

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Eléctrica Departamento de Potencia



Desarrollo de un programa de cálculo general para la Escuela Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo con la inclusión de un módulo para el cálculo de cortocircuito en alta tensión bajo normativa ANSI IEEE C37- 010-1999.

Tutor: Realizado por:

Prof.: Milagros Peña Br: Wilmer Mujica



Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Eléctrica Departamento de Potencia



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado "Desarrollo de un programa de cálculo general para la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo con la inclusión de un módulo para el cálculo de cortocircuito en alta tensión bajo normativa ANSI", realizado por el bachiller Wilmer José Mujica Rodríguez, Cedula de Identidad 13.481.813, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

	Prof.: Milagros Peña	
	Tutor	
Prof.:		Prof.:
Jurado		Jurado

Valencia, 25 de Febrero del 2007.

Dedicatoria

A Dios por haberme ayudado, orientado y acompañado durante todo el desarrollo de este trabajo especial de grado y por haber puesto en mi camino a las personas indicadas cuando lo necesitaba...

Agradecimientos.

A mi familia y amigos por creer en mí y darme animo cuando lo necesitaba...

A mi novia por su apoyo en los momentos más importantes de este trabajo.

A Carlos Boujard por su asesoria y su tiempo dedicado para orientarme en lo relacionado con la programación.

A mi tutora por su paciencia y dedicación en la realización de este trabajo.

A los estudiantes que continúen aportando en la mejoración de este programa en el cual espero encuentren la suficiente ayuda.

Índice General

								Página
Certificado de aprob	ación.							.ii
Dedicatoria								.iii
Agradecimientos								.iv
Índice								.V
Índice de figuras							-	.ix
Índice de tablas								.xii
Introducción								.xiii
1. Capítulo I - El prol	olema.							. 1
1.1 Planteamiento	del problen	na.					-	. 1
1.2. Objetivos							-	. 2
1.2.1 Objetivo g	jeneral.							. 2
1.2.2 Objetivos	específicos						-	. 2
1.3. Justificación								. 3
1.4 Alcance.								. 4
1.5 Limitaciones							•	. 5
2. Capítulo II – Marc	o teórico.						•	. 6
2.1. Antecedentes	de la inves	tigacić	n.					. 6
2.2. Bases teórica	S						•	. 8
2.2.1 Sistema F	or Unidad.							. 8
2.2.1.1 Venta	ajas del uso	del sis	stema	por uni	dad.			. 8
2.2.1.2 Valor	es base.							. 9
2.2.2 Análisis d	e cortocircu	ito.						. 10
2.2.2.1 Carao	cterísticas d	e las c	orrien	tes de	cortoci	cuito.		. 11
2.2.3 Compone	ntes simétri	cas.						. 16
2.2.4 Fallas asi	métricas.							. 19
2.2.4.1 Mode	lación de la	máqu	ina sir	crónica	а.			. 19
2.2.4.2 Mode	lación de lo	s trans	sforma	dores.				. 20
2.2.4.2.1Tr	ansformado	ores co	on taps	a ajus	te nom	inal.		. 21
2.2.4.2.2 T	ransformad	ores c	on tap	s a aju	ste			
diferente a	I nominal.		•	•	•		•	. 24
2 2 4 3 Mode	lación de la	s línea	15					25

2.2.5. Tipos de fallas	. 26
2.2.5.1 Falla monofásica de línea a tierra.	. 26
2.2.5.2 Fallas línea a línea.	. 29.
2.2.5.3 Fallas doble línea a tierra.	. 30
2.2.6 Teorema de Thevenin y la Z _{barra}	. 33
2.2.7 Cálculo de las tensiones en todo el sistema.	. 34
2.2.8 Especificaciones de la norma ANSI-IEEE	
C37.010-1999 para el cálculo de cortocircuito.	. 37
2.2.8.1 Método simplificado.	. 41
2.2.8.2 Método con ajuste para el decremento de AC y DC.	. 42
2.2.8.3 Procedimiento para seleccionar	
el factor de corrección.	. 45
3. Capítulo III - Marco metodológico	. 47
3.1 Diseño de la investigación	. 47
3.2 Área de la Investigación.	. 47
3.3 Técnica de recolección de datos	. 48
3.4 Fases de la investigación	. 48
4. Capítulo IV – Desarrollo del Algoritmo de Cálculos	
en Sistemas de Potencia (C.E.S.P).	. 50
4.1 Programa de cálculo general para la Escuela	
de ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo	. 50
4.1.2 Selección de Visual C++.	. 50
4.1.3 Selección de la base de datos Microsoft Access	. 54
4.1.4 Conexión de la base de datos.	. 55
4.1.5 Instalación de C.E.S.P.	. 56
4.1.5.1 Requisitos del sistema.	. 56
4.1.5.2 Pasos para la instalación de C.E.S.P	. 56
4.1.5.3 Procedimiento para crear la conexión ODBC.	. 61
4.1.5.4 Registro de componente para la instalación de C.E.S.P.	. 64
4.1.6 Ventana principal de C.E.S.P.	. 65
5. Capítulo V – Módulo de cálculo de fallas	. 67
5.1 Módulo de cálculo de fallas	. 67
5.1.2 Cálculo de cortocircuito ANSI IEEE C37-010-1000	67

5.1.3 Calculo de cortocirculto clasico	•		. 68
5.1.4 Diagrama del algoritmo de cálculo de cortocircuito	٥.		. 68
5.1.4.1 Carga de datos.			. 71
5.1.4.2 Lectura de la base de datos			. 71
5.1.4.3 Cálculo de las tensiones base			. 71
5.1.4.4 Conversión de los valores en por unidad.			. 71
5.1.4.5 Solicitud del tipo de cálculo			. 72
5.1.4.6 Formación de las matrices de admitancias.			. 72
5.1.4.6.1 Matrices para el cálculo clásico			. 72
5.1.4.6.2 Matrices para el cálculo			
ANSI IEEE C37-010-1999			. 72
5.1.4.7 Solicitud del punto fallado.			. 73
5.1.4.8 Obtención de las matrices L y U (superior e in	nferior)).	. 73
5.1.4.9 Obtención de la impedancia de Thevenin.			. 73
5.1.4.10 Cálculo de las tensiones y corrientes			
en las barras.			. 73
5.1.4.11 Impresión de resultados			. 74
5.2 Introducción de los datos del sistema de potencia a ar	nalizar	•	. 74
5.2.1 Uso de las plantillas de entrada de datos			. 77
5.2.1.1 Uso de la plantilla de Introducción de los gen	erador	es.	. 78
5.2.1.2 Uso de la plantilla de Introducción			
de los transformadores de dos devanados		•	. 79
5.2.1.3 Uso de la plantilla de Introducción de los			
transformadores de tres devanados			. 80
5.2.1.4 Uso de la plantilla de Introducción de las líne	as.		. 81
5.2.1.5 Uso de la plantilla de Introducción de las carg	as	-	. 82
5.2.1.6 Uso de la plantilla de Introducción de los moto	ores	-	. 83
5.3 Visualización de resultados		-	. 84
5.3.1 Visualización de la matriz de admitancias		-	. 85
5.4 Impresión de resultados		-	. 86
5.5 Validación		-	. 88
5.5.1 Caso 1			. 88
5.5.1.1 Sistema del caso1.	•	•	. 88
5.5.1.2 Resolución planteada en el texto .			. 89

5.	5.1.3 Resultados obtenidos co	on C.E	.S.P.		•		. 92
5.5.2 C	Caso 2	-		-			. 93
5.	5.2.1 Sistema del caso2.	-		-			. 93
5.	5.2.2 Resolución planteada e	n el tex	cto				. 94
5.	5.2.3 Resultados obtenidos co	on C.E	.S.P.				. 97
5.5.3 C	aso 3						. 98
5.	5.3.1 Sistema del caso3.						. 99
5.	5.3.2 Resolución planteada e	n el tex	cto				. 100
5.	5.3.3 Resultados obtenidos co	on C.E	.S.P.				. 100
5.5.4 C	aso 4		-				. 102
5.	5.4.1 Sistema del caso 4.		-				. 102
5.	5.4.2 Resolución planteada e	n el tex	cto				. 103
5.	5.4.3 Resultados obtenidos co	on C.E	.S.P.				. 106
5.5.5 A	nálisis de resultados		-				. 107
Conclusio	ones y Recomendaciones.		-				. 108
Bibliograf	ía		-				. 110
Anexo A	Extracto del Código de C.E.S.	Р.	-				. 112
Anexo B	Obtención de los elementos d	e la Z _b	_{arra} a pa	ırtir de	la Y _{bar}	ra…	. 115
Anexo C	Salida de los resultados obter	nidos c	on C.E	.S.P			. 121
Anexo D	Norma ANSI IEEE Std C37-0	10-199	9.Appli	cation			
auide for	AC High Voltage Circuit Brake	<u>-</u> r					136

Índice de Figuras

	Página
Fig. 2.1. Circuito R-L en Serie	. 12
Fig. 2.2. Corriente máxima asimétrica de cortocircuito	. 13
Fig. 2.3. Corriente de Cortocircuito de un Generador	. 14
Fig. 2.4. Componente Simétrica de la corriente de cortocircuito	. 14
Fig. 2.5. Envolvente de la componente simétrica	. 15
Fig. 2.6. Aproximaciones de la corriente de Falla	
y de la Reactancia del generador.	. 16
Fig. 2.7Componentes de secuencia.	. 17
Fig. 2.8 Redes de secuencia de la máquina sincrónica	. 19
Fig. 2.9 Circuito Equivalente del Transformador de dos Devanados.	. 22
Fig. 2.10 Modelo del transformador para secuencia cero	. 22
Fig. 2.11 Circuito equivalente de secuencia cero	
de los transformadores.	. 23
Fig. 2.12 Circuito del transformador de tres devanados	
para secuencia cero.	. 24
Fig. 2.13 Modelo π Para el Transformador de dos Devanados	
con Taps en Ajuste Distinto al Nominal.	. 25
Fig. 2.14 Circuito equivalente monofásico	
para una Línea de transmisión.	. 26
Fig. 215 Falla Monofásica a tierra.	. 27
Fig. 2.16. Conexión de las redes de secuencia	
para una falla monofásica a tierra.	. 28
Fig. 2.17 Falla línea a línea.	. 29
Fig. 2.18. Conexión de las redes de secuencia	
para Una Falla línea a línea.	. 31
Fig. 2.19 Falla doble línea a tierra.	. 31
Fig. 2.20. Conexión de las Redes de Secuencia	
para una falla doble línea a tierra.	. 33
Fig. 2.21 Circuito equivalente de Thevenin.	. 33
Fig. 2.22 Curva para seleccionar el factor de decrecimiento DC	. 44
Fig. 2.23. Curva para seleccionar el factor de decrecimiento AC	. 45

Fig. 4.1. Icono de Instalación	•	•		•	-	. 56
Fig. 4.2. Proceso de Preparación de la	Instala	ción.				. 57
Fig. 4.3. Diálogo 1 de la Instalación.	•					. 58
Fig. 4.4. Diálogo 2 de la Instalación.						. 58
Fig. 4.5. Diálogo 3 de la Instalación.	•					. 59
Fig. 4.6. Diálogo 4 de la Instalación.						. 60
Fig. 4.7. Diálogo 5 de la Instalación.						. 60
Fig. 4.8. Diálogo 6 de la Instalación.						. 61
Fig. 4.9. Icono de orígenes de datos.						. 62
Fig. 4.10. Ventana de administrador de	orígen	ies de (datos C	DDBC.		. 62
Fig. 4.11. Ventana para crear nuevo or	igen de	datos				. 63
Fig. 4.12. Ventana de configuración de	ODBC					. 63
Fig. 4.13. Ventana para seleccionar ba	se de d	latos.				. 64
Fig. 4.14. Icono de C.E.S.P						. 65
Fig. 4.15. Ventana principal del C.E.S.I	Ρ.					. 66
Fig. 5.1. Diagrama de flujo del módulo	de cort	ocircuit	Ю.			. 69
Fig.5.2. Ventana principal de C.E.S.P.						. 74
Fig.5.3. Ventana principal del módulo o	le fallas	S .	·		•	. 75
Fig.5.4. Plantilla para la introducción de	e datos					. 77
Fig.5.5. Plantilla para la introducción de	e datos	de los	genera	adores	-	. 78
Fig.5.6. Plantilla para la introducción de	e datos					
de los transformadores de dos devana	idos.	•			•	. 79
Fig.5.7. Plantilla para la introducción de	e datos					
de los transformadores de tres devana	dos.					. 80
Fig.5.8. Plantilla para la introducción de	e datos	de las	líneas	=		. 81
Fig.5.9. Plantilla para la introducción de	e datos	de las	cargas	S.	•	. 82
Fig.5.10. Plantilla para la introducción o	de dato	s de lo	s moto	res.	•	. 83
Fig.5.11. Visualización de los resultado	s del c	álculo (de cort	ocircui	to.	. 84
Fig.5.12. Visualización de la Y barra.	•	•			•	. 85
Fig.5.13. Resultados del cálculo de cor	tocircui	ito				
exportados para Impresión	•					. 86
Fig.5.14. Visualización de la Ybus del s	sistema	I				
Exportados para Impresión		•	•		•	. 86
Fig. 5.15 Sistema del caso 1.	_	_	_	_	_	. 88

