albán estado estable	151
A.37.Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla monofásica Albán	151
A.38.Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla bifásica Albán	152
A.39.Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla bifásica a tierra Albán	152
A.40.Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla trifásica Albán	153
A.41.Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla monofásica Albán	153
A.42.Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla bifásica Albán	154
A.43.Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla bifásica a tierra Albán	154
A.44.Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla trifásica Albán	155
A.45.Errores modelo Bergeron variación de la configuración falla monofásica Albán	155
A.46.Errores modelo Bergeron variación de la configuración falla bifásica Albán	156
A.47.Errores modelo Bergeron variación de la configuración falla bifásica a tierra Albán	156
A.48.Errores modelo Bergeron variación de la configuración falla trifásica Albán	157
A.49.Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor falla monofásica Albán	157
A.50.Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor falla bifásica Albán	158
A.51.Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor falla bifásica a tierra Albán	158

A.52. Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor falla trifásica Albán	159
A.53. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla monofásica Albán	159
A.54. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla bifásica Albán	160
A.55. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla bifásica a tierra Albán	160
A.56. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla trifásica Albán	161
A.57. Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla monofásica Albán	161
A.58. Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla bifásica Albán	162
A.59. Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla bifásica a tierra Albán	162
A.60. Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla trifásica Albán	163
A.61. Errores modelo JMarti variación de la configuración falla monofásica Albán	163
A.62. Errores modelo JMarti variación de la configuración falla bifásica Albán	164
A.63. Errores modelo JMarti variación de la configuración falla bifásica a tierra Albán	164
A.64. Errores modelo JMarti variación de la configuración falla trifásica Albán	165
A.65. Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor falla monofásica Albán	165
A.66. Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor falla bifásica Albán	166
A.67. Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor falla bifásica a tierra Albán	166
A.68. Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor falla trifásica Albán	167
A.69. Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno falla monofásica Albán	167

A.70.Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno falla bifásica Albán	168
A.71.Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno falla bifásica a tierra Albán	168
A.72.Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno falla trifásica Albán	169
A.73.Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores falla monofásica Albán	169
A.74.Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores falla bifásica Albán	170
A.75.Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores falla bifásica a tierra Albán	170
A.76.Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores falla trifásica Albán	171
A.77.Errores modelo Clarke variación de la configuración falla monofásica Albán	171
A.78.Errores modelo Clarke variación de la configuración falla bifásica Albán	172
A.79.Errores modelo Clarke variación de la configuración falla bifásica a tierra Albán	172
A.80.Errores modelo Clarke variación de la configuración falla trifásica Albán	173
A.81.Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor falla monofásica Albán	173
A.82.Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor falla bifásica Albán	174
A.83.Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor falla bifásica a tierra Albán	174
A.84.Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor falla trifásica Albán	175
A.85.Errores modelo Bergeron al variar todos los parámetros en estado estable para el circuito Albán.	175
A.86.Errores modelo Bergeron al variar todos los parámetros en falla monofásica para el circuito Albán.	176
A.87.Errores modelo Bergeron al variar todos los parámetros en falla bifásica para el circuito Albán.	176

A.88. Errores modelo Bergeron al variar todos los parámetros en falla bifásica a tierra para el circuito Albán.	177
A.89. Errores modelo Bergeron al variar todos los parámetros en falla trifásica para el circuito Albán.	177
A.90. Errores modelo JMarti al variar todos los parámetros en estado estable para el circuito Albán.	178
A.91. Errores modelo JMarti al variar todos los parámetros en falla monofásica para el circuito Albán.	178
A.92. Errores modelo JMarti al variar todos los parámetros en falla bifásica para el circuito Albán.	179
A.93. Errores modelo JMarti al variar todos los parámetros en falla bifásica a tierra para el circuito Albán.	179
A.94. Errores modelo JMarti al variar todos los parámetros en falla trifásica para el circuito Albán.	180
A.95. Errores modelo Clarke al variar todos los parámetros en estado estable para el circuito Albán.	180
A.96. Errores modelo Clarke al variar todos los parámetros en falla monofásica para el circuito Albán.	181
A.97. Errores modelo Clarke al variar todos los parámetros en falla bifásica para el circuito Albán.	181
A.98. Errores modelo Clarke al variar todos los parámetros en falla bifásica a tierra para el circuito Albán.	182
A.99. Errores modelo Clarke al variar todos los parámetros en falla trifásica para el circuito Albán.	182
B.1. Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno Meissen estado estable	183
B.2. Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores Meissen estado estable	184
B.3. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno Meissen estado estable	184
B.4. Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores Meissen estado estable	185
B.5. Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla monofásica Meissen	185

B.6. Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla bifásica Meissen	186
B.7. Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla bifásica a tierra Meissen	186
B.8. Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla trifásica Meissen	187
B.9. Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla monofásica Meissen	187
B.10. Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla bifásica Meissen	188
B.11. Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla bifásica a tierra Meissen	188
B.12. Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla trifásica Meissen	189
B.13. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla monofásica Meissen	189
B.14. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla bifásica Meissen	190
B.15. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla bifásica a tierra Meissen	190
B.16. Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla trifásica Meissen	191
B.17. Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla monofásica Meissen	191
B.18. Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla bifásica Meissen	192
B.19. Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla bifásica a tierra Meissen	192
B.20. Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla trifásica Meissen	193

Glosario

\hat{z}_{ii}	Impedancia propia del conductor i en $\Omega/milla$.
\hat{z}_{ij}	Impedancia mutua entre el conductor i y el j en $\Omega/milla$.
r_i	Resistencia del conductor i en $\Omega/milla$.
ω	Frecuencia angular del sistema en radianes por segundo ($\omega = 2\pi f$).
RD_i	Radio del conductor i en pies.
G	Constante.
k_{ij}	Función de Carson para el efecto de la frecuencia y resistividad del terreno.
GMR_i	Radio Medio Geométrico del conductor i en pies.
f	Frecuencia del sistema en Hertz.
ρ	Resistividad del terreno en $\Omega - metros$.
α	Componente en las fases B y C es igual, y en la fase A es de signo opuesto y del doble que las otras.
β	Componente en las fases B y C es igual en magnitud y de signo opuesto, la componente de la fase A es cero.
0	Componente en las tres fases es igual.
v_k	Voltaje en el nodo k.
i_k	Corriente en el nodo k.
v_m	Voltaje en el nodo m.
i_m	Corriente en el nodo m.
L'	Inductancia por unidad de longitud [H/km].

C'	Capacitancia por unidad de longitud [F/km].
Z_c	Impedancia característica de la línea ($\sqrt{L'/C'}$).
τ	Tiempo de desplazamiento de la onda viajera.
ARMA	Auto Regressive Moving Average.
EMTP	Electro Magnetic Transient Program.
TNA	Transient Network Analyzer.
BPA	Boneville Power Administration.
EPRI	Electric Power Research Institute.
Neplan	Programa de simulación de flujo de carga y cortocircuito.
PSS/E	Programa de simulación de flujo de carga y cortocircuito.
Digsilent	Programa de simulación de flujo de carga y cortocircuito.
TACS	Transients Analisis Control System.
CODENSA	Empresa de energía de Bogotá.

Resumen

TÍTULO:

VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE LÍNEAS EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA¹

AUTORES:

SERGIO IVÁN JOYA SUÁREZ

ALEXANDER PACHECO ARTEAGA²

PALABRAS CLAVE:

Líneas eléctricas, resistividad del terreno, flecha, vano.

DESCRIPCIÓN:

La incertidumbre en el origen de los errores encontrados al comparar los datos obtenidos mediante simulaciones de circuitos contra datos reales, genera una preocupación acerca del correcto modelado de los elementos presentes en el circuito, es por esta razón que se hace necesario abordar el problema referente al modelado de estos elementos y cuál es su importancia en el circuito, así como su influencia en los resultados que se obtienen de las simulaciones. Los elementos del circuito para los cuáles se hace necesario un análisis de sensibilidad con el fin de atacar el problema para reducir esta incertidumbre son fuentes, cargas y líneas.

En el presente proyecto el análisis se centra en el estudio de los modelos de líneas eléctricas que están siendo empleados en las simulaciones de circuitos en sistemas de distribución, se analizaron diferentes modelos, cada uno de ellos con características diferentes, y en cada modelo se validaron parámetros importantes (resistividad del terreno, distancia entre conductores, variación de configuración y longitud real del conductor), con el fin de descubrir cuál de ellos es relevante y con esto perfeccionar el modelo y de este modo reducir la incertidumbre y mejorar los resultados obtenidos.

Después de realizar el análisis de los parámetros a cada uno de los modelos de líneas que se presentan en este proyecto, se muestran los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, en los cuáles se observa que estos modelos son insensibles a la variación de sus parámetros tanto para análisis de circuitos en estados estable como en estados de falla, demostrando que los errores en los resultados de las simulaciones al compararlos con los datos reales no se deben a los modelos de líneas empleados, por lo cuál se deben analizar en trabajos futuros los modelos empleados en los otros parámetros del circuito tales como fuentes y cargas.

¹Proyecto de Grado

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Dr. Hermann Raúl Vargas Torres. Codirector Ing. Iván David Serna Suárez.

TITLE:

VALIDATION OF THE MODELS OF LINES USED IN THE SIMULATION OF SYSTEMS OF ELECTRICAL POWER DISTRIBUTION³

AUTHORS:

SERGIO IVÁN JOYA SUÁREZ

ALEXANDER PACHECO ARTEAGA⁴

KEY WORDS:

Power lines, ground resistivity, arrow, span.

DESCRIPTION:

The uncertainty in the origin of the errors found when comparing the data obtained from circuit simulations against real data, creates a concern about the successful modeling of the elements present in the circuit, which is why it becomes necessary to address the problem concerning the modeling of these elements and what is its importance in the circuit, and its influence on the results obtained from the simulations. The elements of the circuit for what is needed is a sensitivity analysis to address the problem to reduce this uncertainty are sources, loads and lines.

In this project the analysis focuses on the study of models of power lines that are being used in simulations of circuits in distribution systems, we analyzed different models, each with different characteristics, and each model is validated important parameters (ground resistivity, distance between conductors, change configuration and real length of the conductor), in order to discover which of these is relevant and with this refine the model and thus reduce uncertainty and improve results.

After performing the analysis of the parameters to each of the line models presented in this project, shows the results obtained in different tests, which shows that these models are insensitive to changes in both parameters Analysis of circuits in steady states as in states of failure, showing that the errors in the simulation results when compared with the real data are not due to the model line used, which should be discussed in future work models used in the other circuit parameters such as sources and loads.

³Proyecto de Grado

⁴Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Dr. Hermann Raúl Vargas Torres. Codirector Ing. Iván David Serna Suárez.

Introducción

Sin lugar a duda algunos de los principales problemas que afectan la calidad de la energía eléctrica son las fallas de red y las cargas no lineales, la primera de ellas genera impacto sobre la continuidad del servicio y las cargas no lineales alteran la calidad de la forma de onda suministrada por las empresas distribuidoras de energía [Baggini, 2008].

La mayoría de estos temas relacionados con la calidad de la energía eléctrica como los mencionados anteriormente han sido trabajados por una gran cantidad de autores, obteniendo muy buenos resultados en la simulación de circuitos de distribución basados en modelos creados por la obtención de parámetros, pero surge la pregunta ¿Qué tan sensibles son estos modelos obtenidos en la simulación al ser incorporados en los sistemas reales? Actualmente se cuenta con modelos teóricos de los sistemas de distribución de energía eléctrica en los cuáles se presentan incertidumbres en la exactitud de sus resultados al ser contrastados con los modelos reales, por ello se hace necesario comparar los modelos teóricos con los modelos reales y verificar la eficiencia de los modelos utilizados.

Para corroborar la sensibilidad de los modelos teóricos empleados en la simulación de circuitos en sistemas de distribución se deben revisar los diferentes componentes del circuito como lo son las fuentes, las cargas y las líneas eléctricas. Para ello se deben revisar y validar los modelos que se están empleando en cada uno de estos componentes y de allí detectar cuál o cuáles de estos componentes están teniendo gran influencia en los circuitos para así realizar las correcciones que conlleven al mejoramiento de los modelos y con esto a la mejora en los resultados de las simulaciones cuando estas se comparan con los datos reales del circuito.

En la actualidad la representación de los circuitos en los sistemas de distribución se realiza con modelos de líneas eléctricas que son normalizados y se encuentra fácilmente en la bibliografía referente al tema, pero estos modelos no son completos al no

tener en cuenta ciertos factores tales como el perfil del terreno o los cables de guarda, surgiendo de aquí otra inquietud ¿Qué tanto afecta a la exactitud del modelo la no inclusión de parámetros como los mencionados? Es por ello que se hace necesario la validación del modelado de los sistemas de tal manera que el presente trabajo se centra en los modelos de líneas eléctricas empleados en la simulación de sistemas de distribución.

Los primeros modelos de líneas eléctricas empleados en la simulación de sistemas de distribución fueron muy simples, ya que estos solo tenían en cuenta sus parámetros básicos, como su configuración y el tipo de conductor [Checa, 2000]. Con el transcurso del tiempo y la necesidad de mejorar los resultados arrojados por estos modelos, se fueron realizando correcciones hasta llegar a un modelo más completo, incluyendo en este modelo parámetros importantes como la resistividad del terreno y los cable de guarda [Anderson, 1973]. Pero aún con este modelo más completo quedaron por fuera ciertos parámetros importantes en las líneas eléctricas como lo es el perfil del terreno, lo cual produce incertidumbre del efecto que éste parámetro genera en los resultados obtenidos en las simulaciones.

Para la validación de los modelos de líneas teóricos empleados en la simulación de circuitos en sistemas de distribución, en primera instancia se determinaron los modelos a trabajar, para esto se buscaron modelos ampliamente utilizados que en el momento del análisis presentan diferentes formas de solución para la obtención de los resultados, lo cual permitió trabajar con casos que fuesen diferentes. Después de definir cada uno de los modelos, se procedió a definir los parámetros que se consideraron relevantes en las líneas eléctricas y que fueron tomados algunos de una revisión bibliográfica de las líneas y otros que no están siendo incluidos en los modelos teóricos, pero pueden ser relevantes, tal como el perfil del terreno.

Para realizar la validación de cada uno de los modelos, se incluyeron en ellos los parámetros definidos y se realizaron variaciones de los mismos para así definir la importancia de cada uno de los parámetros en los diferentes modelos empleados en este trabajo y con ello buscar el mejoramiento de los modelos y la reducción de la incertidumbre.

En este libro se hace la descripción de los trabajos realizados para cumplir con los objetivos del presente proyecto, esa descripción se encuentra estructurada de la siguiente forma: Capítulo 1: En el primer capítulo se hace una descripción detallada de la forma y solución de cada uno de los modelos de líneas con que se trabajaron

en el presente proyecto. Capítulo 2: En el segundo capítulo se hace la descripción de la herramienta software empleada para realizar las simulación con la descripción de los circuitos que fueron empleados para realizar las pruebas de validación. Capítulo 3: En el tercer capítulo se muestran los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas a cada uno de los modelos y el análisis de estos resultados.

1. Modelos de líneas

1.1. Método de Carson

Carson en su documento de 1926 desarrolló una técnica mediante la cual se puede determinar la impedancia propia y mutua para un número arbitrario de conductores aéreos incluyendo en estas impedancias el efecto de la resistividad del terreno, así como de los cables de guarda presentes en la línea. En un principio, la técnica no fue bien recibida, debido a los cálculos tediosos que tenían que hacerse a mano y sobre la regla de cálculo. Con la llegada de la computadora digital, las ecuaciones de Carson han sido ampliamente utilizadas. En su documento, Carson supone que la tierra es infinita, uniforme, sólida con superficie superior plana uniforme y una resistencia constante.

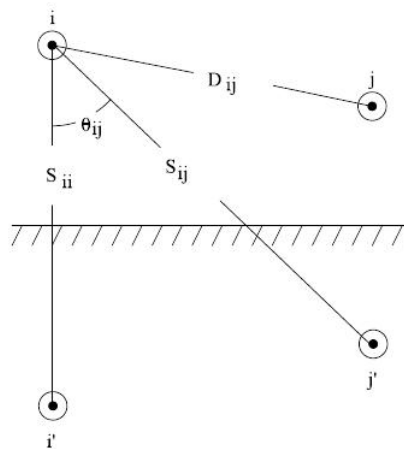


FIGURA 1.1.: Conductores y sus imágenes

Carson hizo uso del método de imágenes del conductor, es decir, cada conductor en un momento dado a una distancia sobre el suelo tiene un conductor imagen a

la misma distancia bajo este suelo como se muestra en la figura 1.1. Con ayuda de este método, Carson desarrolló las ecuaciones que se muestran a continuación para el cálculo de las impedancias mutuas y propias de los conductores.

Impedancias del conductor:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 4\omega P_{ii}G + j \left(X_i + 2\omega G \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4\omega Q_{ii}G \right) [\Omega/milla] \quad (1.1)$$

$$\hat{z}_{ij} = 4\omega P_{ij}G + j \left(2\omega G \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 4\omega Q_{ij}G \right) [\Omega/milla] \quad (1.2)$$

Donde:

- \hat{z}_{ii} Impedancia propia del conductor i en $\Omega/milla$.
- \hat{z}_{ij} Impedancia mutua entre el conductor i y el j en $\Omega/milla$.
- r_i Resistencia del conductor i en $\Omega/milla$.
- ω Frecuencia angular del sistema en radianes por segundo ($\omega = 2\pi f$).
- RD_i Radio del conductor i en pies.
- D_{ij} Distancia entre el conductor i y j en pies (ver figura 1.1).
- S_{ij} Distancia entre el conductor i y la imagen j en pies (ver figura 1.1).

Donde a su vez:

$$X_i = 2\omega G \ln \frac{RD_i}{GMR_i} [\Omega/milla] \quad (1.3)$$

$$P_{ij} = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} k_{ij} \cos(\theta_{ij}) + \frac{k_{ij}^2}{16} \cos(2\theta_{ij}) \cdot \left(0,6728 + \ln \frac{2}{k_{ij}} \right) \quad (1.4)$$

$$Q_{ij} = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k_{ij}} + \frac{1}{3\sqrt{2}} k_{ij} \cos(2\theta_{ij}) \cdot \quad (1.5)$$

$$k_{ij} = 8,565 * 10^{-4} \cdot S_{ij} \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (1.6)$$

Donde:

G	Constante. ($G = 0,1609344 * 10^{-3} [\Omega/milla]$)
X_i	Reactancia del conductor i en $\Omega/milla$.
P_{ij}	Diferencia de potencial entre los conductores i y j .
Q_{ij}	Carga entre los conductores i y j .
k_{ij}	Función de Carson para el efecto de la frecuencia y resistividad del terreno.
GMR_i	Radio Medio Geométrico del conductor i en pies.
f	Frecuencia del sistema en Hertz.
ρ	Resistividad del terreno en $\Omega - metros$.
θ_{ij}	Ángulo entre las líneas trazadas desde el conductor i y su propia imagen y la imagen al conductor j (ver figura 1.1).

1.1.1. Ecuaciones de Carson modificadas

Sólo dos aproximaciones se realizan en la obtención de las ecuaciones de Carson modificadas. Estas aproximaciones implican los términos asociados con P_{ij} y Q_{ij} ; donde se utiliza sólo el primer término de la variable P_{ij} y los dos primeros términos de Q_{ij} [Kersting, 2002], [Anderson, 1973].

$$P_{ij} = \frac{\pi}{8} \quad (1.7)$$

$$Q_{ij} = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k_{ij}} \quad (1.8)$$

Sustituyendo X_i de la ecuación (1.3) en la ecuación (1.1) se tiene:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 4\omega P_{ii}G + j \left(2\omega G \ln \frac{RD_i}{GMR_i} + 2\omega G \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4\omega Q_{ii}G \right) \quad (1.9)$$

Combinando términos y simplificando se obtiene:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 4\omega P_{ii}G + j2\omega G \left(\ln \frac{S_{ii}}{GMR_i} + 2Q_{ii} \right) \quad (1.10)$$

Por su parte, simplificando la ecuación (1.2)

$$\hat{z}_{ij} = 4\omega P_{ij}G + j2\omega G \left(\ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 2Q_{ij} \right) \quad (1.11)$$

Sustituyendo la expresión de P y para $\omega = 2\pi f$ se tiene:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + \pi^2 f G + j4\pi f G \left(\ln \frac{S_{ii}}{GMR_i} + 2Q_{ii} \right) \quad (1.12)$$

$$\hat{z}_{ij} = \pi^2 f G + j4\pi f G \left(\ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 2Q_{ij} \right) \quad (1.13)$$

Por otro lado, sustituyendo la ecuación de k_{ij} (ecuación (1.6)) en la ecuación aproximada de Q_{ij} , (ecuación (1.8))

$$Q_{ij} = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{8,565 * 10^{-4} S_{ij} \sqrt{\frac{f}{\rho}}} \quad (1.14)$$

Al expandir se tiene:

$$Q_{ij} = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{8,565 * 10^{-4}} + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{S_{ij}} + \frac{1}{2} \ln \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (1.15)$$

Reduciendo la anterior ecuación se tiene:

$$Q_{ij} = 3,8393 - \frac{1}{2} \ln S_{ij} + \frac{1}{4} \ln \frac{\rho}{f} \quad (1.16)$$

ó

$$2Q_{ij} = 7,6786 - \ln S_{ij} + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \quad (1.17)$$

Sustituyendo la ecuación (1.17) en la ecuación (1.12) y simplificando:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + \pi^2 f G + j4\pi f G \left(\ln \frac{S_{ii}}{GMR_i} + 7,6786 - \ln S_{ii} + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (1.18)$$

$$\hat{z}_{ii} = r_i + \pi^2 f G + j4\pi f G \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7,6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (1.19)$$

Sustituyendo la ecuación (1.17) en la ecuación (1.13) y simplificando:

$$\hat{z}_{ij} = \pi^2 f G + j4\pi f G \left(\ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 7,6786 - \ln S_{ij} + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (1.20)$$

$$\hat{z}_{ij} = \pi^2 f G + j4\pi f G \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7,6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (1.21)$$

Teniendo en cuenta los valores de las constantes G y π se llega entonces a que:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0,00158836f + j0,00202237f \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7,6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (1.22)$$

$$\hat{z}_{ij} = 0,00158836.f + j0,00202237.f \left(\ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 7,6786 - \ln S_{ij} + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (1.23)$$

Asumiendo que la frecuencia es de 60 Hz y que la resistividad del terreno es de 100 Ωm , las ecuaciones modificadas de Carson son:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0,09530 + j0,12134 \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7,6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (1.24)$$

$$\hat{z}_{ij} = 0,09530 + j0,12134 \left(\ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 7,6786 - \ln S_{ij} + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (1.25)$$

1.1.2. Matriz de impedancia primitiva de líneas aéreas

Las ecuaciones (1.24) y (1.25) se utilizan para calcular los elementos de la matriz de impedancia primitiva de $n \times n$ conductores.

$$[\hat{z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} \hat{z}_{aa} & \hat{z}_{ab} & \hat{z}_{ac} & | & \hat{z}_{an1} & \hat{z}_{an2} & \cdots & \hat{z}_{annm} \\ \hat{z}_{ba} & \hat{z}_{bb} & \hat{z}_{bc} & | & \hat{z}_{bn1} & \hat{z}_{bn2} & \cdots & \hat{z}_{bnnm} \\ \hat{z}_{ca} & \hat{z}_{cb} & \hat{z}_{cc} & | & \hat{z}_{cn1} & \hat{z}_{cn2} & \cdots & \hat{z}_{cnnm} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & | & \text{---} & \text{---} & & \text{---} \\ \hat{z}_{n1a} & \hat{z}_{n1b} & \hat{z}_{n1c} & | & \hat{z}_{n1n1} & \hat{z}_{n1n2} & \cdots & \hat{z}_{n1nm} \\ \hat{z}_{n2a} & \hat{z}_{n2b} & \hat{z}_{n2c} & | & \hat{z}_{n2n1} & \hat{z}_{n2n2} & \cdots & \hat{z}_{n2nm} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{z}_{nma} & \hat{z}_{nmb} & \hat{z}_{nmc} & | & \hat{z}_{nmn1} & \hat{z}_{nmn2} & \cdots & \hat{z}_{nmnm} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

En forma resumida la ecuación (1.26) se transforma en:

$$[\hat{z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [\hat{z}_{ij}] & [\hat{z}_{in}] \\ [\hat{z}_{nj}] & [\hat{z}_{nn}] \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

1.1.3. Matriz de impedancia de fase en líneas aéreas

En la mayoría de las aplicaciones, la matriz de impedancia primitiva debe reducirse a una matriz de fase de 3×3 , que consiste en las impedancias propias y mutuas equivalentes para las tres fases.

Uno de los métodos estándar de reducción, es la reducción de Kron. Se supone una línea con neutro múltiple a tierra, como se muestra en la figura 1.2.

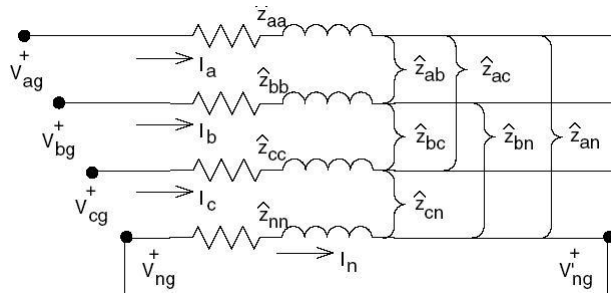


FIGURA 1.2.: Segmento de línea en estrella, de cuatro hilos. Tomada de [Kersting, 2002]

Aplicando las leyes de Kirchoff al circuito se obtiene:

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \\ V'_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \widehat{z}_{aa} & \widehat{z}_{ab} & \widehat{z}_{ac} & \widehat{z}_{an} \\ \widehat{z}_{ba} & \widehat{z}_{bb} & \widehat{z}_{bc} & \widehat{z}_{bn} \\ \widehat{z}_{ca} & \widehat{z}_{cb} & \widehat{z}_{cc} & \widehat{z}_{cn} \\ \widehat{z}_{na} & \widehat{z}_{nb} & \widehat{z}_{nc} & \widehat{z}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

En forma simple la ecuación (1.28) quedaría:

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}] \\ [V_{ng}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V'_{abc}] \\ [V'_{ng}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \widehat{z}_{ij} & \widehat{z}_{in} \\ \widehat{z}_{nj} & \widehat{z}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{abc}] \\ [I_n] \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Debido al neutro a tierra, las tensiones V_{ng} y V'_{ng} son iguales a cero. Sustituyendo estos valores en la ecuación(1.29) y expandiendo los resultados se tiene:

$$[V_{abc}] = [V'_{abc}] + [\widehat{z}_{ij}] \cdot [I_{abc}] + [\widehat{z}_{in}] \cdot [I_n] \quad (1.30)$$

$$[0] = [0] + [\widehat{z}_{nj}] \cdot [I_{abc}] + [\widehat{z}_{nn}] \cdot [I_n] \quad (1.31)$$

Al resolver la ecuación (1.31) para $[I_n]$:

$$[I_n] = -[\widehat{z}_{nn}]^{-1} \cdot [\widehat{z}_{nj}] \cdot [I_{abc}] \quad (1.32)$$

Sustituyendo la ecuación (1.32) en la ecuación (1.30):

$$[V_{abc}] = [V'_{abc}] + ([\widehat{z}_{ij}] - [\widehat{z}_{in}] \cdot [\widehat{z}_{nn}]^{-1} \cdot [\widehat{z}_{nj}]) \cdot [I_{abc}] \quad (1.33)$$

$$[V_{abc}] = [V'_{abc}] + [z_{abc}] [I_{abc}] \quad (1.34)$$

Donde:

$$[z_{abc}] = [\widehat{z}_{ij}] - [\widehat{z}_{in}] \cdot [\widehat{z}_{nn}]^{-1} \cdot [\widehat{z}_{nj}] \quad (1.35)$$

La ecuación (1.35) es la forma final de la técnica de la reducción de Kron. Por tanto la matriz de impedancia de fase se convierte en:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} [\Omega/milla] \quad (1.36)$$

El modelo que representa esta matriz se muestra en la figura 1.3.

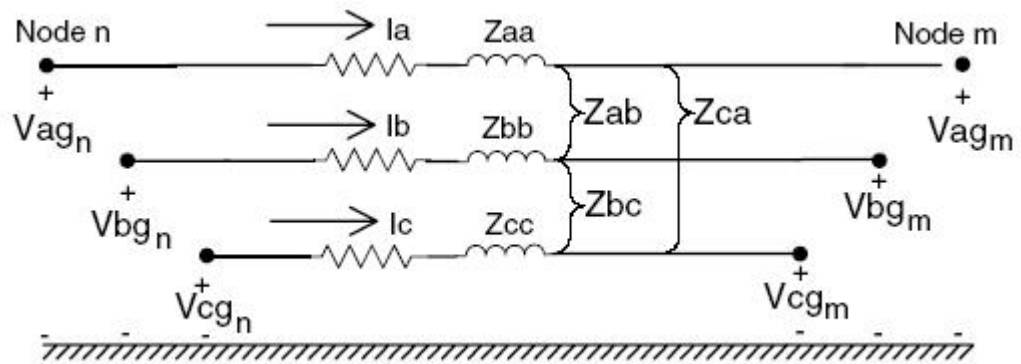


FIGURA 1.3.: Segmento de modelo de línea trifásica. Tomada de [Kersting, 2002]

Del modelo mostrado en la figura 1.3 se pueden deducir las siguientes relaciones de tensión y corriente:

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.37)$$

La Ecuación (1.37) se puede escribir en forma resumida como:

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [\hat{z}_{abc}][I_{abc}] \quad (1.38)$$

1.2. Modelo Pi

Este modelo es el mas empleado para representar líneas hoy día en el análisis de sistemas de distribución, consta de dos modelos:

El primero de ellos es un modelo de línea de parámetros concentrados llamado también modelo Pi nominal, el cuál se emplea con muy buenos resultados para líneas de longitud media. Este modelo como se muestra en la figura 1.2, consta de una impedancia Z concentrada en el punto medio de la línea y una admitancia Y dividida en dos partes iguales en cada extremo de la misma [Checa, 2000].

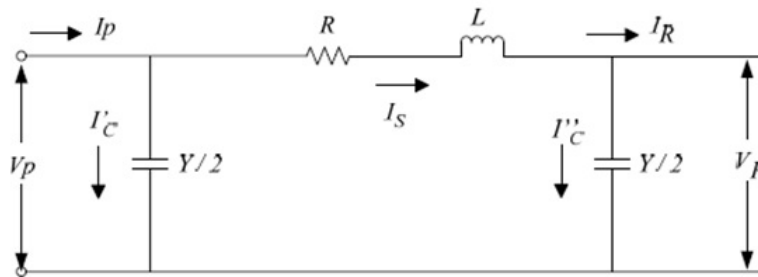


FIGURA 1.4.: Modelo de línea Pi nominal.

Donde:

V_p Voltaje en el extremo transmisor.

V_r Voltaje en el extremo receptor.

I_p Corriente en el extremo transmisor.

I_r Corriente en el extremo receptor.

I'_c Corriente en el ramal del extremo transmisor.

I''_c Corriente en el ramal del extremo receptor.

Del modelo mostrado se obtiene las siguientes relaciones en tensión:

$$V_S = (V_R \frac{Y}{2} + I_R)Z + V_R \quad (1.39)$$

$$V_S = (\frac{ZY}{2} + 1)V_R + ZI_R \quad (1.40)$$

Y para la corriente:

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (1.41)$$

El segundo modelo es el modelo Pi de parámetros distribuidos, también llamado modelo Pi exacto, este modelo se emplea para líneas de longitud largas ya que con el modelo Pi nominal no se logran obtener buenos resultados en este caso. El modelo Pi exacto se muestra en la figura 1.5.

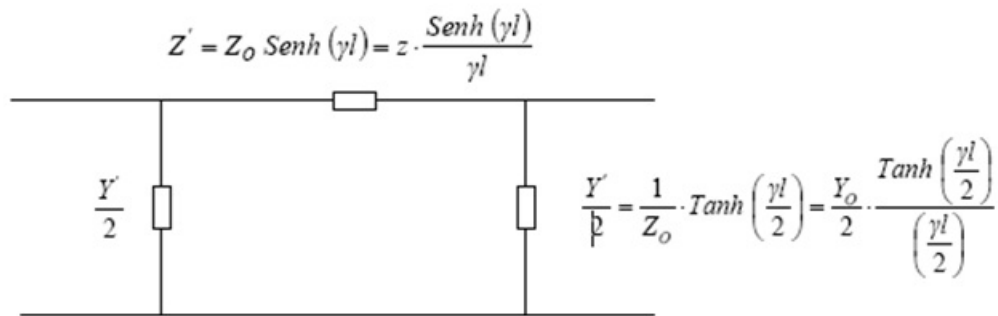


FIGURA 1.5.: Modelo de línea Pi exacto Tomada de [Checa, 2000].

Donde:

- Z' Impedancia exacta de la línea.
- Y' Admitancia exacta de la línea.
- γ Longitud de onda de la línea.
- l Longitud de la línea.

1.3. Modelo Clarke

El modelo de línea Clarke utiliza como método de solución la transformación de las componentes de fase del sistema a componentes α , β y 0 [Clarke, 1965] por medio de una matriz de transformación que lo que hace básicamente es descomponer una propagación que se daría para una línea acoplada, en varios modos de propagación que sean ortogonales (linealmente independientes) entre sí. Tomando como referencia la fase A, las componentes α , β y 0 para un sistema trifásico se definen como:

- α Su componente en las fases B y C es igual, y en la fase A es de signo opuesto y del doble que las otras.
- β Su componente en las fases B y C es igual en magnitud y de signo opuesto, la componente de la fase A es cero.
- 0 Su componente en las tres fases es igual.

De este modo se encuentra la matriz de transformación a componentes α, β y 0, la cuál se muestra a continuación:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

El modelo realiza la transformación de la matriz de impedancias equivalentes por fase que se obtiene con el metodo de línea de Carson y de la matriz de admitancias equivalentes, con la siguiente relación:

$$Z_{\alpha,\beta,0} = T^{-1}Z_{a,b,c}T \quad (1.43)$$

$$Y_{\alpha,\beta,0} = T^{-1}Y_{a,b,c}T \quad (1.44)$$

Utilizando la matriz de transformación de Clarke, se encuentran las siguientes relaciones entre las tensiones del sistema y las tensiones α, β y 0:

$$V_a = V_\alpha + V_0 \quad (1.45)$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta + V_0 \quad (1.46)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta + V_0 \quad (1.47)$$

1.4. Modelo Bergeron

Este modelo adaptado y desarrollado por Hermann Dommel, es un método simple, de frecuencia constante que está basado en la propagación de las ondas en una línea de transmisión sin pérdidas, y con parámetros L' , C' constantes distribuidos a través de la línea de transmisión. La figura 1.6 representa el modelo de Bergeron para una línea de transmisión sin pérdidas, donde las ecuaciones que relacionan las tensiones y corrientes en los extremos de la línea están representadas en (1.48) a (1.51):

$$i_{km}(t) = \frac{1}{Z_c} v_k(t) + i_k(t) \quad (1.48)$$

$$i_{mk}(t) = \frac{1}{Z_c} v_m(t) + i_m(t) \quad (1.49)$$

$$i_k(t) = -\frac{1}{Z_c} v_m(t - \tau) - i_m(t - \tau) \quad (1.50)$$

$$i_m(t) = -\frac{1}{Z_c} v_k(t - \tau) - i_k(t - \tau) \quad (1.51)$$

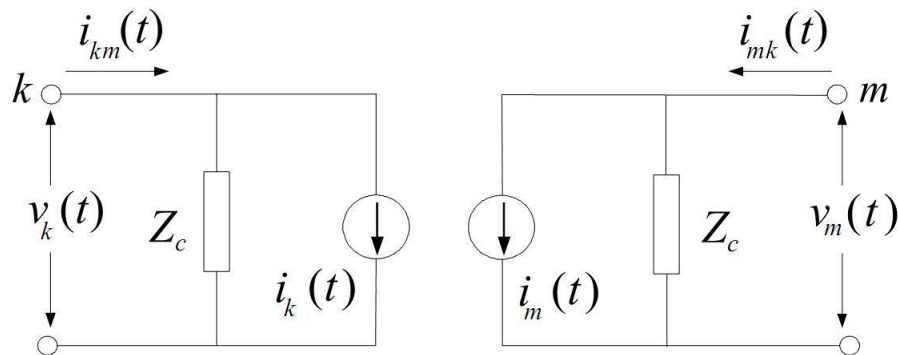


FIGURA 1.6.: Modelo de línea de Bergeron sin pérdidas. Tomada de [Watson and Arrillada, 2003]

Donde:

- v_k Voltaje en el nodo k.
- i_k Corriente en el nodo k.
- v_m Voltaje en el nodo m.
- i_m Corriente en el nodo m.
- L' Inductancia por unidad de longitud [H/km].
- C' Capacitancia por unidad de longitud [F/km].
- Z_c Impedancia característica de la línea ($\sqrt{L'/C'}$).
- τ Tiempo de desplazamiento de la onda viajera.