Fig. 5	5.16	Circuitos equivalentes de secuencia	a	•	•	•	. 89
Fig. 5	5.17	Red para falla monofásica					. 89
Fig. 5	5.18	Red para falla bifásica.					. 90
Fig. 5	5.19	Red para falla bifásica a tierra.					. 90
Fig. 5	5.20	Red para falla trifásica a tierra.					. 90
Fig. 5	5.21	Sistema del caso 2					. 93
Fig. 5	5.22	Circuitos equivalentes de las secue	ncias.				. 94
Fig. 5	5.23	Red para falla monofásica					. 94
Fig. 5	5.24	Red para falla bifásica					. 95
Fig. 5	5.25	Red Para falla bifásica a tierra.					. 95
Fig. 5	5.26	Red para falla trifásica a Tierra.					. 95
Fig. 5	5.27	Sistema del caso 3.					. 98
Fig. 5	5.28	Circuitos equivalentes de las secue	ncias.				. 99
Fig. 5	5.29	Red para falla trifásica a tierra.					. 99
Fig. 5	5.30	Red para falla monofásica a tierra.					. 100
Fig. 5	5.31	Sistema del caso 4					. 101
Fig. 5	5.32	Circuitos equivalentes de las secue	ncias.				. 102
Fig. 5	5.33	Red para falla trifásica a tierra.					. 103
Fig. 5	5.34	Red para falla bifásica					. 103
Fig. 5	5.35	Red Para falla bifásica a tierra.					. 104
Fig. 5	5.36	Red para falla trifásica a Tierra.					. 104

Índice de Tablas

			Pagina
Tabla 2.1. Relaciones X/R para distintos generadores.			. 43
Tabla 4.1. Espacio en memoria de los tipos de datos.			. 52
Tabla 4.2. Rango, usos y precisión de los tipos			
de datos de Visual C++			. 53
Tabla 5.1. Datos generales del sistema del caso 1			. 88
Tabla 5.2. Datos de los equipos del sistema del caso 1.			. 88
Tabla 5.3. Resultados del caso 1.			. 91
Tabla 5.4. Resultados del cálculo con C.E.S.P del caso 1.			. 91
Tabla 5.5. Comparación de los resultados entre C.E.S.P			
y el texto en el caso 1.			. 92
Tabla 5.6. Datos generales del sistema del caso 2.			. 93
Tabla 5.7. Datos de los equipos del sistema del caso 2.			. 93
Tabla 5.8. Resultados del cálculo para el caso 2.			. 96
Tabla 5.9. Resultados del cálculo con C.E.S.P del sistema			
del caso 2.		•	. 96
Tabla 5.10. Comparación de resultados entre C.E.S.P y el o	casc	2.	. 97
Tabla 5.11 Datos generales del sistema del caso 3			. 98
Tabla 5.12. Datos de los equipos del sistema del caso 3.			. 98
Tabla 5.13. Resultados del cálculo para el caso 3.			. 100
Tabla 5.14. Resultados del cálculo con C.E.S.P del caso 3			. 100
Tabla 5.15 Comparación de resultados entre C.E.S.P			
y el texto del caso 3.			. 100
Tabla 5.16 Datos generales del sistema del caso 4			. 101
Tabla 5.17. Datos de los equipos del sistema del caso 4.			. 102
Tabla 5.18. Resultados del cálculo para el caso 4.			. 104
Tabla 5.19. Resultados del cálculo con C.E.S.P del caso 4			. 105
Tabla 5.20 Comparación de resultados entre C.E.S.P			
v el texto del caso 4.	_	_	. 106

Introducción

La planificación y operación de un Sistema Eléctrico de Potencia requiere la predicción y simulación de fenómenos que pudiesen ocurrir tanto en condiciones normales de operatividad como en condiciones anormales o de fallas, para llegar a determinar como respondería el sistema ante alguno de estos eventos se realizan una gran cantidad de cálculos que pretenden cuantificar las variables básicas de los sistemas, tanto en condiciones estables, como cuando ocurre un evento que lo perturba, como un cortocircuito, una apertura de línea, la conexión y desconexión de algún equipo, entre otros.

Muchos de estos cálculos pueden ser mas o menos extensos dependiendo del tamaño del sistema y de las simplificaciones que se hagan en los modelos a utilizar, debido a esto se desarrollan programas computacionales que incorporan los distintos algoritmos que realizan estos cálculos de una manera mucho mas rápida y sencilla, además de poder visualizar de forma gráfica y tabulada los resultados, optimizando así los tiempos de desarrollo de los sistemas y la operación de los mismos.

El presente trabajo desarrolló un programa de cálculo general para los sistemas de potencia donde se puedan incorporar módulos que realicen los distintos cálculos útiles en los sistemas de potencia, como son flujo de carga, cortocircuito, estabilidad, parámetros de líneas, parámetros de máquinas, cálculo de armónicos, entre otros.

De todos los posibles cálculos en los sistemas de potencia, en este trabajo se realizó el módulo de cálculo de cortocircuito, el cual incorpora dos métodos diferentes, uno es el clásico llamado así debido a que incorpora modelos matemáticos que buscan tener en cuenta la mayor cantidad de factores posibles para una precisión numérica bastante exacta, y el otro método es el sugerido por la normativa americana ANSI IEEE C37-010-1999 en cual se desprecian una serie de factores, debido a que se consideran poco relevantes en la exactitud del resultado, además se han estimado que las

diferencias que pudieran presentarse con los valores reales favorecen el diseño de las protecciones, haciendo así mas seguro y robusto el sistema.

El uso de este método trae consigo una gran ventaja en lo que respecta a la velocidad y al espacio en la memoria de los computadores lo cual puede ser provechoso en determinadas situaciones.

El trabajo realizado se divide en cinco capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo 1: El Problema.

Este capítulo incluye planteamiento del problema, objetivos, justificación, alcance y limitaciones.

Capítulo 2: Marco teórico.

Este capítulo incluye los antecedentes y las bases teóricas necesarias para la comprensión del trabajo especial de grado.

Capítulo 3: Marco Metodológico.

Este capítulo incluye la metodología con la que fue realizada la investigación.

 Capítulo 4: Desarrollo del algoritmo de Algoritmo de Cálculo en Sistemas de Potencia.

Este capítulo incluye las ventajas del lenguaje utilizado, presentación del programa y la instalación del programa C.E.S.P.

Capítulo 5: Módulo de Cálculo de Fallas.

Este capítulo incluye el cálculo de cortocircuito ANSI IEEE C37-010-1999 realizado por el programa, el cálculo de cortocircuito clásico realizado por el programa, manual del usuario y la validación

Capítulo I - El Problema

1.1 Planteamiento del problema

En el área de los sistemas de potencia, uno de los factores determinantes para su buen diseño, funcionamiento y operación es el estudio de los cortocircuitos. Este fenómeno afecta el flujo normal de energía desde los centros de generación a través de la red hacia la carga, así como también el cortocircuito puede dañar a los equipos que se encuentren en el recorrido de la corriente de falla debido al alto nivel de calor que se puede generar en el mismo, pudiendo ocasionar pérdida total del servicio eléctrico y hasta pérdidas humanas.

Debido a este hecho, es de gran importancia el cálculo de las corrientes de falla y sus consecuencias de una forma rápida, confiable y práctica, para así diseñar las protecciones y especificar los equipos adecuados de forma tal que se puedan controlar los efectos de esta corriente.

En la actualidad existen programas computacionales avanzados que facilitan estos cálculos a través de modelos previamente establecidos, los cuales son utilizados tanto por empresas del sector eléctrico en el diseño y monitoreo de los sistemas, como por los estudiantes de las asignaturas relacionadas con los sistemas de potencia, para poder comprobar sus cálculos y simular condiciones anormales que puedan presentarse.

En la Universidad de Carabobo existe la necesidad de tener en una sola herramienta de varios cálculos eléctricos, en la que se puedan agrupar de manera sencilla un conjunto de programas necesarios para la resolución o el estudio de los sistemas de potencia y que sea de fácil acceso a los estudiantes y profesores de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

En este sentido, se realizó una plataforma de cálculo moderna, fácil de usar y gratuita en la que se puedan ir integrando varios programas necesarios en el estudio de sistemas de potencia.

Se incluyo un módulo para el cálculo de cortocircuito bajo la normativa ANSI IEEE C37-010-1999 y para el cálculo de cortocircuito clásico, el cual es el primer programa de la herramienta de cálculo realizado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar una herramienta computacional y un módulo de cálculo de cortocircuito en alta tensión, bajo la normativa ANSI IEEE C37-010-1999, para la Escuela de Ingeniería Eléctrica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar los métodos de cálculo mas adecuados en los sistemas de potencia, para el estudio de cortocircuito.
- Analizar la normativa ANSI IEEE C37-010-1999 para aplicar la metodología sugerida en el algoritmo de cálculo de cortocircuito.
- Desarrollar una plataforma para la inclusión de varios módulos posteriores tales como, cálculo de flujo de carga, cortocircuito, estabilidad, armónicos, entre otros.

- Implementar la plataforma y el algoritmo para el cálculo de los cortocircuitos.
- Validar el programa por medio de ejemplos prácticos que estén previamente comprobados.

1.3 Justificación.

Debido a lo extenso que pueden resultar algunos de los cálculos que se realizan en el área de los sistemas de potencia y a la dependencia que existe entre las diversas variables calculadas en procedimientos distintos (con algoritmos distintos) es necesario la realización de un trabajo especial de grado para la Escuela de Ingeniería Eléctrica para contar con una herramienta moderna, fácil de usar, gratuita y que permita la unión de los diferentes programas bajo un mismo formato y poder aprovechar la información obtenida en un cálculo para usarla en otras aplicaciones.

Actualmente los programas de uso comercial son muy costosos por el hecho de ser realizados generalmente en el exterior, por grandes empresas y por consiguiente no están siempre disponibles a los estudiantes y profesores.

En la Escuela de Ingeniería Eléctrica existen algunas herramientas computacionales de cálculos eléctricos que se encuentran en forma separada. Con esta herramienta computacional se pretende agrupar a todos bajo un mismo formato y que además sus módulos estén validados para poder ser usados en cualquier aplicación.

Es importante destacar que el cálculo de cortocircuito que se realizó es bajo la normativa ANSI-IEEE C37-010-1999, la cual indica las consideraciones y pasos a realizar para el cálculo de un cortocircuito en alta tensión.

El hecho de que el cálculo de cortocircuito esté apoyado por dicha normativa le otorga una competitividad al programa fuera y dentro de la universidad, lo cual dará un prestigio a la Escuela de Ingeniería Eléctrica.

1.4 Alcance

A continuación se describe el alcance de la investigación:

- El presente trabajo genera una herramienta computacional que permite poder agrupar todos los programas que se realicen en el Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo bajo un mismo formato y con una relación de todos entre si a través de una misma base de datos.
- La herramienta computacional elegida para la elaboración de este proyecto de grado es Visual C++ por ser un programa muy versátil, de gran uso y difusión a nivel comercial, además de estar basado en componentes bajo ambiente Windows, que facilitan su uso a nivel personal, así como también su versatilidad matemática.
- Se incluye un módulo que calcula de forma rápida y precisa para un sistema de potencia (de número de barras solo limitado por la memoria del computador) los valores de las corrientes y tensiones en cualquier parte del sistema en el momento en el que ocurre una falla.
- Las fallas que se contemplan son los cortocircuitos tanto balanceados como desbalanceados.

- El cálculo toma en cuenta todas las condiciones de falla realizando modelos muy aproximados a la realidad. Incluyendo factores como los posibles desfasajes en los transformadores y las variaciones en los taps de los transformadores, entre otros.
- Dicho estudio y cálculo se realizó tomando las recomendaciones de las normas ANSI/IEEE C37-0.10-1999 donde se explica cómo calcular las corrientes de primer ciclo y de interrupción, tanto simétrica como asimétrica.
- Para realizar todos los cálculos se deben representar adecuadamente todos los elementos que conforman el sistema de potencia.

1.5 Limitaciones

Las herramientas computacionales requieren de una preparación bastante amplia en lo que se refiere a codificación y manejo de interfaz gráfica, como también manejo de base de datos, es por esto que la realización del proyecto requirió de asesoramiento constante por parte de profesionales en esta área, que son tanto internos como ajenos al recinto universitario.

Capítulo II - Marco Teórico

2.1 Antecedentes

En el área relacionada con los algoritmos de cálculo de cortocircuito existen algunas investigaciones realizadas en años anteriores que han servido como base para este trabajo especial de grado.

 Rodríguez Carlos y Caridad Leonard (2004). Implementación de un módulo de cálculo de cortocircuito bajo la norma ANSI para el software ASP (Analizador de Sistemas de Potencia) perteneciente a la UNEFA. Este programa fue realizado en visual pascal y presenta una muy completa herramienta computacional para el cálculo en los sistemas de potencia, contando con una interfaz gráfica y s encuentra bajo ambiente Windows

 Pandare José M (2001). Software para la enseñanza de los Sistemas de Potencia perteneciente a la Universidad de Carabobo.

Este programa presenta gráficos y visualización de carga de datos de buena calidad y cálculos de buena aproximación aunque no se rige bajo ninguna normativa internacional y no toma en cuenta los cambios de fase que ocurren en los transformadores.

 Burgos Luis y Fuenmayor Manuel (1998). Programa de cálculo de cortocircuito en Sistemas de 34.5 KV y a nivel industrial perteneciente a la Universidad de Carabobo.

Este programa no se encuentra bajo ambiente Windows por lo que no es muy práctico su uso además de estar limitado a 25 barras.

Norma ANSI IEEE C37-010-1999.

La norma ANSI IEEE C37-010-1999 realiza un estudio acerca de los parámetros a ser tomados en cuenta para la selección de interruptores en alta tensión, y contempla un apartado acerca del cálculo de la corriente de cortocircuito.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Sistema por Unidad.

En los sistemas de potencia es una práctica común expresar los valores de las variables e impedancias (Voltios, Amperios, Ohmios, Potencia, etc.) como una nueva magnitud denominada "por unidad" (°/1).

Esta magnitud resulta de dividir el valor real de una variable y el valor base o referencia base de la misma el cual tiene una unidad igual a la del valor real resultando un número adimensional.

Entonces de acuerdo a esta definición el valor de una variable en por unidad es:

$$Variable(^{\circ}/1) = \frac{Valor _ Re \ al _ de _ la _ Variable[U]}{Valor _ Base _ de _ la _ Variable[U]}$$
(2.1)

En algunos casos se expresa el valor en por unidad como un porcentaje, práctica muy común.

2.2.1.1 Ventajas del Uso del Sistema por Unidad.

El sistema por unidad es una forma muy común de manejar los valores en los sistemas de potencia debido a que se obtienen algunas ventajas operacionales como son:

- La impedancia de las máquinas (motores, generadores, transformadores, entre otros) son del mismo orden de magnitud, independientemente del tamaño de los mismos.
- La impedancia equivalente en por unidad de cualquier transformador es igual referida a cualquier lado.
- Los transformadores trifásicos tienen la misma impedancia.
- Se reduce el empleo del $\sqrt{3}$ en los cálculos trifásicos.
- Los fabricantes especifican las impedancias de los equipos en por unidad o en por ciento.
- Si se seleccionan las bases de manera que cumplan con la relación de transformación se pueden eliminar las relaciones de transformación y sustituir por un equivalente.

2.2.1.2 Valores base.

Para la selección de los valores bases se deben fijar la menor cantidad de variables posibles, como bases. En electricidad existen seis variables

- Tensión
- Corriente
- Potencia aparente
- Impedancia
- Fases
- Tiempo

El tiempo es omitido en régimen permanente, la fase es adimensional y de las cuatro restantes con solo fijar dos de ellas las demás quedan definidas ya que están relacionadas entre sí.

Lo más usual es asignar valores bases a la potencia aparente y a la tensión respetando las relaciones básicas como son la ley de Ohm, las leyes Kirchhoff y la ley de las Potencias.

Las ecuaciones en circuitos trifásicos para la impedancia base y las corrientes bases son:

$$Z_{\text{bnase}} = \left(\frac{V_{\text{base}}^{2}}{S_{\text{base}}}\right)$$
 (2.2)

$$I_{base} = \left(\frac{S_{base}}{\sqrt{3} * V_{base}}\right) \tag{2.3}$$

En muchos equipos (como son motores generadores, transformadores, entre otros) la impedancia viene dada en por unidad generalmente en una base diferente a la del sistema, por lo que es necesario cambiarla a la nueva base, usando la ecuación:

$$Z(^{\circ}/1)nueva = Z(^{\circ}/1)vieja * \left(\frac{Vbase_vieja}{Vbase_nueva}\right)^{2} * \left(\frac{Sbase_nueva}{Sbase_vieja}\right)$$
 (2.4)

Donde:

Z_{(°/1)vieia} = impedancia de la placa del equipo (pu).

Z_{(°/1)nueva} = impedancia transformada a la nueva base del sistema (pu).

V base vieia = Tensión nominal del equipo (V).

V base nueva = Tensión base del sistema (V).

S base vieia = Potencia Aparente nominal del equipo (VA).

S base nueva = Potencia Aparente base del sistema (VA).

2.2.2 Análisis de Cortocircuito.

Un cortocircuito es un fenómeno que ocurre cuando se ponen en contacto dos puntos que se encuentran a diferente potencial, a través de una baja impedancia, trayendo como consecuencia elevadas corrientes y por consiguiente, altas temperaturas que pueden generar destrucción de elementos del sistema de potencia.

A pesar de las previsiones para que esto no ocurra, sucede algunas veces debido a descargas atmosféricas, envejecimiento de los aislamientos, sobre tensiones, aperturas y cierre de líneas, entre otros.

Los cortocircuitos se tratan de evitar utilizando elementos de protección intercalados en puntos críticos del sistema los cuales interrumpen el flujo de la corriente de manera muy rápida, de allí la importancia de conocer los posibles valores de las corrientes de falla y su duración para poder especificar dichos equipos.

Cuando ocurre una falla, ésta es alimentada por diversas fuentes que pueden contribuir a la magnitud de la corriente, estas fuentes son llamadas fuentes de cortocircuito y pueden ser, los generadores, los motores síncronos, los motores de inducción y la red de potencia.

Muchos métodos se utilizan para determinar el valor del cortocircuito, siendo algunos más exactos y complejos que otros, por lo que deben emplearse según la utilidad requerida. A continuación se introducen los conceptos básicos de la corriente de cortocircuito para ilustrar las diferencias existentes entre el método clásico y el método ANSI IEEE C37-010-1999.

2.2.2.1 Características de la Corriente de Cortocircuito

Las fallas que ocurren en un sistema de potencia tienen la característica de durar solo un tiempo, es decir, es de carácter transitorio. Durante este período la corriente presenta una forma de onda sinusoidal a frecuencia constante la cual generalmente es de 50Hz o 60Hz, con un valor máximo el cual va decrementándose hasta llegar a un valor estable.

Para explicar el fenómeno de la corriente de cortocircuito en un sistema se supondrá en principio, la energización de un circuito monofásico RL conformado por una fuente de tensión sinusoidal ideal, una resistencia y una inductancia, conectados todos en serie como se indica en la figura 2.1. La tensión del modelo viene expresada según la ecuación 2.5.

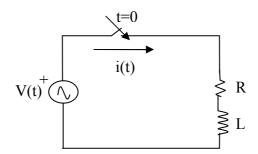


Fig. 2.1. Circuito R-L en Serie

$$V(t) = VmSen(\omega t + \alpha)$$
 (2.5)

Donde:

Vm = Voltaje máximo de la onda senoidal de tensión.

ω= Frecuencia de oscilación de la señal.

 α = Ángulo de la señal en el momento del cierre del interruptor.

t = tiempo.

La corriente que circula en este circuito se obtiene al recorrer el camino con impedancias inductivas y resistivas, como son normalmente los sistemas de potencia. Aplicando las ecuaciones de Kirchhoff y resolviendo las ecuaciones diferenciales de primer grado que se generan, queda la ecuación 2.6.

$$i(t) = \left(\frac{Vm}{|Z|}\right). \left[Sen\left(wt + \alpha - \theta\right) - e^{\left(\frac{-R}{L}\right)t}.Sen\left(\alpha - \theta\right)\right]$$
 (2.6)

Donde:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\theta = Tan^{-1}(\omega L/R)$$
(2.7)

El primer término de la ecuación 2.6 varía senoidalmente y es la corriente de régimen permanente, mientras que el segundo miembro de la ecuación 2.6 decae exponencialmente a razón de L/R y representa la corriente transitoria llamada también componente continua.

Esta componente continua puede presentar características de asimetría con respecto al eje X (tiempo) del oscilograma de la corriente, si el valor de α - θ es igual a π o 0 en el instante de la falla se produciría el valor mínimo de asimetría, por el contrario si el valor de α - θ es igual a π /2 o - π /2 en el instante de la falla se produciría la máxima asimetría de la corriente como se muestra en la figura 2.2.

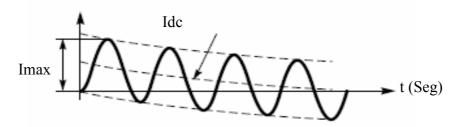


Fig. 2.2. Corriente Máxima en un Circuito R-L Serie

Esta componente de continua disminuye rápidamente debido a que su energía es absorbida por la resistencia del sistema en forma de calor, siendo la velocidad del decaimiento inversamente proporcional a la relación X/R del sistema, hecho similar al mostrado en la figura 2.2.

El modelo anteriormente mencionado no toma en cuenta los fenómenos magnéticos que ocurren dentro de la máquina, por lo que para realizar un estudio más exacto se toman oscilogramas de las corrientes de las máquinas en el momento de producirle una falla en los terminales de la misma. Una muestra de dichos oscilogramas es la mostrada en la figura 2.3.

Como en un sistema trifásico existen tres tensiones desfasadas 120° el valor máximo de corriente asimétrica solo podría ocurrir en una sola fase del sistema.

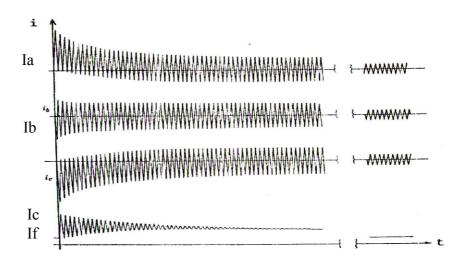


Fig. 2.3 Corrientes de Cortocircuito de un Generador. Figura Tomada de Alejandro Lukostchuk.

Si se analiza bien la figura 2.3, además de la componente asimétrica, la componente de corriente alterna varia en función de una envolvente con el tiempo la cual es simétrica con respecto al eje X. Esta componente simétrica disminuye al transcurrir el tiempo de la falla, debido a que el flujo magnético producido por las corrientes de cortocircuito de las fases se ve obligado a pasar por caminos de alta reluctancia inicialmente, para luego moverse a caminos de menor reluctancia y así poder cumplir con el principio del flujo constante, como se aprecia en la figura 2.4.



Fig.2.4 Componente Simétrica de la Corriente de Cortocircuito

El efecto en conjunto de la componente simétrica y la componente asimétrica es lo que se refleja en los oscilogramas de las corrientes de cortocircuito de la figura 2.3.

De acuerdo con la variación de la envolvente de la componente simétrica de la corriente de cortocircuito se puede realizar un estudio dividiendo la corriente en tres intervalos: el período subtransitorio, en el cual la envolvente decae rápidamente, el período transitorio, en el cual la envolvente decae más lentamente y el período de régimen permanente donde la corriente de cortocircuito es totalmente senoidal.

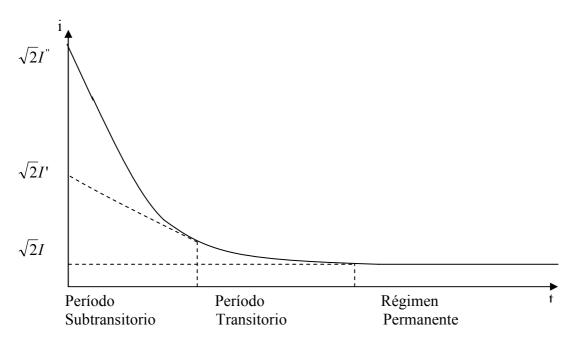


Fig. 2.5. Envolvente de la Componente Simétrica

Físicamente lo que ocurre en el interior de las máquinas es que existe una variación de voltaje en los devanados de armadura debido a reacción de de inducido, lo que provoca una variación de la corriente, sin embargo para efectos de cálculo se puede asumir que la tensión no varía sino que la que cambia, es la reactancia haciendo que la corriente cambie, en consecuencia. Debido a este fenómeno y a la simplificación en tres períodos antes mencionada se definen tres reactancias.

X" = Reactancia subtransitoria.

X' = Reactancia transitoria.

X = Reactancia de régimen permanente.

La figura 2.6 muestra la relación de las reactancias definidas en intervalos posteriores a la falla y su respectiva corriente asociada.