Dommel realizó una extensión del modelo para incluir las pérdidas a lo largo de la línea de transmisión. En esta extensión, la representación de la resistencia serie distribuida en toda la línea cambio al dividir la longitud total de la línea en varias secciones ubicando resistencias localizadas de la siguiente forma: $R/4$ en cada extremo de la línea y $R/2$ en el punto medio de cada sección de la línea, como se observa en la figura 1.7, este modelo obtiene respuestas razonables con tal que $R/4 \ll Z_c$, donde Z_c es la impedancia característica. Sin embargo, para los estudios de alta frecuencia este modelo de resistencia localizada puede no ser adecuado [Watson and Arrillada, 2003].

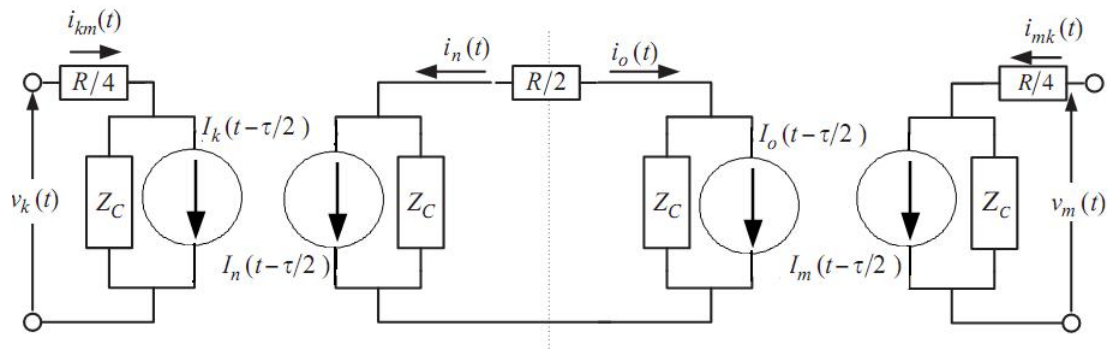


FIGURA 1.7.: Equivalente de la línea con resistencias localizadas. Tomada de [Watson and Arrillada, 2003]

A partir del modelo presentado anteriormente se llega al modelo equivalente de la mitad de la línea que se muestra en la figura 1.8, cuyas relaciones de tensión y corriente se ven representadas en las ecuaciones (1.52) a (1.55):

$$i_{km}(t) = \frac{1}{Z_c + R/4} v_k(t) + i_k(t - \tau/2) \quad (1.52)$$

$$i_{mk}(t) = \frac{1}{Z_c + R/4} v_m(t) + i_m(t - \tau/2) \quad (1.53)$$

$$i_k(t - \tau/2) = \frac{-1}{Z_c + R/4} v_m(t - \tau/2) - \left(\frac{Z_c - R/4}{Z_c + R/4} \right) i_m(t - \tau/2) \quad (1.54)$$

$$i_m(t - \tau/2) = \frac{-1}{Z_c + R/4} v_k(t - \tau/2) - \left(\frac{Z_c - R/4}{Z_c + R/4} \right) i_k(t - \tau/2) \quad (1.55)$$

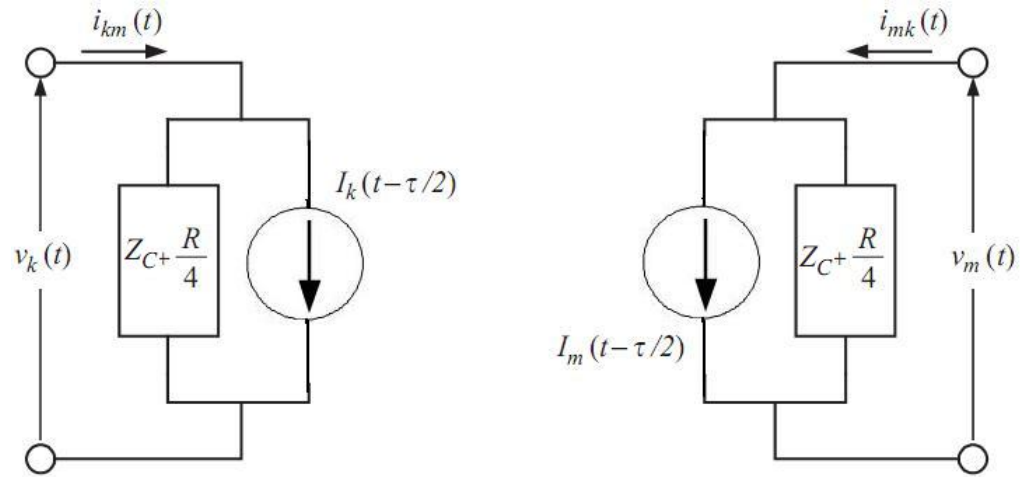


FIGURA 1.8.: Equivalente de la mitad de la línea.

Finalmente, al colocar dos de los modelos de la mitad de la línea en cascada y eliminando las variables del punto medio de la línea, ya que los terminales de interés son los extremos, se establece el modelo de Bergeron para una línea de transmisión completa con pérdidas, presentado en la figura 1.9 y donde las relaciones de tensión y corriente de los terminales de la línea se ven representadas en las ecuaciones (1.56) y (1.59) [Watson and Arrillada, 2003].

$$i_{km}(t) = \frac{1}{Z_c + R/4} v_k(t) + i'_k(t - \tau) \quad (1.56)$$

$$i_{mk}(t) = \frac{1}{Z_c + R/4} v_m(t) + i'_m(t - \tau) \quad (1.57)$$

$$i'_k(t - \tau) = \frac{-Z_c}{(Z_c + R/4)^2} (v_m(t - \tau) + (Z_c - R/4) i_{mk}(t - \tau)) + \frac{-R/4}{(Z_c + R/4)^2} (v_k(t - \tau) + (Z_c - R/4) i_{km}(t - \tau)) \quad (1.58)$$

$$i'_m(t - \tau) = \frac{-Z_c}{(Z_c + R/4)^2} (v_k(t - \tau) + (Z_c - R/4) i_{km}(t - \tau)) + \frac{-R/4}{(Z_c + R/4)^2} (v_m(t - \tau) + (Z_c - R/4) i_{mk}(t - \tau)) \quad (1.59)$$

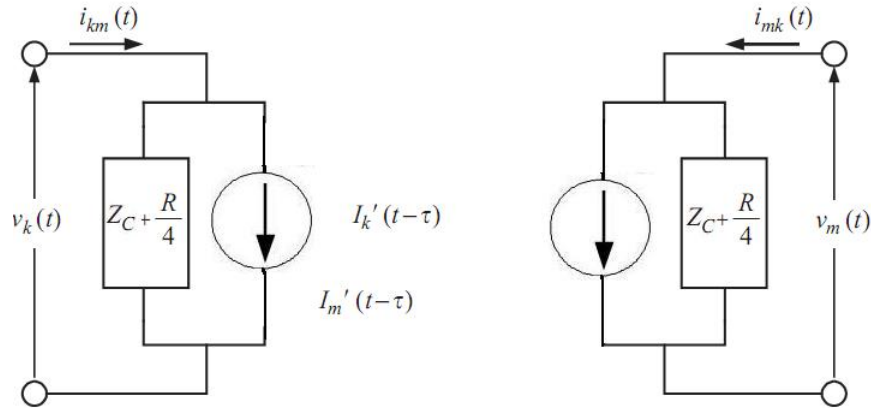


FIGURA 1.9.: Modelo de línea de Bergeron con pérdidas.

1.5. Modelo JMarti

Este modelo, aproxima la impedancia característica y la constante de propagación por funciones racionales y utiliza una matriz de transformación constante para convertir valores del dominio modal al dominio de las fases, cuya influencia para líneas aéreas es poco notable pero para cables es muy importante, puesto que evita que se lleguen a resultados inservibles [Marti, 1982]. Una limitación es su comportamiento

inestable para frecuencias muy bajas, como es el caso de la carga atrapada, donde la tensión puede incrementarse sin límites en algunos casos. Si bien es posible obtener resultados convincentes, requiere de ciertas manipulaciones en los datos efectuar el ajuste.

Cuando se incluyen pérdidas en el circuito como es el caso del modelo de JMarti se vuelve complicado escribir de manera práctica la solución de las ecuaciones en el dominio del tiempo, esta relación puede darse fácilmente en el dominio de la frecuencia.

$$V_k(\omega) = \cosh(\gamma(\omega)l) V_m(\omega) - Z_c(\omega) \sinh(\gamma(\omega)l) I_m(\omega) \quad (1.60)$$

$$I_k(\omega) = \frac{1}{Z_c(\omega)} \sinh(\gamma(\omega)l) V_m(\omega) - \cosh(\gamma(\omega)l) I_m(\omega) \quad (1.61)$$

Donde la impedancia característica de la línea se define como:

$$Z_c(\omega) = \sqrt{Z'(\omega) Y'(\omega)} \quad (1.62)$$

y la constante de preparación

$$\gamma(\omega) = \sqrt{\frac{Z'(\omega)}{Y'(\omega)}} \quad (1.63)$$

Con:

$$Z'(\omega) = R'(\omega) + j\omega L'(\omega) \quad (1.64)$$

$$Y'(\omega) = G'(\omega) + j\omega C'(\omega) \quad (1.65)$$

$R'(\omega)$ Resistencia serie por unidad de longitud.

$L'(\omega)$ Inductancia serie por unidad de longitud.

$G'(\omega)$ Conductancia de derivación por unidad de longitud.

$C'(\omega)$ Capacitancia de derivación por unidad de longitud.

1.5.1. Explicación física del modelo

En los primeros modelos de línea dependientes de frecuencia [Budner, 1970], se usó el concepto de funciones de peso, las cuáles fueron incorporadas para relacionar los voltajes y corrientes como una forma análoga a la interpretación simple de las ecuaciones de Bergeron [Marti, 1982], pero estas funciones en este tipo de modelos son altamente oscilatorias y difíciles de evaluar como se muestra en la figura 1.10 con las funciones de peso $a_1(t)$ y $a_2(t)$.

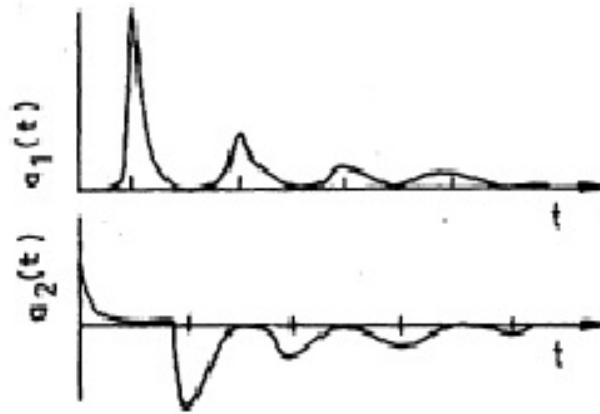


FIGURA 1.10.: Funciones de peso. Tomada de [Marti, 1982]

De las funciones de peso $a_1(t)$ y $a_2(t)$ mostradas en la figura 1.10, $a_2(t)$ es la más difícil de calcular, es por esto que se hace una nueva formulación en la cuál se elimina $a_2(t)$ y se reduce la oscilación de $a_1(t)$. El sentido físico en el modelo de la función de propagación $a_1(t)$ se muestra en la figura 1.11, donde la línea se excita con un pulso de tensión y en sus extremos termina con una impedancia equivalente (Z_{eq}). Allí se ve claramente que $a_2(t)$ está relacionado con el voltaje en el nodo k y $a_1(t)$ con el voltaje en el nodo m .

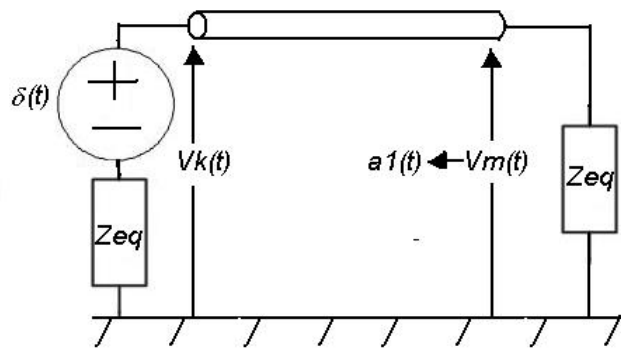


FIGURA 1.11.: Interpretación física de la función de propagación $a_1(t)$.

Los picos en las oscilaciones que se muestran en la figura 1.10, se deben a sucesivas reflexiones en ambos extremos de la línea. Si se ubica una impedancia cuya respuesta de frecuencia sea la misma que la impedancia característica no habrá reflexiones en ambos extremos de la línea como se observa en la figura 1.12, donde la constante relacionada con el envío $a_2(t)$ se hace cero y la constante $a_1(t)$ en la recepción es un único pulso [Marti, 1982].

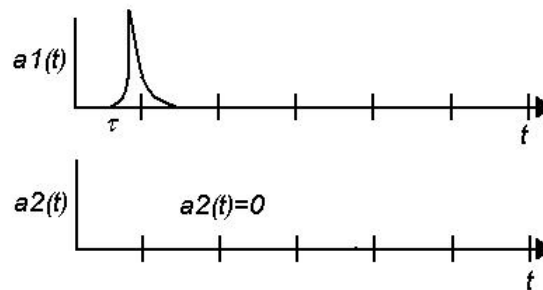


FIGURA 1.12.: Funciones de propagación $a_1(t)$ y $a_2(t)$ en el modelo JMarti. Tomada de [Marti, 1982]

1.5.2. Desarrollo matemático del modelo

Para representar matemáticamente el modelo, este se puede separar en dos componentes: funciones de onda viajera que van alejándose del nodo emisor y funciones de onda viajera que van acercándose al nodo emisor, como lo muestran las ecuaciones (1.66) y (1.67) para las que se alejan y las ecuaciones (1.68) y (1.69) para las que se acercan.

$$F_k(\omega) = V_k(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_k(\omega) \quad (1.66)$$

$$F_m(\omega) = V_m(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_m(\omega) \quad (1.67)$$

$$B_k(\omega) = V_k(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_k(\omega) \quad (1.68)$$

$$B_m(\omega) = V_m(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_m(\omega) \quad (1.69)$$

Donde Z_{eq} es impedancia de la red y es aproximadamente la impedancia de la línea Z_c .

Comparando las ecuaciones (1.66) a (1.69) con las ecuaciones básicas de la línea en frecuencia (1.60) y (1.61) se obtiene lo siguiente:

$$B_k(\omega) = A_1(\omega) F_m(\omega) \quad (1.70)$$

$$B_m(\omega) = A_1(\omega) F_k(\omega) \quad (1.71)$$

Donde:

$$A_1(\omega) = e^{-\gamma(\omega)l} = \frac{1}{\cosh(\gamma(\omega)l) + \sinh(\gamma(\omega)l)} \quad (1.72)$$

Entonces las relaciones de tensión y corriente que caracterizan el modelo de línea de JMarti se encuentra en las ecuaciones (1.73) a (1.76) y cuyo circuito equivalente se presenta en la figura 1.13.

$$V_k(\omega) = Z_c(\omega) I_k(\omega) + E_{mh}(\omega) \quad (1.73)$$

$$V_m(\omega) = Z_c(\omega) I_m(\omega) + E_{kh}(\omega) \quad (1.74)$$

Donde:

$$E_{mh} = [V_m(\omega) + Z_c(\omega) I_m(\omega)] A_1(\omega) \quad (1.75)$$

$$E_{kh} = [V_k(\omega) + Z_c(\omega) I_k(\omega)] A_1(\omega) \quad (1.76)$$

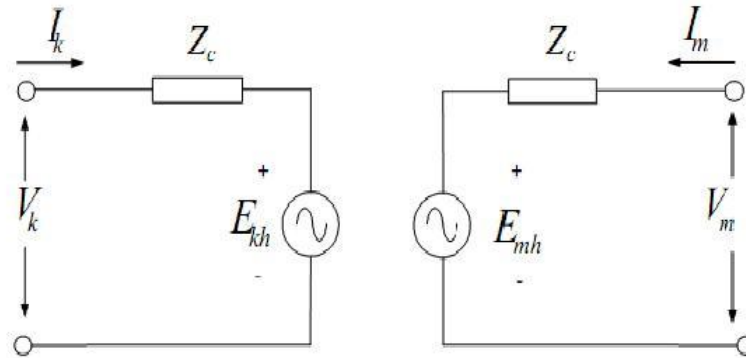


FIGURA 1.13.: Modelo de línea de JMarti.

Que transformadas al dominio del tiempo se convierte en:

$$v_k(t) = Z_c * i_k(t) + [v_m(t) + Z_c * i_m(t)] * a_1(t) \quad (1.77)$$

$$v_m(t) = Z_c * i_m(t) + [v_k(t) + Z_c * i_k(t)] * a_1(t) \quad (1.78)$$

Donde el símbolo * significa la evaluación numérica de la convolución; dicha operación para el cálculo de transitorios es lenta. Para acelerar este proceso, es necesario sintetizar los elementos involucrados en la convolución, como son la impedancia equivalente y la función de propagación, debido a la naturaleza irracional de $a_1(t)$ y Z_{eq} . La síntesis por medio de funciones racionales permite que la evaluación numérica de la convolución se vuelva más rápida, ya que se obtienen exponenciales en el dominio del tiempo, aplicando así las técnicas de convolución recursiva [Marti, 1982].

1.5.3. Síntesis de la impedancia equivalente

La Z_{eq} que representa la impedancia característica de la línea de Z_c es simulada por una serie de bloques de resistencia y capacitancia (R-C) paralelos como se muestra en la figura 1.14.

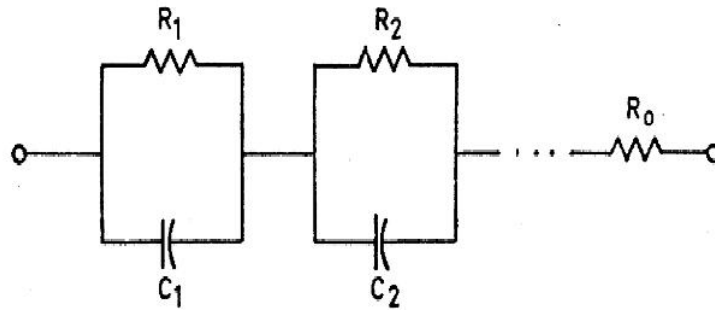


FIGURA 1.14.: Equivalente para síntesis de Z_{eq} . Tomada de [Marti, 1982]

El número de bloques R-C se determina de manera automática con el siguiente procedimiento:

Primero se debe sintetizar la Z_{eq} por medio de evaluar la función Z_c que se hace con la ecuación (1.62) (con parámetros dependientes de la frecuencia obtenidos con las ecuaciones de Carson) y se hace la primera aproximación en el plano complejo ($s = \sigma + j\omega$) por funciones racionales.

$$Z_{eq}(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = H \left[\frac{(s + z_1)(s + z_2) \dots (s + z_n)}{(s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_n)} \right] \quad (1.79)$$

Los polos y ceros de esta función son reales y positivos, y los valores de los bloques R-C se obtienen al expandir la ecuación (1.79) en una serie de fracciones simples [Marti, 1982].

$$Z_{eq}(s) = k_0 + \frac{k_1}{s + p_1} + \frac{k_2}{s + p_2} + \dots + \frac{k_n}{s + p_n} \quad (1.80)$$

Donde en la figura 1.14:

$$\begin{aligned} R_0 &= k_0 \\ R_i &= k_i/p_i \\ C_i &= 1/k_i \end{aligned} \quad (1.81)$$

1.5.4. Función de propagación y convolución

De la figura 1.12, se puede ver que la función $a_1(t)$ puede ser expresada de la forma:

$$a_1(t) = p(t - \tau) \quad (1.82)$$

Donde $p(t)$ tiene la misma forma de $a_1(t)$ pero se desplaza τ unidades de tiempo hacia el origen. Por las propiedades de la transformada de Fourier la ecuación (1.82) en el tiempo es:

$$A_1(\omega) = P(\omega) e^{-j\omega\tau} \quad (1.83)$$

La función $p(\omega)$ es aproximada en el plano complejo por una función racional de la forma.

$$P_a(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = H \left[\frac{(s + z_1)(s + z_2) \dots (s + z_n)}{(s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_n)} \right] \quad (1.84)$$

Ya que $A_1(\omega)$ corresponde a la respuesta de un sistema físico pasivo y tiende a cero cuando $\omega \rightarrow \infty$. El número de ceros debe ser menor que el número de polos y la parte real de los polos debe estar en la parte izquierda del plano complejo.

Después de un desarrollo en fracciones parciales de la ecuación (1.84) y su correspondiente transformación al dominio del tiempo la aproximación de $a_1(t)$ se transforma en:

$$a_{1a}(t) = \left[k_1 e^{-p_1(t-\tau)} + k_2 e^{-p_2(t-\tau)} + \dots + k_m e^{-p_m(t-\tau)} \right] u(t - \tau) \quad (1.85)$$

El número de exponenciales en la aproximación depende de la línea particular y del modo.

1.6. Modelo Noda

Uno de los primeros autores que trabajó modelos de líneas dependientes de frecuencia fue Semlyen [Semlyen and Dabuleanu, 1975], el cuál trabajó un método para reducir los tiempos de simulación que eran elevados y que estaban siendo empleados en los modelos dependientes de frecuencia existentes [Marti, 1982], el método consistía en evitar la convolución en el tiempo a través de la aproximación de la admitancia de la línea por medio de funciones exponenciales, las cuáles a su vez eran reducidas utilizando aproximaciones por medio de sumatorias. El método tiene un inconveniente y es que su eficiencia depende de saber determinar cuál o cuáles de los factores de la sumatoria son importantes. Por esto surge un nuevo modelo el cuál busca reducir los tiempos empleados en la simulación sin tener estos inconvenientes.

El modelo de Noda toma en cuenta la dependencia de la frecuencia en los parámetros de la línea de transmisión. Además es desarrollado en el dominio de la fase para evitarse los problemas asociados con las matrices de transformación dependientes de la frecuencia. Su eficiencia se basa en la utilización de un modelo matemático llamado ARMA (*Auto Regressive Moving Average*) que reemplaza las convoluciones en el dominio del tiempo, para reducir los tiempos de cálculo. La admitancia característica y los coeficientes de deformación se ajustan mediante funciones racionales [Noda et al., 1996].

Generalmente es más difícil obtener un modelo adecuado de este tipo para una línea determinada, pero tiene la ventaja que permite definir un paso de cálculo independiente del tiempo de viaje, pero esto exige emplear este paso de tiempo para la simulación. De ser necesario emplear otro paso, deberá recalcularse el modelo.

1.6.1. Modelo en el dominio de las fases

El modelo de Noda se comienza a deducir al decir que todo sistema multifase está caracterizado por un vector de tensiones (que representa las tensiones presentes en cada conductor con respecto a tierra) y un vector de corrientes (que representa las corrientes presentes en cada conductor) en el dominio de la frecuencia, obteniendo de esto un modelo como el que se aprecia en la figura 1.15.

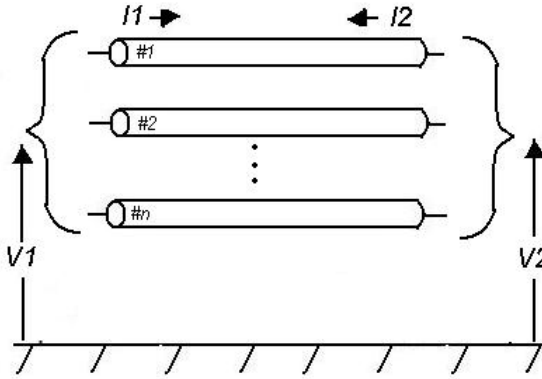


FIGURA 1.15.: Línea multifase de parámetros distribuidos.

Las relaciones de la propagación de onda pueden ser descritas por una par de ecuaciones diferenciales de telegrapher que se solucionan como:

$$V(x, \omega) = e^{-\gamma\omega x} V_f(\omega) + e^{\gamma\omega x} V_b(\omega) \quad (1.86)$$

$$I(x, \omega) = Y_0(\omega) [e^{-\gamma\omega x} V_f(\omega) - e^{\gamma\omega x} V_b(\omega)] \quad (1.87)$$

Donde:

$V_f(\omega)$ Vector de voltaje de la onda que viaja hacia delante.

$V_b(\omega)$ Vector de voltaje de la onda que viaja hacia atrás.

$Y_0(\omega)$ Matriz de la admitancia característica de la línea.

$\gamma(\omega)$ Matriz de la constante de propagación.

Considerando al final de la línea el vector de envío como $V_1(\omega)$ y el vector de recepción como $V_2(\omega)$, y realizando una manipulación de (1.86) y (1.87) se puede llegar a las siguientes relaciones entre las tensiones y corrientes en el modelo de la línea:

$$I_1(\omega) = \frac{Y_0(\omega) V_1(\omega) - Y_0(\omega) e^{-j\omega\tau}}{H(\omega) \{V_2(\omega) + Z_0(\omega) I_2(\omega)\}} \quad (1.88)$$

$$I_2(\omega) = \frac{Y_0(\omega) V_2(\omega) - Y_0(\omega) e^{-j\omega\tau}}{H(\omega) \{V_1(\omega) + Z_0(\omega) I_1(\omega)\}} \quad (1.89)$$

Donde:

$$H(\omega) = e^{j\omega\tau} e^{-\gamma\omega l}$$

$$Z_0(\omega) = Y_0(\omega)$$

$H(\omega)$ Matriz de deformación de onda en el dominio de las fases.

τ Mínimo tiempo de viaje.

$Z_0(\omega)$ Matriz de impedancia característica.

Pero estas ecuaciones tardan un tiempo considerable en su solución, el cual se puede reducir con la siguiente relación:

$$Y_0(\omega) H(\omega) = H^T(\omega) Y_0(\omega) \quad (1.90)$$

Al reemplazar la ecuación (1.90) en las ecuaciones (1.88) y (1.89) se obtienen a las siguientes expresiones:

$$I_1(\omega) = Y_0(\omega) V_1(\omega) - e^{-j\omega\tau} H^T(\omega) \{Y_0(\omega) V_2(\omega) + I_2(\omega)\} \quad (1.91)$$

$$I_2(\omega) = Y_0(\omega) V_2(\omega) - e^{-j\omega\tau} H^T(\omega) \{Y_0(\omega) V_1(\omega) + I_1(\omega)\} \quad (1.92)$$

Que transformadas al dominio del tiempo se muestran de la siguiente forma:

$$i_1(t) = y_0(t) * v_1(t) - i_{p1}(t) \quad (1.93)$$

$$i_{p1}(t) = h^T(t) * \{y_0(t) * v_2(t - \tau) + i_2(t - \tau)\} \quad (1.94)$$

$$i_2(t) = y_0(t) * v_2(t) - i_{p2}(t) \quad (1.95)$$

$$i_{p2}(t) = h^T(t) * \{y_0(t) * v_1(t - \tau) + i_1(t - \tau)\} \quad (1.96)$$

Donde $h(t)$ es la transformada inversa de Fourier de $H(\omega)$ y el símbolo * significa convolución.

Este modelo se ve representado en la figura 1.16.

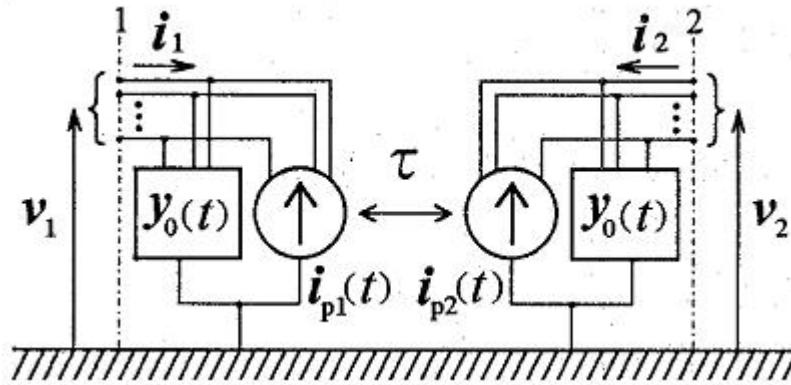


FIGURA 1.16.: Circuito equivalente en el dominio del tiempo. Tomada de [Noda et al., 1996]

La operación de convolución $y_0(t) * v(t)$ es fácilmente descompuesta como:

$$y_0(t) * v(t) = y_{00} * v(t) + y_{01}(t) * v(t - \Delta t) \quad (1.97)$$

Donde:

$y_{01}(t) * v(t - \Delta t)$ Matriz y vector de convolución con valores de respuesta instantáneo.

Con esta relación las ecuaciones básicas del modelo se convierten en:

$$i_1(t) = y_{00}(t) * v_1(t) - i'_{p1}(t) \quad (1.98)$$

$$i'_{p1}(t) = i_{p1}(t) - y_{01}(t) * v_1(t - \Delta t) \quad (1.99)$$

$$i_2(t) = y_{00}(t) * v_2(t) - i'_{p2}(t) \quad (1.100)$$

$$i'_{p2}(t) = i_{p2}(t) - y_{01}(t) * v_2(t - \Delta t) \quad (1.101)$$

Cuyo modelo se ve representado en la figura 1.17 [Noda et al., 1996].

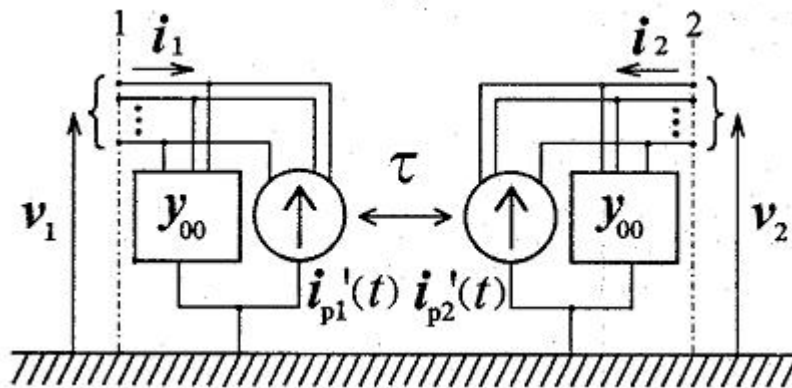


FIGURA 1.17.: Circuito equivalente en el dominio del tiempo. Tomada de [Noda et al., 1996]

1.6.2. Modelo ARMA

Un modelo ARMA (*Auto Regressive Moving Average*) esencialmente representa un sistema discreto en el tiempo con entrada $x(t)$ y salida $y(t)$, cuyas muestras son calculadas en un intervalo Δt como $x(n) = x(t) |_{t=n\Delta t}$, $y(n) = y(t) |_{t=n\Delta t}$, ($n=0,1,2,\dots$). Utilizando la transformada Z, un modelo ARMA se define por la siguiente función racional en el dominio de Z:

$$G(z) = \frac{a_0 + a_1z^{-1} + \dots + a_Nz^{-N}}{1 + b_1z^{-1} + \dots + b_Nz^{-N}} \quad (1.102)$$

Donde a_n y b_n son los coeficientes del modelo ARMA y N es el orden del modelo porque el operador z^{-n} denota n muestras.

La ecuación (1.102), se transforma en el dominio del tiempo como:

$$y(n) = a_0x(n) + a_1x(n-1) + \dots + a_Nx(n-N) - b_1y(n-1) - \dots - b_Ny(n-N) \quad (1.103)$$

La ecuación mencionada es una representación en el dominio del tiempo de un modelo ARMA, y es equivalente a aplicar una convolución recursiva. Usando esta ecuación, la salida $y(n)$ puede ser calculada con $2N + 1$ multiplicaciones y $2N$ adiciones. El cálculo basado en las ecuaciones simples del dominio de las fases requiere una convolución de la siguiente forma:

$$y(t) = g(t) * x(t) \quad (1.104)$$

Donde:

$g(t)$ Matriz de función de transferencia.

$x(t)$ Vector de entrada.

$y(t)$ Vector de salida.

La matriz $g(t)$ es equivalente a $y_0(t)$ en las ecuaciones (1.93) a (1.96), cada elemento de $g(t)$ es reemplazada por un modelo ARMA y la relación en el dominio Z se convierte en:

$$Y(Z) = G(Z)X(Z) \quad (1.105)$$

Con esta relación aplicada a las ecuaciones básicas del modelo, se evita la convolución en el dominio del tiempo y con esto se reducen los tiempos de ejecución.

2. Descripción herramienta software y sistemas de prueba

2.1. Selección del software de simulación

El programa EMTP (Electro Magnetic Transient Program) fue desarrollado junto con otros programas como alternativa digital del Analizador de Transitorios en Redes (TNA - *Transient Network Analyzer*). Éste primero fue desarrollado a fines de la década del 60 por el Dr. Hermann Dommel, quien cedió el programa a la Boneville Power Administration (BPA). El EMTP se expandió y distribuyó bajo la dirección de la BPA hasta que la empresa lo liberó para evadir el mantenimiento, y lo siguió soportando el Electric Power Research Institute (EPRI).

Dentro de los estudios que permite el EMTP están, el diseño, que incluye coordinación de aislamiento, dimensionamiento de equipos, especificación de los equipos de protección y la solución de problemas operativos como son el análisis de fallas en sistemas eléctricos de potencia. No obstante, el costo elevado del EMTP soportado por el EPRI, hizo reaccionar a sus creadores, que junto con el grupo europeo de usuarios desarrollaron una versión para PC con la filosofía original que se denomina ATP. Su distribución es gratuita a través de grupos de usuarios y tiene la ventaja de poderse ajustar a las necesidades de cada tipo de problema. A diferencia del EMTP, el ATP tiene diferentes plataformas para su interfaz gráfica y manuales de uso un poco más laboriosos de manejar, sin embargo se tiene la misma máquina de solución del EMTP la cual es Fortran, lo que permite un software rápido y confiable.