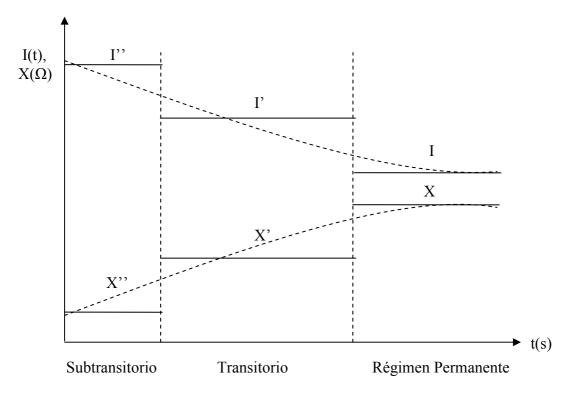


Fig. 2.6. Aproximaciones de la Corriente de Falla y de la Reactancia del Generador

2.2.3 Componentes Simétricas

La teoría de las componentes simétricas consiste en que si se tiene un sistema de n fasores desbalanceados relacionados entre si, estos fasores pueden ser representados o descompuestos como un sistema de n-1 fasores balanceados (es decir del mismo tamaño y separados la misma distancia angular entre sí), mas un sistema de secuencia cero (es decir fasores del mismo tamaño y orientados en la misma dirección).

Dicha teoría fue enunciada en 1918 por C.L. Fortecue en un trabajo titulado "Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Network".

Esta teoría fue adaptada a los sistemas de potencia (Trifásicos) por C.F. Wagner y R.D. Evans, ya que cuando se tiene un sistema trifásico este puede estar desbalanceado (como cuando ocurre alguna falla), quedando dos sistemas con fasores balanceados y uno con fasores del mismo tamaño y orientados en la misma dirección, los cuales son:

- Componente de secuencia positiva: Formado por tres fasores de igual módulo, con separación de fase de 120° y con la misma secuencia de los fasores originales.
- Componente de secuencia negativa: Formado por tres fasores de igual módulo, con separación de fase de 120° y con la secuencia opuesta de los fasores originales.
- Componente de secuencia cero: Formado por tres fasores de igual módulo y orientados en la misma dirección.

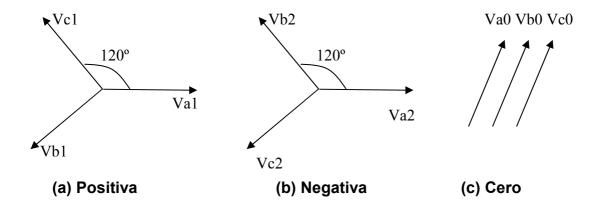


Fig. 2.7.-Componentes de Secuencia

Para facilitar el cálculo de las fallas es necesario definir al operador "a" como un fasor de magnitud uno y de fase 120°.

$$a = 1 \angle 120^{\circ}$$
 (2.8)

Aplicando la teoría anteriormente mencionada se pueden expresar cada una de las tensiones como la suma de sus componentes de secuencia como se muestra en las ecuaciones 2.9

$$Va = Va0 + Va1 + Va2$$

 $Vb = Vb0 + Vb1 + Vb2$ (2.9)
 $Vc = Vc0 + Vc1 + Vc2$

Debido a que las componentes de secuencia están desfasadas 120° se pueden expresar en función del operador "a" de la siguiente manera:

Secuencia (+) Secuencia (-) Secuencia (0)
$$Va1 = V_{a1} \qquad Va2 = Va2 \qquad Va0 = Va0$$

$$Vb1 = a^2.Va1 \qquad Vb2 = a.Va2 \qquad Vb0 = Va0 \qquad (2.10)$$

$$Vc1 = a. Va1 \qquad Vc2 = a^2. Va2 \qquad Vc0 = Va0$$

Luego sumando las componentes queda:

$$Va = Va1 + Va2 + Va0$$

$$Vb = a^{2}Va1 + aVa2 + Va0$$

$$Vc = aVa1 + a^{2}Va2 + Va0$$
(2.11)

Finalmente en forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Va & 0 \\ Va & 1 \\ Va & 2 \end{bmatrix}$$
 (2.12)

Si se despejan las tensiones de secuencia de la ecuación 2.12 queda:

$$\begin{bmatrix} Va & 0 \\ Va & 1 \\ Va & 2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix}$$
 (2.13)

2.2.4 Fallas Asimétricas.

En un sistema trifásico equilibrado ocurren fallas que pueden originar desbalances tanto de voltajes como de corrientes como son las fallas línea a tierra, línea a línea y doble línea a tierra, siendo la más frecuente y la más severa de todas, la falla trifásica. Si los voltajes y corrientes están relacionados a través de impedancias lineales se puede aplicar para la solución de las redes, el principio de superposición y aplicar la teoría de las componentes simétricas para generar tres sistemas equilibrados que facilitarán el estudio.

Cada elemento del sistema tiene una modelación dependiendo de la conexión del mismo y de las sugerencias del método de cálculo utilizado.

2.2.4.1 Modelación de la máquina sincrónica.

La máquina sincrónica se descompone en tres circuitos deducidos al desarrollar la ecuación 2.11, uno para cada secuencia: la positiva, la negativa y la cero. El circuito de secuencia positiva se modela como una fuente de tensión (Ea) y una impedancia en serie (Z_1) con la fuente. El circuito de secuencia negativa se modela como una impedancia (Z_2). El circuito de secuencia cero se modela como una impedancia (Z_0). Esto se muestra en la siguiente figura:

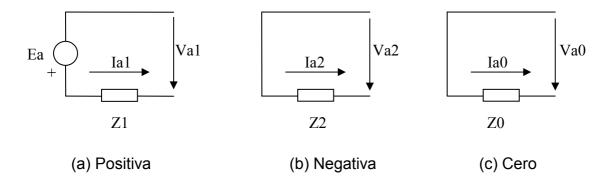


Fig. 2.8 Redes de Secuencia de la Máguina

La impedancia Z1 representa la impedancia del generador cuando trabaja en condiciones de equilibrio, a secuencia positiva.

La impedancia Z2 representa los efectos de la circulación por el inducido de corrientes de secuencia negativa que provocan un campo magnético que gira al contrario del movimiento del rotor. La fuerza magnetomotriz debido a estas corrientes, cambia continuamente su posición respecto a los ejes directos y en cuadratura del rotor haciendo que la reactancia X2 tenga un valor intermedio entre Xd y Xq y por lo tanto también Z2 tendrá un valor distinto.

La impedancia Z0 es la resultante de la circulación de corrientes de secuencia cero por los devanados, aunque ésta es relativamente baja (teóricamente cero). Además, en la secuencia cero debe tomarse en cuenta la impedancia del neutro, si está puesto a tierra, por donde circularán tres corrientes de secuencia cero una por cada fase.

De la figura 2.8 se deducen las siguientes ecuaciones,

$$Va1 = Ea - Z1^* Ia1$$

 $Va2 = -Z2^* Ia2$ (2.14)
 $Va0 = -Z0^* Ia0$

Expresado de forma matricial se tiene,

$$\begin{bmatrix} Va0 \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Ea \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z0 & 0 & 0 \\ 0 & Z1 & 0 \\ 0 & 0 & Z2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Ia0 \\ Ia1 \\ Ia2 \end{bmatrix}$$
 (2.15)

2.2.4.2 Modelación de los Transformadores.

La modelación de los transformadores depende en gran medida del número de devanados que tengan y del ajuste de los taps.

2.2.4.2.1 Transformadores con Taps a Ajuste Nominal.

Las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero dependen del tipo de transformador y de su conexión, como se describe a continuación.

- Banco trifásico de tres transformadores monofásicos: Para este caso las impedancias de secuencia son iguales (Z+ = Z- = Z0). Esto es consecuencia de que cada transformador tiene una impedancia independientemente de la tensión aplicada. Cada transformador tiene su circuito de baja reluctancia y por lo tanto una alta reactancia de magnetización de secuencia cero, que puede ser despreciada.
- Transformador trifásico tipo núcleo de tres columnas: Para este caso las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales. La reactancia de secuencia cero aparece debido a que circulan los flujos magnéticos de igual magnitud y mismo ángulo (generados por las corrientes de secuencia cero), por las columnas del transformador, y al encontrarse en un nodo se suman estos flujos intentando salir por el aire, el cual tiene una alta reluctancia y por consiguiente una baja reactancia de magnetización de secuencia cero que debe ser tomada en cuenta. Sin embargo cuando no se requiera tanta precisión de los cálculos, esta puede ser despreciada.
- Transformador trifásico tipo núcleo de cinco columnas: Para este caso las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales, sin embargo la reactancia de secuencia cero puede ser despreciada, debido a que cuando circulan los tres flujos de igual magnitud y en fase producidos por las corrientes de secuencia cero, a través de las tres columnas del transformador en donde se encuentra los arrollados, estas corrientes consiguen caminos por donde circular a través de las otras dos columnas del transformador, las cuales tienen una baja reluctancia, y por consiguiente una alta reactancia.

 Transformador trifásico tipo acorazado: En este transformador las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales, en este caso la reactancia de magnetización es bastante alta y despreciable debido a las diversas vías de circulación de baja reluctancia.

Debido a estas características es posible la modelación de secuencia positiva y negativa de los transformadores como un circuito con una impedancia en serie, como muestra la figura 2.9, donde Zcc^+ representa la impedancia de cortocircuito del transformador.

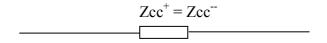


Fig. 2.9 Circuito Equivalente del Transformador de Dos Devanados

En el caso de la modelación de secuencia cero se coloca también una impedancia en serie entre la entrada y la salida del mismo, con un valor determinado en los ensayos o dado por el fabricante, solo que este circuito depende de la conexión en la que se encuentra el transformador.

Las combinaciones entre las conexiones en Δ y Y modificarán el circuito debido a las condiciones para el paso de las corrientes de secuencia cero como son la conexión de tierra o la circulación interna a través de las Δ de dichas corrientes y se modela de la siguiente manera.

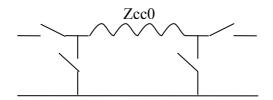


Fig. 2.10 Modelo del Transformador Para Secuencia Cero

El circuito de la figura 2.10 posee cuatro interruptores, dos en serie y dos en paralelo, y una impedancia de secuencia cero Zcc0, a la cual se le puede

adicionar tres veces la impedancia de puesta a tierra (3*Zn) si el transformador se encuentra aterrado a través de una impedancia.

Los dos interruptores que están en serie con la impedancia Z0 (uno representa el primario y otro el secundario), se utilizan para modelar la conexión del transformador cuando está conectado en "Y", estos se mantienen abiertos cuando la conexión es en "Y" no aterrado y se cierra cuando la conexión en "Y" está puesta a tierra.

Los interruptores en paralelo (uno representa el primario y otro el secundario) se utilizan para modelar cuando el transformador esta conectado en Δ , se cierran cuando la conexión es en Δ y estarán abiertos si la conexión es en "Y".

La figura 2.11 muestra en forma resumida las combinaciones antes mencionadas.

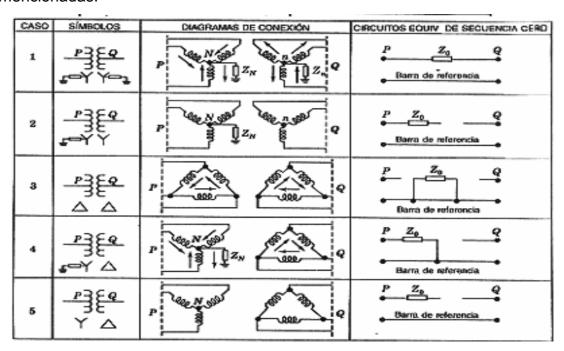


Fig. 2.11 Circuito Equivalente de Secuencia Cero de los Transformadores.

Figura Tomada de Grainger-Stevenson.

Donde:

Zo = Z_0 cc+3Zn Impedancia de secuencia cero.

N = Neutro.

P = Devanado primario.

Q = Devanado secundario.

Transformadores de tres devanados: Este es un transformador que a diferencia del caso anterior posee un tercer núcleo generalmente utilizado para alimentar servicios auxiliares o para disminuir terceros armónicos de las tensiones, compensación reactiva, darle un camino a la corriente de secuencia cero, entre otras. Debido a su similitud con el de dos devanados se cumple todo lo descrito para el caso de dos devanados, por lo tanto las redes de secuencia negativa y positiva son iguales. Para la red de secuencia cero se utiliza un circuito como el de la figura 2.12:

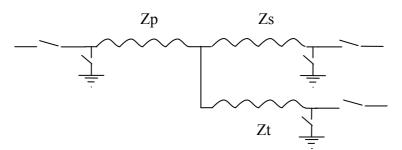


Fig. 2.12 Circuito del Transformador de Tres Devanados Para Secuencia Cero

De igual manera que en el transformador de dos devanados los interruptores serie representan la puesta a tierra o no de las conexiones en Y, y los interruptores en paralelo representan si la conexión es o no en Δ .

2.2.4.2.2 Transformadores Con Taps en Ajuste Diferente al Nominal.

Cuando se tienen taps en posición distinto del valor nominal del transformador la modelación dependerá del número de devanados del mismo es decir de dos o de tres devanados.

Transformador de Dos Devanados: Para modelar este caso se hace uso del modelo π mostrado en la figura 2.13

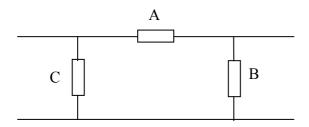


Fig. 2.13 Modelo Π Para el Transformador de Dos Devanados Con Taps en Ajuste Distinto al Nominal.

Donde:

$$A = \frac{1}{a Z} \tag{2.16}$$

$$B = \frac{1}{Z} \left(\frac{1-a}{a^2} \right) \tag{2.17}$$

$$C = \frac{1}{Z} \left(\frac{a-1}{a} \right) \tag{2.18}$$

Donde:

a: Relación de Transformación.

Z: Impedancia de cortocircuito del transformador en por unidad.

La modelación de los transformadores de tres devanados se encuentra enunciada en el anexo [D] de este trabajo.

2.2.4.3 Modelación de las líneas.

Las líneas de transmisión son elementos estáticos los cuales no ven afectadas sus propiedades al circular secuencias positivas o inversas. Por esta razón la impedancia de secuencia positiva y negativa son las mismas, no obstante la impedancia de secuencia cero varía de las anteriormente mencionadas, ya que pudiese circular la corriente de secuencia cero a través de otros elementos como son: las torres de transmisión, el terreno, el cable de quarda, entre otros.

Existen parámetros de gran importancia en la modelación de las líneas como son la resistencia serie y paralelo, la inductancia serie y la capacitancia en paralelo; algunos modelos incluyen todos estos parámetros, mientras que otros modelos desprecian ciertos parámetros. La utilización de estos modelos dependerá principalmente de la exactitud requerida y la longitud de las líneas.

El modelo que toma en cuenta todos estos parámetros asumiendo que los mismos están distribuidos uniformemente se muestra en la figura 2.14

$$Y/2 \left\{ \begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \end{array} \end{array} \right\} Y/2$$

Fig. 2.14 Circuito Equivalente Monofásico Para una Línea de Transmisión

2.2.5. Tipos de fallas

Entre las fallas que pudiesen ocurrir en los sistemas de potencia se encuentran las siguientes:

2.2.5.1 Falla monofásica de línea a tierra.

Esta es la falla que ocurre con más frecuencia y se origina principalmente cuando un conductor hace contacto con elementos que están tocando con la tierra. El modelo se deduce suponiendo la falla en la fase a.

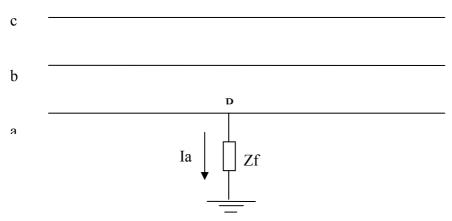


Fig. 2.15 Falla Monofásica a Tierra

Las condiciones para el sistema mostrado relativas a las corrientes y a las tensiones son,

$$Va = Ia*Zf$$
 $Ib=0$ (2.19)
 $Ic=0$

Las componentes simétricas de las corrientes son:

$$\begin{bmatrix}
Iao \\
Ia1 \\
Ia2
\end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix}
1 & 1 & 1 \\
1 & a & a^2 \\
1 & a^2 & a
\end{bmatrix} * \begin{bmatrix}
Ia \\
0 \\
0
\end{bmatrix}$$
(2.20)

Al resolver queda:

$$Ia \ 0 = Ia \ 1 = Ia \ 2 = \frac{Ia}{3}$$
 (2.21)

Conociendo la ecuación general que relaciona voltaje y corriente para condiciones de falla,

$$\begin{bmatrix} Vao \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Va \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Zo & 0 & 0 \\ 0 & Z1 & 0 \\ 0 & 0 & Z2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Ia0 \\ Ia1 \\ Ia2 \end{bmatrix}$$

$$(2.22)$$

Al sustituir la ecuación 2.21 en la ecuación 2.22 queda:

$$\begin{bmatrix} Vao \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Va \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Zo*Ia1 \\ Z1*Ia1 \\ Z2*Ia1 \end{bmatrix}$$
(2.23)

Resultando de esta ecuación:

$$Vao + Va1 + Va2 = Va - la1 (Z0 + Z1 + Z2)$$
 (2.24)

Sustituyendo las condiciones iniciales,

$$\frac{Va}{Ia1} = Z0 + Z1 + Z2 + 3Zf$$
 (2.25)

Lo cual indica que las redes de secuencia para una falla monofásica a tierra deben conectarse en serie como indica la figura 2.16.

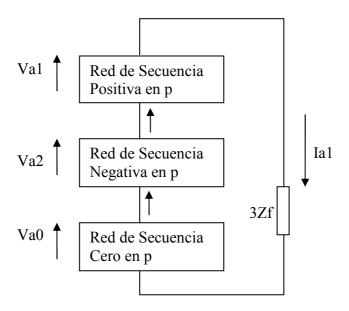


Fig. 2.16. Conexión de las Redes de Secuencia Para una Falla Monofásica a Tierra

2.2.5.2 Falla línea a línea.

Esta falla se origina principalmente cuando un elemento hace contacto con dos de las líneas del sistema, o cuando éstas se tocan directamente. El modelo se deduce para las fases b y c

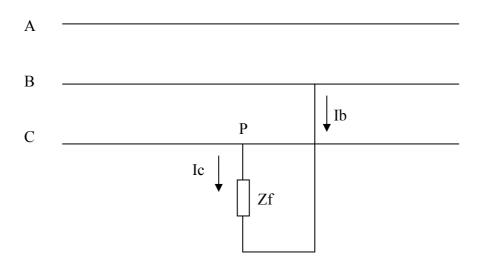


Fig. 2.17 Falla Línea a Línea

Las condiciones para el sistema mostrado relativas a las corrientes y a las tensiones son,

$$la = 0$$

$$lb = -lc$$

$$Vc - Vb = lb*Zf$$
(2.26)

Las componentes simétricas de las corrientes son:

$$\begin{bmatrix}
Iao \\
Ia1 \\
Ia2
\end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix}
1 & 1 & 1 \\
1 & a & a^2 \\
1 & a^2 & a
\end{bmatrix} * \begin{bmatrix}
0 \\
Ib \\
-Ib
\end{bmatrix}$$
(2.27)

Al resolver queda:

$$|a0 = 0|$$
 $|a1 = -|a2|$ (2.28)
 $|Vc - Vb| = |b*Zf|$

Las componentes simétricas de las tensiones son:

$$\begin{bmatrix} Vao \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vb - Zf * Ib \end{bmatrix}$$
 (2.29)

Al restar Va1-Va2 se obtiene la siguiente expresión:

$$Va1 - Va2 = \frac{Ib * Zf}{3} (a^2 - a)$$
 (2.30)

De la ecuación de las corrientes en función de las componentes simétricas, mostrada en la ecuación 2.31,

$$\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ Ia1 \\ -Ia1 \end{bmatrix}$$
 (2.31)

Se obtiene:

$$lb = la1 (a^2-a)$$
 (2.32)

Sustituyendo la ecuación 2.32 en la ecuación 2.30 queda:

$$Va1 - Va2 = Ia1*Zf$$
 (2.33)

Para satisfacer las ecuaciones 2.33 y 2.28 las redes deben conectarse como indica la figura 2.18,

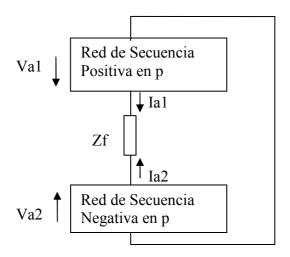


Fig. 2.18. Conexión de las Redes de Secuencia Para Una Falla Línea a Línea

2.2.5.3 Falla Doble Línea a Tierra.

Esta falla se origina principalmente cuando un elemento hace contacto con dos de las líneas del sistema y éste se encuentra en contacto con la tierra.

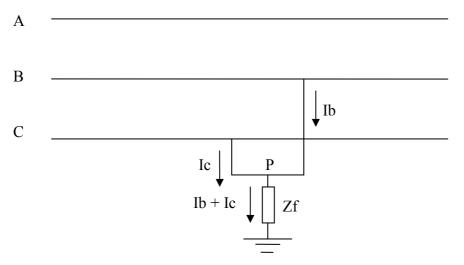


Fig. 2.19 Falla Doble Línea a Tierra

Las condiciones para el sistema mostrado relativas a las corrientes y a las tensiones son:

$$Ia = 0$$

Vc = Vb = (Ib + Ic) * Zf (2.34)

Las componentes simétricas de las tensiones son:

$$\begin{bmatrix} Vao \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vb \end{bmatrix}$$
 (2.35)

Al resolver se observa que:

$$Va1 = Va2$$
 (2.36)

Si se resta Va0 - Va1 queda:

$$Va0-Va1= (lb + lc) Zf$$
 (2.37)

De la ecuación de las componentes simétricas en función de las corrientes se tiene:

$$\begin{bmatrix}
Iao \\
Ia1 \\
Ia2
\end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\
1 & a & a^2 \\
1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\
Ib \\
Ic \end{bmatrix}$$
(2.38)

Al resolver queda:

lao =
$$\frac{1}{3}$$
(la + lb) (2.39)

De la ecuación 2.37 y 2.39 queda:

$$Va0 - Va1 = 3 * Ia0 * Zf$$
 (2.40)

Resolviendo queda que:

$$Ia1 = \frac{Vf}{Z1 + Z2 * \left(\frac{Z0 + 3Zf}{Z2 + Z0 + 3Zf}\right)}$$
 (2.41)

Para poder satisfacer las ecuaciones 2.36, 2.40 y 2.41 las redes de secuencia deben conectarse como indica la figura 2.20:

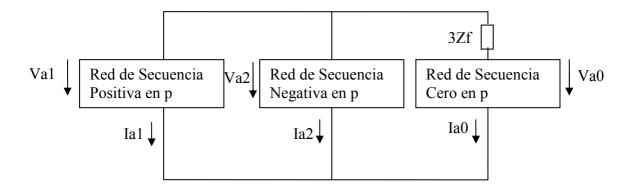


Fig. 2.20. Conexión de las Redes de Secuencia Para Una Falla Doble Línea a Tierra

2.2.6 Teorema de Thevenin y la Z_{barra}.

Como es bien sabido en el área de las redes eléctricas se puede sustituir todo un sistema eléctrico por un circuito equivalente conformado por una fuente de tensión y una impedancia en serie los cuales representan la impedancia y la tensión equivalente de todo el sistema en un punto determinado previamente.

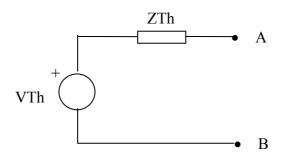


Fig.2.21 Circuito Equivalente de Thevenin

La matriz de impedancias (Z_{barra}) es una herramienta utilizada en los cálculos de los sistemas de potencia debido a las ventajas que proporciona, sobre todo si se están usando métodos computacionales los cuales ayudan en la determinación de las corrientes de fallas.

Esta matriz brinda información muy importante relacionada con la red ya que proporciona la impedancia de Thevenin en cada una de las barras del sistema, pudiendo la misma ser construida paso a paso, o agregándole y quitándole elementos al sistema, también se puede obtener invirtiendo la matriz Y barra.

El teorema de Thevenin y la Z_{barra} enuncia que si se tiene una falla en una barra "k", la impedancia equivalente de Thevenin en el punto fallado es equivalente al elemento Z kk de la matriz de impedancias (Z_{barra}).

Como ya se mencionó se puede obtener la matriz de impedancias a través de la inversión total de la matriz de admitancias (Y_{barra}) pero esto no es conveniente cuando se trata de sistemas muy grandes (muchas barras), como suelen ser los sistemas de potencia (utiliza una gran cantidad de memoria de los computadores y retrasa los cálculos). Es por esta razón que se suele aplicar un método de construcción matricial para obtener el término requerido de la matriz de impedancias a través de la matriz de admitancias, método que es demostrado en el anexo B.

Este método es de gran utilidad debido a que es muy sencillo armar la matriz Ybarra para luego invertirla.