A diferencia de otros programas de simulación de flujo de carga y cortocircuitos como son el Neplan, el PSS/E y el Digsilent, los datos de entrada requeridos por el ATP o cualquiera de los programas mencionados anteriormente son diferentes y superiores en cantidad debido a que utilizan modelos más detallados para poder

simular en forma precisa los transitorios que ocurren durante cortos periodos.

Por otro lado el modelo del programa ATP puede configurarse con un programa adicional, el cual actúa como un pre-procesador de los datos, permitiendo ensamblar los distintos componentes del modelo en forma gráfica como el ATPDRAW y el ATP PLOT, entre otros. Las sucesivas versiones del programa y toda la información relacionada con el mismo (manuales y diversas publicaciones), son recibidas y distribuidas por los comités de usuarios.

Además es el programa que cuenta con la mayor cantidad de modelos de líneas, los cuales son muy precisos, lo cual permite tener un buen grupo de modelos para escoger y realizar las pruebas pertinentes.

Por estas y las anteriores razones, el software seleccionado para el modelo de los diferentes elementos del sistemas de distribución y la realización de las distintas simulaciones es el ATPDraw, interfaz gráfica para el ATP.

2.2. Descripción del software de simulación

El ATP cuenta con varios modelos disponibles dentro de los cuales se mencionan algunos a continuación:

- Modelos constituidos por elementos concentrados RLC. Estos modelos pueden ser simples ramas RLC serie, circuitos Pi polifásicos que pueden representar líneas de transmisión o transformadores.
- Modelo de onda viajera para representar adecuadamente una línea o un cable.
- Impedancias de tipo no lineal: resistencias no lineales, inductancias no lineales, resistencias variables con el tiempo.
- Conmutadores ideales controlados por tiempo. Conmutadores controlados por voltaje para la simulación de “gaps” en flameos de aisladores. Diodos y tiristores. Conmutadores de operación estadística.
- Fuentes de voltaje y corriente ideales de tipo escalón, sinusoidal, rampa, exponencial y definidas punto a punto.
- Modelo completo para la máquina sincrónica.

- Modelo universal de la máquina eléctrica que permite representar doce tipos de máquinas diferentes. El modelo de más interés en este grupo de modelos es el del motor de inducción trifásico.
- Representación de los sistemas de control mediante la opción de los TACS (Transients Analisis Control System). En las versiones más recientes del ATP existe una opción alterna para representar la parte de control del sistema de potencia: MODELS.

A continuación se concentrará en la descripción de los modelos de líneas existentes en el ATP.

2.2.1. Modelos de líneas

2.2.1.1. Parámetros concentrados

Circuitos π : Los circuitos π son una aproximación discreta a los parámetros distribuidos constantes. En este caso, ATP presenta la opción de modelar 1, 2 y 3 fases por el modelo π con sus respectivas impedancias mutuas, por lo que se puede representar tanto una red trifásica como ramificaciones monofásicas. La conexión en cascada de circuitos π puede ser útil para líneas no transpuestas, puesto que no es necesario considerar aproximaciones a la matriz de transformación fase-nodo. Como defecto, no se pueden representar líneas con parámetros dependientes de la frecuencia y deben aceptarse oscilaciones provocadas por los elementos concentrados. De allí que sea necesario la correcta elección del número de circuitos π para cada caso. Por otro lado, las oscilaciones pueden amortiguarse mediante resistencias en paralelo con las ramas R-L. Su principal ventaja es que no condiciona el paso de tiempo (ΔT) del cálculo de la solución [Hevia, 1999].

El ATP presenta dos formas de representar el modelo π , los cuales se encuentran en la opción Lines/Cables Constants. El primero se encuentra en la sub-opción Lumped en el ítem llamado RLC Pi-equiv.1. Esta representación tiene como desventaja que los datos a ingresar al modelo son los valores de resistencia, inductancia y capacitancia tanto propias de cada fase como mutuas, teniendo que realizar los cálculos previos de estas según sea la configuración de la red (Modelo de parámetros concentrados). En la figura 2.1 se muestra la ruta y datos a ingresar para dicho modelo en el ATP.

Los datos requeridos por el modelo anterior, si se tiene una línea trifásica, son los mostrados a continuación:

- Las resistencias en [Ohm/m].
- Las inductancias en [mH/m] si $X_{opt} = 0$ ó en [Ohm/m] si X_{opt} es igual a la frecuencia del sistema.
- La capacitancias en [uF/m] si $C_{opt} = 0$ ó en [uMho/m] si C_{opt} es igual a la frecuencia del sistema.
- La longitud de la línea en metros [Length].

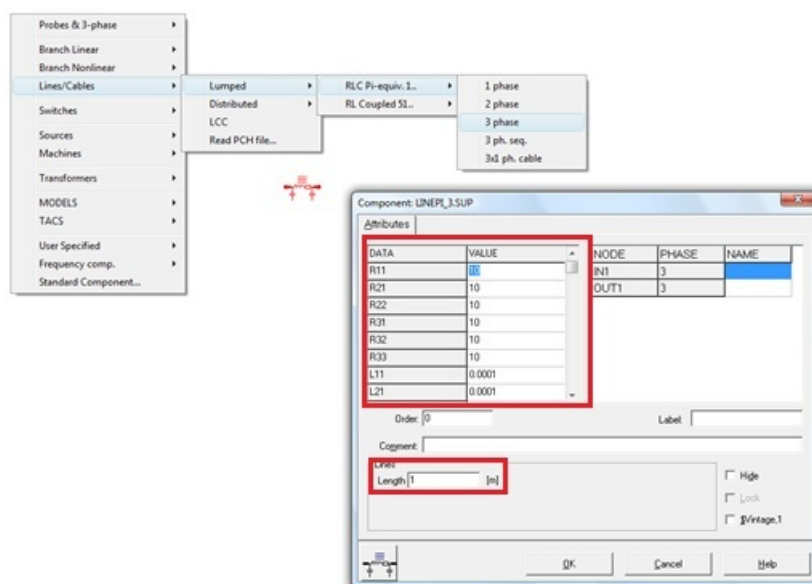


FIGURA 2.1.: Modelo π con parámetros concentrados.

La segunda opción se encuentra en el ítem LCC, este elemento da la opción de elegir entre diferentes modelos, uno de ellos es π . Con este modelo se ingresan los datos de resistencia y reactancia por fase con la respectiva configuración de la línea (Distancias entre conductores y altura). En la figura 2.2 se muestra la ruta y datos a ingresar para dicho modelo en el ATP.

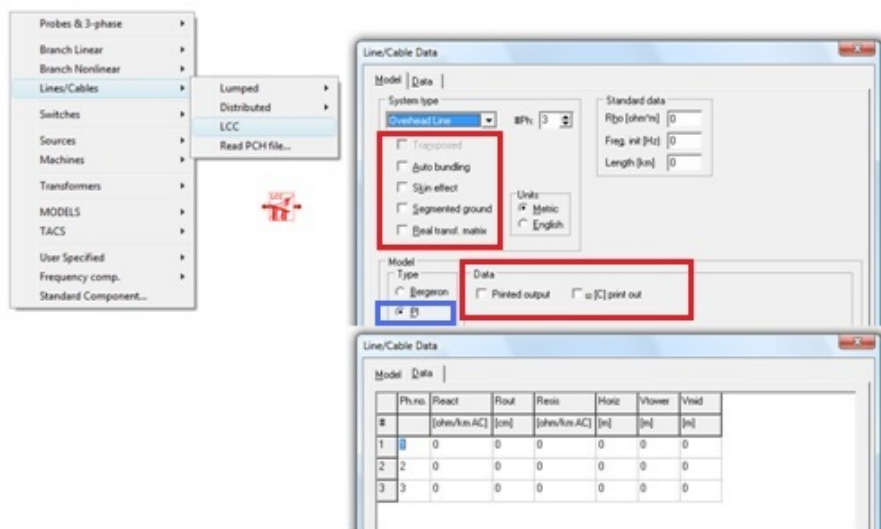


FIGURA 2.2.: Modelo π con line constans (LCC).

Línea R-L con acople: Este tipo de modelo es similar al modelo tipo π , no obstante, como diferencia se tiene que los efectos capacitivos del modelo son excluidos. En consecuencia, los datos a ingresar son las resistencias e inductancias tanto propias como mutuas. En la figura 2.3 se muestra la ruta y los datos a ingresar para dicho modelo en el ATP.

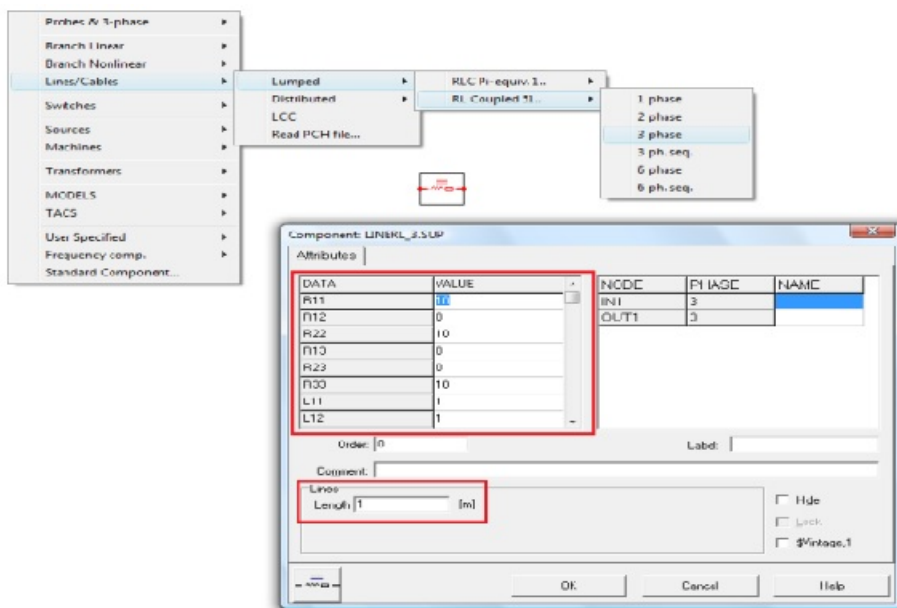


FIGURA 2.3.: Modelo R-L con acople.

2.2.1.2. Parámetros distribuidos constantes

Los modelos de onda viajera para línea transpuesta y no transpuesta son los modelos más utilizados para representar adecuadamente una red de transmisión de energía eléctrica para diferentes estudios de un sistema de potencia. Para estudio de transitorios y considerando una línea trifásica se hace una descomposición en modos de propagación.

Modelo Bergeron: Este modelo adaptado y desarrollado por Herman Dommel [Domel and Meyer, 1969] está basado en la propagación de las ondas en una línea de transmisión sin pérdidas, y con parámetros L' y C' constantes distribuidos a través de la línea. Para sistemas M-fásicos, las líneas se desacoplan por medio del método de descomposición modal para estudiar cada modo como una línea monofásica. Esta descomposición se realiza por medio de matrices de transformación constantes con componentes reales, dando resultados exactos para líneas balanceadas. Para líneas desbalanceadas el modelo no es útil, ya que suponer que la matriz de transformación es constante no es válido porque las matrices son dependientes de la frecuencia [Restrepo et al., 2008]. En la figura 2.4 se muestran los datos a ingresar para dicho modelo en el ATP.

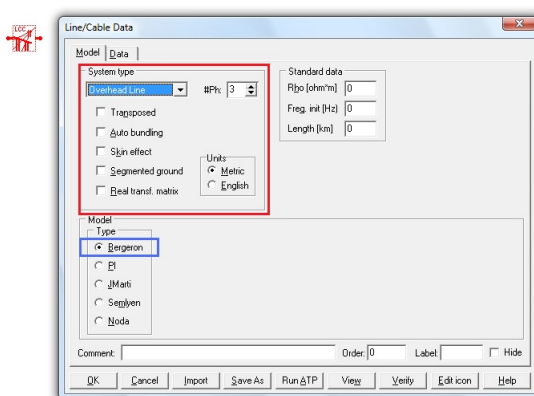


FIGURA 2.4.: Modelo Bergeron con lines constans (LCC).

Línea transpuesta de Clarke y Línea no transpuesta de K.C. Lee: El modelo de Clarke utiliza para los cálculos una matriz de transformación constante, ya que para la línea transpuesta los parámetros de secuencia siempre se pueden evaluar de la misma manera. Una matriz de transformación descompone la propagación dada por una línea acoplada (caso trifásico por ejemplo) en varios modos de propagación que sean

ortogonales entre sí. Para el caso de línea trifásica transpuesta, los parámetros para los tres modos de propagación, se pueden obtener a partir de las componentes de secuencia. Cuando la línea deja de ser transpuesta (K.C. Lee) los modos se evalúan para cada configuración en forma particular. Para este caso se debe calcular una matriz de transformación particular, que se hace normalmente con la opción LINE CONSTANTS del ATP. Si la línea es monofásica no se requiere matriz de transformación.

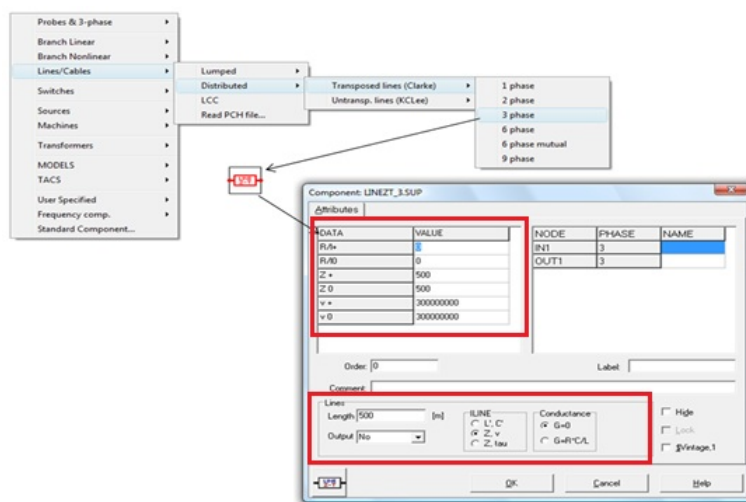


FIGURA 2.5.: Modelo Clarke para línea transpuesta.

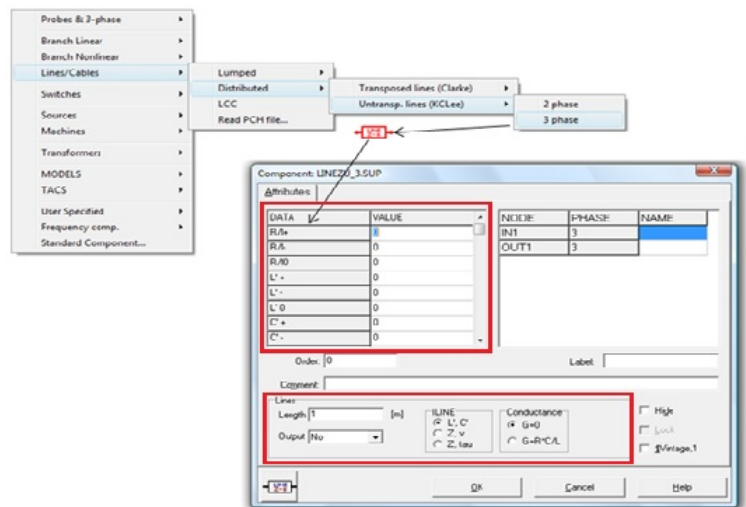


FIGURA 2.6.: Modelo K.C Lee para línea no transpuesta.

2.2.1.3. Parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia

Modelo J. Marti: Este modelo aproxima la impedancia característica y la constante de propagación por funciones racionales. El modelo presenta algunas limitaciones, ya que al igual que el modelo de Bergeron maneja matrices de transformación constante reales para la descomposición fase-modo; por lo tanto, también presenta inconvenientes de exactitud para líneas desbalanceadas, al igual que para cables subterráneos. En la figura 2.7 se puede observar los datos requeridos por dicho modelo en el ATP.

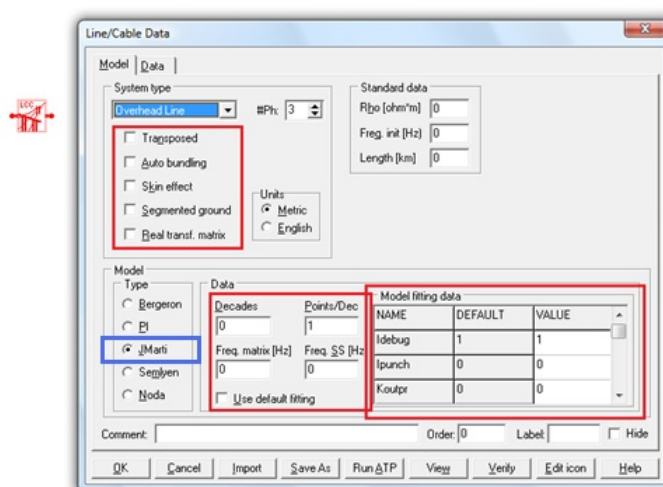


FIGURA 2.7.: Modelo JMarti con line constans (LCC).

Modelo Semlyen: Este modelo aproxima la impedancia característica y la constante de propagación de cada modo mediante dos exponenciales. La sencillez de las ecuaciones hace que, aún cuando los parámetros de la línea no presenten discontinuidades, la aproximación sea insuficiente, puesto que la solución exacta se aproxima, introduciendo así un error. Es posible que se discontinúe su inclusión en el ATP. En la figura 2.8 se puede observar los datos requeridos por dicho modelo en el ATP.

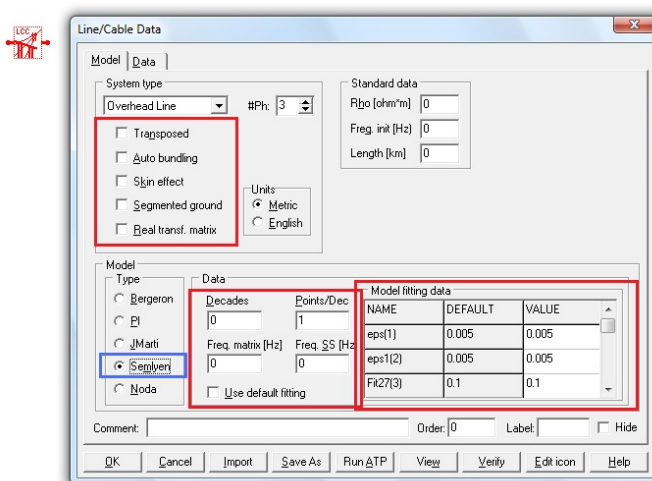


FIGURA 2.8.: Modelo Semylen con line constans (LCC).

Modelo T. Noda: Este modelo es desarrollado en el espacio fasorial, evitando los problemas encontrados con las matrices de transformación. Su eficiencia se basa en la implementación de un modelo matemático llamado ARMA (Auto Regressive Moving Average). En la figura 2.9 se puede observar los datos requeridos por dicho modelo en el ATP.

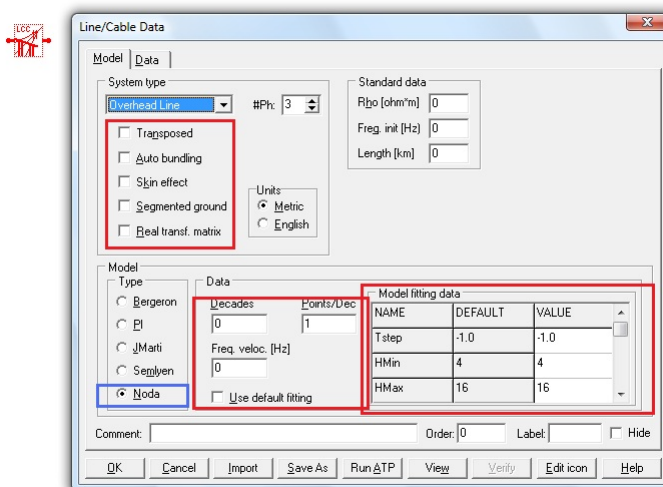


FIGURA 2.9.: Modelo T. Noda con line constans (LCC).

En todos los modelos LCC es necesario ingresar los parámetros de la línea: configuración (distancias entre conductores y altura de los mismos), resistencia, impedancia

inductiva como se muestra en la figura 2.10.

#	Ph.no.	React [ohm/km AC]	Rout [cm]	Resis [ohm/km AC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0	0

FIGURA 2.10.: Datos de parámetros de las líneas LCC.

2.2.1.4. Elemento LCC del ATP

Con este elemento se puede seleccionar entre un tipo de sistema y modelo para construir redes a través de constantes de líneas o parámetros de cables. A continuación se muestran los parámetros y datos a ingresar, para la simulación de cada modelo.

TIPOS DE SISTEMAS:

Líneas típicas generales [Overhead line]:

- Transposición [Transposed]: Se debe seleccionar esta opción si se desea un modelo con línea transpuesta.
- Auto bundling : Permite la selección automática de haz de conductores a partir de las constantes de líneas.
- Segmented ground wires: Si este parámetro no se encuentra seleccionado se asume que la línea esta continuamente puesta a tierra.
- Efecto piel [Skin effect]: Si el parámetro es seleccionado se asume efecto piel con $IX = 4$ en caso contrario se desprecia el efecto piel e $IX = 0$.
- Matriz de transformación real [Real trans. Matrix]: Si es seleccionado este parámetro, se asume que la matriz de transformación es real, es decir los vectores propios de la matriz de transformación giran cerca del eje real, de modo que su parte imaginaria se desprecia. Se recomienda para la simulación de transitorios. Si no es seleccionado éste parámetro se maneja una matriz de transformación compleja, recomendada para cálculos de estado estable.

- Métrico/Inglés [Metric/English]: Se selecciona el sistema de unidades de medidas entre el sistema internacional o el inglés.

Cables compacto. [Single core cable]:

- Snaking: Si este parámetro es seleccionado los cables se asumen transpuestos.
- Cables in: En esta sección se debe seleccionar si los cables van por el aire, por la superficie o subterráneos.
- Cable constants: Esta opción se selecciona si se desea pasar de ingresar los parámetros de los cables a ingresar constantes de cable. La opción de puesta a tierra es activada y la opción de conductancia y capacitancia se desactivaban (Add G y Add C), al seleccionar constantes de cable.
- Matrix output: Si se selecciona esta opción el programa imprime los datos de la matriz de impedancia y admitancia (R, wL y wC).
- Add G: Se selecciona esta opción cuando se permite conductancia entre los conductores.
- Add C: Se selecciona esta opción cuando se permite capacitancia entre los conductores.
- Num. cables: Especifica el número de cables en el sistema.

[Enclosing pipe]:

- Depth: Distancia positiva en metros entre el centro del ducto y la superficie.
- Rin: Radio interior del ducto en metros.
- Rout: Radio exterior del ducto en metros.
- Rins: Radio total en metros.
- Rho: Resistividad.
- Mu: Permeabilidad relativa.
- Eps(in): Permeabilidad relativa del aislamiento interior (Entre cables y ducto).
- Eps(out): Permeabilidad relativa del aislamiento exterior (Alrededor del ducto).

Existen datos estándares para todos los modelos, esto son: la resistividad del suelo [Rho], la frecuencia a la cual fueron calculados los parámetros en el caso de los modelos de Bergeron y de Pi o el bajo punto de frecuencia para los modelos JMarti, Noda y Semlyen [Freq. init] y por último la longitud la cual está dada en kilómetros o millas según el sistema de medida seleccionado.

TIPOS DE MODELOS:

Estas son las especificaciones que requiere el LCC de acuerdo al tipo de modelo, estos fueron los nombrados en el documento previamente:

- Bergeron: Parámetros constantes.
- PI: Equivalente π para líneas cortas.
- JMarti: Modelo dependiente de la frecuencia con matriz de constantes de transformación.
- Noda: Modelo dependiente de la frecuencia no se basa en constantes de cable.
- Semlyen: Modelo ajustado simple dependiente de la frecuencia se basa en parámetros de cables.

Los modelos JMarti, Noda y Semlyen son ajustados en un rango de frecuencias especificadas. Adicional a esto, los modelos JMarti y Semlyen sólo requieren la frecuencia donde la matriz de transformación es calculada y la frecuencia de estado estable para calcular la condición de estado estable. El modelo Noda necesita la frecuencia donde la velocidad de los modos naturales de propagación son calculados. Un valor superior a la frecuencia más alta de barrido es el usualmente más apropiado [Prikler and Hoidalén, 2002].

2.3. Descripción del circuito de prueba inicial

Como caso base se tomó el sistema de prueba IEEE 4 Node Test Feeder para sistemas de distribución de la IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY que se observa en la figura 2.11, ya que en este se conocen las medidas de tensión y de corriente en estado estable y por su configuración es sencillo calcular estas medidas para análisis de fallas, esto permite realizar simulaciones de los diferentes modelos de líneas en el ATP.

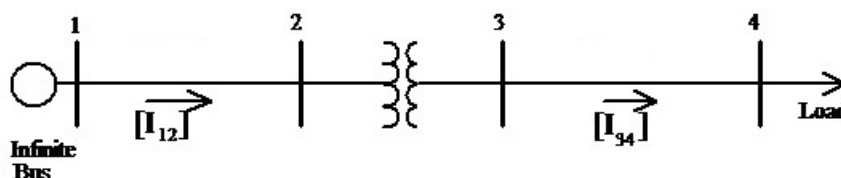


FIGURA 2.11.: Sistema de prueba IEEE 4 Node Test Feeder.

El circuito consta de dos líneas con una configuración horizontal asimétrica como la que se observa en la figura 2.12, en las cuales el conductor de fase es calibre 336,4 MCM. 26/7 y el neutro calibre 4/0 6/1 ACSR.

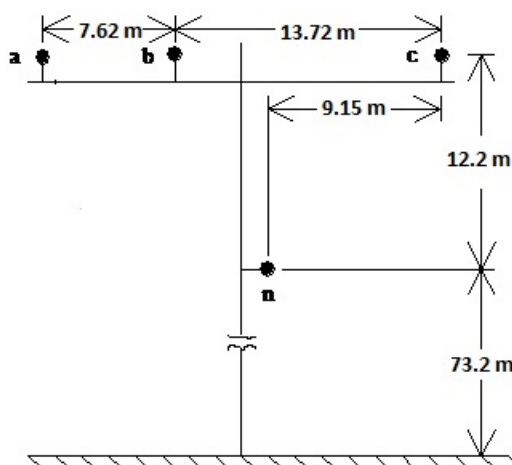


FIGURA 2.12.: Configuración de las líneas.

La tensión en la fuente generadora es de 12.47 kV y el transformador es conectado en Y-Y con los datos que se observan en la tabla 2.1.

CONEXIÓN	KVA	KVLL - Alta	KVLL - Baja	R - %	X - %
Y - Y	6,000	12,47	24,9	1,0	6,0

TABLA 2.1.: Datos del transformador.

El circuito tiene una carga trifásica equilibrada de 1800 W con un factor de potencia de 0.9 en atraso que se modelará como una carga de impedancia constante.

2.4. Simulación del circuito de prueba inicial

Para hacer la simulación del circuito de prueba inicial se realizaron dos montajes diferentes, uno para análisis en estado estable y otro para análisis de fallas en ATP, que se observan en las figuras 2.13 y 2.14, modelando cada elemento con los parámetros descritos anteriormente.

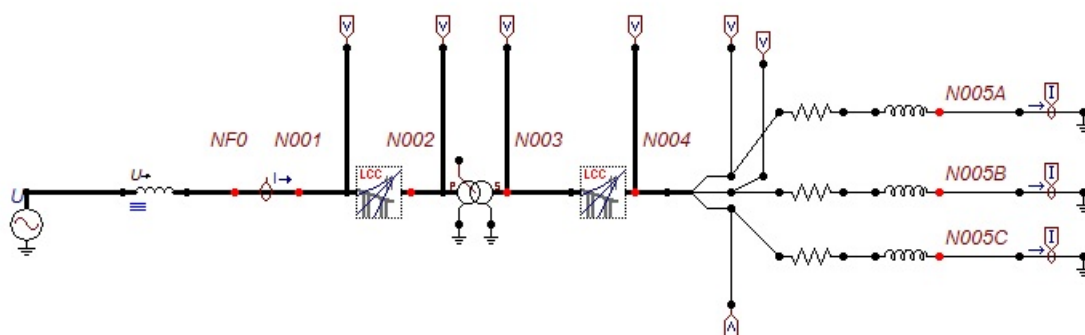


FIGURA 2.13.: Montaje del circuito de prueba inicial en ATP para análisis en estado estable.

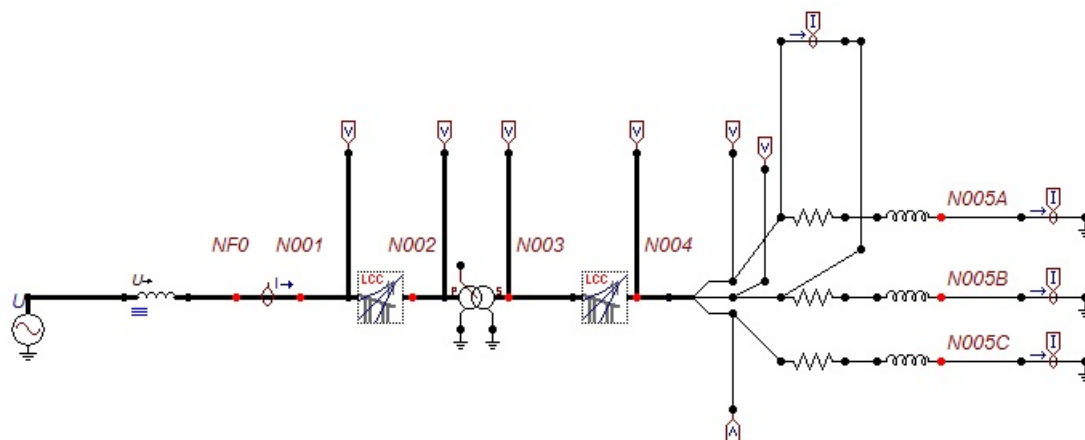


FIGURA 2.14.: Montaje del circuito de prueba inicial en ATP para análisis en estado de falla.

2.4.1. Modelo Bergeron

Para la simulación inicial del modelo de línea Bergeron se tomó una resistividad de terreno de 100 ohm-m y una frecuencia de operación de 60 Hz como se muestra en la figura 2.15.

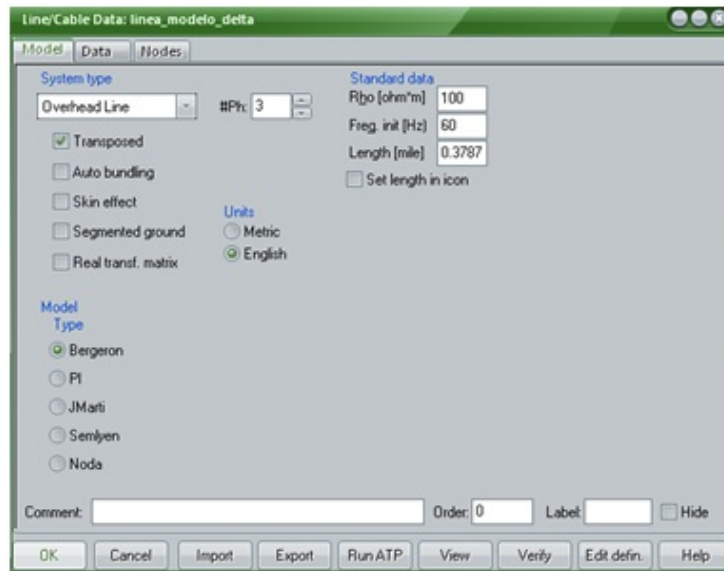


FIGURA 2.15.: Modelo Bergeron.

Y se introdujeron como datos de la línea los valores que se observan en la figura 2.16 que son los que corresponden a la configuración que se muestra en la figura 2.12.

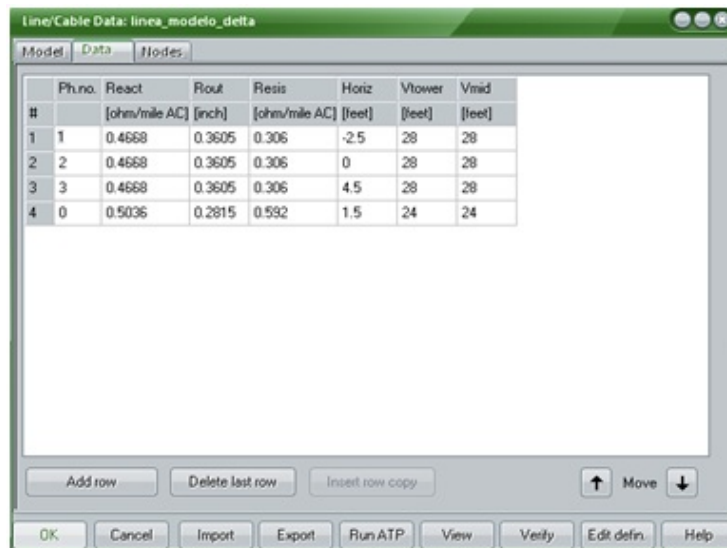


FIGURA 2.16.: Datos de la línea.

2.4.1.1. Estado estable

En la simulación del modelo Bergeron al igual que en los demás modelos se tomaron medidas de tensión y corriente en la salida de la subestación, la tensión en el nodo Nf01 y la corriente entre los nodos Nf0 y Nf01; éstas se compararán con los valores teóricos, para corroborar que tan bueno es el modelo y a su vez si se está simulando bien o existe algún problema en la interpretación de los datos de entrada del modelo.

Para analizar los datos de la simulación obtenida de ATP se utilizó la función *pl42mat* para exportar los datos a Matlab. Con los datos en Matlab se implementó una función para calcular el espectro de Fourier de las señales, con el fin de verificar la magnitud y el ángulo de las mismas, se tomó la componente fundamental y algunas otras frecuencias para descartar algún efecto importante en la señal.

Los resultados de la simulación del sistema, comparados con los resultados teóricos del sistema en estado estable se observan en la tabla 2.2.

	Valor teórico	Valor simulación	Errores %
Va	6906,27	6902,88	0,0491
Vb	6903,28	6902,88	0,0058
Vc	6901,36	6902,88	0,022
Ia	310,49	308,64	0,6
Ib	310,57	308,64	0,63
Ic	310,35	308,64	0,55
<Va	-90,01	-93,85	4,09
<Vb	149,99	146,15	2,63
<Vc	29,99	28,15	6,53
<Ia	-119,02	-123,95	3,98
<Ib	120,08	116,05	3,47
<Ic	0,98	-3,95	75,19

TABLA 2.2.: Errores modelo Bergeron en el circuito inicial en estado estable.

2.4.1.2. Estado de falla

Para el análisis en estado de falla se realizó inicialmente una falla bifásica entre las fases B y C en la barra 4 del sistema, y se tomaron las medidas en el punto de falla. Los resultados de la simulación del sistema comparados con los resultados teóricos del sistema en estado de falla se observan en la tabla 2.3.