La matriz Ybarra es una matriz simétrica que contiene una fila y una columna para cada una de las barras del sistema y tiene la forma mostrada en la ecuación 2.42, donde el subíndice k representa el número de barras del sistema.

$$Ybarra = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{ik} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2k} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{ik} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \dots & Y_{ki} & \dots & Y_{kk} \end{bmatrix}$$

$$(2.42)$$

Esta matriz posee en la diagonal principal la información de la suma de todas las admitancias conectadas a la barra numerada con el número correspondiente a la posición ii de la matriz, mientras que en los demás elementos se encuentra la información de las admitancias conectadas entre dos barras numeradas con los números correspondientes a la posición ik de la matriz, con signo negativo.

2.2.7 Cálculo de las Tensiones en todo el Sistema.

Hasta ahora se ha analizado todo lo relativo a la corriente de cortocircuito, sin tomar en cuenta el cálculo de los voltajes en todas las barras del sistema, en condiciones de falla.

Estos voltajes son de gran importancia ya que una vez ocurrida la falla es deseable saber cómo se comporta el sistema para poder planificar las protecciones ante determinada falla.

En este apartado se le dará un enfoque desde el punto de vista computacional y se dividirá el estudio según el tipo de falla que pudiera presentarse en el sistema.

Para la realización de este estudio se usarán las siguientes variables:

Vo = Voltaje de secuencia cero.

V1 = Voltaje de secuencia positiva.

V2 = Voltaje de secuencia negativa.

E = Voltaje interno de los generadores.

Zij = Impedancia proveniente de la matriz Zbarra.

i = Subíndice correspondiente a la barra fallada.

j = Subíndice correspondiente a todas las barras del sistema menos la fallada.

Zf = Impedancia de la falla.

 Falla Trifásica: En esta falla solo aparecen componentes de secuencia positiva para las tensiones por lo que se definen las siguientes ecuaciones.

$$V^{1}i = E - Z^{1}{}_{ii}I^{1}{}_{i} {(2.43)}$$

$$V^{1}{}_{j} = \left[\frac{Z_{f} + Z^{1}{}_{ii} - Z^{1}{}_{ji}}{Z_{f} + Z^{1}{}_{ii}}\right] E$$
 (2.44)

 Falla Monofásica a tierra: En esta falla aparecen las componentes de secuencia cero, positiva y cero, para las tensiones por lo que se definen las siguientes ecuaciones.

$$V^{0}_{j} = \frac{-Z^{0}_{ji} E}{Z^{0}_{ii} + Z^{1}_{ii} + Z^{2}_{ii} + 3Z_{f}}$$
(2.45)

$$V^{1}_{j} = \left[\frac{Z^{0}_{ii} + Z^{1}_{ii} + Z^{2}_{ii} + 3Z_{f} - Z^{1}_{ji}}{Z^{0}_{ii} + Z^{1}_{ii} + Z^{2}_{ii} + 3Z_{f}} \right] E$$

$$V^{2}_{j} = \frac{-Z^{2}_{ji}E}{Z^{0}_{ii} + Z^{1}_{ii} + Z^{2}_{ii} + 3Z_{f}}$$
(2.46)

 Falla Bifásica: En esta falla aparecen las componentes de secuencia positiva y negativa, para las tensiones por lo que se definen las siguientes ecuaciones.

$$V^{1}_{j} = \left[\frac{Z^{1}_{ii} + Z^{2}_{ii} + Z_{f} - Z^{1}_{ji}}{Z^{1}_{ii} + Z^{2}_{ii} + Z_{f}} \right] E$$
 (2.47)

$$V^{2}_{j} = \left[\frac{Z^{2}_{ji} E}{Z^{1}_{ii} + Z^{2}_{ii} + Z_{f}} \right]$$
 (2.48)

 Falla bifásica a tierra: En esta falla aparecen las componentes de secuencia positiva, negativa y cero para las tensiones por lo que se definen las siguientes ecuaciones.

Para simplificar las ecuaciones se define:

$$\Delta : Z_{ii}^{1} Z_{ii}^{2} + Z_{ii}^{1} \left(3Z_{f} + Z_{ii}^{0} \right) + Z_{ii}^{2} \left(3Z_{f} + Z_{ii}^{0} \right)$$
 (2.49)

$$V^{0}_{j} = \left[\frac{Z^{0}_{ji} Z^{2}_{ii} E}{\Delta} \right]$$
 (2.50)

$$V^{1}{}_{j} = \left[\frac{\Delta - Z^{1}{}_{ji} \left(Z^{2}{}_{ii} + 3Z_{f} + Z^{0}{}_{ii}\right)}{\Delta}\right] E$$
 (2.51)

$$V^{2}_{j} = \frac{Z^{2}_{ji} (3Z_{f} + Z^{0}_{ii})E}{\Lambda}$$
 (2.52)

2.2.8 Especificaciones de la Norma ANSI IEEE C37-010-1999) Para el Cálculo de Cortocircuito.

Una norma es un documento, establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido, que proporciona, para un uso común y repetido, reglas, directrices o características para actividades o sus resultados, con el fin de conseguir un grado óptimo de orden en un contexto dado.

Son desarrolladas por comités técnicos, los cuales son coordinados por un organismo especializado y aseguran que se superen las barreras entre las diferentes áreas de actividad.

Las normas reflejan los resultados del trabajo conjunto entre todas las partes involucradas y son aprobadas por consenso entre representantes de todas las partes interesadas: productores, usuarios, laboratorios, autoridades públicas, consumidores, etc.

Las normas se revisan periódicamente o según las circunstancias para asegurar su vigencia, y de esa manera acompasarse con los progresos tecnológicos y sociales.

Son documentos que se reconocen como válidos a nivel nacional, regional o internacional, según corresponda.

No son obligatorias, sino que son de aplicación voluntaria. En ciertos casos, su cumplimiento puede ser obligatorio (en campos relacionados con la seguridad, instalaciones eléctricas, con relación a contratos públicos, etc.).

En la rama de la ingeniería eléctrica existen diversas normas que sirven de apoyo, para realizar cálculos, seleccionar equipos, diseñar sistemas, entre otras. Una de estas aplicaciones es el cálculo de las corrientes de cortocircuito, el cual es necesario para la especificación de las protecciones de un sistema.

Existen diversos métodos para el cálculo de la corriente de cortocircuito, dependiendo del requerimiento se debe seleccionar el mas adecuado tomando en cuenta que para obtener mayor precisión será necesaria una mayor complejidad de los cálculos, por lo que el ingeniero debe seleccionar el método mas adecuado de acuerdo a sus necesidades.

Algunas de las normas para el cálculo de corrientes de cortocircuito son: la norma IEC-909 (Normativa Europea), las normas ANSI IEEE (Normativas Americanas), que calculan los cortocircuitos en baja, media y alta tensión, entre otras. Esta última la es la desarrollada en este aparatado, la Norma ANSI IEEE C37-010-1999 (American Nacional Standard Institute).

La Norma ANSI IEEE C37-010-1999, se basa en la especificación de interruptores en alta tensión y define una serie de parámetros que deben ser tomados en cuenta a la hora de poder seleccionar dichos interruptores.

Los parámetros para la selección están ligados estrechamente a las variables del sistema como son: voltaje, corriente e impedancia en el punto de la falla, además de tomar en cuenta factores como la temperatura, la humedad, la altura, entre otros. En el presente trabajo se definen algunos de los parámetros.

- Red de reactancias: Con la finalidad de facilitar los cálculos en los sistemas de potencia se asume que el sistema tiene resistencia cero, quedando solo las reactancias tanto capacitivas como inductivas interconectadas formando la llamada red de reactancia.
- Red de resistencias: Con la finalidad de facilitar los cálculos en los sistemas de potencia se asume que el sistema tiene reactancia cero, quedando solo las resistencias interconectadas formando la llamada red de resistencias.
- X: Es el valor mas bajo de la red de reactancias visto desde el punto de vista de la falla, para asegurar la peor condición de falla.
- R: Es el valor mas bajo de la red de resistencias visto desde el punto de vista de la falla, para asegurar la peor condición de falla.
- E: Es el valor típicamente más alto de voltaje entre línea y neutro que existe en el punto de la falla, para asegurar la peor condición de falla.
- Relación X/R: La relación X/R es un valor adimensional muy utilizado en la selección de interruptores, ya que da una idea de la impedancia del sistema en el punto de la falla, con la cual se puede estimar el decaimiento de la componente de corriente continua que se genera en el punto de la falla.

- Relación E/X: Es un cálculo que se realiza para estimar la corriente de cortocircuito sin tomar en cuenta los factores de decaimiento AC y DC.
- Capacidad de interrupción simétrica: La máxima capacidad de interrupción simétrica que un interruptor requiere es "K" veces la relación E/X de corriente de cortocircuito, siendo k:

$$K = \frac{\text{Voltaje Máximo}}{\text{Voltaje de Operación}}$$
 (2.53)

Una vez definidos estos parámetros se pueden clasificar y analizar las fallas según sus tipos y sus características básicas.

Un sistema de potencia está sujeto a distintas tipos de fallas como son:

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

En general la falla trifásica impone el valor mas alto de corriente de falla, aunque la falla monofásica a tierra puede producir un valor de corriente de falla mas elevado que la falla trifásica si la reactancia de secuencia cero en el punto de la falla es menor que la reactancia de secuencia positiva $(x_0 < x_1)$.

Se debe asumir que un cortocircuito que ocurra en un sistema de corriente alterna AC, puede producir un desplazamiento máximo de la onda de corriente (componente DC). La onda resultante de corriente asimétrica decae gradualmente hasta convertirse en una onda de corriente simétrica, donde la tasa de decaimiento de la componente DC es determinada por la relación $\frac{L}{R}$ del sistema. La constante de tiempo para el decaimiento de la componente DC es:

$$Tdc = \frac{L}{R}(s) = \frac{X/R}{2\Pi}(ciclos)$$
 (2.54)

El valor total de la corriente RMS de falla se obtiene de:

$$I_{rms} = \sqrt{(IcomponenteAC_{rms})^2 + (IcomponenteDC_{rms})^2}$$
 (2.55)

El estándar ANSI IEEE C37-010-1999 sugiere dos métodos para el cálculo de corrientes de cortocircuito, (ver anexo [C]) uno es el método simplificado que requiere solo el cálculo de la relación E/X. Este método se recomienda cuando no se necesite gran exactitud en los cálculos.

El segundo método con Ajuste Para el Decremento de AC y DC es más exacto y requiere que se haga primero un cálculo de la relación E/X como en el anterior método y luego se debe ajustar el valor obtenido de corriente, con unos factores obtenidos de unas tablas proporcionadas por el estándar y con esto se logra tomar en cuenta el decaimiento AC y DC, dependiendo estos factores de las condiciones iniciales del sistema.

2.2.8.1 Método Simplificado:

En muchos casos donde se realizan cálculos de corriente de cortocircuito, con la relación de E/X_1 para fallas trifásicas o $3E/(2X_1+X_0)$ para falla monofásica a tierra, se provee la adecuada precisión para la selección de interruptores.

Este método es aplicado cuando se conoce que la relación de X_1/R_1 para fallas trifásicas o la relación $(2X_1+X_0)/(2R_1+R_0)$ para fallas monofásicas a tierra es menor a 17.

El método simplificado puede ser usado sin determinar la red de resistencias siempre y cuando la relación de cortocircuito E/X no exceda el 80% de la capacidad de interrupción simétrica del interruptor. Si se desean usar interruptores que no cumplan con esta condición, se recomienda usar el método con ajuste para el decremento de AC y DC.

También se recomienda el uso de un procedimiento más exacto para el cálculo si una falla monofásica a tierra es suplida principalmente por generadores y el valor de la corriente de cortocircuito E/X excede el 70% de la capacidad de interrupción simétrica de interruptor.

2.2.8.2 Método con Ajuste Para el Decremento de AC y DC.

Para obtener una mayor exactitud que la obtenida con el método simplificado descrito anteriormente, se recomienda usar el método con ajuste para el decremento AC y DC, el cual emplea factores de corrección que afectarán a los valores obtenidos del cálculo de la corriente de cortocircuito E/X.

Los factores de corrección sugeridos para el cálculo de la relación E/X están basados en la relación de X/R que hay en el punto de falla.

Este método se divide en dos alternativas básicas, el primero incluye solo un factor de corrección por el decaimiento de la componente DC de la corriente de cortocircuito y el segundo incluye un factor que contempla los dos decaimientos de la corriente de cortocircuito (el AC y el DC). Sin embargo ambos pasos arrojan cálculos bastantes conservadores para la selección de interruptores, especialmente para fallas cerca de los centros de generación, solo que el primer método es menos exacto que el segundo.

El cálculo realizado con ajuste para el decremento AC y DC, se basa en el método simplificado, solo que a los resultados obtenidos se le afectan con factores que intentan reflejar el efecto del decaimiento simétrico y asimétrico

que ocurre cuando hay un cortocircuito, estos resultados son más favorables en la selección de los interruptores.

Para la aplicación de este método es necesario considerar una serie de factores como son, los efectos del decaimiento de la componente AC y la derivación de multiplicadores E/X.