	Valor teórico	Valor simulación	Errores %
Va	13077,4	12938,4	1,07
Vb	6538,7	6469,2	1,07
Vc	6538,7	6469,2	1,07
Ia	155,74	154,72	0,66
Ib	77,87	77,36	0,66
Ic	77,87	77,36	0,66
<Va	-91,81	-98,11	6,64
<Vb	88,19	81,88	7,71
<Vc	88,19	81,88	7,71
<Ia	-117,47	-123,95	5,23
<Ib	62,53	56,03	11,6
<Ic	62,53	56,03	11,6

TABLA 2.3.: Errores modelo Bergeron en el circuito inicial en estado de falla.

2.4.2. Modelo Pi

Para la simulación inicial del modelo de línea Pi, se tomaron los mismos parámetros del modelo Bergeron, una resistividad de terreno de 100 ohm-m y una frecuencia de operación de 60 Hz, como se muestra en la figura 2.17.

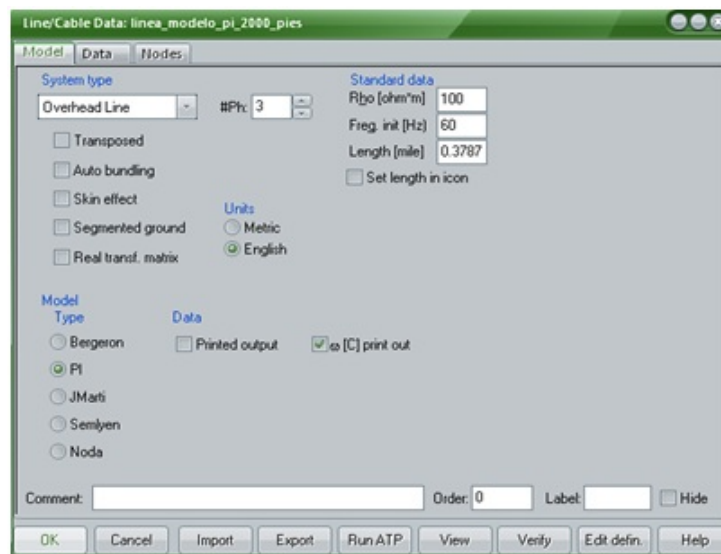


FIGURA 2.17.: Modelo Pi.

Los datos para la configuración de la línea son los mismos que para la línea Bergeron.

2.4.2.1. Estado estable

Se realizó la misma simulación que con el modelo Bergeron obteniendo los resultados mostrados en la tabla 2.4 y comparados con los resultados teóricos del sistema.

	Valor teórico	Valor simulación	Errores %
Va	6907,29	6902,88	0,06
Vb	6902,85	6902,88	0
Vc	6900,77	6902,88	0,03
Ia	309,92	308,64	0,41
Ib	311,09	308,64	0,79
Ic	310,41	308,64	0,57
<Va	-90,12	-93,85	3,97
<Vb	149,84	146,15	2,52
<Vc	29,89	28,15	6,18
<Ia	-119,77	-123,95	3,97
<Ib	120,14	116,05	3,52
<Ic	0,08	-3,95	97,97

TABLA 2.4.: Errores modelo Pi en el circuito inicial en estado estable.

2.4.2.2. Estado de falla

Para el análisis de falla se realizó la misma simulación que en el modelo Bergeron obteniendo los resultados mostrados en la tabla 2.5 y comparados con los resultados teóricos del sistema.

	Valor teórico	Valor simulación	Errores %
Va	13052,2	12938,4	0,88
Vb	6527,87	6469,2	0,91
Vc	6527,87	6469,2	0,91
Ia	155,57	154,72	0,55
Ib	77,80	77,36	0,57
Ic	77,80	77,36	0,57
<Va	-91,49	-98,11	6,75
<Vb	87,92	81,88	7,38
<Vc	87,92	81,88	7,38
<Ia	-117,18	-123,95	5,46
<Ib	62,23	56,03	11,07
<Ic	62,23	56,03	11,07

TABLA 2.5.: Errores modelo Pi en el circuito inicial en estado de falla.

2.4.3. Modelo JMarti

El modelo JMarti es más complejo de simular dada la gran cantidad de datos de entrada que solicita, los cuales le permiten hacer una variación en un rango de frecuencias, lo que ayuda a obtener mejores resultados en el análisis de fallas.

A saber, los parámetros adicionales a introducir son: frecuencia inicial, décadas de incremento y puntos por década. Estos se deben ingresar para permitir un rango de frecuencias sobre el cual trabajar.

El modelo de JMarti se simuló con los valores de resistividad 100 ohms-m, freq init 0.01 Hz, 8 Décadas, 10 puntos por década, freq matriz 5000 (los valores de décadas y puntos por década así como freq matriz son recomendados en el rule book del ATP) y frecuencia de estado estable 60 Hz como se muestra en la figura 2.18. Además se tiene en cuenta el efecto piel que es importante para modelos dependientes de frecuencias, ya que este efecto produce una variación en la resistencia eléctrica de un conductor debido a la variación de la frecuencia. Y adicionalmente una opción que permite que la matriz de transformación de los datos a valores modales se aproximen a valores reales que es recomendado para este modelo.

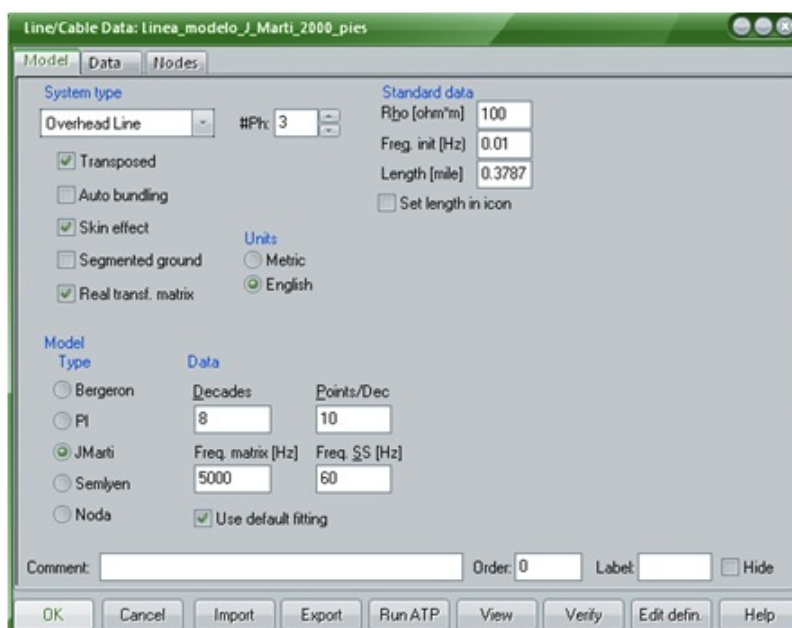


FIGURA 2.18.: Modelo JMarti.

2.4.3.1. Estado estable

Se realizó la misma simulación con el modelo Bergeron obteniendo los resultados mostrados en la tabla 2.6 y comparados con los resultados teóricos del sistema.

	Valor teórico	Valor simulación	Errores %
Va	6904,72	6902,88	0,026
Vb	6901,68	6902,88	0,017
Vc	6899,73	6902,88	0,045
Ia	311,33	308,64	0,87
Ib	311,41	308,64	0,89
Ic	311,19	308,64	0,82
<Va	-90,14	-93,85	3,95
<Vb	149,83	146,15	2,51
<Vc	29,87	28,15	6,11
<Ia	-119,93	-123,95	3,24
<Ib	120,03	116,05	3,42
<Ic	0,03	-3,95	99,24

TABLA 2.6.: Errores modelo JMarti en el circuito inicial en estado estable.

2.4.3.2. Estado de falla

Para el análisis de falla se realizó la misma simulación que en el modelo Bergeron obteniendo los resultados mostrados en la tabla 2.7 y comparados con los resultados teóricos del sistema.

	Valor teórico	Valor simulación	Errores %
Va	13115,0	12938,4	1,39
Vb	6557,51	6469,2	1,36
Vc	6557,51	6469,2	1,36
Ia	156,17	154,72	0,93
Ib	78,09	77,36	0,94
Ic	78,09	77,36	0,94
<Va	-91,85	-98,11	6,38
<Vb	85,15	81,88	3,99
<Vc	88,15	81,88	3,99
<Ia	-117,5	-123,95	5,2
<Ib	62,5	56,03	11,55
<Ic	62,5	56,03	11,55

TABLA 2.7.: Errores en el modelo JMarti en el circuito inicial en estado de falla.

2.4.4. Modelo Clarke

El modelo de Clarke a diferencia de los otros modelos, los datos de entrada son los parámetros de Clarke de la línea y no su configuración, como lo hacían los otros modelos. Es por esto que se realizó un cálculo previo con ayuda de Matlab, para obtener la matriz de impedancias por medio del modelo de Carson de forma que esta sea lo más precisa que se pueda, ya que este modelo, como se observó anteriormente, tiene en cuenta efectos tales como la resistividad del terreno. Después de realizada la transformación a los parámetros de Clarke con ayuda de la matriz de transformación de Clarke se introdujeron al modelo, tal y como se ve en la figura 2.19.

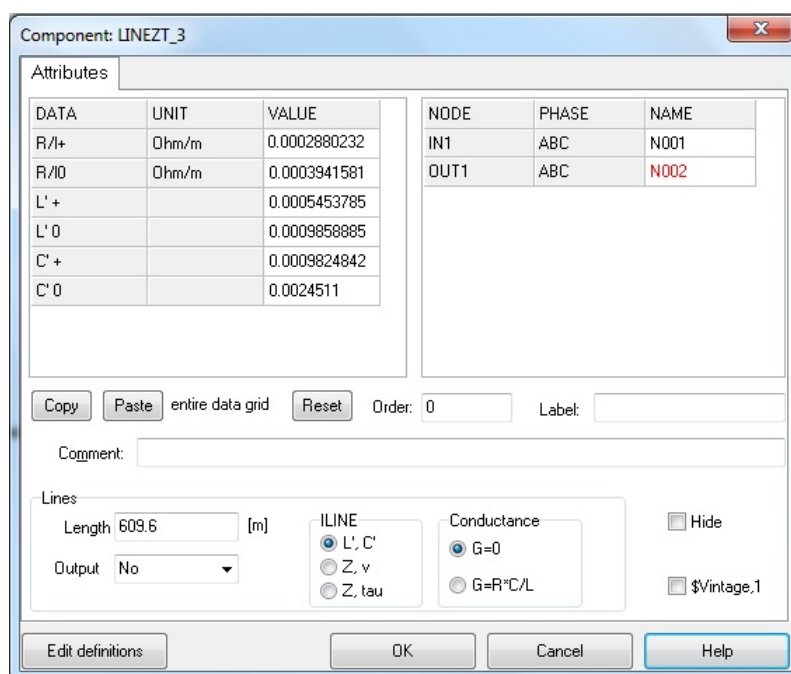


FIGURA 2.19.: Modelo Clarke.

2.4.4.1. Estado estable

Para la simulación del modelo de Clarke en estado estable en el circuito de prueba inicial se calcularon los parámetros de Clarke teniendo en cuenta una resistividad del terreno de 100 ohm/m y frecuencia de operación de 60 Hz. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 2.8.

	Valor teórico	Valor simulación	Errores %
Va	6906,4	6902,88	0,05
Vb	6903,6	6902,88	0,01
Vc	6901,8	6902,88	0,015
Ia	308,73	308,64	0,029
Ib	308,85	308,64	0,068
Ic	308,61	308,64	0,009
<Va	-90,1	-93,85	3,99
<Vb	149,9	146,15	2,56
<Vc	29,9	28,15	6,21
<Ia	-120	-123,95	3,18
<Ib	119,96	116,05	3,36
<Ic	-0,03	-3,95	99,24

TABLA 2.8.: Errores modelo Clarke en el circuito inicial en estado estable.

2.4.4.2. Estado de falla

Para el estado de falla se hizo la misma falla que con los otros modelos, una falla bifásica entre las fases b y c, y la línea nuevamente tuvo que calcularse los parámetros de Clarke para los datos de entrada, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 2.9.

	Valor teórico	Valor simulación	Errores %
Va	13004	12938,4	0,5
Vb	6502,2	6469,2	0,51
Vc	6502,2	6469,2	0,51
Ia	154,85	154,72	0,08
Ib	77,42	77,36	0,07
Ic	77,42	77,36	0,07
<Va	-92	-98,11	6,22
<Vb	88,1	81,88	7,59
<Vc	88,1	81,88	7,59
<Ia	-117,52	-123,95	5,18
<Ib	62,47	56,03	11,49
<Ic	62,47	56,03	11,49

TABLA 2.9.: Errores modelo Clarke en el circuito inicial en estado de falla.

2.4.5. Modelo Noda

El modelo de Noda realiza la solución en el dominio de la frecuencia, a diferencia de JMarti que realiza la solución en el dominio del tiempo para lo que usa una matriz de transformación modal. Con la solución propuesta por Noda se evita el uso de esta matriz de transformación y posibles complicaciones debido a ésta, para circuitos con frecuencias bajas. Al igual este modelo disminuye los tiempos de simulación, con la ayuda de una opción que permite escoger un paso de cálculo diferente para cada circuito, lo cual hace que a una variación en el circuito se tenga que escoger un nuevo paso de cálculo, esto hace el modelo más complicado para su simulación. Puesto que el interés en este proyecto es el estado estable del circuito y el estado estable de las fallas más no la parte transitoria de las fallas, no se tendrá inconvenientes por baja frecuencia, además la disminución en el tiempo de simulación con el modelo de Noda es irrelevante, ya que la disminución es del orden de los micro segundos. Por estas razones, por la aproximación en la solución del modelo JMarti según la revisión bibliográfica realizada en donde se ve que el modelo permite la variación en un rango de frecuencias y por la diferencia en la complejidad que tienen los dos modelos para su simulación, se concluye que este modelo no es relevante para la validación de las líneas en sistemas de distribución cuando de estado estable se trata.

2.5. Selección del circuito de prueba

Para alcanzar los objetivos trazados en este proyecto se tomaron dos circuitos reales, los cuales fueron suministrados por la empresa de Energía de Bogotá CODENSA.

Para la selección de los circuitos se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Que el circuito tenga una gran cantidad de líneas de transmisión y pocas cargas para que estas no afecten la validación de las líneas.
- Que el circuito tenga diferentes configuraciones de líneas.
- Que se conozcan las medidas de tensión y de corriente del circuito en estado estable y en el estado estable de la falla en la subestación.

Teniendo en cuenta los anteriores criterios se seleccionó el circuito Albán y como un segundo circuito para respaldo de las pruebas el circuito Meissen. Estos son circuitos de distribución ubicados en el departamento de Cundinamarca.

2.5.1. Circuito Albán

El circuito Albán está alimentado de la subestación Villeta, y conecta los municipios de Villeta con Vianí, tiene un tramo desenergizado, el cuál sirve como respaldo para energizar algunas de las cargas en caso de falla. El circuito esta situado en un área que es predominantemente plana, sólo con una serie de zonas montañosas. Consta de 332 tramos de líneas trifásicas trifilares con conductor 266.8 ACSR desnudo, en las cuales se cuenta con 6 configuraciones diferentes, las cuales se muestran en las figuras 2.20 a 2.25, y cuyas distancias están dadas en metros (m). Las configuraciones observadas en este circuito son:

- Configuración Triangular asimétrica 1:

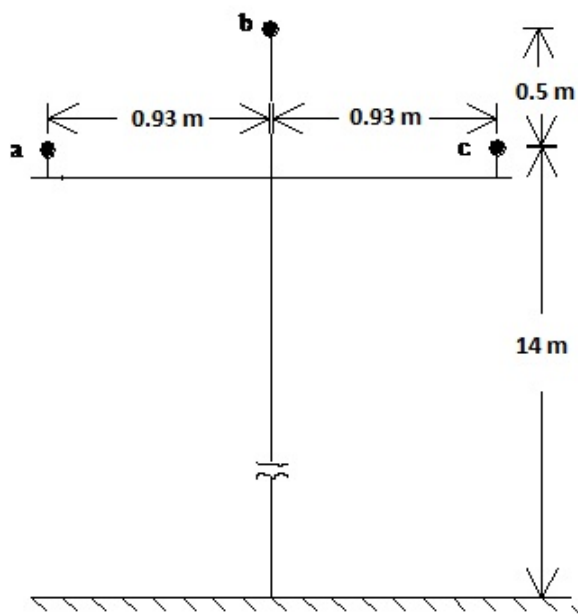


FIGURA 2.20.: Configuración de línea Triangular asimétrica 1.

- Configuración de línea Triangular asimétrica 2:

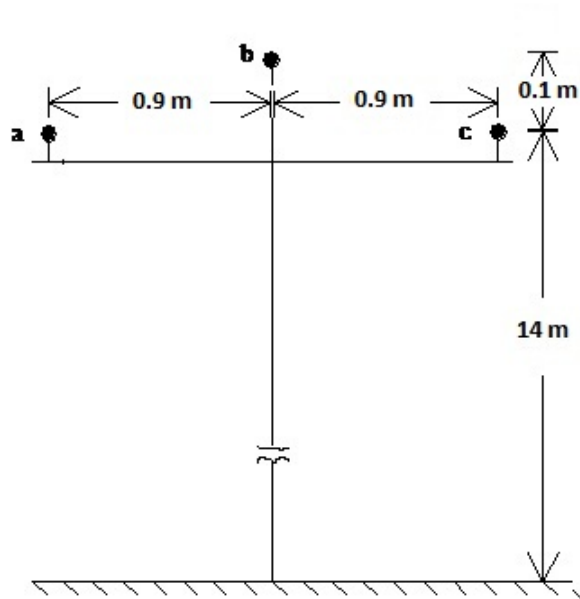


FIGURA 2.21.: Configuración de línea Triangular asimétrica 2.

- Configuración de línea vertical:

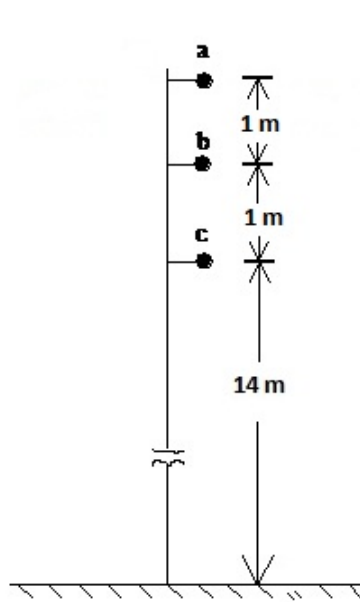


FIGURA 2.22.: Configuración de línea vertical.

- Configuración horizontal suspensión dos estructuras:

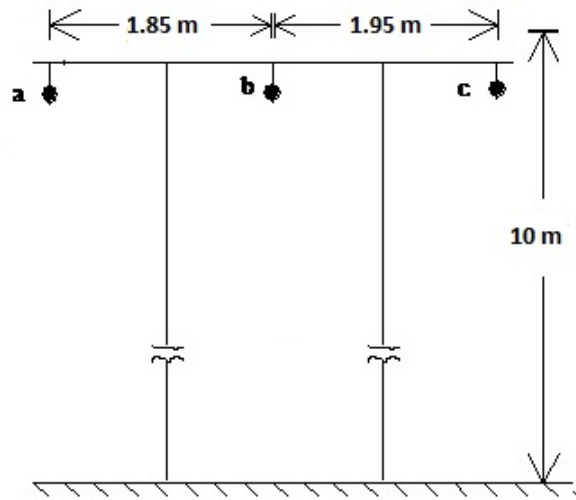


FIGURA 2.23.: Configuración de línea horizontal suspensión dos estructuras.

- Configuración horizontal de paso dos estructuras:

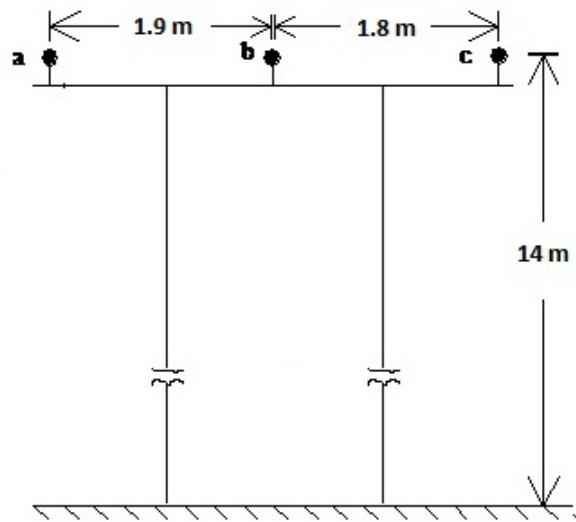


FIGURA 2.24.: Configuración de línea horizontal de paso dos estructuras.

- Configuración horizontal de paso tres estructuras:

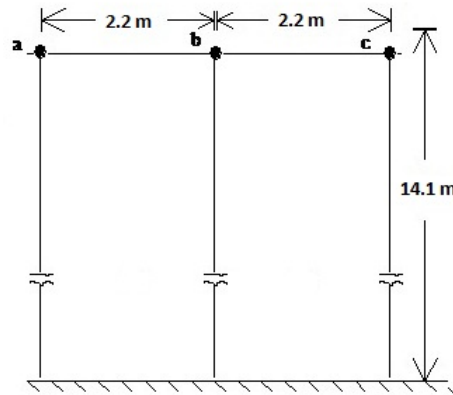


FIGURA 2.25.: Configuración de línea horizontal de paso tres estructuras.

Además de las líneas mencionadas, el circuito Albán tiene cuatro tramos de red compacta con conductor de aluminio con cubierta aislante y dos capas internas de polietileno calibre 266, y un pequeño tramo de 250 metros de red subterránea con conductor trifásico calibre 2/0 XLPE a la salida de la subestación.

El circuito además cuenta con las siguientes cargas:

- Carga trifásica conectada en delta con potencia $S= 161,732$ kVA y factor de potencia $F_p=0,91$.
- Carga trifásica conectada en delta con potencia $S= 664,278$ kVA y factor de potencia $F_p=0,91$.
- Carga trifásica conectada en delta con potencia $S= 486,276$ kVA y factor de potencia $F_p=0,7$.
- Carga trifásica conectada en delta con potencia $S= 142,898$ kVA y factor de potencia $F_p=0,8$.
- Carga trifásica conectada en delta con potencia $S= 122,587$ kVA y factor de potencia $F_p=0,91$.
- Carga trifásica conectada en delta con potencia $S= 131,846$ kVA y factor de potencia $F_p=0,91$.
- Carga trifásica conectada en delta con potencia $S= 5000,023$ kVA y factor de potencia $F_p=0,95$.

La topología del circuito se puede observar en la figura 2.26.

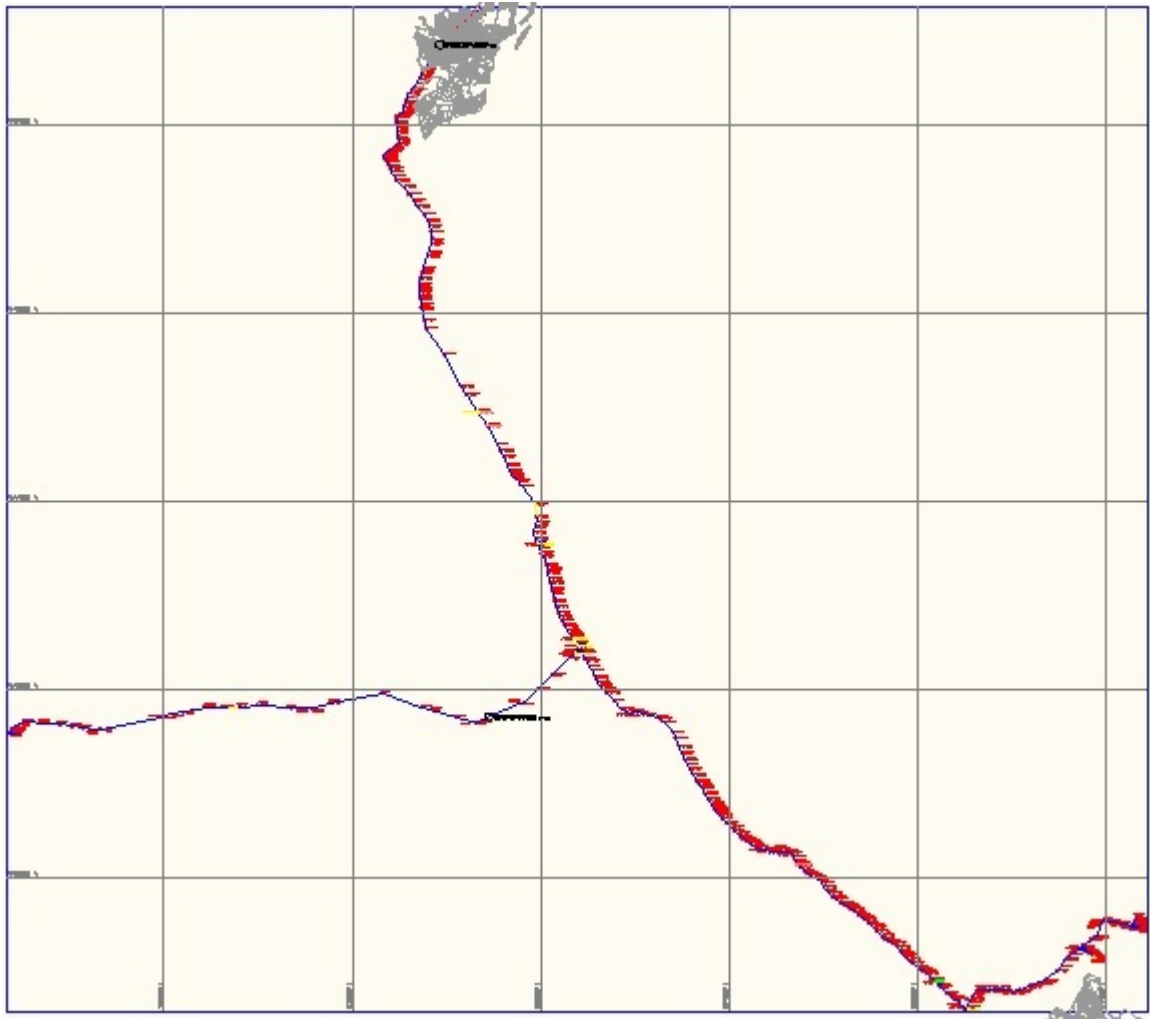


FIGURA 2.26.: Circuito Albán.

2.5.2. Circuito Meissen

El circuito Meissen está alimentado de la subestación Tunal. Esta ubicado en el área urbana de la ciudad de Bogotá, lo cual hace que el terreno sea plano. Consta de 88 tramos de líneas trifásicas trifilares con conductores 2/0 ACSR y 4/0 ACSR, en las cuales se cuenta con 3 configuraciones diferentes las cuales se muestran en las figuras 2.27 a 2.29 y cuyas distancias están dadas en metros (m).

- Configuración horizontal asimétrica:

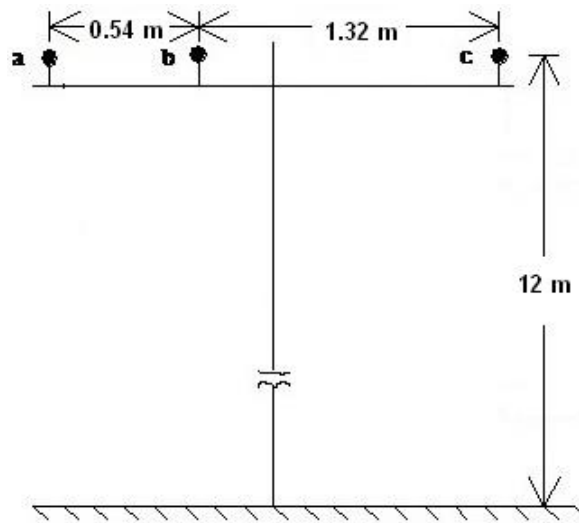


FIGURA 2.27.: Configuración de línea horizontal de paso.

- Configuración horizontal simétrica:

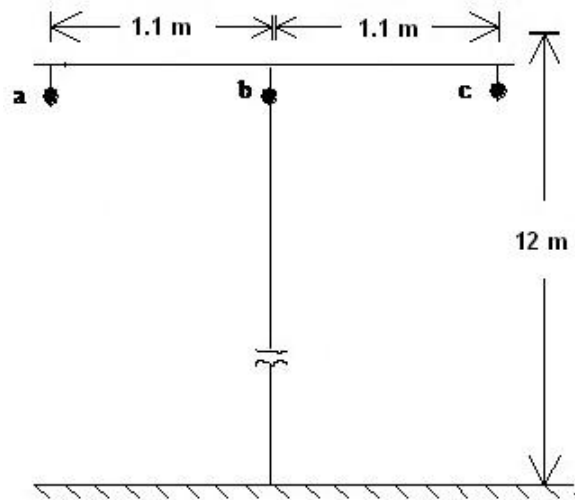


FIGURA 2.28.: Configuración de línea horizontal en suspensión.

- Configuración horizontal en bandera:

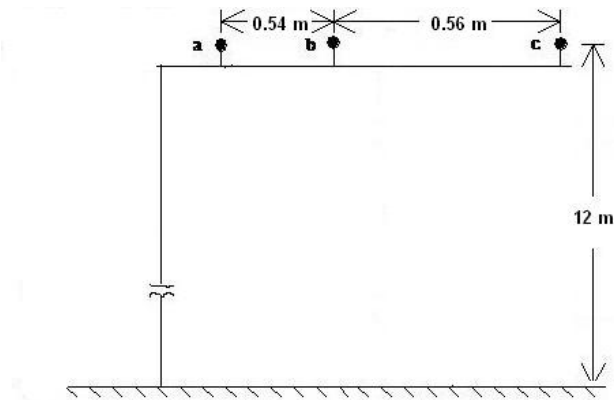


FIGURA 2.29.: Configuración de línea horizontal en bandera.

Además el circuito consta de dos tramos de red subterránea, uno ubicado a la salida de la subestación y otro en el centro del circuito, ambos tramos con conductor calibre 4/0 XLPE.

La topología del circuito se puede observar en la figura 2.30.

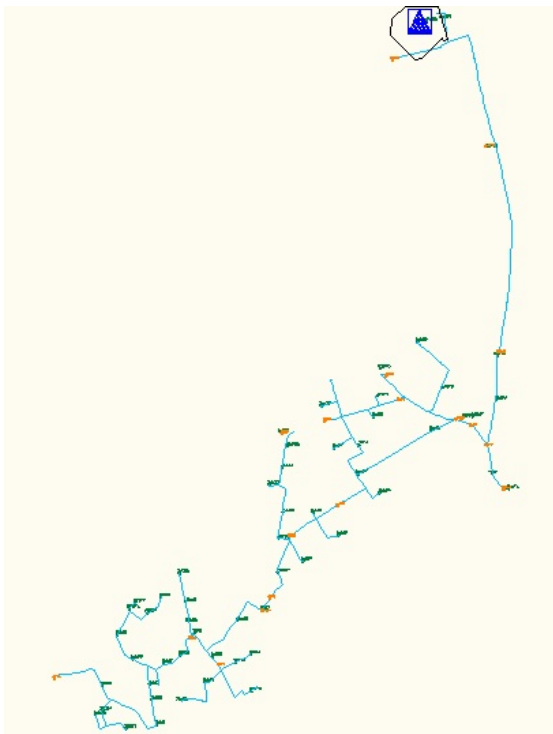


FIGURA 2.30.: Circuito Meissen.

2.6. Simulación de los circuitos de prueba

2.6.1. Simulación del circuito Albán y Meissen

Para la simulación de los circuitos se montaron los diferentes elementos en el software ATP. Para las líneas se utilizó el campo Lines/Cable Constants (LCC), en el cuál se encuentran los diferentes modelos de líneas trabajados en el presente proyecto, allí se permite introducir los parámetros de la línea tales como la configuración, datos del conductor y longitud. Las cargas fueron modeladas como impedancia constante, obteniendo así los circuitos que se observa en las figuras 2.31 y 2.32. El circuito Albán se trabajó con una reducción en el número de estructuras, se tomaron aquellas estructuras que tenían la misma configuración y que estaban seguidas una de otra para unificar en una sola estructura con restricción de vanos máximos de 1 kilómetro.

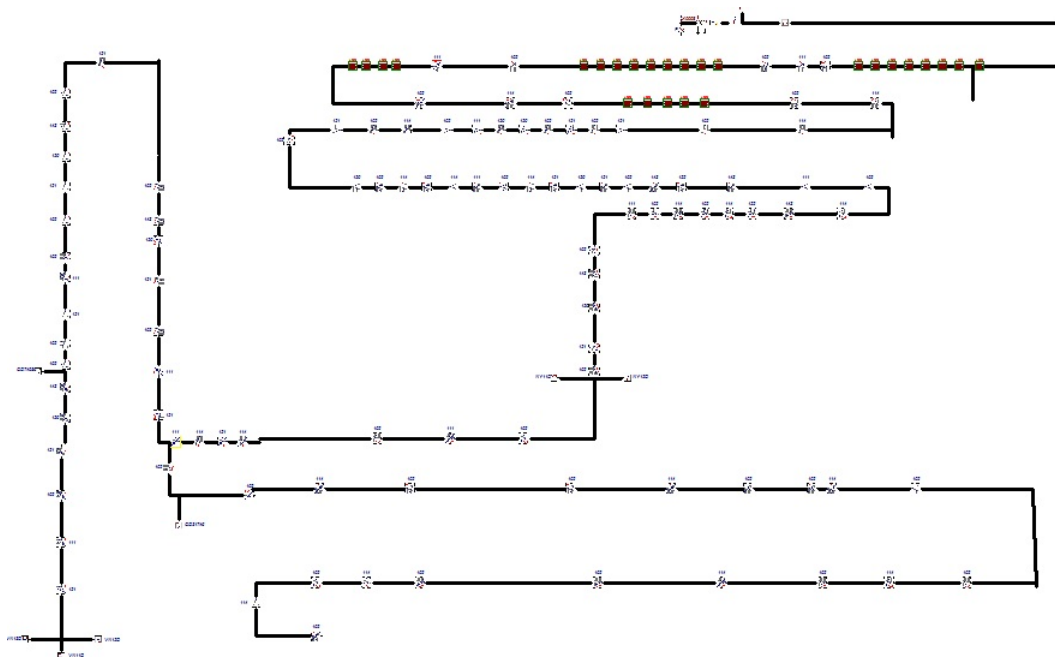


FIGURA 2.31.: Montaje del circuito Albán.

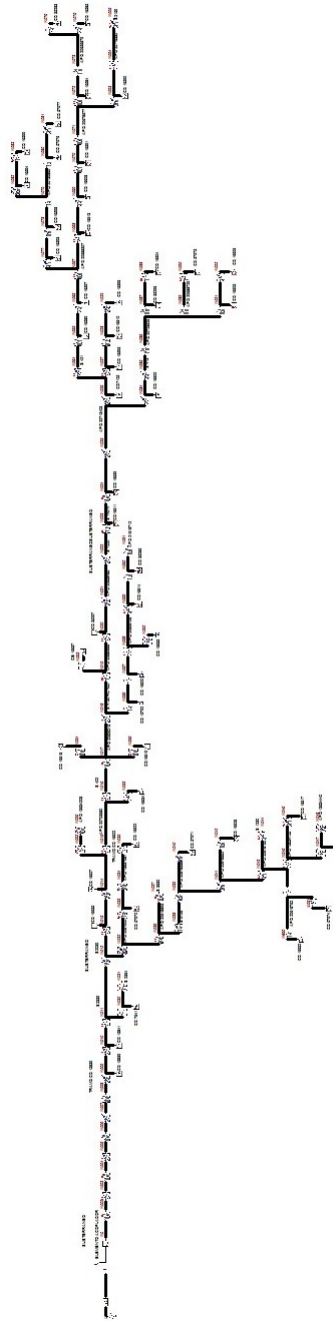


FIGURA 2.32.: Montaje del circuito Meissen.