Efectos del decaimiento de la componente AC.

La necesidad de un apropiado reconocimiento del decaimiento de la componente simétrica de la corriente de cortocircuito se nota claramente cuando se han graficado los valores de la corriente al realizar ensayos de cortocircuito en los terminales de los generadores como el presentado en la figura 2.3.

De la tabla 2.1, se ve que la componente simétrica de la corriente de cortocircuito, 4 ciclos después de iniciada la falla, puede ser tan baja como el 62% del valor calculado con la relación E/X.

Figure	Generator ratings or range of ratings	Fault location	Symmetrical current component at 4 cycles, in % of E/X
A.I	107 MVA, 3600 r/min, conductor cooled	LV	62
A.2	107 MVA, 3600 r/min, conductor cooled	Remote	87
A.3	95-200 MVA, 3600 r/min, conventional cooled, composite characteristics	HV	78
A.4	35-65 MVA, 3600 r/min, composite characteristics	LV HV	68 77

Tabla 2.1. Componente Simétrica de la Corriente para Distintos generadores. Tabla Tomada de ANSI IEEE C37-010-1999.

Donde:

LV: Bajo Voltaje. HV: Alto Voltaje.

Remote: Falla remota.

Para fallas remotas o para cortocircuitos cerca de la estación de generación donde hay una sustancial contribución de corrientes de falla de un sistema remoto, el decaimiento AC es muy bajo. Si se desea tomar en cuenta este decaimiento, el valor de la corriente de cortocircuito no diferirá mucho, además la diferencia en los resultados va en favor de la protección del sistema.

Derivación de multiplicadores E/X

La figura 2.22 muestra el factor de decrecimiento DC por el cual se debe afectar a la corriente de falla, como función de la relación X/R para varias curvas de diferentes tiempos de aperturas de contactos del interruptor.

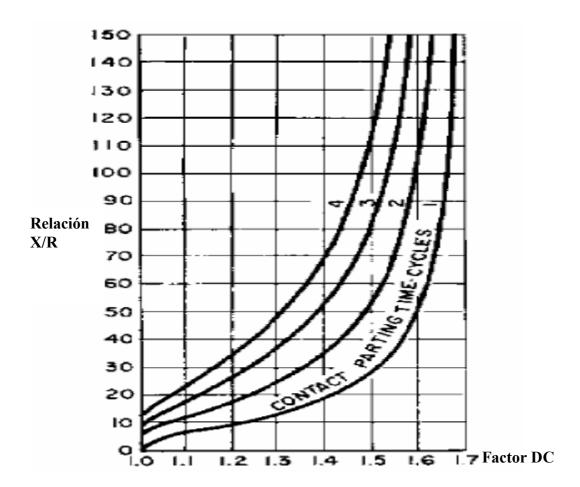


Fig. 2.22 Curva Para Seleccionar el Factor de Decrecimiento DC. Figura de ANSI IEEE C37-010-1999.

Esta familia de curvas considera solo el decaimiento de la componente DC de la corriente de falla. Para tomar en cuenta el decaimiento de la componente simétrica de falla se deben modificar las curvas de la figura 2.22 usando el factor de corrección que arroja el juego de curvas de la figura 2.23.

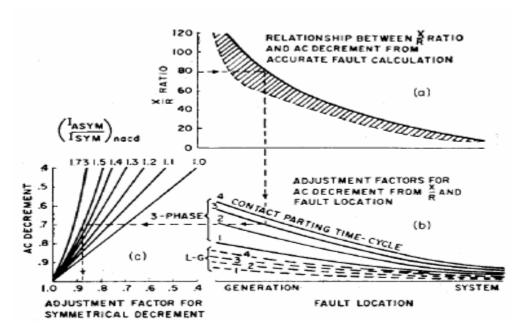


Fig. 2.23 Curva Para Seleccionar el Factor de Decrecimiento AC. Figura Tomada de ANSII IEEE C37-010-1999.

2.2.8.3 Procedimiento para Seleccionar el Factor de Corrección de la corriente de Cortocircuito.

- 1) En la curva mostrada en la figura 2.22, con el valor de la relación de X/R del sistema y el tiempo de despeje de la falla requerido, se obtiene el factor de la corrección de la corriente de cortocircuito sin tomar en cuenta la componente AC.
- 2) Con la relación de X/R del sistema en el punto de falla ubicado en la figura 2.23a, se interceptan las curvas para el cálculo de decremento AC, que vienen dadas como una banda de valores.

Esta banda de valores es debida a los diferentes tipos de generadores que ofrecen los diferentes fabricantes, la especificada en la figura 2.23a es

para generadores de 3600RPM. Si se usan generadores de 1800 RPM pudiese caerse debajo de la banda pero el error es muy pequeño para interruptores mayores de 4 ciclos. Si se usan generadores hidráulicos pudiese caerse por encima de la banda.

Se recomienda para realizar cálculos conservadores, tomar siempre la línea superior de la curva.

- 3) Luego de interceptar la figura 2.23a se debe proyectar de forma vertical una línea hasta la curva 2.23b, para luego interceptar a la curva correspondiente al tiempo de despeje de la falla.
- 4) Una vez interceptada la curva 2.23b se proyecta una línea de forma horizontal hasta la figura 2.23c para luego interceptar la curva correspondiente al valor obtenido en el paso número uno.
- 5) Se ubica en el eje horizontal el factor de ajuste para el decremento simétrico.
- 6) Se multiplica el factor de reducción por el valor obtenido en el paso número uno y se obtiene la nueva relación, la cual toma en cuenta los decrementos AC y DC.

Capítulo III - Marco Metodológico

3.1 Diseño de la Investigación.

La siguiente investigación titulada "Desarrollo de un programa de cálculo general para la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad

de Carabobo con la inclusión de un módulo para el cálculo de cortocircuito en alta tensión bajo normativa ANSI C37-010-1999", se puede considerar como una investigación documental, ya que "se basa en la obtención y análisis de datos provenientes de materiales impresos u otro tipo de materiales" [1].

También la presente investigación se clasifica como del tipo descriptiva ya que "consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento" [1].

Esta investigación es considerada factible debido a que se cuenta con las herramientas técnicas necesarias como pudieran ser material bibliográfico, programas adecuados, computadores personales, entre otros, para llevar a cabo la labor, además de tener un costo relativamente bajo. Por otra parte, el presente proyecto proporciona una solución a la necesidad de tener en la Escuela de Ingeniería Eléctrica una herramienta necesaria para el cálculo como el propuesto.

3.2 Área de la Investigación.

Este trabajo especial de grado se desarrolló en la cátedra de Sistemas de Potencia, adscrita al departamento de potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo.

3.3 Técnica de Recolección de Datos.

Debido a que se trata de una investigación documental los datos fueron obtenidos principalmente de la revisión bibliográfica de textos provenientes de tres áreas básicamente.

Bibliografía especializada en cálculos eléctricos.

• Bibliografía especializada en la programación avanzada.

La normativa existente para cortocircuitos en alta tensión.

También se utilizó la Internet como herramienta de consulta tanto bibliográfica como para consultar a especialistas en la materia; además fue muy frecuente la consulta con profesores expertos en las áreas de Programación y Sistemas de Potencia

3.4 Fases de la investigación.

Etapa 1: Planteamiento de la investigación.

Etapa 2: Recopilación de información acerca del tema por medio de entrevistas

y lectura de trabajos relacionados.

Etapa 3: Delimitación del alcance del tema y puesta en marcha del proyecto.

Etapa 4: Selección del lenguaje de programación adecuado para la realización

del programa así como de la base de datos y la conexión que ofreciera más

ventajas.

Etapa 5: Aprendizaje del lenguaje de programación seleccionado, el cual fue

Visual C++ y su conexión con Microsoft Access.

Etapa 6: Investigación de la normativa ANSI IEEE C37-010-1999 para el

cálculo de cortocircuito.

Etapa 7: Investigación del método clásico para el cálculo de cortocircuito.

Etapa 8: Realización de la codificación para el cálculo de las fallas.

Etapa 9: Integración de las fases y módulos del proyecto.

Etapa 10: Prueba y depuración del funcionamiento global del programa.

Capítulo IV – Desarrollo del Algoritmo de Cálculos en Sistemas de Potencia (C.E.S.P)

4.1 Programa de Cálculo General para la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo.

C.E.S.P (Cálculos en Sistemas de Potencia) es un algoritmo de cálculo realizado con la finalidad de acceder a una herramienta computacional la cual sea capaz de incluir una serie de módulos para los distintos cálculos en los sistemas de potencia, los cuales están relacionados entre sí a través del intercambio de datos necesarios en los diferentes algoritmos, realizándose por medio de interconexiones de distintas bases de datos. Este programa además permite la ampliación y modificación de todas las herramientas allí incluidas ya que contempla esto en sus parámetros y diseño.

La herramienta fue diseñada para operar bajo el sistema operativo Windows, por ser realizado con Microsoft Visual Estudio Visual C++ y apoyarse en la base de datos Access. Al trabajar con esta plataforma se obtienen una gran cantidad de ventajas, que se discuten a continuación.

4.1.2 Selección de Visual C++.

La selección de este lenguaje se debe a un estudio realizado a través de textos, publicaciones y entrevistas a la literatura relacionada y profesores respectivamente.

De este estudio se pudo concluir que aunque existen una gran variedad de lenguajes, cuándo se realiza una comparación, el lenguaje que ofrece mayores beneficios es el adoptado.

Velocidad de Cálculo:

Debido a que la codificación fue realizada en lenguaje C, los procesos que se realizan son mas directos y mas rápidos porque este lenguaje se considera de bajo nivel, es decir se aproxima al lenguaje de máquina.

Herramientas matemáticas:

Este es un lenguaje ideado para realizar cálculos, por esto posee una serie de bibliotecas que facilitan algunas tareas que se deseen realizar.

Bibliografía Existente:

Por ser un lenguaje probado ampliamente y con una gran tradición en el mundo de los programadores se pueden encontrar fácilmente referencias bibliográficas, ayuda en la red, así como también bibliotecas para realizar distintas tareas.

Precisión numérica:

Esta plataforma permite una variedad de datos con distinta precisión numérica, los cuales pueden clasificarse como "enteros" o "flotantes":

Enteros

1. Int

- 2. Long int
- 3. Long long
- 4. Short
- 5. Char
- 6. Wchar t

Flotantes

- 7. Float (IEEE 754 Simple)
- 8. Double (IEEE 754 Normal)
- 9. Long double (IEEE 754 Extendido)

En la tabla 4.1 se muestran los espacios en memoria de los tipos de datos utilizados en C++.

Tabla 4.1. Espacio en Memoria de los Tipos de Datos.

Tipo	Número de Bits	
Char	8	
Short	16	
Int	32	
Float	32	
Double	64	

Según la máquina y el compilador que se utilicen los tipos primitivos pueden ocupar un determinado tamaño en memoria. La lista de la tabla 4.2 ilustra el número de bits que ocupan los distintos tipos primitivos en un PC de la familia X86 y con el compilador de visual estudio.

Estos datos tienen un rango de valor numérico que dependen de la implementación y generalmente derivan de la arquitectura del computador. El ANSI C reconoce que el tamaño y rangos de valor numérico de los tipos básicos dependen de la implementación y generalmente derivan de la

arquitectura del computador. La tabla 4.2 muestra los tamaños y rangos de los tipos numéricos de 64-bits de C++.

Tabla 4.2 Rango, Usos y Precisión de los Tipos de Datos de Visual C++

Tipo	Bits	Rango	Tipo de Uso
int	32	-2,147,483,648 <= X <= 2,147,483,647	Números pequeños
enum	32	-2,147,483,648 <= X <= 2,147,483,647	Conjuntos de valores
long	32	-2,147,483,648 <= X <= 2,147,483,647	Números grandes
float	32	1.18e-38 <= X <= 3.40e38	Precisión científica (7-dígitos)
double	64	2.23e-308 <= X <= 1.79e308	Presición cientifica (15 Digitos)

En la aplicación se trabaja con el tipo Double el cual como se puede observar en la tabla 4.2 tiene una precisión de 15 dígitos.

Interfaz Gráfica:

Esta herramienta permite la generación de cuadros de diálogos con todos los componentes de Windows como son botones, cuadros de edición, botones de radio, casillas de verificación entre otros. Además de poseer arquitectura de documento vista, los cuales son documentos con formatos que permiten realizar procesos gráficos tales como los usados por programas como Microsoft Word, Excel, entre otros.

• Orientación a objetos:

La tendencia actual para los realizadores de programas es la de trabajar bajo el formato de la orientación a objetos, que no es más que trabajar apoyándose en construcciones previamente realizadas pero que permiten ser modificadas haciendo así mas fácil y rápido el diseño de una aplicación.

Manejo de base de datos:

El paquete de opciones que ofrece Visual C++ incluye algunos objetos que permiten la comunicación y el intercambio de datos con casi cualquier archivo de datos.