3. Pruebas y análisis de resultados

Para la validación de los modelos de líneas seleccionados se realizaron simulaciones en las cuales se representan las diferentes condiciones a las que están expuestas las líneas en sistemas de distribución, teniendo como parámetros importantes en las líneas los siguientes:

- Resistividad del terreno.
- Distancia entre conductores (efecto del viento y cambios en la temperatura que acerca o aleja los conductores de los extremos).
- Variación de la configuración (efecto generado por el cambio de configuración de una estructura a otra).
- Variación de la longitud del conductor (efecto en la variación de la longitud real del conductor, debido a los supuestos hechos o cambios en la temperatura).

Los resultados que se mostrarán en las diferentes pruebas para el circuito Albán, son los obtenidos con el modelo Pi debido a la similitud de los resultados de este modelos con respecto a los otros. Los resultados de los otros modelos se presentan en el anexo A.

3.1. Circuito de prueba inicial

Primero se trabajó el circuito de prueba inicial con el fin de ver el efecto que tienen cada uno de estos parámetros en los diferentes modelos de líneas seleccionados tanto en estado estable como en estado de falla.

3.1.1. Estado estable

3.1.1.1. Modelo Pi

Variación de la resistividad del terreno: Para observar el efecto que tiene la resistividad del terreno en el modelo de línea Pi y considerando 100 ohm-m como el valor nominal, se realizó un barrido a partir de este valor con variaciones del 10 %, hacía arriba y hacía abajo. Los resultados obtenidos se compararon con los resultados de la simulación a valor nominal observando que no hay variación debido a este parámetro como se aprecia en la tabla 3.1 en la cual muestra la comparación con un valor extremo de 10 ohm-m. Al considerar otro valor extremo, como lo es una resistividad de 1000 Ohm-m, los resultados son similares.

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 10 [ohm-m]	Errores %
Va	6907,29	6907,29	0
Vb	6902,85	6902,85	0
Vc	6900,77	6900,77	0
Ia	309,92	309,92	0
Ib	311,09	311,09	0
Ic	310,41	310,41	0
<Va	-90,12	-90,12	0
<Vb	149,84	149,84	0
<Vc	29,89	29,89	0
<Ia	-119,77	-119,77	0
<Ib	120,14	120,14	0
<Ic	0,08	0,08	0

TABLA 3.1.: Errores modelo Pi del circuito inicial, variando la resistividad del terreno en estado estable.

Variación de la distancia entre conductores: Para observar el efecto que tiene la variación de la distancia entre conductores en el modelo de línea Pi se realizaron simulaciones en las cuales se hicieron acercamientos de los conductores externos hacia el centro en variaciones de 10 % hasta llegar al 50 % de su distancia, observando que este parámetro no es relevante en el modelo, como se ve en los resultados de la tabla 3.2.

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	6907,29	6908,25	0
Vb	6902,85	6902,35	0
Vc	6900,77	6900,95	0
Ia	309,92	309,84	0
Ib	311,09	311,59	0,1607
Ic	310,41	310,37	0
<Va	-90,12	-90,12	0
<Vb	149,84	149,83	0
<Vc	29,89	29,88	0
<Ia	-119,77	-119,66	0
<Ib	120,14	120,13	0
<Ic	0,08	0,09	12,5

TABLA 3.2.: Errores modelo Pi del circuito inicial, variando la distancia entre conductores estado estable.

Variación de la configuración: La variación de la configuración simula el efecto de tener en cuenta el cambio de configuración en la línea de una estructura a otra, cuando este cambio es significativo. Para esto se realizaron cambios como el que se observa en la figura 3.1 para este tipo de líneas, observando que no produce variación en los resultados como se ve en la tabla 3.3.

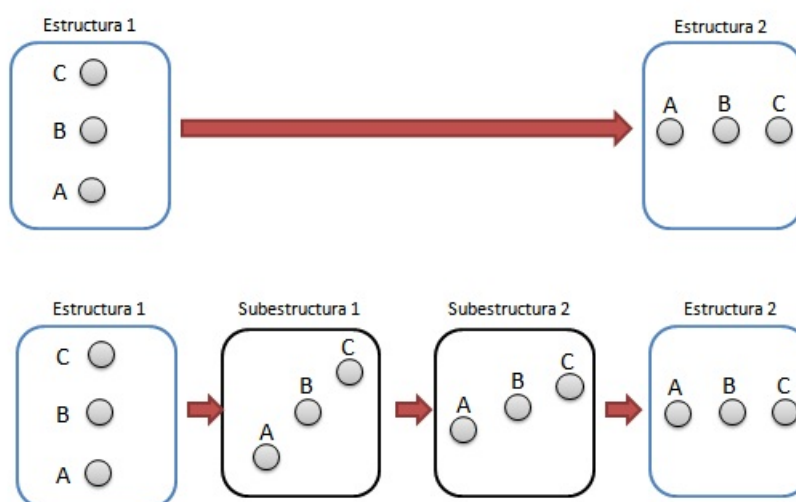


FIGURA 3.1.: Cambio de configuración de la línea.

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6907,29	6907,68	0
Vb	6902,85	6903,26	0
Vc	6900,77	6900,35	0
Ia	309,92	310,98	0,342
Ib	311,09	310,86	0,0739
Ic	310,41	310,58	0,0548
<Va	-90,12	-90,13	0
<Vb	149,84	149,83	0
<Vc	29,89	29,8	0
<Ia	-119,77	-119,71	0
<Ib	120,14	120,15	0
<Ic	0,08	0,04	50

TABLA 3.3.: Errores modelo Pi del circuito inicial al variar la configuración en estado estable.

Variación de la longitud del conductor: La variación de la longitud del conductor tiene en cuenta el incremento en la longitud real debido a los efectos de cambio de la temperaturas y flecha, para esto se realizaron los cálculos previamente en una función de Matlab para diferentes condiciones de flechas y temperaturas, se trabajo haciendo variación de cada uno de estos parámetros individualmente y finalmente los dos al tiempo para con esto tomar el incremento y realizar las pruebas obteniendo que este parámetro no presenta variación en los resultados como se puede ver en la tabla 3.4.

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6907,29	6906,9	0
Vb	6902,85	6903	0
Vc	6900,77	6901	0
Ia	309,92	310,09	0,0542
Ib	311,09	311	0,0289
Ic	310,41	310,31	0,0322
<Va	-90,12	-90,12	0
<Vb	149,84	149,84	0
<Vc	29,89	29,89	0
<Ia	-119,77	-119,79	0
<Ib	120,14	120,15	0
<Ic	0,08	0,09	12,5

TABLA 3.4.: Errores modelo Pi del circuito inicial al variar la longitud del conductor en estado estable.

3.1.2. Estado de falla

Para el análisis en estado de falla se realizaron las mismas pruebas que para el análisis en estado estable, se realizó la variación de parámetros para cada uno de los modelos de líneas con el circuito de la falla bifásica entre las fases A y B realizados anteriormente.

3.1.2.1. Modelo Pi

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 10 [ohm-m]	Errores %
Va	6913,06	6913,04	0,0002
Vb	4808,29	4808,30	0,0002
Vc	4636,61	4636,64	0,0006
Ia	310,17	310,17	0
Ib	1802,62	1802,62	0
Ic	1564,48	1564,47	0,0006
<Va	-90,15	-90,15	0
<Vb	131,91	131,91	0
<Vc	45,90	45,90	0
<Ia	-119,07	-119,07	0
<Ib	96,92	96,92	0
<Ic	-76,29	-76,29	0

TABLA 3.5.: Errores modelo Pi del circuito inicial al variar la resistividad del terreno en estado de falla.

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	6913,06	6917,40	0,062
Vb	4808,29	4806,29	0,041
Vc	4636,61	4636,20	0,008
Ia	310,17	310,20	0,009
Ib	1802,62	1804,11	0,082
Ic	1564,48	1565,29	0,051
<Va	-90,15	-90,15	0
<Vb	131,91	131,86	0,037
<Vc	45,90	45,92	0,043
<Ia	-119,07	-119,10	0,025
<Ib	96,92	96,94	0,020
<Ic	-76,29	-76,28	0,013

TABLA 3.6.: Errores modelo Pi del circuito inicial al variar la distancia entre conductores en estado de falla.

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6913,06	6912,78	0,004
Vb	4808,29	4806,21	0,043
Vc	4636,61	4632,05	0,098
Ia	310,17	310,15	0,003
Ib	1802,62	1805,27	0,147
Ic	1564,48	1567,25	0,177
<Va	-90,15	-90,15	0
<Vb	131,91	131,86	0,037
<Vc	45,90	45,92	0,043
<Ia	-119,07	-119,10	0,025
<Ib	96,92	96,94	0,020
<Ic	-76,29	-76,28	0,013

TABLA 3.7.: Errores modelo Pi circuito inicial variación de la configuración estado de falla.

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6913,06	6912,06	0,014
Vb	4808,29	4807,25	0,021
Vc	4636,61	4634,63	0,042
Ia	310,17	310,16	0,003
Ib	1802,62	1806,65	0,223
Ic	1564,48	1566,52	0,130
<Va	-90,15	-90,15	0
<Vb	131,91	131,88	0,022
<Vc	45,90	45,91	0,021
<Ia	-119,07	-119,09	0,016
<Ib	96,92	96,93	0,010
<Ic	-76,29	-76,29	0

TABLA 3.8.: Errores modelo Pi del circuito inicial al variar la longitud del conductor estado de falla.

En los resultados de las tablas 3.5 a 3.8 y en los resultados presentados en el anexo A, se observa que estos parámetros no son relevantes para los modelos de líneas trabajados en estado de falla debido a las variaciones tan pequeñas que se producen.

3.2. Circuito Albán

El circuito Albán, como se describió anteriormente, es el primero de los dos circuitos de prueba reales con que se trabajó. Inicialmente se presentarán una serie de pruebas al circuito en las cuales se pretende verificar la verdadera influencia de parámetros en las líneas eléctricas al realizar su variación, en este caso se quiere verificar que tan importante puede ser que el circuito tenga una cantidad grande de líneas y no solo sean dos, como se implementó inicialmente.

3.2.1. Circuito Albán Estado estable

Igual que se hizo con el circuito de prueba inicial, en el circuito Albán se tomaron los diferentes modelos de líneas para realizar simulaciones haciendo la variación de parámetros que se consideran relevantes para las líneas eléctricas. Para este caso no solo se realizaron variaciones a los parámetros en porcentajes de los valores estándar, también se hicieron variaciones en porcentajes del número de líneas del circuito, inicialmente unas pocas y se incremento gradualmente hasta llegar a la totalidad del circuito.

3.2.1.1. Modelo Pi

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	19436,4	19436,6	0,001
Vb	19440,0	19440,2	0,002
Vc	19432,6	19432,8	0,001
Ia	103,35	103,32	0,01
Ib	103,84	103,82	0,001
Ic	104,19	104,16	0,002
<Va	-90,007	-90,006	0,002
<Vb	149,97	149,97	0,001
<Vc	29,966	29,967	0,001
<Ia	-110,74	-110,73	0
<Ib	129,57	129,58	0,01
<Ic	9,243	9,248	0,02

TABLA 3.9.: Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno Albán en estado estable.

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	19436,4	19436,6	0,001
Vb	19440,0	19440,2	0,002
Vc	19432,6	19432,8	0,001
Ia	103,35	103,32	0,01
Ib	103,84	103,82	0,001
Ic	104,19	104,16	0,002
<Va	-90,007	-90,006	0,002
<Vb	149,97	149,97	0,001
<Vc	29,966	29,967	0,001
<Ia	-110,74	-110,73	0
<Ib	129,57	129,58	0,01
<Ic	9,243	9,248	0,02

TABLA 3.10.: Errores modelo Pi al variar de distancia entre conductores Albán en estado estable.

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19436,4	19436,6	0,001
Vb	19440,0	19440,2	0,002
Vc	19432,6	19432,8	0,001
Ia	103,35	103,32	0,01
Ib	103,84	103,8	0,001
Ic	104,19	104,16	0,002
<Va	-90,007	-90,006	0,002
<Vb	149,97	149,96	0,001
<Vc	29,966	29,967	0,001
<Ia	-110,74	-110,73	0
<Ib	129,57	129,58	0,01
<Ic	9,243	9,249	0,02

FIGURA 3.2.: Errores modelo Pi al variar la configuración Albán en estado estable.

Variación de la longitud del conductor: Para definir la variación real de la longitud del conductor, se creo una función en Matlab, la cuál calcula el error que se comete al no tener en cuenta los parámetros de flecha, temperatura y diferencia de alturas entre las estructuras, debido a la topología del terreno. Con esta función se realizó un barrido para los diferentes vanos del circuito y para las diferencias de altura entre estructuras, hallando así la longitud real del conductor con la cual se realizaron las

pruebas. Una muestra de los resultados arrojados por la función se observan en la figura 3.3.

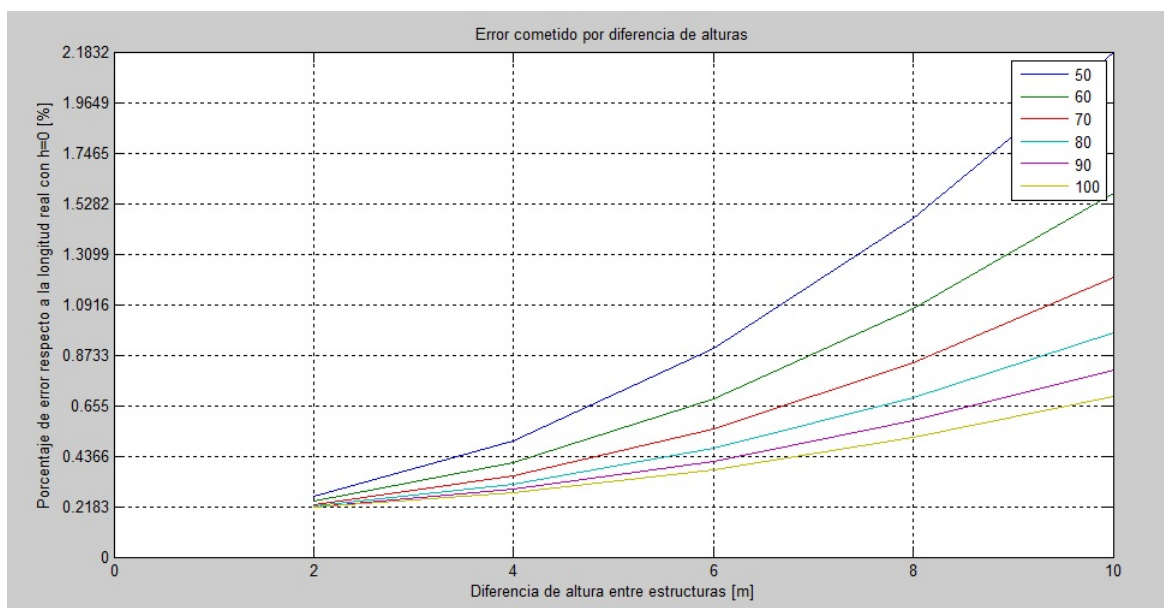


FIGURA 3.3.: Errores en la longitud real del conductor.

En la tabla se muestran los resultados obtenidos al realizar la variación de la longitud del conductor, ajustando en el circuito la distancia real para cada línea en función de su flecha, la diferencia de altura entre estructuras y la temperatura.

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19436,4	19436,6	0,001
Vb	19440,0	19440,2	0,002
Vc	19432,6	19432,8	0,001
la	103,35	103,32	0,01
lb	103,84	103,82	0,001
lc	104,19	104,16	0,002
<Va	-90,007	-90,006	0,002
<Vb	149,97	149,97	0,001
<Vc	29,966	29,967	0,001
<la	-110,74	-110,73	0
<lb	129,57	129,58	0,01
<lc	9,243	9,248	0,02

TABLA 3.11.: Errores modelo Pi al variar la longitud del conductor Albán en estado estable.

Después de realizar las pruebas de variación de los diferentes parámetros para cada

uno de los modelos de líneas en el circuito Albán en estado estable, se observa que no existen cambios significativos en los valores de tensión y corriente, como se puede apreciar en las tablas 3.9 a 3.11, en las cuáles se muestran los resultados para valores extremos de cada uno de los parámetros.

3.2.2. Circuito Albán Estado de falla

Para la validación del circuito Albán en estado de falla se hicieron variaciones de los parámetros considerados en las líneas eléctricas para cada uno de los modelos de líneas, con los mismos porcentajes de variación que se trabajaron en estado estable. En el estado de falla se realizaron las pruebas para los cuatro tipos de falla más importantes:

- Falla monofásica.
- Falla bifásica.
- Falla bifásica a tierra.
- Falla trifásica.

3.2.2.1. Modelo Pi

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	20446	20426	0,0978
Vb	20289	20287	0,0098
Vc	10657	10755	0,9195
Ia	35,287	35	0,3947
Ib	36,546	36,506	0,1089
Ic	856,66	841,23	1,8010
<Va	-90	-90	0
<Vb	155	155	0
<Vc	14	15	7,1428
<Ia	-90,644	-91	0,2196
<Ib	125,50	125,75	0,1933
<Ic	-31,192	-31,626	1,3907

TABLA 3.12.: Errores modelo Pi al variar la resistividad en falla monofásica en el circuito Albán.

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	14575	14575	0
Vb	6381,8	6381,8	0
Vc	19783	19783	0
Ia	1350,7	1350,7	0
Ib	1318,9	1318,9	0
Ic	39,839	39,839	0
<Va	-136	-136	0
<Vb	-178,3	-178,3	0
<Vc	31	31	0
<Ia	-128,3	-128,3	0
<Ib	52,7	52,7	0
<Ic	15,295	15,295	0

TABLA 3.13.: Errores modelo Pi al variar la resistividad en falla bifásica en el circuito Albán.

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	8088,2	8122,4	0,4228
Vb	4631,8	4598,9	0,7103
Vc	20923	20915	0,0382
Ia	1534,9	1532	0,2084
Ib	1355,4	1356,6	0,0885
Ic	32,571	32,618	0,1443
<Va	-146,5	-146,2	0,2047
<Vb	130,8	131,3	0,3822
<Vc	32	32	0
<Ia	-147,6	-148	0,0677
<Ib	67,7	67,5	0,2954
<Ic	12,919	13,001	0,6347

TABLA 3.14.: Errores modelo Pi al variar la resistividad en falla bifásica a tierra en el circuito Albán.

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	19776	19776	0
Vb	19780	19780	0
Vc	19776	19776	0
Ia	39,447	39,447	0
Ib	39,684	39,684	0
Ic	40,01	40,01	0
<Va	-90	-90	0
<Vb	150	150	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-105,77	-105,77	0
<Ib	134,77	134,77	0
<Ic	14,359	14,359	0

TABLA 3.15.: Errores modelo Pi al variar la resistividad en falla trifásica en el circuito Albán.

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	20446	20448	0,0097
Vb	20289	20290	0,0049
Vc	10657	10661	0,0375
Ia	35,287	35	0,1212
Ib	36,546	36,669	0,3373
Ic	856,66	856,42	0,0282
<Va	-90	-90	0
<Vb	155	155	0
<Vc	14	14	0
<Ia	-90,644	-90	0,2766
<Ib	125,50	125,83	0,2567
<Ic	-31,192	-31,179	0,0413

TABLA 3.16.: Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla monofásica en el circuito Albán.

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	14575	14608	0,2264
Vb	6381,8	6314,8	1,0498
Vc	19783	19785	0,0101
Ia	1350,7	1356,9	0,4590
Ib	1318,9	1325,1	0,4700
Ic	39,839	39,806	0,0835
<Va	-136	-139	2,2058
<Vb	-178,3	-179,9	0,8973
<Vc	31	29	6,4516
<Ia	-128,3	-130,3	1,5588
<Ib	52,7	50,8	3,6053
<Ic	15,295	13,380	12,516

TABLA 3.17.: Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla bifásica en el circuito Albán.

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	8088,2	8138,8	0,6256
Vb	4631,8	4547,8	1,8135
Vc	20923	20923	0
Ia	1534,9	1540	0,3062
Ib	1355,4	1362,8	0,5459
Ic	32,571	32,549	0,0675
<Va	-146,5	-148,9	1,6382
<Vb	130,8	128,6	1,6819
<Vc	32	31	3,125
<Ia	-147,6	-149	1,2195
<Ib	67,7	65,5	3,2496
<Ic	12,919	11,059	14,397

TABLA 3.18.: Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla bifásica a tierra en el circuito Albán.

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	19776	19781	0,0252
Vb	19780	19782	0,0101
Vc	19776	19776	0
Ia	39,447	39	0,5222
Ib	39,684	39,884	0,5039
Ic	40,01	39,905	0,2624
<Va	-90	-90	0
<Vb	150	150	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-105,77	-105	0,4282
<Ib	134,77	135,16	0,2893
<Ic	14,359	14,358	0,0069

TABLA 3.19.: Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla trifásica en el circuito Albán.

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20446	20419	0,1320
Vb	20289	20274	0,0739
Vc	10657	10923	2,4960
Ia	35,287	35	0,2695
Ib	36,546	36	0,3278
Ic	856,66	827	3,5122
<Va	-90	-90	0
<Vb	155	155	0
<Vc	14	15	7,1428
<Ia	-90,644	-91	0,0431
<Ib	125,50	126	0,1334
<Ic	-31,192	-31	0,7434

TABLA 3.20.: Errores modelo Pi al variar la configuración en falla monofásica en el circuito Albán.

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14575	14585	0,0686
Vb	6381,8	6373,8	0,1253
Vc	19783	19784	0,0050
Ia	1350,7	1351	0,0222
Ib	1318,9	1319,3	0,0303
Ic	39,839	39,809	0,0747
<Va	-136	-138	1,4705
<Vb	-178,3	-179,5	0,6730
<Vc	31	29	6,4516
<Ia	-128,3	-130,4	1,6367
<Ib	52,7	50,7	3,7950
<Ic	15,295	13,185	13,793

TABLA 3.21.: Errores modelo Pi al variar la configuración en falla bifásica en el circuito Albán.

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	8088,2	8109,3	0,2608
Vb	4631,8	4620,9	0,2353
Vc	20923	20923	0
Ia	1534,9	1534,3	0,0390
Ib	1355,4	1356,3	0,0664
Ic	32,571	32,545	0,0798
<Va	-146,5	-148,5	1,3651
<Vb	130,8	128,7	1,6055
<Vc	32	31	3,125
<Ia	-147,6	-149,6	1,3550
<Ib	67,7	65,6	3,1019
<Ic	12,919	10,865	15,899

TABLA 3.22.: Errores modelo Pi al variar la configuración en falla bifásica a tierra en el circuito Albán.

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19776	19777	0,0050
Vb	19780	19779	0,0050
Vc	19776	19775	0,0050
Ia	39,447	39	0,0937
Ib	39,684	40	0,0251
Ic	40,01	40	0,1099
<Va	-90	-90	0
<Vb	150	150	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-105,77	-106	0,0094
<Ib	134,77	135	0,0074
<Ic	14,359	14	0,1532

TABLA 3.23.: Errores modelo Pi al variar la configuración en falla trifásica en el circuito Albán.

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20446	20419	0,1320
Vb	20289	20301	0,0591
Vc	10657	10698	0,3847
Ia	35,287	35,25	0,1057
Ib	36,546	36,516	0,0829
Ic	856,66	854,73	0,2262
<Va	-90	-91	1,1111
<Vb	155	154	0,6451
<Vc	14	13	7,1428
<Ia	-90,644	-91,862	1,3432
<Ib	125,50	124,38	0,8985
<Ic	-31,192	-32,353	3,7211

TABLA 3.24.: Errores modelo Pi al variar la longitud del conductor en falla monofásica en el circuito Albán.

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14575	14575	0
Vb	6381,8	6382,5	0,0109
Vc	19783	19782	0,0050
Ia	1350,7	1350,5	0,0148
Ib	1318,9	1318,7	0,0151
Ic	39,839	39,838	0,0042
<Va	-136	-136	0
<Vb	-178,3	-178,3	0
<Vc	31	31	0
<Ia	-128,3	-128,3	0
<Ib	52,7	52,7	0
<Ic	15,295	15,285	0,0666

TABLA 3.25.: Errores modelo Pi al variar la longitud del conductor en falla bifásica en el circuito Albán.

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	8088,2	8089,6	0,0173
Vb	4631,8	4632,9	0,0237
Vc	20923	20923	0
Ia	1534,9	1534,7	0,0130
Ib	1355,4	1355,3	0,0073
Ic	32,571	32,572	0,0030
<Va	-146,5	-146,5	0
<Vb	130,8	130,8	0
<Vc	32	32	0
<Ia	-147,6	-147,6	0
<Ib	67,7	67,7	0
<Ic	12,919	12,92	0,0077

TABLA 3.26.: Errores modelo Pi al variar la longitud del conductor en falla bifásica a tierra en el circuito Albán.

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19776	19757	0,0960
Vb	19780	19789	0,0455
Vc	19776	19784	0,0404
Ia	39,447	39,413	0,0861
Ib	39,684	39,684	0
Ic	40,01	40,042	0,0799
<Va	-90	-89	1,1111
<Vb	150	151	0,6666
<Vc	30	31	3,3333
<Ia	-105,77	-104,51	1,1912
<Ib	134,77	136,12	1,0017
<Ic	14,359	14,62	1,8176

TABLA 3.27.: Errores modelo Pi al variar la longitud del conductor en falla trifásica en el circuito Albán.

De los resultados obtenidos para cada una de las fallas en cada uno de los modelos de líneas se observa que estos parámetros son irrelevantes en el circuito, lo que denota que los modelos de líneas no son sensibles a las variaciones de estos parámetros, ya que los valores que se muestran en las tablas se dan para variaciones extremas en cada uno de los parámetros y aún así no son considerables. Además aquellos errores que podrían ser considerables (errores en los ángulos de las tensiones o corrientes), en realidad presentan valores que no tienen una variación significativa, sino que son valores que se dan cercanos a cero y es por esto que los errores se incrementan.

3.2.3. Circuito Albán con las variaciones al máximo

Como última prueba a la variación de parámetros, se realizaron simulaciones para el circuito Albán en régimen permanente para condiciones normales y de falla. Se trabajó el efecto que tienen estos parámetros (resistividad del terreno, distancia entre conductores, configuración y longitud real del conductor) cuando se presentan en un mismo instante, observando que la suma de los errores individuales que se generan en la variación de cada parámetro, origina un error mayor. Pero este error sigue siendo pequeño como se observa en los resultados que se muestran en las tablas 3.28 a 3.32 para variaciones máximas de estos parámetros. La simulación mostrada se hizo para un circuito con una resistividad del terreno de 400 ohm-m, distancia entre conductores reducida al 50 % de la distancia original, cambio de configuración en todas las líneas cuando al pasar de una estructura a otra la configuración es diferente y cambio en la longitud real del conductor. Ya que los valores trabajados para los parámetros son extremos al punto que pueden salirse de la realidad, no queda duda que los modelos de líneas empleados no tienen efectos importantes en los resultados obtenidos en las simulaciones de los circuitos.

Debido a la similitud en los resultados obtenidos, se muestran solo los resultados para el modelo Pi. Los resultados de los otros modelos se muestran en el anexo A.

3.2.3.1. Modelo Pi

Estado estable:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19776	19761	0,0758
Vb	19780	19791	0,0556
Vc	19776	19786	0,0505
Ia	39,447	39,197	0,6337
Ib	39,684	39,852	0,4233
Ic	40,01	39,901	0,2724
<Va	-90	-91	1,1111
<Vb	150	149,5	0,3333
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-105,77	-106,16	0,3687
<Ib	134,77	134,37	0,2968
<Ic	14,359	13,524	5,8151

TABLA 3.28.: Errores modelo Pi al variar todos los parámetros en estado estable para el circuito Albán.

Falla monofásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20446	20372	0,3619
Vb	20289	20284	0,0246
Vc	10657	10800	1,3418
Ia	35,287	35,492	0,5800
Ib	36,546	36,472	0,2033
Ic	856,66	826,18	3,5589
<Va	-90	-93	1,1111
<Vb	155	152	0,6451
<Vc	14	13	7,1428
<Ia	-90,644	-93,995	1,4899
<Ib	125,50	123,07	1,1455
<Ic	-31,192	-33,143	3,0478

TABLA 3.29.: Errores modelo Pi al variar todos los parámetros en falla monofásica para el circuito Albán.

Falla bifásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14575	14616	0,2813
Vb	6381,8	6309,5	1,1329
Vc	19783	19785	0,0101
Ia	1350,7	1356,9	0,4590
Ib	1318,9	1325,1	0,4700
Ic	39,839	39,774	0,1649
<Va	-136	-139	2,2058
<Vb	-178,3	-179,8	0,8412
<Vc	31	30	3,2258
<Ia	-128,3	-130,3	1,5588
<Ib	52,7	50,8	3,6053
<Ic	15,295	14,313	6,4216

TABLA 3.30.: Errores modelo Pi al variar todos los parámetros en falla bifásica para el circuito Albán.

Falla bifásica a tierra:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	8088,2	8222,6	1,6616
Vb	4631,8	4479,8	3,2816
Vc	20923	20905	0,0860
Ia	1534,9	1532,5	0,1563
Ib	1355,4	1365,5	0,7451
Ic	32,571	32,608	0,1135
<Va	-146,5	-148,3	1,2286
<Vb	130,8	129,6	0,9174
<Vc	32	30	6,25
<Ia	-147,6	-149,3	1,1517
<Ib	67,7	65,2	3,6927
<Ic	12,919	12,186	5,6738

TABLA 3.31.: Errores modelo Pi al variar todos los parámetros en falla bifásica a tierra para el circuito Albán.

Falla trifásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19771	19761	0,0505
Vb	19771	19791	0,1011
Vc	19771	19786	0,0758
Ia	39,572	39,197	0,9476
Ib	39,585	39,852	0,6744
Ic	39,576	39,901	0,8212
<Va	-90	-91	1,1111
<Vb	150	149	0,6666
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-106,39	-106,16	0,2161
<Ib	133,58	134,37	0,5914
<Ic	13,574	13,524	0,3683

TABLA 3.32.: Errores modelo Pi al variar todos los parámetros en falla trifásica para el circuito Albán.

3.3. Validación circuito Albán con datos reales

Para cumplir los objetivos trazados en este proyecto se hace la validación de las simulaciones contra datos reales. Realizando una comparación entre los resultados obtenidos en las simulaciones de los modelos de líneas, contra datos reales del circuito Albán, los cuales se obtienen de registros del circuito suministrados por la empresa de energía de Bogotá CODENSA, en los que se encontraron fallas localizadas. Son estos registros en los cuales se centra el estudio para ver la similitud que tienen los diferentes modelos de líneas con los datos reales.

Los resultados mostrados a continuación dan la relación tensión/corriente por fase vistas desde la cabecera del circuito, diferente a como se venía trabajando, debido al problema de la referencia de fase respecto a los datos reales.

Para obtener los datos reales del circuito se creó una función en Matlab, la cual exporta los valores de los registros a Matlab y después de un análisis entrega los resultados vistos desde la cabecera por fase. Estos valores se comparan con los obtenidos en las simulaciones de las fallas para cada uno de los modelos, encontrando los siguientes resultados.

3.3.1. Estado estable

3.3.1.1. Falla monofásica en la fase C

En las primeras pruebas que se realizaron con datos reales al circuito Albán se trabajó un registro de falla monofásica en la fase C a tierra, localizada entre los nodos 88-89 del circuito y con una resistencia de falla estimada de 4.023 ohm. La localización y resistencia de falla fueron suministrados por la empresa de Energía de Bogotá CODENSA.

Para los valores reales se realizó el cálculo de las relaciones tensión/corriente vistas desde la cabecera del circuito con ayuda de la función en Matlab, estas relaciones se compararon con las obtenidas en los datos de la simulación de la falla en ATP, en el punto y con la resistencia de falla mencionada.

Los errores que se encontraron en los resultados para los modelos utilizados se muestran en las figuras 3.4 y 3.5.

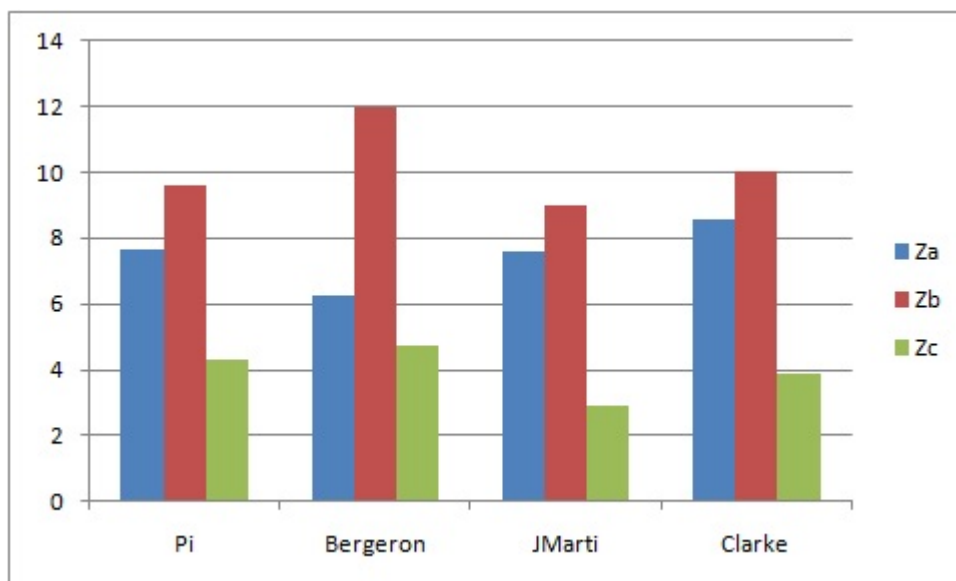


FIGURA 3.4.: Errores en la magnitud de las impedancias en estado de prefalla (falla monofásica).

En la figura 3.4, se observan los resultados de los errores en las magnitudes de las impedancias apreciando un comportamiento similar en los errores de las tres fases, el modelo JMarti es el que presenta menor error. Sin embargo, se debe mirar otro factor importante en el momento de la simulación, como lo es el tiempo de la misma, este

modelo a pesar de presentar poco error emplea alrededor de 30 minutos en simular, a diferencia del modelo Pi que presenta un error similar y tan solo emplea un tiempo del orden de los 20 segundos. Los otros dos modelos (Bergeron y Clarke) presentan un tiempo de simulación similar, alrededor de 4 minutos; en la gráfica también se aprecia que el modelo Bergeron presenta mayor error en la fase B y menor en la fase A.

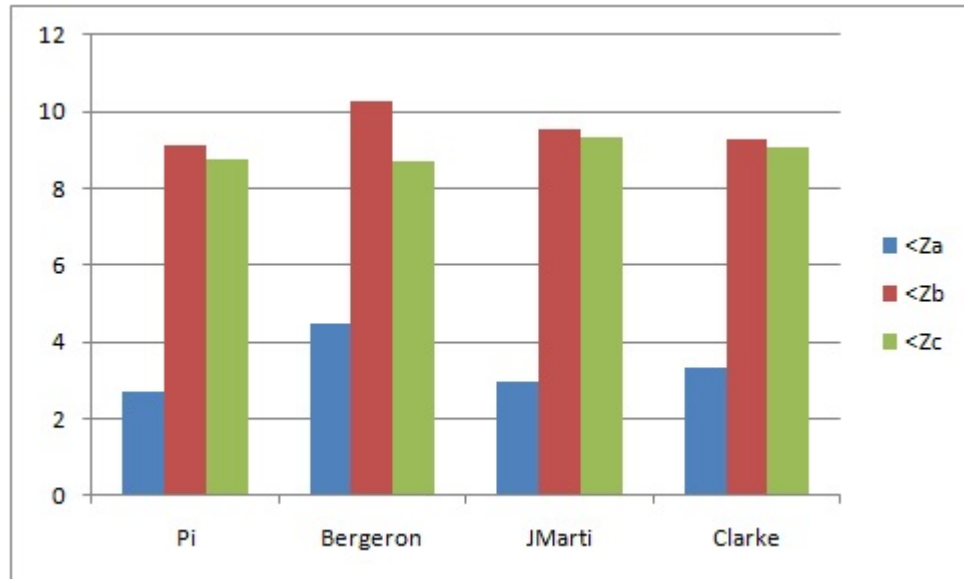


FIGURA 3.5.: Errores en los ángulo de las impedancias en estado de prefalla (falla monofásica).

En la figura 3.5, se observa que el modelo Pi es el que tiene menores errores en el ángulo en las tres fases, pero los errores de los demás modelos no están tan lejos de este.

De los resultados obtenidos en las impedancias, tanto en magnitud como en ángulo, se observa que al presentar errores del orden de los modelos más exactos y emplear el menor tiempo de simulación, el modelo Pi es el mejor para trabajar en estado estable.

3.3.1.2. Falla bifásica entre las fases A y B

Otra falla localizada fue una falla bifásica entre las fases A y B que se encuentra localizada entre los nodos 36-37 y tiene una resistencia de falla entre fases de 2.6861. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3.6 y 3.7.

En los resultados de las figuras 3.6 y 3.7, se observa el mismo comportamiento que se presentó en el estado estable para la falla monofásica, esto ratifica que el modelo Pi es una buena opción para trabajar la simulación de líneas en sistemas de distribución en estado estable.

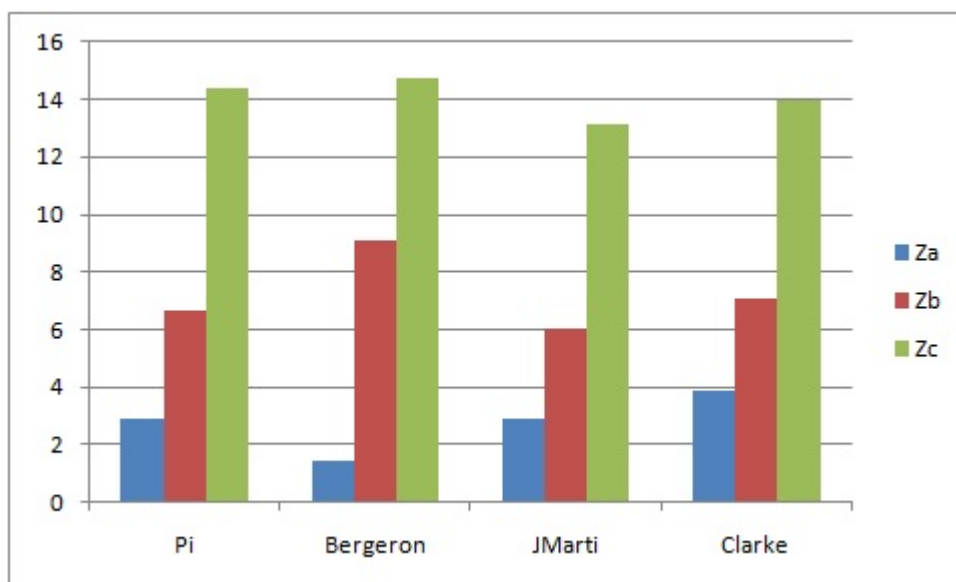


FIGURA 3.6.: Errores en la magnitud de las impedancias en estado de prefalla (falla bifásica).

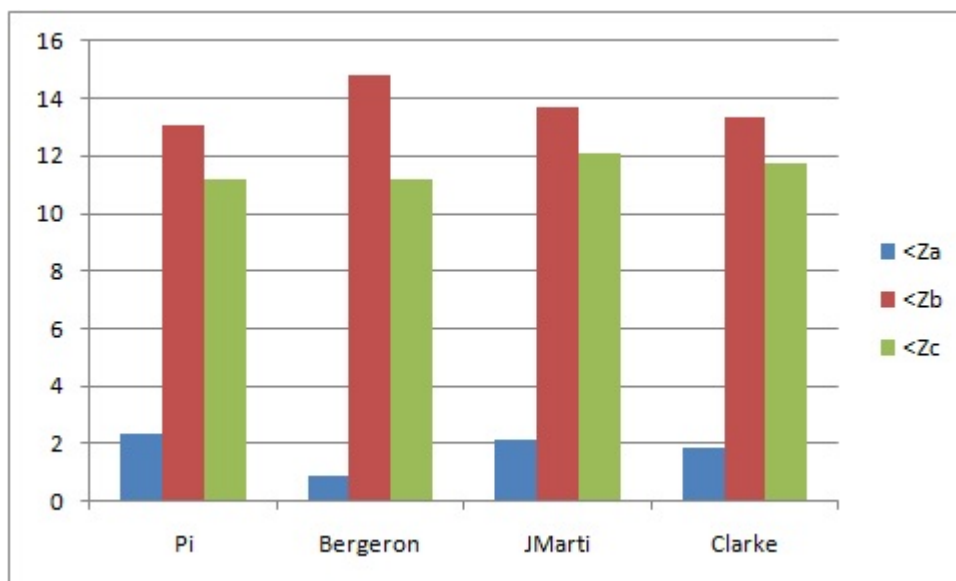


FIGURA 3.7.: Errores en el ángulo de las impedancias en estado de prefalla (falla bifásica).

3.3.2. Estado de falla

Para complementar el análisis de los registros de las fallas localizadas, se realiza el estudio para los modelos de líneas en el estado de falla del registro.

3.3.2.1. Falla monofásica en la fase C

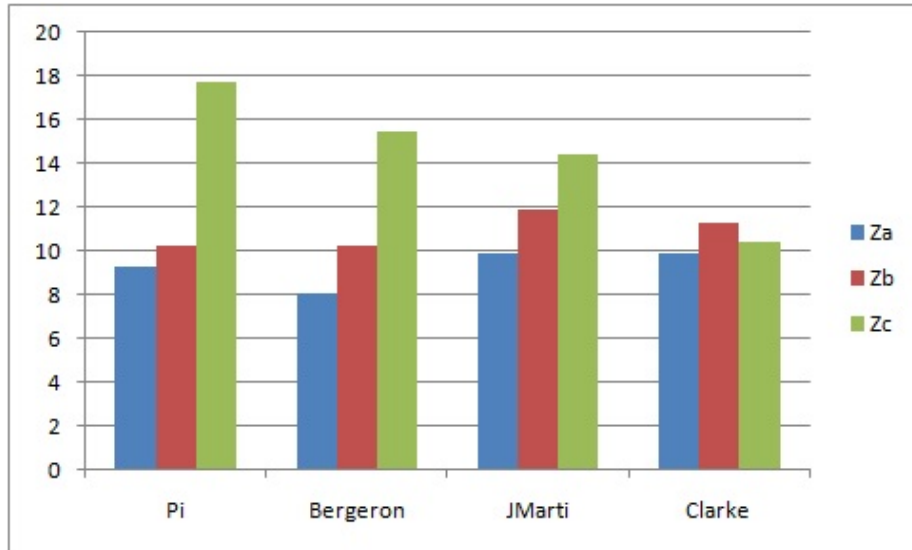


FIGURA 3.8.: Errores en la magnitud de las impedancias en estado de falla (falla monofásica).

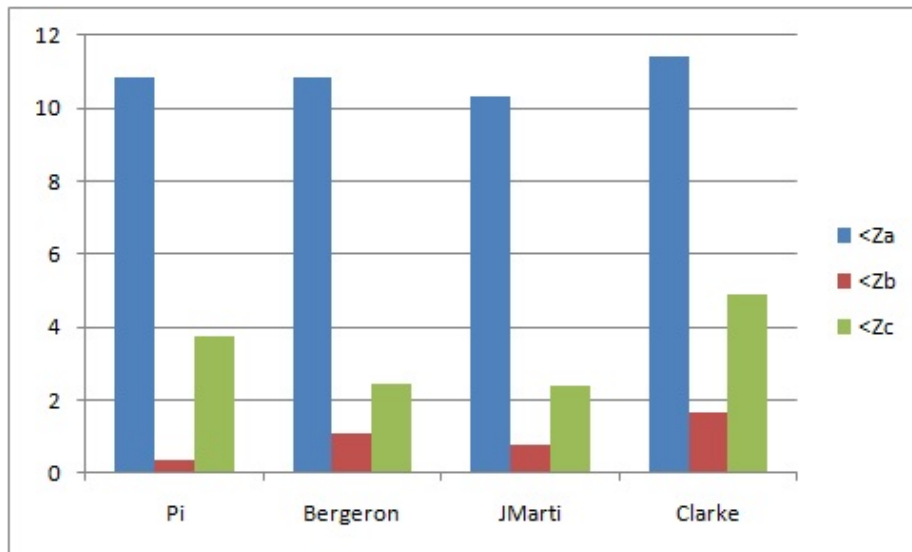


FIGURA 3.9.: Errores en el ángulo de las impedancias en estado de falla (falla monofásica).

En los resultados de la figura 3.8, se observa que el modelo Clarke tiene el menor error en la fase fallada y aunque no tiene el menor de los errores en las otras fases, estos errores no difieren mucho de los de los demás modelos.

En los resultados de la figura 3.9, se observa el mayor error en la fase fallada en el modelo Clarke, difiriendo en menos del 2% con los errores mas bajos en las otras dos fases. El menor error se da para el modelo JMarti, pero se recuerda que el tiempo de simulación es elevado en comparación de los demás modelos.

Después de revisar los errores en magnitud y ángulo, el modelo Clarke es el mejor para trabajar dicha falla, ya que presenta el menor error en magnitud y aunque en ángulo no es el mejor, no difiere mucho de los otros. El modelo Pi se descarta porque presenta un error muy elevado en la magnitud de la fase fallada, fase de mucha importancia en este estudio.

3.3.2.2. Falla bifásica entre las fases A y B

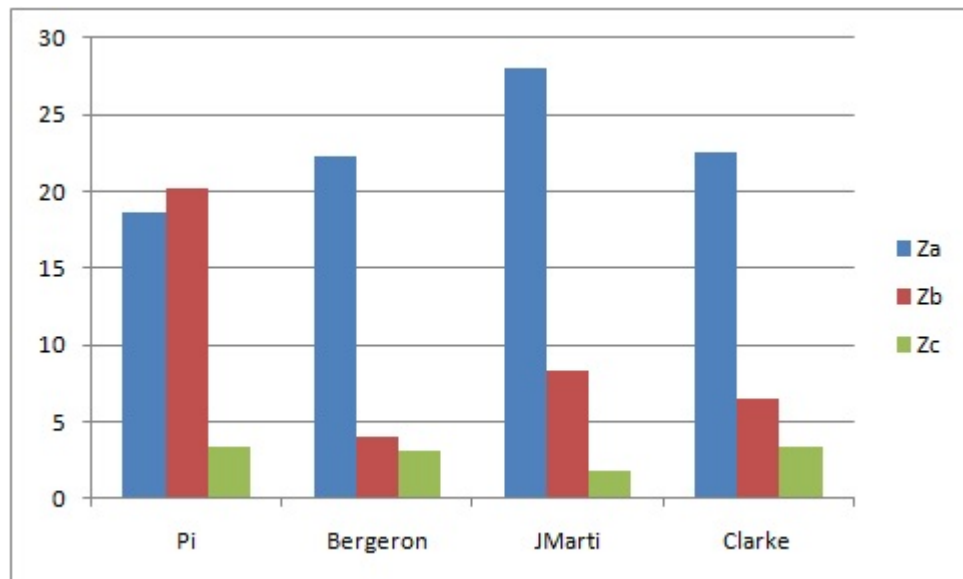


FIGURA 3.10.: Errores en la magnitud de las impedancias en estado de falla (falla bifásica).

En los resultados de la figura 3.10, se observa el modelo Pi con un error muy grande en la fase B que difiere en gran proporción de los errores de los demás modelos en esta fase, pero a su vez tiene el menor de los errores en la fase A que es la otra fase fallada. El modelo que presenta los menores errores es el Bergeron junto con el Clarke

que no esta muy lejos, y por la similitud en el tiempo de simulación, cualquiera de los dos sería aconsejable.

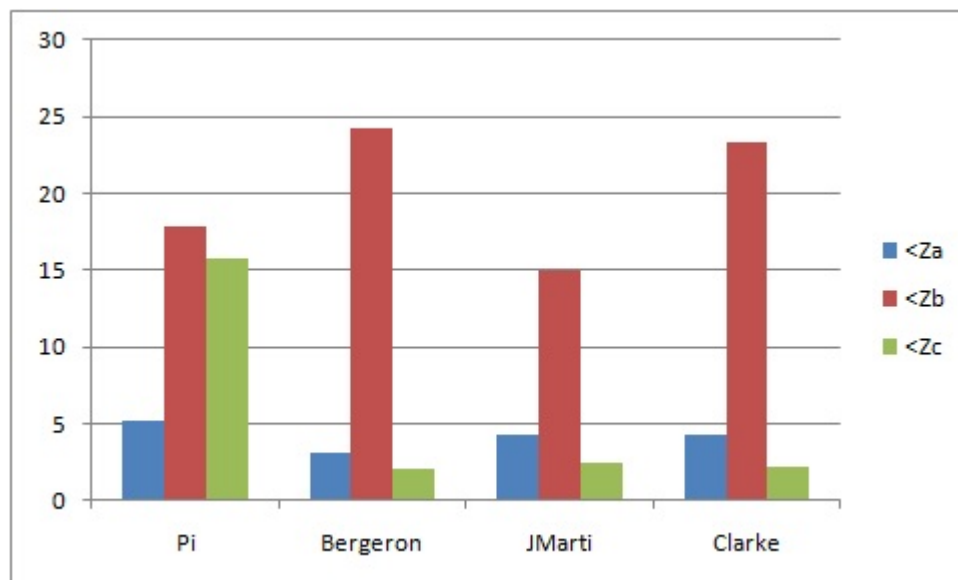


FIGURA 3.11.: Errores en el ángulo de las impedancias en estado de falla (falla bifásica).

En los resultados que se muestran en la figura 3.11 se observa que los errores mas bajos se presentan para el modelo JMarti, mientras que los modelos Bergeron y Clarke presenta errores muy similares entre sí, pero que difieren en un valor grande con los obtenidos en el modelo JMarti para a fase B. Con esto se puede decir que el modelo JMarti sería el mejor para esta falla.

Después de analizar los errores en magnitud y ángulo para la falla bifásica, se puede decir que con los modelos Bergeron, Clarke y JMarti se obtienen valores similares de impedancia, pero que por el tiempo de simulación se descarta el modelo JMarti y se toman los modelos Bergeron y Clarke como los mejores modelos para simular esta falla.

3.3.3. Explicación errores encontrados

En los resultados obtenidos, al hacer la comparación entre los datos reales y los datos simulados para las fallas trabajadas, se observa que hay errores considerables. En el caso de la falla monofásica el error es del orden del 10% y en el caso de la falla

bifásica en estado de falla algunos llegan hasta el orden del 20 %. Dichos errores no se pueden corregir ni reducir con ajustes a los modelos de líneas como se aprecia anteriormente en las pruebas realizadas, los modelos son insensibles a la variación de los parámetros de la línea aún llevando estos a valores extremos que se pueden salir de la realidad.

La explicación a estos errores no se debe al modelado de las líneas en el circuito sino a otros factores tales como el correcto modelado de las cargas, fuentes e impedancias del generador, esto se puede ver en las figuras 3.12 a 3.15 donde se comparan las formas de onda de un registro de una falla monofásica en la fase B con la simulación de esta misma falla en ATP. Como se observa en las figuras 3.12 y 3.13 la tensión y corriente de la fase B en el momento de la falla tienen una diferencia grande entre estas dos ondas, esta diferencia es la que conlleva al error que se tiene en la validación. Al realizar un ajuste de desbalance en la fuente y la impedancia del generador se aprecia que las ondas mostradas en las figuras 3.14 y 3.15 la tensión y corriente en la fase fallada (fase B) mejoran al punto de ser casi idénticas, de forma que se reduce la diferencia y por lo tanto el error. Con esto se justifica que la fuente y la impedancia del generador son factores importantes a tener en cuenta en el modelado de circuitos.

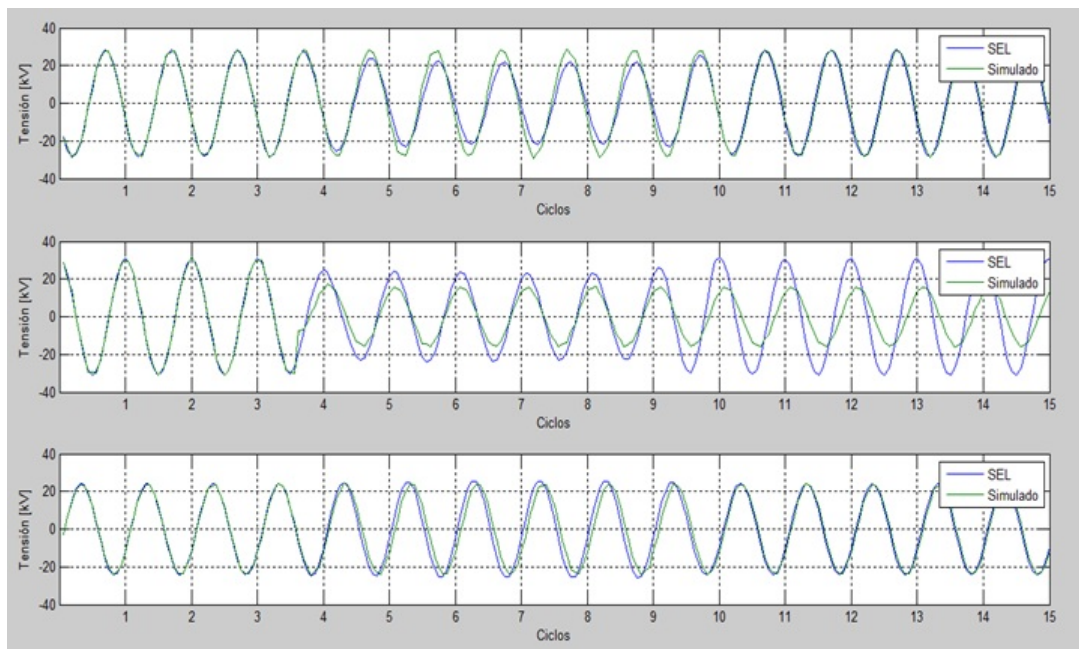


FIGURA 3.12.: Comparación entre ondas de tensión sin variación de la fuente y la impedancia.

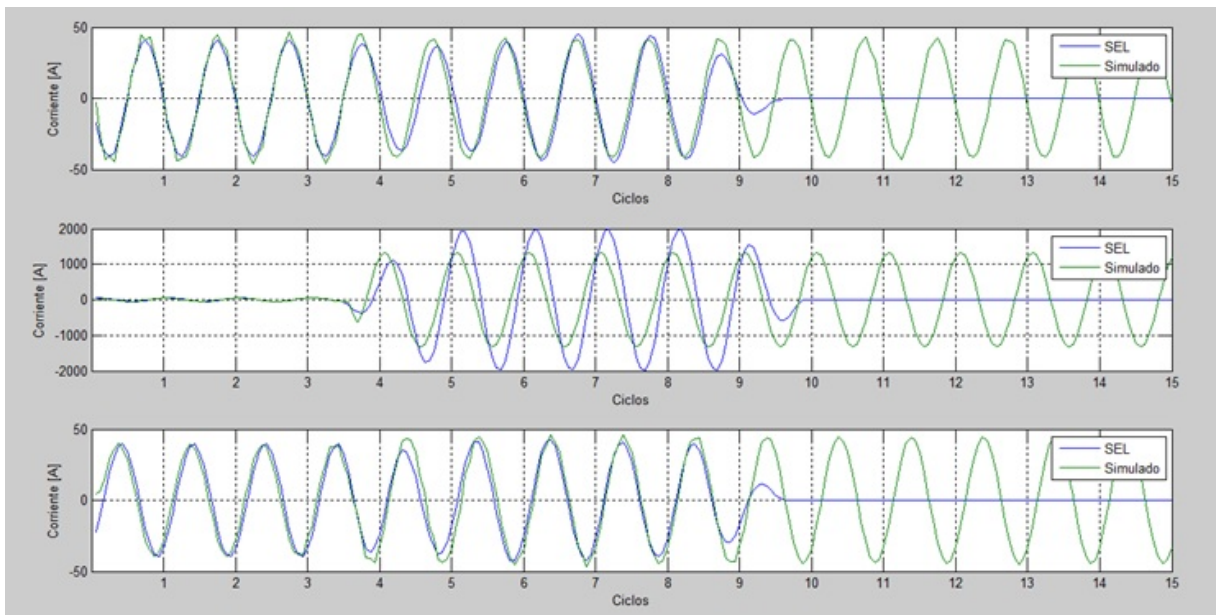


FIGURA 3.13.: Comparación entre ondas de corriente sin variación de la fuente y la impedancia.

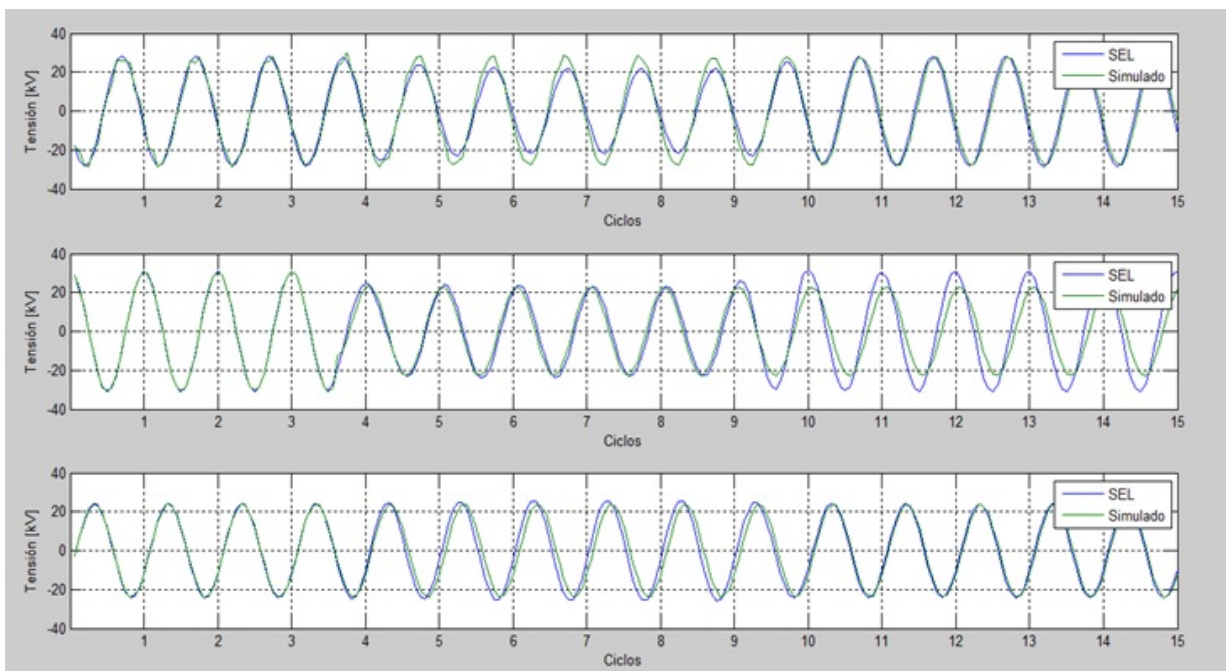


FIGURA 3.14.: Comparación entre ondas de tensión con variación de la fuente y la impedancia.

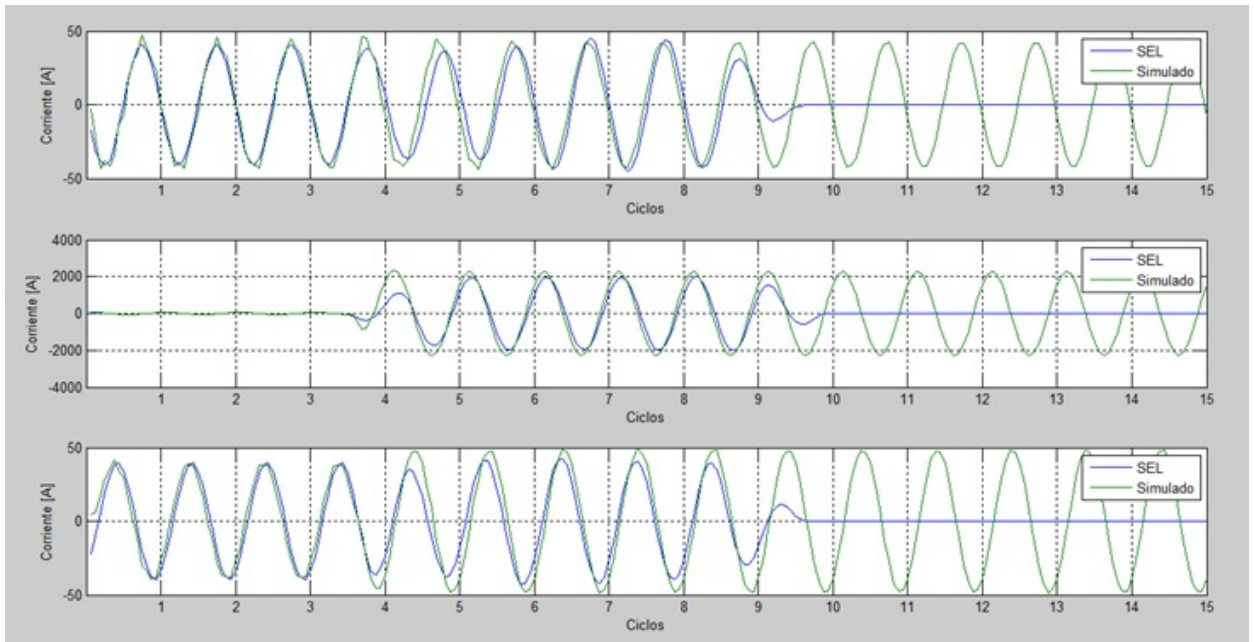


FIGURA 3.15.: Comparación entre ondas de corriente con variación de la fuente y la impedancia

3.4. Circuito Meissen

Con el objetivo de corroborar los resultados obtenidos con el circuito Albán, se trabajó un segundo circuito llamado circuito Meissen, el cuál tiene una topología diferente, y usado principalmente para comprobar que los resultados obtenidos no se deban a la topología del circuito. Se realizaron pruebas de variación de parámetros de resistividad del terreno y distancia entre conductores, las pruebas de variación de la configuración y longitud del conductor se descartaron porque el circuito en su totalidad está montado en configuración horizontal y este se encuentra sobre la sabana de Bogotá lo cuál hace que no exista un perfil de terreno complicado ni un cambio de temperatura considerable.

Los resultados de las pruebas se muestran a continuación, y por la similitud entre los resultados obtenidos para los diferentes modelos, se muestran para el modelo Pi. Los demás se presentan en el anexo B.

3.4.1. Circuito Meissen estado estable

3.4.1.1. Modelo Pi

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6649,01	6649,01	0
Vb	6531,00	6531	0
Vc	6490,76	6490,76	0
Ia	69,81	69,808	0
Ib	69,70	69,704	0
Ic	68,30	68,299	0
<Va	-85,524	-85,524	0
<Vb	153,47	153,47	0
<Vc	34,88	34,88	0
<Ia	-105,99	-105,99	0
<Ib	132,62	132,62	0
<Ic	13,398	13,398	0

TABLA 3.33.: Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno en el circuito Meissen en estado estable.

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6649,01	6649,041	0
Vb	6531,00	6531,012	0
Vc	6490,76	6490,767	0
Ia	69,81	69,789	0,03
Ib	69,70	69,732	0,04
Ic	68,30	68,287	0,02
<Va	-85,524	-85,524	0
<Vb	153,47	153,472	0
<Vc	34,88	34,88	0
<Ia	-105,99	-105,954	0,03
<Ib	132,62	132,65	0,02
<Ic	13,398	13,399	0,01

TABLA 3.34.: Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en el circuito Meissen en estado estable.

Con los resultados que se observan en las tablas 3.33 y 3.34, se corrobora que los resultados obtenidos anteriormente para el estado estable no son causados por la topología del mismo.

3.4.2. Circuito Meissen estado de falla

Para la variación de parámetros en estado de falla para el circuito Meissen, se realizaron las mismas pruebas de variación de la resistividad del terreno y de distancia entre conductores para las fallas mas conocidas:

- Falla monofásica.
- Falla bifásica.
- Falla bifásica a tierra.
- Falla trifásica.

Los resultados obtenidos en las pruebas se muestran para el modelo Pi. Debido a la similitud en los resultados con los otros modelos, estos se muestran en el anexo B.

3.4.2.1. Modelo Pi

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6611,3	6611,8	0,01
Vb	6546,4	6545,7	0,01
Vc	5922,2	5913,5	0,15
Ia	62,61	62,77	0,26
Ib	69,72	69,59	0,18
Ic	1799,4	1779,9	1,08
<Va	-85,48	-85,47	0
<Vb	153,17	153,17	0
<Vc	26,27	26,45	0,69
<Ia	-101,88	-101,83	0,05
<Ib	126,25	126,32	0,05
<Ic	-0,63	-1,50	137,34

TABLA 3.35.: Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno en falla monofásica en el circuito Meissen.

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6649,38	6649,38	0
Vb	6551,87	6551,87	0
Vc	5071,37	5071,37	0
Ia	69,31	69,30	0.01
Ib	2539,77	2539,77	0
Ic	2518,18	2518,18	0
<Va	-85,52	-85,52	0
<Vb	139,65	139,65	0
<Vc	28,08	28,08	0
<Ia	-105,65	-105,65	0
<Ib	145,45	145,45	0
<Ic	-33,06	-33,06	0

TABLA 3.36.: Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno en falla bifásica en el circuito Meissen.

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6620,6	6620,7	0
Vb	6425,0	6425,8	0,01
Vc	5021,3	5018,1	0,07
Ia	66,29	66,315	0,04
Ib	2516,6	2513,5	0,12
Ic	2827,4	2829,4	0,07
<Va	-84,61	-84,604	0
<Vb	140,87	140,88	0,01
<Vc	26,20	26,224	0,11
<Ia	-104,43	-104,39	0,03
<Ib	141,84	141,87	0,03
<Ic	-25,84	-25,97	0,52

TABLA 3.37.: Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno en falla bifásica a tierra en el circuito Meissen.

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6649,01	6649,01	0
Vb	6531,00	6531,00	0
Vc	6490,76	6490,76	0
Ia	69,81	69,81	0
Ib	69,70	69,70	0
Ic	68,30	68,30	0
<Va	-85,52	-85,52	0
<Vb	153,47	153,47	0
<Vc	34,88	34,88	0
<Ia	-105,99	-105,99	0
<Ib	132,62	132,62	0
<Ic	13,40	13,40	0

TABLA 3.38.: Errores modelo Pi al variar la resistividad del terreno en falla trifásica en el circuito Meissen.

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6611,3	6611,3	0
Vb	6546,4	6546,3	0
Vc	5922,2	5922,4	0
Ia	62,61	62,85	0,38
Ib	69,72	69,81	0,13
Ic	1799,4	1799,2	0,01
<Va	-85,48	-85,478	0
<Vb	153,17	153,16	0
<Vc	26,27	26,268	0
<Ia	-101,88	-101,87	0
<Ib	126,25	126,19	0,05
<Ic	-0,63	-0,622	1,58

TABLA 3.39.: Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores falla monofásica en el circuito Meissen.

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6649,38	6649,6	0
Vb	6551,87	6551,9	0
Vc	5071,37	5071,1	0
Ia	69,31	68,987	0,46
Ib	2539,77	2540,1	0,02
Ic	2518,18	2518,4	0,01
<Va	-85,52	-85,522	0
<Vb	139,65	139,65	0
<Vc	28,08	28,082	0
<Ia	-105,65	-105,40	0,23
<Ib	145,45	145,45	0
<Ic	-33,06	-33,063	0,02

TABLA 3.40.: Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla bifásica en el circuito en el circuito Meissen.

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6620,6	6620,9	0
Vb	6425,0	6425,1	0
Vc	5021,3	5021,3	0
Ia	66,29	66,081	0,31
Ib	2516,6	2517,2	0,02
Ic	2827,4	2827,3	0
<Va	-84,61	-84,606	0
<Vb	140,87	140,867	0
<Vc	26,20	26,198	0,01
<Ia	-104,43	-104,13	0,29
<Ib	141,84	141,843	0
<Ic	-25,84	-25,84	0,02

TABLA 3.41.: Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores falla bifásica a tierra en el circuito Meissen.

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6649,01	6649,01	0
Vb	6531,00	6531,00	0
Vc	6490,76	6490,76	0
Ia	69,81	69,81	0
Ib	69,70	69,70	0
Ic	68,30	68,30	0
<Va	-85,52	-85,52	0
<Vb	153,47	153,47	0
<Vc	34,88	34,88	0
<Ia	-105,99	-105,99	0
<Ib	132,62	132,62	0
<Ic	13,40	13,40	0

TABLA 3.42.: Errores modelo Pi al variar la distancia entre conductores en falla trifásica en el circuito Meissen.

Con los resultados que se muestran en las tablas 3.35 a 3.42, se concluye que la variación de parámetros para el estado de falla en el circuito Meissen no es relevante, y con esto se verifica que los modelos son insensibles a la variación de parámetros sin importar la topología del circuito.

4. Conclusiones

Se encontró que las medidas de tensión y corriente en la cabecera de los circuitos son insensibles a la variación de parámetros en los modelos de las líneas; dichos parámetros son la resistividad del terreno con variaciones hasta de un 300 %, la distancia entre conductores con variaciones hasta un 50 % y la configuración de la línea para todo el circuito. Esta insensibilidad se presenta en análisis de estado permanente para condiciones normales y de falla. Después de realizar las pruebas variando cada uno de estos parámetros para los diferentes modelos de líneas y comparando las medidas de tensión y corrientes tomadas en la cabecera para los circuitos trabajados, no existe ninguna variación significativa en los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, incluso al llevar los parámetros a valores que pueden ser absurdos, se encontró que sus errores varían entre un mínimo de 0 % y un máximo de 2 %. Esta insensibilidad se produce sin importar la complejidad de la topología del circuito, ni el número de estructuras presentes en el mismo.

Se encontró para el caso en estudio, que las medidas de tensión y corriente en la cabecera de los circuitos son insensibles a la variación de la longitud del conductor en los modelos de las líneas, en análisis de estado permanente para condiciones normales y de falla. Después de realizar las pruebas variando la longitud del conductor entre 0 % y 2 % de la longitud inicial, dependiendo de la ubicación del tramo, no existen variaciones significativas en los resultados obtenidos al modelar en el circuito la longitud real del conductor, incluyendo en esta longitud el efecto producido por la flecha, temperatura y perfil del terreno. Se hallaron errores menores al 1 %.

De igual manera, se realizó la simulación teniendo en cuenta la variación de todos los parámetros (resistividad del terreno, distancia entre conductores, configuración de la línea, longitud del conductor) en un mismo instante, para el circuito Albán. Obteniendo un error acumulado mayor a los antes mencionados, pero igualmente despreciable. Dichos errores oscilan entre 0 % y 3 % en la magnitud de las tensiones y corrientes medidas en la cabecera del circuito y entre un 0 % y 5 % en el ángulo de

las mismas. Estos errores se presentaron al llevar los parámetros a valores límites; resistividad del terreno de 400 ohm-m, distancia entre conductores reducida al 50 % de la distancia original, cambio de configuración en todas las líneas cuando al pasar de una estructura a otra la configuración es diferente y cambio en la longitud real del conductor.

De los resultados obtenidos en la validación con datos reales, se encontró que el mejor modelo de líneas eléctricas para trabajar la simulación de circuitos en sistema de distribución para análisis de estado estable es el modelo JMarti, ya que este presenta los menores errores. Pero este modelo tiene un gran inconveniente debido al tiempo excesivo que emplea en la simulación que es del orden de los 30 minutos para el circuito Albán, el cuál consta de 332 estructuras y siete cargas distribuidas a lo largo del circuito. Esto hace que el modelo Pi sea una buena opción, ya que sus errores son mayores a los del modelo JMarti pero no difieren mucho, la diferencia entre sus errores es del orden del 1 % y el tiempo empleado en la simulación del circuito Albán con el modelo Pi es del orden de los 20 segundos. Con esto se concluye que si se necesita exactitud sin importar el tiempo, la mejor opción es el modelo JMarti, pero si se necesita análisis de datos rápidos, el modelo Pi es la mejor opción.

También se encontró que para fallas monofásicas el modelo que presentó los mejores resultados es el modelo Clarke, pero debido a que el análisis estuvo limitado a una sola falla localizada por la poca información que fue suministrada de datos reales del circuito, no se puede decir que este sea la mejor opción para todas las fallas monofásicas. Por ende se hace necesario un mayor estudio referente al tema.

Por otro lado, para fallas bifásicas no hay un modelo en particular que arroje mejores resultados que los otros, los modelos Bergeron, Clarke y JMarti se pueden emplear en este tipo de fallas, pero debido a la poca información de fallas localizadas que limitó el análisis no se puede determinar cuál de estos es el mejor, se debe hacer un estudio más detallado para así poder determinar cuál de estos modelos es óptimo para el análisis de este tipo de fallas.

Los errores encontrados en la validación de los modelos teóricos con los datos reales, no son originados por el modelado de las líneas en el circuito. Estos errores se deben al modelado de otros componentes en el circuito tales como fuentes, impedancia del generador y cargas, ya que al realizar una pequeña prueba haciendo un ajuste a los valores de prefalla con la fuente y la impedancia del generador, los errores se redujeron en análisis de estado permanente para condiciones normales y de falla. Esto

puede afirmarse debido a que los resultados encontrados en las diferentes pruebas muestran que los modelos de líneas son insensibles a la variación de sus parámetros, tanto para análisis en estado estable como para análisis en estado de falla.

Con el objetivo de reducir la incertidumbre en el origen de los errores encontrados al comparar datos reales del circuito con resultados obtenidos mediante simulaciones, se hacen necesarios estudios posteriores como una ampliación de este trabajo, relacionados con los modelos utilizados en los otros elementos presentes en el circuito, elementos tales como: Fuentes, impedancia del generador y cargas.

Bibliografía

- P. Anderson. *Analysis of Faulted Power System*. The Iowa State University press/ames, 1973.
- A. Baghini. *Handbook of Power Quality*, volume 1. Jhon Wiley & Son. Ltd, 2008.
- A. Budner. Introduction of frequency-dependent line parameters into an electromagnetic transients programs. *IEEE transactions on Power Apparatus and Systems*, 1:88–97, 1970.
- L. Checa. *Líneas de transporte de Energía*, volume 3. Alfaomega marcombo, 2000.
- E. Clarke. *Circuit Analysis of A-C Power System*, volume 1. John Wiley & Sons, INC, 1965.
- H. Domel and W. Meyer. Digital computer solution of electromagnetic transient in single and multiphase networks. *IEEE transactions on Power Apparatus and Systems*, 4:388–399, 1969.
- O. Hevia. Comparación de los modelos de líneas en el atp. *Revista Iberoamericana del ATP*, 1999.
- W. Kersting. *Distribution System Modeling and Analysis*. Leo Grigsby, 2002.
- J. Marti. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. *IEEE transactions on Power Apparatus and Systems*, 1:147–157, 1982.
- T. Noda, N. Nagaoka, and A. Ametani. Phase domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an arma model. *IEEE transactions on Power Delivery*, 11:401–411, 1996.
- L. Prikler and H. Hoidalén. *ATPDRAW version 3.5 Users Manual*. 2002.
- L. Restrepo, G. Caicedo, and F. Castro. Modelos de líneas de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia. *Revista Energía y Computación*, 16:21–32, 2008.

- A. Semlyen and A. Dabuleanu. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions. *IEEE transactions on Power Apparatus and Systems*, 2:561–571, 1975.
- N. Watson and J. Arrillada. *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*, volume 1. Professor A.T.Johns, D.F.Warne, 2003.

Anexos

A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

En el anexo A se muestran los resultados de las pruebas realizadas de variación de parámetros (resistividad del terreno, distancia entre conductores, configuración y longitud del conductor) a los circuitos de prueba inicial, Albán y Meissen en análisis de estado estable y estado de falla, para los modelos de línea Bergeron, JMarti y Clarke.

A.1. Circuito de prueba inicial

A.1.1. Estado estable

A.1.1.1. Modelo Bergeron

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 10 [ohm-m]	Errores %
Va	6906,27	6906,27	0
Vb	6903,28	6903,28	0
Vc	6901,36	6901,36	0
Ia	310,49	310,49	0
Ib	310,57	310,57	0
Ic	310,35	310,35	0
<Va	-90,01	-90,01	0
<Vb	149,99	149,99	0
<Vc	29,99	29,99	0
<Ia	-119,02	-119,02	0
<Ib	120,08	120,08	0
<Ic	0,98	0,98	0

TABLA A.1.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado estable

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	6906,27	6906,28	0
Vb	6903,28	6903,3	0
Vc	6901,36	6901,39	0
Ia	310,49	310,49	0
Ib	310,57	310,59	0
Ic	310,35	310,36	0
<Va	-90,01	-90,01	0
<Vb	149,99	149,99	0
<Vc	29,99	29,99	0
<Ia	-119,02	-119,02	0
<Ib	120,08	120,08	0
<Ic	0,98	0,98	0

TABLA A.2.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado estable

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6906,27	6906,27	0
Vb	6903,28	6903,28	0
Vc	6901,36	6901,36	0
Ia	310,49	310,49	0
Ib	310,57	310,57	0
Ic	310,35	310,35	0
<Va	-90,01	-90,01	0
<Vb	149,99	149,99	0
<Vc	29,99	29,99	0
<Ia	-119,02	-119,02	0
<Ib	120,08	120,08	0
<Ic	0,98	0,98	0

TABLA A.3.: Errores modelo Bergeron variación de la configuración circuito de prueba inicial estado estable

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6906,27	6905,92	0
Vb	6903,28	6902,93	0
Vc	6901,36	6901,01	0
Ia	310,49	310,67	0,058
Ib	310,57	310,75	0,058
Ic	310,35	310,53	0,058
<Va	-90,01	-90,12	0,1222
<Vb	149,99	149,84	0,1
<Vc	29,99	29,88	0,3668
<Ia	-119,02	-119,85	0,6974
<Ib	120,08	120,11	0,025
<Ic	0,98	0,12	87,75

TABLA A.4.: Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado estable

A.1.1.2. Modelo JMarti

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 10 [ohm-m]	Errores %
Va	6904,72	6904,72	0
Vb	6901,68	6901,68	0
Vc	6899,73	6899,73	0
Ia	311,33	311,33	0
Ib	311,41	311,41	0
Ic	311,19	311,19	0
<Va	-90,14	-90,14	0
<Vb	149,83	149,83	0
<Vc	29,87	29,87	0
<Ia	-119,93	-119,93	0
<Ib	120,03	120,03	0
<Ic	0,03	0,03	0

TABLA A.5.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado estable

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	6904,72	6905,11	0
Vb	6901,68	6901,85	0
Vc	6899,73	6899,76	0
Ia	311,33	311,45	0
Ib	311,41	311,55	0
Ic	311,19	311,3	0
<Va	-90,14	-90,13	0
<Vb	149,83	149,84	0
<Vc	29,87	29,88	0
<Ia	-119,93	-119,88	0
<Ib	120,03	120,07	0
<Ic	0,03	0,08	166,6

TABLA A.6.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado estable

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6904,72	6904,74	0
Vb	6901,68	6901,67	0
Vc	6899,73	6899,71	0
Ia	311,33	310,94	0,1253
Ib	311,41	311,03	0,122
Ic	311,19	310,8	0,1253
<Va	-90,14	-90,13	0
<Vb	149,83	149,84	0
<Vc	29,87	29,88	0
<Ia	-119,93	-119,97	0
<Ib	120,03	119,99	0
<Ic	0,03	0,03	0

TABLA A.7.: Errores modelo JMarti variación de la configuración circuito de prueba inicial estado estable

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6904,72	6904,58	0
Vb	6901,68	6901,54	0
Vc	6899,73	6899,59	0
Ia	311,33	311,42	0,0289
Ib	311,41	311,51	0,0321
Ic	311,19	311,28	0,0289
<Va	-90,14	-90,14	0
<Vb	149,83	149,83	0
<Vc	29,87	29,87	0
<Ia	-119,93	-119,94	0
<Ib	120,03	120,02	0
<Ic	0,03	0,03	0

TABLA A.8.: Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado estable

A.1.1.3. Modelo Clarke

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 10 [ohm-m]	Errores %
Va	6906,4	6906,4	0
Vb	6903,6	6903,6	0
Vc	6901,8	6901,8	0
Ia	308,73	308,73	0
Ib	308,85	308,85	0
Ic	308,61	308,61	0
<Va	-90,1	-90,1	0
<Vb	149,9	149,9	0
<Vc	29,9	29,9	0
<Ia	-120	-120	0
<Ib	119,96	119,96	0
<Ic	-0,03	-0,03	0

TABLA A.9.: Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado estable

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	6906,4	6906,4	0
Vb	6903,6	6903,6	0
Vc	6901,8	6901,8	0
Ia	308,73	308,73	0
Ib	308,85	308,85	0
Ic	308,61	308,61	0
<Va	-90,1	-90,1	0
<Vb	149,9	149,9	0
<Vc	29,9	29,9	0
<Ia	-120	-120	0
<Ib	119,96	119,96	0
<Ic	-0,03	-0,03	0

TABLA A.10.: Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado estable

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6906,4	6906,4	0
Vb	6903,6	6903,6	0
Vc	6901,8	6901,8	0
Ia	308,73	308,73	0
Ib	308,85	308,85	0
Ic	308,61	308,61	0
<Va	-90,1	-90,1	0
<Vb	149,9	149,9	0
<Vc	29,9	29,9	0
<Ia	-120	-120	0
<Ib	119,96	119,96	0
<Ic	-0,03	-0,03	0

TABLA A.11.: Errores modelo Clarke variación de la configuración circuito de prueba inicial estado estable

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6906,4	6906,4	0
Vb	6903,6	6903,6	0
Vc	6901,8	6901,8	0
Ia	308,73	308,78	0,058
Ib	308,85	308,89	0,058
Ic	308,61	308,65	0,058
<Va	-90,1	-90,15	0,1222
<Vb	149,9	149,9	0
<Vc	29,9	30	0,3668
<Ia	-120	-121	0,0697
<Ib	119,96	119,99	0,025
<Ic	-0,03	-0,03	0

TABLA A.12.: Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado estable

A.1.2. Estado de falla

A.1.2.1. Modelo Bergeron

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 10 [ohm-m]	Errores %
Va	6906,27	6906,27	0
Vb	4811,09	4811,09	0
Vc	4635,5	4635,5	0
Ia	310,49	310,49	0
Ib	1801,51	1801,51	0
Ic	1563,94	1563,94	0
<Va	-90,12	-90,12	0
<Vb	131,92	131,92	0
<Vc	45,85	45,85	0
<Ia	-119,83	-119,83	0
<Ib	96,96	96,96	0
<Ic	-76,21	-76,21	0

TABLA A.13.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado de falla

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	6906,27	6906,48	0,003
Vb	4811,09	4804,73	0,131
Vc	4635,5	4622,9	0,271
Ia	310,49	310,62	0,041
Ib	1801,51	1809,63	0,450
Ic	1563,94	1571,93	0,510
<Va	-90,12	-90,13	0,011
<Vb	131,92	131,75	0,128
<Vc	45,85	45,94	0,196
<Ia	-119,83	-119,79	0,033
<Ib	96,96	97	0,041
<Ic	-76,21	-76,21	0,013

TABLA A.14.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado de falla

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6906,27	6906,47	0,002
Vb	4811,09	4807,65	0,071
Vc	4635,5	4627,78	0,166
Ia	310,49	310,56	0,022
Ib	1801,51	1806,34	0,268
Ic	1563,94	1568,72	0,305
<Va	-90,12	-90,03	0,011
<Vb	131,92	131,81	0,083
<Vc	45,85	45,89	0,087
<Ia	-119,83	-119,81	0,016
<Ib	96,96	96,98	0,020
<Ic	-76,21	-76,21	0

TABLA A.15.: Errores modelo Bergeron variación de la configuración circuito de prueba inicial estado de falla

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6906,27	6906,27	0
Vb	4811,09	4808,09	0,062
Vc	4635,5	4629,5	0,129
Ia	310,49	310,53	0,021
Ib	1801,51	1805,51	0,222
Ic	1563,94	1566,94	0,191
<Va	-90,12	-90,12	0
<Vb	131,92	131,82	0,075
<Vc	45,85	45,87	0,043
<Ia	-119,83	-119,83	0
<Ib	96,96	96,98	0,021
<Ic	-76,21	-76,21	0

TABLA A.16.: Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado de falla

A.1.2.2. Modelo JMarti

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 10 [ohm-m]	Errores %
Va	6904,72	6904,72	0
Vb	4754,61	4754,67	0,001
Vc	6664,36	6664,4	0,008
Ia	311,33	311,33	0
Ib	1808,26	1808,22	0,002
Ic	1566,46	1566,42	0,002
<Va	-90,14	-90,14	0
<Vb	132,21	132,21	0
<Vc	46,5	46,49	0,021
<Ia	-119,93	-119,93	0
<Ib	95,89	95,89	0
<Ic	-77,43	-77,43	0

TABLA A.17.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado de falla

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	6904,72	6905,11	0,005
Vb	4754,61	4747,83	0,142
Vc	6664,36	6652,59	0,252
Ia	311,33	311,45	0,038
Ib	1808,26	1816,2	0,439
Ic	1566,46	1574,24	0,496
<Va	-90,14	-90,13	0,011
<Vb	132,21	132,07	0,098
<Vc	46,5	46,6	0,129
<Ia	-119,93	-119,88	0,025
<Ib	95,89	95,93	0,062
<Ic	-77,43	-77,42	0,051

TABLA A.18.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado de falla

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6904,72	6904,98	0,003
Vb	4754,61	4750,47	0,087
Vc	6664,36	6653,91	0,224
Ia	311,33	311,42	0,028
Ib	1808,26	1841,45	0,350
Ic	1566,46	1572,77	0,405
<Va	-90,14	-90,13	0,011
<Vb	132,21	132,08	0,098
<Vc	46,5	46,56	0,129
<Ia	-119,93	-119,9	0,025
<Ib	95,89	95,95	0,062
<Ic	-77,43	-77,39	0,051

TABLA A.19.: Errores modelo JMarti variación de la configuración circuito de prueba inicial estado de falla

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	6904,72	6904,58	0,002
Vb	4754,61	4748,61	0,126
Vc	6664,36	6666,53	0,046
Ia	311,33	311,42	0,028
Ib	1808,26	1809,45	0,065
Ic	1566,46	1567,22	0,048
<Va	-90,14	-90,14	0
<Vb	132,21	132,23	0,015
<Vc	46,5	46,56	0,129
<Ia	-119,93	-119,94	0,008
<Ib	95,89	95,79	0,104
<Ic	-77,43	-77,55	0,154

TABLA A.20.: Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado de falla

A.1.2.3. Modelo Clarke

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 10 [ohm-m]	Errores %
Va	13004	13004	0
Vb	6502,2	6502,2	0
Vc	6502,2	6502,2	0
Ia	154,85	154,85	0
Ib	77,42	77,42	0
Ic	77,42	77,42	0
<Va	-92	-92	0
<Vb	88,1	88,1	0
<Vc	88,1	88,1	0
<Ia	-117,52	-117,52	0
<Ib	62,47	62,47	0
<Ic	62,47	62,47	0

TABLA A.21.: Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno circuito de prueba inicial estado de falla

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	13004	13012	0,061
Vb	6502,2	6503,2	0
Vc	6502,2	6503,2	0
Ia	154,85	155,85	0,645
Ib	77,42	77,42	0
Ic	77,42	77,42	0
<Va	-92	-92	0,011
<Vb	88,1	88,1	0,128
<Vc	88,1	88,1	0,196
<Ia	-117,52	-117,52	0,033
<Ib	62,47	62,47	0,041
<Ic	62,47	62,47	0,013

TABLA A.22.: Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores circuito de prueba inicial estado de falla

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	13004	13012	0,061
Vb	6502,2	6505,2	0,046
Vc	6502,2	6505,2	0,046
Ia	154,85	154,85	0
Ib	77,42	77,48	0,077
Ic	77,42	77,48	0,077
<Va	-92	-92	0
<Vb	88,1	88,1	0
<Vc	88,1	88,1	0
<Ia	-117,52	-116,52	0,849
<Ib	62,47	62,43	0,064
<Ic	62,47	62,43	0,064

TABLA A.23.: Errores modelo Clarke variación de la configuración circuito de prueba inicial estado de falla

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	13004	13012	0,061
Vb	6502,2	6505,2	0,046
Vc	6502,2	6505,2	0,046
Ia	154,85	154,85	0
Ib	77,42	77,48	0,077
Ic	77,42	77,48	0,077
<Va	-92	-92	0,011
<Vb	88,1	88,1	0,128
<Vc	88,1	88,1	0,196
<Ia	-117,52	-117,52	0,033
<Ib	62,47	62,47	0,041
<Ic	62,47	62,47	0,013

TABLA A.24.: Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor circuito de prueba inicial estado de falla

A.2. Circuito Albán

A.2.1. Estado estable

A.2.1.1. Modelo Bergeron

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 400 [ohm-m]	Errores %
Va	19407,2	19422,1	0,076
Vb	19407,2	19422,1	0,076
Vc	19407,2	19422,1	0,076
Ia	104,16	102,92	1,19
Ib	104,16	102,92	1,19
Ic	104,16	102,92	1,19
<Va	-89,999	-90,000	0,0003
<Vb	150,00	149,99	0,0005
<Vc	30,000	29,999	0,0026
<Ia	-111,48	-111,65	0,15
<Ib	128,51	128,34	0,13
<Ic	8,5105	8,3429	1,96

TABLA A.25.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno Albán estado estable

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	19407,2	19431,4	0,12
Vb	19407,2	19431,5	0,12
Vc	19407,2	19431,5	0,12
Ia	104,16	102,61	1,49
Ib	104,16	102,61	1,49
Ic	104,16	102,61	1,49
<Va	-89,999	-90	0,0003
<Vb	150,00	150,00	0,0001
<Vc	30,000	29,999	0,0013
<Ia	-111,48	-111,21	0,24
<Ib	128,51	128,78	0,21
<Ic	8,5105	8,7808	3,17

TABLA A.26.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores Albán estado estable

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19407,2	19424,8	0,09
Vb	19407,2	19424,8	0,09
Vc	19407,2	19424,8	0,09
Ia	104,16	103,05	1,06
Ib	104,16	103,05	1,06
Ic	104,16	103,05	1,06
<Va	-89,999	-89,999	0,0002
<Vb	150,00	150,00	0,0001
<Vc	30,000	30,000	0,0013
<Ia	-111,48	-111,46	0,018
<Ib	128,51	128,53	0,016
<Ic	8,5105	8,5312	0,24

TABLA A.27.: Errores modelo Bergeron variación de la configuración Albán estado estable

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19407,2	19420,7	0,0695
Vb	19407,2	19420,7	0,0695
Vc	19407,2	19420,7	0,0695
Ia	104,16	103,05	1,06
Ib	104,16	103,05	1,06
Ic	104,16	103,05	1,06
<Va	-89,999	-90	0,0003
<Vb	150,00	150,00	0,0001
<Vc	30,000	29,999	0,0013
<Ia	-111,48	-111,21	0,24
<Ib	128,51	128,78	0,21
<Ic	8,5105	8,7808	3,17

TABLA A.28.: Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor Albán estado estable

A.2.1.2. Modelo JMarti

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 400 [ohm-m]	Errores %
Va	19407,2	19407,2	0
Vb	19407,2	19407,2	0
Vc	19407,2	19407,2	0
Ia	104,16	104,16	0,0004
Ib	104,16	104,16	0,0004
Ic	104,16	104,16	0,0004
<Va	-89,999	-89,999	0,0001
<Vb	150,00	150,00	0
<Vc	30,000	30,000	0
<Ia	-112,13	-112,13	0,0075
<Ib	127,86	127,86	0,0003
<Ic	7,8674	7,8679	0,0063

TABLA A.29.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno Albán estado estable

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	19407,2	19409,6	0,012
Vb	19407,2	19409,6	0,012
Vc	19407,2	19409,6	0,012
Ia	104,16	104,16	1,91
Ib	104,16	104,16	1,91
Ic	104,16	104,16	1,91
<Va	-89,999	-90,000	0,0004
<Vb	150,00	149,99	0,0003
<Vc	30,000	29,999	0,0013
<Ia	-112,13	-112,00	0,45
<Ib	127,86	127,99	0,39
<Ic	7,8674	7,9995	6

TABLA A.30.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores Albán estado estable

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19407,2	19408,5	0,006
Vb	19407,2	19408,5	0,006
Vc	19407,2	19408,5	0,006
Ia	104,16	104,16	1,91
Ib	104,16	104,16	1,91
Ic	104,16	104,16	1,91
<Va	-89,999	-90,000	0,0004
<Vb	150,00	149,99	0,0003
<Vc	30,000	29,999	0,0013
<Ia	-112,13	-112,00	0,45
<Ib	127,86	127,99	0,39
<Ic	7,8674	7,9995	6

TABLA A.31.: Errores modelo JMarti variación de la configuración Albán estado estable

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19407,2	19409,6	0,012
Vb	19407,2	19409,6	0,012
Vc	19407,2	19409,6	0,012
Ia	104,16	104,16	1,91
Ib	104,16	104,16	1,91
Ic	104,16	104,16	1,91
<Va	-89,999	-89,999	0,0001
<Vb	150,00	150,00	0
<Vc	30,000	30,000	0
<Ia	-112,13	-112,13	0,0075
<Ib	127,86	127,86	0,0003
<Ic	7,8674	7,8679	0,0063

TABLA A.32.: Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor Albán estado estable

A.2.1.3. Modelo Clarke

Variación de la resistividad:

	Resistividad 100 [ohm-m]	Resistividad 400 [ohm-m]	Errores %
Va	19424,4	19422,1	0,011
Vb	19424,4	19422,1	0,011
Vc	19424,4	19422,1	0,011
Ia	103,05	102,92	0,13
Ib	103,05	102,92	0,13
Ic	103,05	102,92	0,13
<Va	-89,999	-90,000	0,0008
<Vb	150,00	149,99	0,0005
<Vc	30,000	29,999	0,0026
<Ia	-111,48	-111,65	0,15
<Ib	128,51	128,34	0,13
<Ic	8,5105	8,3429	1,96

TABLA A.33.: Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno Albán estado estable

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia 0%	Distancia 50%	Errores %
Va	19424,4	19431,4	0,036
Vb	19424,4	19431,5	0,036
Vc	19424,4	19431,5	0,036
Ia	103,05	102,61	0,43
Ib	103,05	102,61	0,43
Ic	103,05	102,61	0,43
<Va	-89,999	-90	0,0003
<Vb	150,00	150,00	0,0001
<Vc	30,000	29,999	0,0013
<Ia	-111,48	-111,21	0,24
<Ib	128,51	128,78	0,21
<Ic	8,5105	8,7808	3,17

TABLA A.34.: Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores Albán estado estable

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19424,4	19424,8	0,002
Vb	19424,4	19424,8	0,002
Vc	19424,4	19424,8	0,002
Ia	103,05	103,05	0,0016
Ib	103,05	103,05	0,0016
Ic	103,05	103,05	0,0016
<Va	-89,999	-89,999	0,0002
<Vb	150,00	150,00	0,0001
<Vc	30,000	30,000	0,0013
<Ia	-111,48	-111,46	0,018
<Ib	128,51	128,53	0,016
<Ic	8,5105	8,5312	0,24

TABLA A.35.: Errores modelo Clarke variación de la configuración Albán estado estable

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19424,4	19422,1	0,011
Vb	19424,4	19422,1	0,011
Vc	19424,4	19422,1	0,011
Ia	103,05	102,92	0,13
Ib	103,05	102,92	0,13
Ic	103,05	102,92	0,13
<Va	-89,999	150,00	0,001
<Vb	150,00	29,999	0,013
<Vc	30,000	-111,21	0,24
<Ia	-111,48	128,78	0,21
<Ib	128,51	8,7808	3,17
<Ic	8,5105	150,00	0,001

TABLA A.36.: Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor Albán estado estable

A.2.2. Estado de falla

A.2.2.1. Modelo Bergeron

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	20371	20374	0,0147
Vb	20276	20262	0,0690
Vc	11046	11143	0,8781
Ia	35,615	36	0,5006
Ib	36,409	36,386	0,0617
Ic	808,48	793	1,9294
<Va	-93	-92	1,0752
<Vb	152	154	1,3157
<Vc	13	12	7,6923
<Ia	-94,14	-92,781	1,4435
<Ib	121,27	122,86	1,3111
<Ic	-35,231	-34,069	3,2982

TABLA A.37.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	14127	14217	0,6370
Vb	7246,2	7246,2	0
Vc	19787	19787	0
Ia	1272,3	1272,3	0
Ib	1239,9	1239,9	0
Ic	39,698	39,697	0,0012
<Va	-135	-135	0
<Vb	176,7	176,7	0
<Vc	29	29	0
<Ia	-131,6	-131,6	0
<Ib	49,5	49,5	0
<Ic	13,622	13,622	0,0036

TABLA A.38.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla bifásica Albán

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	7755,5	7793,9	0,4951
Vb	5521	5493	0,5071
Vc	20908	20900	0,0382
Ia	1457	1453,8	0,2196
Ib	1268,2	1269,3	0,0867
Ic	32,211	32,26	0,1521
<Va	-141,8	-141,5	0,2115
<Vb	133,5	133,9	0,2996
<Vc	30	30	0
<Ia	-151,2	-151,1	0,0661
<Ib	65,5	65,3	0,3053
<Ic	11,036	11,122	0,7792

TABLA A.39.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla bifásica a tierra Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	19757	19777	0,1012
Vb	19786	19777	0,0454
Vc	19787	19777	0,0505
Ia	39,617	39,651	0,0858
Ib	39,662	39,664	0,0050
Ic	39,689	39,654	0,0881
<Va	-91	-90	1,0989
<Vb	149	150	0,6711
<Vc	29	30	3,4482
<Ia	-106,34	-105,55	0,7429
<Ib	133,72	134,42	0,5234
<Ic	13,629	14,415	5,7671

TABLA A.40.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla trifásica Albán

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	20371	20395	0,1178
Vb	20276	20267	0,0443
Vc	11046	11035	0,0995
Ia	35,615	36	0,1881
Ib	36,409	36,402	0,0189
Ic	808,48	808,08	0,0494
<Va	-93	-92	1,0752
<Vb	152	154	1,3157
<Vc	13	12	7,6923
<Ia	-94,14	-92,781	1,4434
<Ib	121,27	122,86	1,3184
<Ic	-35,231	-34,069	3,2962

TABLA A.41.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	14127	14228	0,7149
Vb	7246,2	7220,8	0,3505
Vc	19787	19790	0,0151
Ia	1272,3	1274,8	0,1964
Ib	1239,9	1242,3	0,1935
Ic	39,698	39,661	0,0909
<Va	-135	-135	0
<Vb	176,7	176,8	0,0565
<Vc	29	29	0
<Ia	-131,6	-131,5	0,0759
<Ib	49,5	49,5	0
<Ic	13,622	13,911	2,1267

TABLA A.42.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla bifásica Albán

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	7755,5	7772,1	0,2140
Vb	5521	5488,3	0,5922
Vc	20908	20909	0,0047
Ia	1457	1458,7	0,1166
Ib	1268,2	1271	0,2207
Ic	32,211	32,211	0
<Va	-141,8	-141,9	0,0705
<Vb	133,5	133,5	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-151,2	-151,1	0,0661
<Ib	65,5	65,5	0
<Ic	11,036	11,336	2,7183

TABLA A.43.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla bifásica a tierra Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	19757	19780	0,1164
Vb	19786	19779	0,0353
Vc	19787	19779	0,0404
Ia	39,617	40	0,0050
Ib	39,662	39,628	0,0857
Ic	39,689	39,618	0,1788
<Va	-91	-90	1,0989
<Vb	149	150	0,6711
<Vc	29	30	3,4482
<Ia	-106,34	-105	1,0156
<Ib	133,72	134,71	0,7403
<Ic	13,629	14,706	7,9022

TABLA A.44.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla trifásica Albán

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20371	20392	0,1030
Vb	20276	20263	0,0641
Vc	11046	11047	0,0090
Ia	35,615	36	0,2097
Ib	36,409	36	0,0431
Ic	808,48	807	0,2196
<Va	-93	-92,2	0,8602
<Vb	152	154	1,3157
<Vc	13	12,5	3,8461
<Ia	-94,14	-93,008	1,2024
<Ib	121,27	122,37	0,9129
<Ic	-35,231	-34,094	3,2247

TABLA A.45.: Errores modelo Bergeron variación de la configuración falla monofásica Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14127	14224	0,6866
Vb	7246,2	7248,7	0,0345
Vc	19787	19787	0
Ia	1272,3	1271,4	0,0707
Ib	1239,9	1239,1	0,0645
Ic	39,698	39,708	0,0264
<Va	-135	-135	0
<Vb	176,7	176,6	0,0565
<Vc	29	29	0
<Ia	-131,6	-131,6	0
<Ib	49,5	49,5	0
<Ic	13,622	13,506	0,8464

TABLA A.46.: Errores modelo Bergeron variación de la configuración falla bifásica Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	7755,5	7779,5	0,3094
Vb	5521	5523,3	0,0416
Vc	20908	20905	0,0143
Ia	1457	1454,9	0,1441
Ib	1268,2	1267,8	0,0315
Ic	32,211	32,231	0,0620
<Va	-141,8	-141,7	0,0705
<Vb	133,5	133,5	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-151,2	-151,2	0
<Ib	65,5	65,4	0,1526
<Ic	11,036	10,961	0,6795

TABLA A.47.: Errores modelo Bergeron variación de la configuración falla bifásica a tierra Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19757	19777	0,1012
Vb	19786	19777	0,0454
Vc	19787	19777	0,0505
Ia	39,617	40	0,1135
Ib	39,662	40	0,0302
Ic	39,689	40	0,0604
<Va	-91	-90	1,0989
<Vb	149	150	0,6711
<Vc	29	30	3,4482
<Ia	-106,34	-106	0,6770
<Ib	133,72	134	0,4711
<Ic	13,629	14	5,2828

TABLA A.48.: Errores modelo Bergeron variación de la configuración falla trifásica Albán

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20371	20369	0,0098
Vb	20276	20274	0,0098
Vc	11046	11076	0,2715
Ia	35,615	35,628	0,0365
Ib	36,409	36,394	0,0411
Ic	808,48	805,16	0,4106
<Va	-93	-93	0
<Vb	152	152	0
<Vc	13	13	0
<Ia	-94,14	-94,14	0
<Ib	121,27	121,3	0,0247
<Ic	-35,231	-35,25	0,0539

TABLA A.49.: Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14127	14208	0,5733
Vb	7246,2	7225,5	0,2856
Vc	19787	19787	0
Ia	1272,3	1275,5	0,2515
Ib	1239,9	1243,1	0,2580
Ic	39,698	39,702	0,0100
<Va	-135	-135	0
<Vb	176,7	177	0,1697
<Vc	29	29	0
<Ia	-131,6	-131,6	0
<Ib	49,5	49,4	0,2020
<Ic	13,622	13,613	0,0660

TABLA A.50.: Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor falla bifásica Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	7755,5	7716,9	0,4977
Vb	5521	5496,8	0,4383
Vc	20908	20914	0,0286
Ia	1457	1462,3	0,3637
Ib	1268,2	1270,7	0,1971
Ic	32,211	32,198	0,0403
<Va	-141,8	-142,2	0,2820
<Vb	133,5	133,3	0,1498
<Vc	30	30	0
<Ia	-151,2	-151,3	0,0661
<Ib	65,5	65,5	0
<Ic	11,036	10,979	0,5164

TABLA A.51.: Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor falla bifásica a tierra Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19757	19757	0
Vb	19786	19786	0
Vc	19787	19787	0
Ia	39,617	39,622	0,0126
Ib	39,662	39,666	0,0100
Ic	39,689	39,693	0,0100
<Va	-91	-91	0
<Vb	149	149	0
<Vc	29	29	0
<Ia	-106,34	-106,35	0,0094
<Ib	133,72	133,71	0,0074
<Ic	13,629	13,612	0,1247

TABLA A.52.: Errores modelo Bergeron variación de la longitud del conductor falla trifásica Albán

A.2.2.2. Modelo JMarti

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	20334	20340	0,0295
Vb	20325	20310	0,0738
Vc	10626	10721	0,8940
Ia	34,912	35	0,4585
Ib	36,069	36	0,0596
Ic	821,07	807	1,6918
<Va	-93	-91	2,1505
<Vb	152	153	0,6578
<Vc	15	16	6,6666
<Ia	-94,477	-91,398	3,2589
<Ib	120,20	121,61	1,1717
<Ic	-38,148	-36,375	4,6494

TABLA A.53.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	14144	14142	0,0141
Vb	7007,8	7018	0,1455
Vc	19875	19785	0,4528
Ia	1307,3	1306,1	0,0917
Ib	1275,4	1274,2	0,0940
Ic	39,208	39,203	0,0117
<Va	-137	-136	0,7299
<Vb	179,3	179,3	0
<Vc	29	29	0
<Ia	-131,9	-131,9	0
<Ib	49,1	49,1	0
<Ic	13,205	13,017	1,4229

TABLA A.54.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla bifásica Albán

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	7588,8	7631	0,5560
Vb	5058,3	5040,3	0,3558
Vc	20926	20916	0,0477
Ia	1493,1	1488,2	0,3281
Ib	1305,4	1305,5	0,0076
Ic	31,843	31,89	0,1475
<Va	-144,6	-144,2	0,2766
<Vb	133,4	134	0,4497
<Vc	30	30	0
<Ia	-151,5	-151,4	0,0660
<Ib	64,8	64,7	0,1543
<Ic	10,432	10,523	0,8723

TABLA A.55.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla bifásica a tierra Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	19775	19775	0
Vb	19775	19775	0
Vc	19775	19775	0
Ia	39,158	39,154	0,0102
Ib	39,163	39,158	0,0127
Ic	39,174	39,169	0,0127
<Va	-90	-90	0
<Vb	150	150	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-106,15	-106,16	0,0094
<Ib	133,86	133,85	0,0074
<Ic	13,848	13,844	0,0288

TABLA A.56.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla trifásica Albán

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	20334	20359	0,1229
Vb	20325	20317	0,0393
Vc	10626	10593	0,3105
Ia	34,912	35	0,0211
Ib	36,069	36	0,1527
Ic	821,07	823	0,1787
<Va	-93	-91	2,1505
<Vb	152	153	0,6578
<Vc	15	16	6,6666
<Ia	-94,477	-92,398	2,2005
<Ib	120,20	121,12	0,7641
<Ic	-38,148	-36,387	4,6179

TABLA A.57.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	14144	14153	0,0636
Vb	7007,8	6992,4	0,2197
Vc	19875	19787	0,4427
Ia	1307,3	1308,7	0,1070
Ib	1275,4	1276,8	0,1097
Ic	39,208	39,114	0,2377
<Va	-137	-137	0
<Vb	179,3	179,3	0
<Vc	29	29	0
<Ia	-131,9	-131,9	0
<Ib	49,1	49,1	0
<Ic	13,205	13,199	0,0416

TABLA A.58.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla bifásica Albán

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	7588,8	7610,7	0,2885
Vb	5058,3	5033	0,5001
Vc	20926	20925	0,0047
Ia	1493,1	1493,3	0,0133
Ib	1305,4	1307,3	0,1455
Ic	31,843	31,799	0,1381
<Va	-144,6	-144,6	0
<Vb	133,4	133,5	0,0749
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-151,5	-151,5	0
<Ib	64,8	64,7	0,1543
<Ic	10,432	10,633	1,9267

TABLA A.59.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla bifásica a tierra Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	19775	19777	0,0101
Vb	19775	19777	0,0101
Vc	19775	19777	0,0101
Ia	39,158	39	0,2400
Ib	39,163	39,07	0,2374
Ic	39,174	39,08	0,2399
<Va	-90	-90	0
<Vb	150	150	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-106,15	-106	0,1978
<Ib	133,86	134,07	0,1568
<Ic	13,848	14,056	1,5020

TABLA A.60.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla trifásica Albán

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20334	20341	0,0344
Vb	20325	20319	0,0295
Vc	10626	10592	0,3199
Ia	34,912	35	0,4585
Ib	36,069	35	0,0596
Ic	821,07	810	1,6918
<Va	-93	-92	1,0752
<Vb	152	152,5	0,3289
<Vc	15	16,2	8
<Ia	-94,477	-91,238	3,4283
<Ib	120,20	121,61	1,1730
<Ic	-38,148	-36,543	4,2072

TABLA A.61.: Errores modelo JMarti variación de la configuración falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14144	14164	0,1414
Vb	7007,8	6962,9	0,6407
Vc	19875	19787	0,4427
Ia	1307,3	1311,5	0,3212
Ib	1275,4	1279,6	0,3293
Ic	39,208	39,093	0,2917
<Va	-137	-137	0
<Vb	179,3	179,5	0,1115
<Vc	29	29	0
<Ia	-131,9	-131,9	0
<Ib	49,1	49,1	0
<Ic	13,205	13,272	0,5126

TABLA A.62.: Errores modelo JMarti variación de la configuración falla bifásica Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	7588,8	7621	0,4243
Vb	5058,3	5035,3	0,4546
Vc	20926	20918	0,0382
Ia	1493,1	1490,2	0,1942
Ib	1305,4	1305,5	0,0076
Ic	31,843	31,79	0,1664
<Va	-144,6	-144,4	0,1383
<Vb	133,4	133	0,2998
<Vc	30	30	0
<Ia	-151,5	-151,4	0,0660
<Ib	64,8	64,7	0,1543
<Ic	10,432	10,556	1,1886

TABLA A.63.: Errores modelo JMarti variación de la configuración falla bifásica a tierra Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19775	19777	0,0101
Vb	19775	19777	0,0101
Vc	19775	19777	0,0101
Ia	39,158	40	1,2870
Ib	39,163	40	1,3048
Ic	39,174	40	1,2533
<Va	-90	-90	0
<Vb	150	150	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-106,15	-106	0,4992
<Ib	133,86	134	0,3660
<Ic	13,848	14	3,6178

TABLA A.64.: Errores modelo JMarti variación de la configuración falla trifásica Albán

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20334	20333	0,0049
Vb	20325	20325	0
Vc	10626	10630	0,0376
Ia	34,912	34,913	0,0025
Ib	36,069	36,086	0,0468
Ic	821,07	820,76	0,0376
<Va	-93	-93	0
<Vb	152	152	0
<Vc	15	15	0
<Ia	-94,477	-94,478	0,0010
<Ib	120,20	120,2	0,0012
<Ic	-38,148	-38,15	0,0034

TABLA A.65.: Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14144	14143	0,0070
Vb	7007,8	7014,4	0,0941
Vc	19875	19785	0,4528
Ia	1307,3	1306,5	0,0611
Ib	1275,4	1274,6	0,0627
Ic	39,208	39,193	0,0377
<Va	-137	-137	0
<Vb	179,3	179,3	0
<Vc	29	29	0
<Ia	-131,9	-131,9	0
<Ib	49,1	49,1	0
<Ic	13,205	13,050	1,1700

TABLA A.66.: Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor falla bifásica Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	7588,8	7535,3	0,7049
Vb	5058,3	5058,7	0,0079
Vc	20926	20939	0,0621
Ia	1493,1	1500,2	0,4755
Ib	1305,4	1307,1	0,1302
Ic	31,843	31,789	0,1695
<Va	-144,6	-145,2	0,4149
<Vb	133,4	132,7	0,5247
<Vc	30	30	0
<Ia	-151,5	-151,6	0,0660
<Ib	64,8	65	0,3086
<Ic	10,432	10,326	1,0161

TABLA A.67.: Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor falla bifásica a tierra Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19775	19775	0
Vb	19775	19784	0,0455
Vc	19775	19785	0,0505
Ia	39,158	39.129	0,0740
Ib	39,163	39.146	0,0434
Ic	39,174	39.212	0,0970
<Va	-90	-91	1,1111
<Vb	150	149	0,6666
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-106,15	-106,96	0,7630
<Ib	133,86	133,14	0,5378
<Ic	13,848	13,057	5,7120

TABLA A.68.: Errores modelo JMarti variación de la longitud del conductor falla trifásica Albán

A.2.2.3. Modelo Clarke

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	20411	20388	0,1126
Vb	20248	20243	0,0246
Vc	11003	11149	1,3269
Ia	35,034	35	0,1358
Ib	36,122	36,056	0,1838
Ic	812,49	793	2,4552
<Va	-90	-90	0
<Vb	155	155	0
<Vc	16	17	6,25
<Ia	-89,727	-90	0,0858
<Ib	121,33	121	0,0276
<Ic	-40,423	-38,589	4,5384

TABLA A.69.: Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	14356	14333,3	0,1581
Vb	7031,3	7106,8	1,0737
Vc	19781	19781	0
Ia	1286,4	1279,1	0,5674
Ib	1254,7	1247,4	0,5818
Ic	39,620	39,608	0,0310
<Va	-136	-135	0,7352
<Vb	176,7	176,4	0,1697
<Vc	29	29	0
<Ia	-131	-131,1	0,0763
<Ib	50,1	50	0,1996
<Ic	12,806	12,754	0,4013

TABLA A.70.: Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno falla bifásica Albán

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	7717,1	7720,5	0,0440
Vb	5457,6	5516,9	1,0865
Vc	20950	20943	0,0334
Ia	1481	1471,4	0,6482
Ib	1285	1278,1	0,5369
Ic	31,823	31,81	0,0408
<Va	-143,9	-143	0,6254
<Vb	129,6	130,2	0,4629
<Vc	30	30	0
<Ia	-151	-151,1	0,0662
<Ib	66,7	66,6	0,1499
<Ic	10,324	10,307	0,1646

TABLA A.71.: Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno falla bifásica a tierra Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	19771	19773	0,0101
Vb	19771	19773	0,0101
Vc	19771	19773	0,0101
Ia	39,572	40	0,1718
Ib	39,585	39,517	0,1717
Ic	39,576	39,508	0,1718
<Va	-90	-90	0
<Vb	150	150	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-106,39	-106	0,1503
<Ib	133,58	133,74	0,1197
<Ic	13,574	13,734	1,1787

TABLA A.72.: Errores modelo Clarke variación de la resistividad del terreno falla trifásica Albán

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	20411	20410	0,0048
Vb	20248	20238	0,0493
Vc	11003	11153	1,3632
Ia	35,034	35	0,2520
Ib	36,122	36	0,5785
Ic	812,49	801	1,3570
<Va	-90	-90	0
<Vb	155	155	0
<Vc	16	16	0
<Ia	-89,727	-90	0,2091
<Ib	121,33	122	0,1841
<Ic	-40,423	-38	5,9955

TABLA A.73.: Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	14356	14410	0,3761
Vb	7031,3	7074,2	0,6101
Vc	19781	19783	0,0101
Ia	1286,4	1277,3	0,7074
Ib	1254,7	1245,6	0,7252
Ic	39,620	39,552	0,1733
<Va	-136	-135	0,7352
<Vb	176,7	175,9	0,4527
<Vc	29	29	0
<Ia	-131	-130,8	0,1526
<Ib	50,1	50,3	0,3992
<Ic	12,806	12,966	1,2548

TABLA A.74.: Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores falla bifásica Albán

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	7717,1	7783,3	0,8578
Vb	5457,6	5554,4	1,7736
Vc	20950	20949	0,0047
Ia	1481	1469,3	0,7900
Ib	1285	1278,7	0,4902
Ic	31,823	31,733	0,2828
<Va	-143,9	-143	0,6254
<Vb	129,6	129,1	0,3858
<Vc	30	30	0
<Ia	-151	-150,8	0,1324
<Ib	66,7	67	0,4497
<Ic	10,324	10,527	1,9662

TABLA A.75.: Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores falla bifásica a tierra Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	19771	19773	0,0101
Vb	19771	19773	0,0101
Vc	19771	19773	0,0101
Ia	39,572	40	0,1718
Ib	39,585	39,517	0,1717
Ic	39,576	39,508	0,1718
<Va	-90	-90	0
<Vb	150	150	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-106,39	-106	0,1503
<Ib	133,58	133,74	0,1197
<Ic	13,574	13,734	1,1787

TABLA A.76.: Errores modelo Clarke variación de la distancia entre conductores falla trifásica Albán

Variación de la configuración:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20411	20408	0,0146
Vb	20248	20246	0,0098
Vc	11003	11039	0,3271
Ia	35,034	35	0,0468
Ib	36,122	36	0,0390
Ic	812,49	809	0,4885
<Va	-90	-90	0
<Vb	155	155	0
<Vc	16	16	0
<Ia	-89,727	-90	0,0192
<Ib	121,33	121	0,0482
<Ic	-40,423	-37,997	6,0021

TABLA A.77.: Errores modelo Clarke variación de la configuración falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14356	14358	0,0139
Vb	7031,3	7041,9	0,1507
Vc	19781	19782	0,0050
Ia	1286,4	1285	0,1088
Ib	1254,7	1253,2	0,1195
Ic	39,620	39,618	0,0050
<Va	-136	-136	0
<Vb	176,7	176,6	0,0565
<Vc	29	29	0
<Ia	-131	-131	0
<Ib	50,1	50	0,1996
<Ic	12,806	12,777	0,2202

TABLA A.78.: Errores modelo Clarke variación de la configuración falla bifásica Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	7717,1	7727,5	0,1347
Vb	5457,6	5469,1	0,2107
Vc	20950	20949	0,0047
Ia	1481	1478,9	0,1417
Ib	1285	1283,8	0,0933
Ic	31,823	31,825	0,0062
<Va	-143,9	-143,8	0,0694
<Vb	129,6	129,6	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-151	-151	0
<Ib	66,7	66,6	0,1499
<Ic	10,324	10,307	0,1646

TABLA A.79.: Errores modelo Clarke variación de la configuración falla bifásica a tierra Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19771	19771	0
Vb	19771	19771	0
Vc	19771	19771	0
Ia	39,572	40	0,0303
Ib	39,585	40	0,0303
Ic	39,576	40	0,0303
<Va	-90	-90	0
<Vb	150	150	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-106,39	-106	0,0563
<Ib	133,58	134	0,0449
<Ic	13,574	14	0,4199

TABLA A.80.: Errores modelo Clarke variación de la configuración falla trifásica Albán

Variación de la longitud del conductor:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20411	20386	0,1224
Vb	20248	20257	0,0444
Vc	11003	11049	0,4180
Ia	35,034	35,008	0,0750
Ib	36,122	36,092	0,0844
Ic	812,49	808,89	0,4439
<Va	-90	-91	1,1111
<Vb	155	154	0,6451
<Vc	16	16	0
<Ia	-89,727	-90,902	1,3087
<Ib	121,33	120,22	0,9229
<Ic	-40,423	-39,1	3,2743

TABLA A.81.: Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor falla monofásica Albán

Anexos A. Resultados simulaciones circuito de prueba inicial y circuito Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14356	14356	0
Vb	7031,3	7041,5	0,1450
Vc	19781	19781	0
Ia	1286,4	1285,2	0,0932
Ib	1254,7	1253,4	0,1036
Ic	39,620	39,609	0,0290
<Va	-136	-135	0,7352
<Vb	176,7	176,7	0
<Vc	29	29	0
<Ia	-131	-131	0
<Ib	50,1	50,1	0
<Ic	12,806	12,834	0,2178

TABLA A.82.: Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor falla bifásica Albán

Va	7717,1	7702,3	0,1917
Vb	5457,6	5414,5	0,7897
Vc	20950	20954	0,0190
Ia	1481	1486,7	0,3848
Ib	1285	1289,1	0,3190
Ic	31,823	31,831	0,0251
<Va	-143,9	-144,4	0,3474
<Vb	129,6	129,4	0,1543
<Vc	30	30	0
<Ia	-151	-151	0
<Ib	66,7	66,7	0
<Ic	10,324	10,3	0,2324

TABLA A.83.: Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor falla bifásica a tierra Albán

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19771	19771	0
Vb	19771	19771	0
Vc	19771	19771	0
Ia	39,572	39,56	0,0303
Ib	39,585	39,573	0,0303
Ic	39,576	39,564	0,0303
<Va	-90	-90	0
<Vb	150	150	0
<Vc	30	30	0
<Ia	-106,39	-106,45	0,0563
<Ib	133,58	133,52	0,0449
<Ic	13,574	13,517	0,4199

TABLA A.84.: Errores modelo Clarke variación de la longitud del conductor falla trifásica Albán

A.2.3. Circuito Albán con las variaciones al máximo

A.2.3.1. Modelo Bergeron

Estado estable:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19757	19759	0,0101
Vb	19786	19788	0,0101
Vc	19787	19789	0,0101
Ia	39,617	39,591	0,0656
Ib	39,662	39,635	0,0680
Ic	39,689	39,662	0,0680
<Va	-91	-91	0
<Vb	149	149	0
<Vc	29	29	0
<Ia	-106,34	-106,2	0,1316
<Ib	133,72	133,86	0,1046
<Ic	13,629	13,773	1,0565

TABLA A.85.: Errores modelo Bergeron al variar todos los parámetros en estado estable para el circuito Albán.

Falla monofásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20371	20344	0,1325
Vb	20276	20273	0,0147
Vc	11046	11233	1,6929
Ia	35,615	35,851	0,6626
Ib	36,409	36,311	0,2691
Ic	808,48	784,37	2,9821
<Va	-93	-93	0
<Vb	152	152	0
<Vc	13	14	7,6923
<Ia	-94,14	-94,36	0,2336
<Ib	121,27	121,95	0,5607
<Ic	-35,231	-35,808	1,6377

TABLA A.86.: Errores modelo Bergeron al variar todos los parámetros en falla monofásica para el circuito Albán.

Falla bifásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14127	14217	0,6370
Vb	7246,2	7247,5	0,0179
Vc	19787	19789	0,0101
Ia	1272,3	1272,3	0
Ib	1239,9	1239,8	0,0080
Ic	39,698	39,671	0,0680
<Va	-135	-135	0
<Vb	176,7	176,7	0
<Vc	29	29	0
<Ia	-131,6	-131,6	0
<Ib	49,5	49,4	0,2020
<Ic	13,622	13,767	1,0644

TABLA A.87.: Errores modelo Bergeron al variar todos los parámetros en falla bifásica para el circuito Albán.

Falla bifásica a tierra:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	7755,5	7834,8	1,0225
Vb	5521	5469,5	0,9328
Vc	20908	20892	0,0765
Ia	1457	1450,7	0,4323
Ib	1268,2	1270	0,1419
Ic	32,211	32,299	0,2731
<Va	-141,8	-141,3	0,3526
<Vb	133,5	134,4	0,6741
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-151,2	-151,1	0,0661
<Ib	65,5	65,1	0,6106
<Ic	11,036	11,345	2,7999

TABLA A.88.: Errores modelo Bergeron al variar todos los parámetros en falla bifásica a tierra para el circuito Albán.

Falla trifásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19757	19761	0,0202
Vb	19786	19791	0,0252
Vc	19787	19786	0,0050
Ia	39,617	39,497	0,3029
Ib	39,662	39,852	0,4790
Ic	39,689	39,901	0,5341
<Va	-91	-91	0
<Vb	149	149	0
<Vc	29	29	0
<Ia	-106,34	-106,16	0,1692
<Ib	133,72	134,37	0,4860
<Ic	13,629	13,524	0,7704

TABLA A.89.: Errores modelo Bergeron al variar todos los parámetros en falla trifásica para el circuito Albán.

A.2.3.2. Modelo JMarti

Estado estable:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19775	19758,3	0,0844
Vb	19775	19787,4	0,0627
Vc	19775	19788,5	0,0682
Ia	39,158	39,431	0,6971
Ib	39,163	39,545	0,9754
Ic	39,174	39,332	0,4033
<Va	-90	-91	1,1111
<Vb	150	149	0,6666
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-106,15	-106,27	0,1130
<Ib	133,86	133,16	0,5229
<Ic	13,848	13,773	0,5415

TABLA A.90.: Errores modelo JMarti al variar todos los parámetros en estado estable para el circuito Albán.

Falla monofásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20334	20353	0,0934
Vb	20325	20264	0,3001
Vc	10626	10804	1,6751
Ia	34,912	34,851	0,1750
Ib	36,069	36,409	0,9423
Ic	821,07	808,31	1,5542
<Va	-93	-93	0
<Vb	152	152	0
<Vc	15	14,5	3,3333
<Ia	-94,477	-94,365	0,1185
<Ib	120,20	121,01	0,6726
<Ic	-38,148	-36,808	3,5144

TABLA A.91.: Errores modelo JMarti al variar todos los parámetros en falla monofásica para el circuito Albán.

Falla bifásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14144	14117	0,1908
Vb	7007,8	7147,5	1,9934
Vc	19875	19792	0,4176
Ia	1307,3	1310,3	0,2294
Ib	1275,4	1279,8	0,3449
Ic	39,2081	39,371	0,4154
<Va	-137	-136	0,7299
<Vb	179,3	178,7	0,3346
<Vc	29	29	0
<Ia	-131,9	-131,6	0,2274
<Ib	49,1	49,4	0,6109
<Ic	13,205	13,567	2,7413

TABLA A.92.: Errores modelo JMarti al variar todos los parámetros en falla bifásica para el circuito Albán.

Falla bifásica a tierra:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	7588,8	7634,8	0,6061
Vb	5058,3	5169,5	2,1983
Vc	20926	20898	0,1338
Ia	1493,1	1480,7	0,8304
Ib	1305,4	1294,3	0,8503
Ic	31,843	31,699	0,4522
<Va	-144,6	-142,3	1,5905
<Vb	133,4	134,4	0,7496
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-151,5	-151,1	0,2640
<Ib	64,8	65,1	0,4629
<Ic	10,432	11,012	5,5598

TABLA A.93.: Errores modelo JMarti al variar todos los parámetros en falla bifásica a tierra para el circuito Albán.

Falla trifásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19775	19761	0,0707
Vb	19775	19791	0,0809
Vc	19775	19786	0,0556
Ia	39,158	39,397	0,6103
Ib	39,163	39,352	0,4825
Ic	39,174	39,201	0,0689
<Va	-90	-91	1,1111
<Vb	150	149	0,6666
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-106,15	-106,23	0,0753
<Ib	133,86	133,37	0,3660
<Ic	13,848	13,642	1,4875

TABLA A.94.: Errores modelo JMarti al variar todos los parámetros en falla trifásica para el circuito Albán.

A.2.3.3. Modelo Clarke

Estado estable:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19771	19766,1	0,0247
Vb	19771	19776,2	0,0263
Vc	19771	19788,5	0,0885
Ia	39,572	39,531	0,1036
Ib	39,585	39,445	0,3536
Ic	39,576	39,332	0,6165
<Va	-90	-91	1,1111
<Vb	150	149	0,6666
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-106,39	-106,27	0,1127
<Ib	133,58	133,16	0,3144
<Ic	13,574	13,773	1,4660

TABLA A.95.: Errores modelo Clarke al variar todos los parámetros en estado estable para el circuito Albán.

Falla monofásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	20411	20524	0,5536
Vb	20248	20311	0,3111
Vc	11003	10815	1,7086
Ia	35,034	35,151	0,3331
Ib	36,122	36,312	0,5246
Ic	812,49	795,31	2,1153
<Va	-90	-91	1,1111
<Vb	155	154	0,6451
<Vc	16	15	6,25
<Ia	-89,727	-91,365	1,8247
<Ib	121,33	121,01	0,2718
<Ic	-40,423	-38,808	3,9966

TABLA A.96.: Errores modelo Clarke al variar todos los parámetros en falla monofásica para el circuito Albán.

Falla bifásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	14356	14217	0,9682
Vb	7031,3	7147,5	1,6526
Vc	19781	19792	0,0556
Ia	1286,4	1277,6	0,6840
Ib	1254,7	1249,8	0,3905
Ic	39,620	39,371	0,6307
<Va	-136	-136	0
<Vb	176,7	177,7	0,5659
<Vc	29	29	0
<Ia	-131	-131,6	0,4580
<Ib	50,1	49,5	1,1976
<Ic	12,806	13,167	2,8181

TABLA A.97.: Errores modelo Clarke al variar todos los parámetros en falla bifásica para el circuito Albán.

Falla bifásica a tierra:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	7717,1	7634,8	1,0664
Vb	5457,6	5269,2	3,4520
Vc	20950	20898	0,2482
Ia	1481	1480,7	0,0202
Ib	1285	1294,3	0,7237
Ic	31,823	31,598	0,7070
<Va	-143,9	-142,3	1,1118
<Vb	129,6	131,3	1,3117
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-151	-151,1	0,0662
<Ib	66,7	65,8	1,3493
<Ic	10,324	11,012	6,6640

TABLA A.98.: Errores modelo Clarke al variar todos los parámetros en falla bifásica a tierra para el circuito Albán.

Falla trifásica:

	Sin variación	Con variación	Errores %
Va	19771	19761	0,0505
Vb	19771	19791	0,1011
Vc	19771	19786	0,0758
Ia	39,572	39,397	0,4422
Ib	39,585	39,352	0,5886
Ic	39,576	39,301	0,6948
<Va	-90	-91	1,1111
<Vb	150	149	0,6666
<Vc	30	29	3,3333
<Ia	-106,39	-106,23	0,1503
<Ib	133,58	133,37	0,1572
<Ic	13,574	13,642	0,5009

TABLA A.99.: Errores modelo Clarke al variar todos los parámetros en falla trifásica para el circuito Albán.

B. Resultados simulaciones circuito Meissen

B.1. Circuito Meissen

B.1.1. Estado estable

B.1.1.1. Modelo Bergeron

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6642,04	6642,04	0
Vb	6534,56	6534,56	0
Vc	6501,30	6501,30	0
Ia	69,77	69,77	0
Ib	69,65	69,65	0
Ic	68,41	68,41	0
<Va	-85,053	-85,053	0
<Vb	154,06	154,06	0
<Vc	35,331	35,331	0
<Ia	-105,60	-105,60	0
<Ib	133,15	133,15	0
<Ic	13,865	13,865	0

TABLA B.1.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno Meissen estado estable

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6642,04	6642,07	0
Vb	6534,56	6534,57	0
Vc	6501,30	6501,30	0
Ia	69,77	69,746	0,03
Ib	69,65	69,675	0,04
Ic	68,41	68,399	0,02
<Va	-85,053	-85,053	0
<Vb	154,06	154,06	0
<Vc	35,331	35,331	0
<Ia	-105,60	-105,57	0,03
<Ib	133,15	133,18	0,02
<Ic	13,865	13,866	0,01

TABLA B.2.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores Meissen estado estable

B.1.1.2. Modelo JMarti

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6572,2	6572,2	0
Vb	6562,4	6562,4	0
Vc	6562,4	6562,4	0
Ia	69,452	69,452	0
Ib	69,415	69,415	0
Ic	69,334	69,334	0
<Va	0	0	0
<Vb	-120	-120	0
<Vc	120,1	120,1	0
<Ia	-20,945	-20,945	0
<Ib	-141,03	-141,03	0
<Ic	99,033	99,033	0

TABLA B.3.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno Meissen estado estable

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6572,2	6572,2	0
Vb	6562,4	6562,4	0
Vc	6562,4	6562,4	0
Ia	69,452	69,448	0,0057
Ib	69,415	69,411	0,0057
Ic	69,334	69,331	0,0057
<Va	0	0	0
<Vb	-120	-120	0
<Vc	120,1	120,1	0
<Ia	-20,945	-20,931	0,0668
<Ib	-141,03	-141,02	0,0070
<Ic	99,033	99,047	0,0141

TABLA B.4.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores Meissen estado estable

B.1.2. Estado de falla

B.1.2.1. Modelo Bergeron

Variación de la resistividad:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6606,2	6606,8	0,01
Vb	6547,8	6547,1	0,01
Vc	5911,3	5904,0	0,12
Ia	62,37	62,541	0,28
Ib	69,68	69,568	0,16
Ic	1760,3	1740,8	1,11
<Va	-85,02	-85,018	0
<Vb	153,72	153,72	0
<Vc	27,121	27,299	0,66
<Ia	-101,20	-101,15	0,05
<Ib	126,60	126,67	0,05
<Ic	-2,173	-3,014	38,70

TABLA B.5.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla monofásica Meissen

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6642,4	6642,4	0
Vb	6492,5	6492,5	0
Vc	5094,0	5094,0	0
Ia	69,29	69,29	0
Ib	2476,8	2476,8	0
Ic	2453,3	2453,3	0
<Va	-85,052	-85,052	0
<Vb	140,568	140,568	0
<Vc	29,311	29,311	0
<Ia	-105,262	-105,262	0
<Ib	144,112	144,112	0
<Ic	-34,371	-34,371	0

TABLA B.6.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla bifásica Meissen

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6629,9	6630,0	0
Vb	6371,8	6372,7	0,01
Vc	5021,0	5017,6	0,07
Ia	66,26	66,285	0,05
Ib	2457,9	2454,8	0,13
Ic	2744,8	2747,1	0,08
<Va	-85,067	-85,066	0
<Vb	140,64	140,66	0,01
<Vc	26,657	26,687	0,11
<Ia	-104,87	-104,83	0,04
<Ib	139,30	139,34	0,03
<Ic	-28,369	-28,515	0,51

TABLA B.7.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla bifásica a tierra Meissen

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6642,04	6642,04	0
Vb	6534,56	6534,56	0
Vc	6501,30	6501,30	0
Ia	69,77	69,77	0
Ib	69,65	69,65	0
Ic	68,41	68,41	0
<Va	-85,053	-85,053	0
<Vb	154,067	154,067	0
<Vc	35,331	35,331	0
<Ia	-105,609	-105,609	0
<Ib	133,158	133,158	0
<Ic	13,865	13,865	0

TABLA B.8.: Errores modelo Bergeron variación de la resistividad del terreno falla trifásica Meissen

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6606,2	6605,9	0
Vb	6547,8	6547,8	0
Vc	5911,3	5908,7	0,04
Ia	62,37	62,579	0,34
Ib	69,68	69,752	0,10
Ic	1760,3	1767,7	0,42
<Va	-85,02	-85,02	0
<Vb	153,72	153,72	0
<Vc	27,121	27,085	0,13
<Ia	-101,20	-101,27	0,07
<Ib	126,60	126,52	0,06
<Ic	-2,173	-2,197	1,10

TABLA B.9.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla monofásica Meissen

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6642,4	6642,6	0
Vb	6492,5	6492,7	0
Vc	5094,0	5093,6	0,01
Ia	69,29	68,987	0,44
Ib	2476,8	2477,6	0,03
Ic	2453,3	2453,8	0,02
<Va	-85,052	-85,052	0
<Vb	140,568	140,56	0
<Vc	29,311	29,31	0
<Ia	-105,262	-105,01	0,24
<Ib	144,112	144,11	0
<Ic	-34,371	-34,378	0,02

TABLA B.10.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla bifásica Meissen

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6629,9	6630,0	0
Vb	6371,8	6371,5	0
Vc	5021,0	5018,8	0,04
Ia	66,26	66,058	0,30
Ib	2457,9	2458,1	0,01
Ic	2744,8	2749,9	0,18
<Va	-85,067	-85,067	0
<Vb	140,64	140,64	0
<Vc	26,657	26,63	0,10
<Ia	-104,87	-104,58	0,28
<Ib	139,30	139,29	0,01
<Ic	-28,369	-28,349	0,07

TABLA B.11.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla bifásica a tierra Meissen

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6642,04	6642,07	0
Vb	6534,56	6534,57	0
Vc	6501,30	6501,30	0
Ia	69,77	69,746	0,03
Ib	69,65	69,675	0,04
Ic	68,41	68,399	0,02
<Va	-85,053	-85,053	0
<Vb	154,067	154,067	0
<Vc	35,331	35,331	0
<Ia	-105,609	-105,573	0,03
<Ib	133,158	133,184	0,02
<Ic	13,865	13,866	0,01

TABLA B.12.: Errores modelo Bergeron variación de la distancia entre conductores falla trifásica Meissen

B.1.2.2. Modelo JMarti

Variación de la resistividad del terreno:

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6531,4	6532,1	0,0107
Vb	6577	6576,2	0,0121
Vc	5941	5931,6	0,1582
Ia	61,987	62,151	0,2791
Ib	70,26	70,101	0,2263
Ic	1967,2	1941,4	1,311
<Va	0,0001	0,0001	0
<Vb	-120,4	-120,4	0
<Vc	111	111,2	0,1801
<Ia	-17,206	-17,115	0,3254
<Ib	-148,07	-148,02	0,0337
<Ic	84,2	83,3	1,0688

TABLA B.13.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla monofásica Meissen

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6572,2	6572,2	0
Vb	6405,4	6405,4	0
Vc	4987,6	4987,6	0
Ia	69,452	69,452	0
Ib	2698	2698	0
Ic	2672,7	2672,7	0
<Va	0	0	0
<Vb	-134,8	-134,8	0
<Vc	114,4	114,4	0
<Ia	-20,945	-20,945	0
<Ib	-132,9	-132,9	0
<Ic	48,5	48,5	0

TABLA B.14.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla bifásica Meissen

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6559,6	6559,7	0,0015
Vb	6281,2	6282,1	0,0143
Vc	4896	4892,8	0,0653
Ia	66,785	66,809	0,0359
Ib	2687,7	2683,3	0,1637
Ic	2982,2	2948	0,0603
<Va	0	0	0
<Vb	-134,8	-134,8	0
<Vc	111,7	111,7	0
<Ia	-20,697	-20,662	0,1691
<Ib	-137,5	-137,5	0
<Ic	54	53,8	0,3703

TABLA B.15.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla bifásica a tierra Meissen

	Resistividad 100 ohm-m	Resistividad 400 ohm-m	Errores %
Va	6572,2	6572,2	0
Vb	6562,4	6562,4	0
Vc	6562,4	6562,4	0
Ia	69,452	69,452	0
Ib	69,415	69,415	0
Ic	69,334	69,334	0
<Va	0	0	0
<Vb	-120	-120	0
<Vc	120,1	120,1	0
<Ia	-20,945	-20,945	0
<Ib	-141,03	-141,03	0
<Ic	99,033	99,033	0

TABLA B.16.: Errores modelo JMarti variación de la resistividad del terreno falla trifásica Meissen

Variación de la distancia entre conductores:

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6531,4	6531,4	0
Vb	6577	6577	0
Vc	5941	5941	0
Ia	61,987	62,114	0,2194
Ib	70,26	70,189	0,1010
Ic	1967,2	1966,8	0,0203
<Va	0,0001	0,0001	0
<Vb	-120,4	-120,4	0
<Vc	111	111	0
<Ia	-17,206	-17,222	0,0929
<Ib	-148,07	-147,95	0,0749
<Ic	84,2	84,2	0

TABLA B.17.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla monofásica Meissen

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6572,2	6572,2	0
Vb	6405,4	6426,3	0,3268
Vc	4987,6	4977,3	0,2065
Ia	69,452	69,448	0,0057
Ib	2698	2728,9	1,1452
Ic	2672,7	2704,5	1,1898
<Va	0	0	0
<Vb	-134,8	-135	0,1483
<Vc	114,4	114,1	0,2622
<Ia	-20,945	-20,932	0,0620
<Ib	-132,9	-132,3	0,4514
<Ic	48,5	48,1	0,8247

TABLA B.18.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla bifásica Meissen

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6559,6	6559,4	0,0030
Vb	6281,2	6301,7	0,3264
Vc	4896	4882,4	0,2777
Ia	66,785	66,792	0,0104
Ib	2687,7	2713	0,9413
Ic	2982,2	2966,2	0,5365
<Va	0	0	0
<Vb	-134,8	-134,9	0,0741
<Vc	111,7	111,3	0,3584
<Ia	-20,697	-20,641	0,2705
<Ib	-137,5	-136,8	0,5090
<Ic	54	54,5	0,9259

TABLA B.19.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla bifásica a tierra Meissen

	Distancia al 0%	Distancia al 50%	Errores %
Va	6572,2	6572,2	0
Vb	6562,4	6562,4	0
Vc	6562,4	6562,4	0
Ia	69,452	69,448	0,0057
Ib	69,415	69,441	0,0374
Ic	69,334	69,33	0,0057
<Va	0	0	0
<Vb	-120	-120	0
<Vc	120,1	120,1	0
<Ia	-20,945	-20,931	0,0668
<Ib	-141,03	-141,02	0,0070
<Ic	99,033	99,047	0,0141

TABLA B.20.: Errores modelo JMarti variación de la distancia entre conductores falla trifásica Meissen