4.1.3 Selección de la Base de Datos Microsoft Access.

Microsoft Access es un sistema de gestión de bases de datos creado y modificado por Microsoft (DBMS) para uso personal o de pequeñas organizaciones. Su principal función es ser una potente base de datos, capaz de trabajar en sí misma o bien con conexión hacia otros lenguajes de programación, tales como Visual Basic 6.0 o Visual C++. Pueden realizarse consultas directas a las tablas contenidas mediante instrucciones SQL.

Permite el ingreso de datos de tipos: Numéricos, Texto, Fecha, Sí/No, OLE, Moneda, Memo y Boolean. Pueden desarrollarse aplicaciones completas basadas en Microsoft Access, pues trae consigo las herramientas necesarias para el diseño y desarrollo de formularios para el ingreso y trabajo con datos e informes para visualizar e imprimir la información requerida.

Su funcionamiento se basa en un motor llamado Microsoft Jet y permite el desarrollo de pequeñas aplicaciones autónomas formadas por formularios Windows y código VBA (Visual Basic para Aplicaciones). Una posibilidad adicional es la de crear ficheros con bases de datos que pueden ser consultados por otros programas. Entre las principales funcionalidades de Access se encuentran:

- Crear tablas de datos indexadas.
- Modificar tablas de datos.
- Relaciones entre tablas (creación de bases de datos relacionales).
- Creación de consultas y vistas.
- Consultar referencias cruzadas.
- Consultas de acción (INSERT, DELETE, UPDATE).
- Formularios.
- Informes.
- Llamadas a la API de Windows.
- Interacción con otras aplicaciones que usen VBA (resto de aplicaciones de Microsoft Office, Autocad, etc.).
- Macros.

Microsoft Access es un programa de gran difusión entre pequeñas empresas cuyas bases de datos no requieren de excesiva potencia, ya que se integra perfectamente con el resto de aplicaciones de Microsoft.

Además la capacidad de esta base de datos permite almacenar datos en el orden de las decenas de miles de registros, lo cual adecuado para los sistemas de potencia típicos.

4.1.4 Conexión de la Base de Datos.

Para realizar la conexión de la base de datos con Microsoft Access es necesario crear un origen de datos ODBC (Open Data Base Conectivity) el cual almacena la información de la conexión al proveedor de datos indicado "Microsoft Access" y es individual para cada equipo en particular.

Éste es un estándar de acceso a Bases de Datos con el objetivo de hacer posible el acceder a cualquier dato de cualquier aplicación, sin importar qué Sistema Gestor de Bases de Datos (*DBMS* por sus siglas en inglés) almacene los datos, *ODBC* logra esto al insertar una capa intermedia llamada manejador de Bases de Datos, entre la aplicación y el *DBMS*, el propósito de esta capa es traducir las consultas de datos de la aplicación en comandos que

el *DBMS* entienda. Para que esto funcione tanto la aplicación como el *DBMS* deben ser compatibles con *ODBC*, esto es que la aplicación debe ser capaz de producir comandos *ODBC* y el *DBMS* debe ser capaz de responder a ellos. Para conectarse a la Base de Datos se crea una DSN (Data Source Name) dentro del ODBC que define los parámetros, ruta y características de la conexión según los datos que solicite el fabricante.

4.1.5 Instalación de C.E.S.P.

La instalación de C.E.S.P contempla un procedimiento para crear la conexión ODBC primeramente, para luego pasar a ser guiado por el asistente de la instalación.

4.1.5.1 Requisitos del sistema.

El sistema requerido es un computador el cual tenga instalado como sistema operativo la plataforma Windows 2000 o Windows XP para poder funcionar de manera óptima, además de poseer el programa Microsoft Office el cual contiene a la base de datos Access, también se debe contar con un espacio libre de memoria en el disco duro de 114 MB.

4.1.5.2 Pasos para la instalación de C.E.S.P.

La instalación del C.E.S.P se realiza por medio del asistente "install Shield" el cual guía todo el proceso de manera automática, contemplando una serie de pasos descritos a continuación.

- 1. Insertar el CD del Programa.
- 2. Abrir la capeta de nombre CESP

3. Hacer doble click en el icono de la figura 4.1, la cual se encuentra en el disco del programa.



Fig.4.1. Icono de Instalación.

4. Se desplegará un diálogo mostrando el proceso de preparación de la instalación como el mostrado en la figura 4.2.

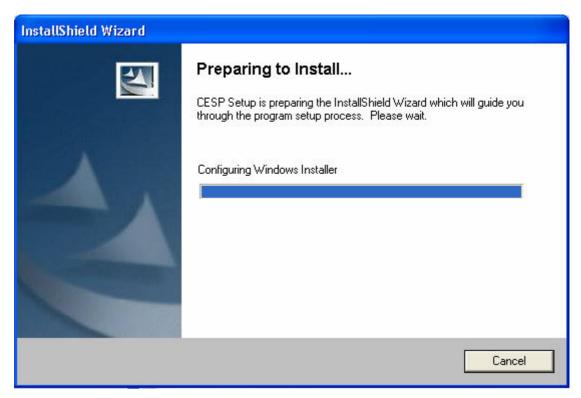


Fig.4.2. Proceso de Preparación de la Instalación.

- 5. Esperar unos segundos hasta que aparezca la pantalla de la figura 4.3.
- 6. Presione el botón "Next" en el diálogo 1 mostrado en la figura 4.3.



Fig.4.3. Diálogo 1 de la Instalación.

 Se mostrará el dialogo 2 mostrado en la figura 4.4, donde se solicita el nombre del usuario y la organización, datos que pueden ser dejados en blanco y luego pulsar el botón "next";

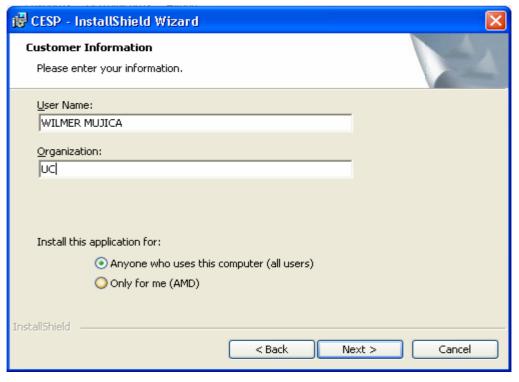


Fig.4.4. Diálogo 2 de la Instalación.

8. Aparecerá el dialogo 3 mostrado en la figura 4.5 el cual tiene dos opciones, la primera de ellas identificada como "complete" realiza la instalación por defecto en la dirección C:\CESP, la segunda de ellas identificada como "Custom" permite seleccionar la ubicación en la que desee guardar el programa, luego presione el botón "Next".

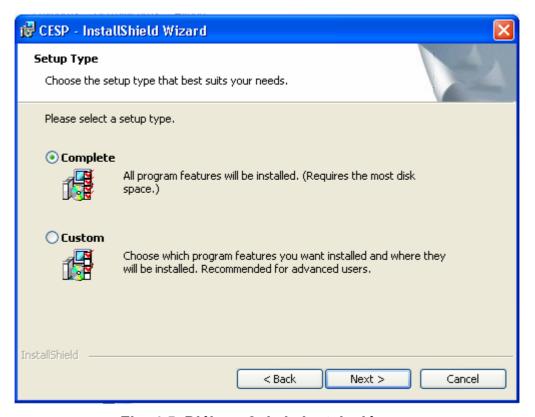


Fig. 4.5. Diálogo 3 de la Instalación.

9. Aparecerá el diálogo 4 mostrado en la figura 4.6 en el cual se debe pulsar el botón "Install", para dar comienzo a la instalación.

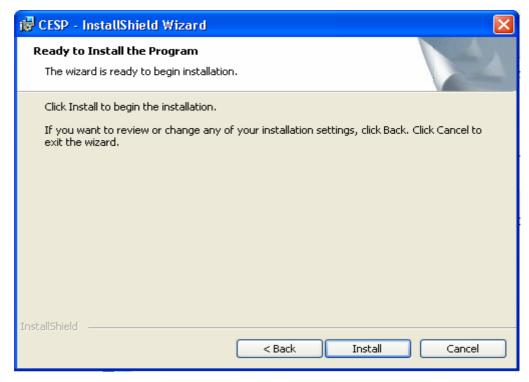


Fig.4.6. Diálogo 4 de la Instalación.

10. Aparecerá el diálogo 5 mostrado en la figura 4.7 en el cual se debe esperar un tiempo mientras se realiza la instalación.

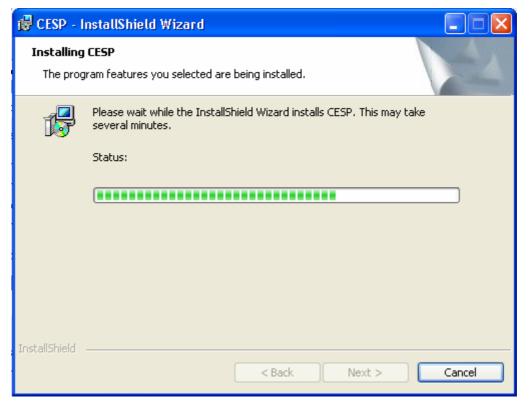


Fig.4.7. Diálogo 5 de la Instalación.

11. Aparecerá el diálogo 6 mostrado en la figura 4.8 en el cual se debe pulsar el botón "Finish", para dar por terminada la instalación.



Fig.4.8. Diálogo 6 de la Instalación.

4.1.5.3 Procedimiento para Crear la Conexión ODBC.

El paso posterior a la instalación del programa C.E.S.P consiste en direccionar la base de datos de Microsoft Access usada en el programa para poder obtener y manejar los datos. Para realizar este direccionamiento se debe abrir el panel de control de la computadora para luego seleccionar rendimiento y mantenimiento, allí se pulsa sobre herramientas administrativas y después orígenes de datos ODBC o fuentes de datos ODBC según sea el la configuración del PC como se indica en la figura 4.9.

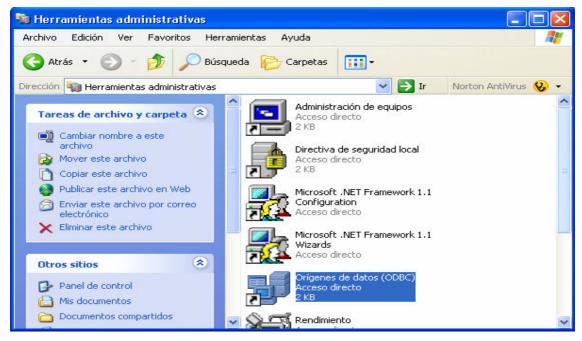


Fig.4.9. Icono de Orígenes de Datos (ODBC).

Se desplegará un diálogo como el mostrado en la figura 4.10 en donde se debe pulsar el botón agregar, después de haber seleccionado MS Access Database (*.mdb).



Fig.4.10. Ventana de Administrador Orígenes de Datos (ODBC).

Luego se desplegará un diálogo como el mostrado en la figura 4.11 en donde se debe pulsar el botón finalizar, después de haber seleccionado Microsoft Access Drivers (*.mdb).

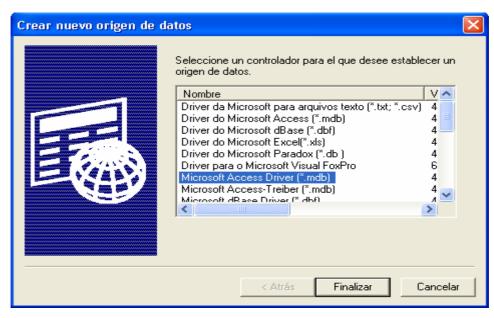


Fig.4.11. Ventana para Crear Nuevo Orígen de Datos (ODBC).

Luego se desplegará un diálogo como el mostrado en la figura 4.12 en donde se debe escribir en el cuadro identificado como "Nombre del Origen de Datos" la palabra "CESP" y luego presionar el botón seleccionar.

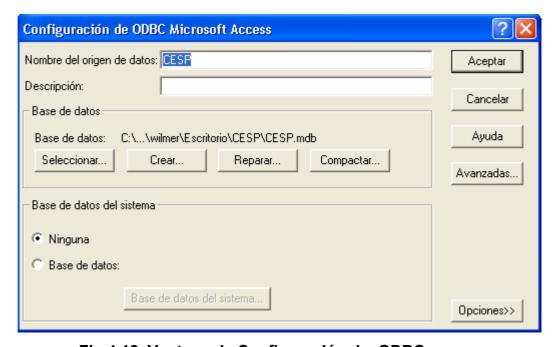


Fig.4.12. Ventana de Configuración de ODBC.

Por último se mostrará un diálogo como el mostrado en la figura 4.13 donde se debe asignar la ruta en la cual se encuentra instalado el programa y luego pulsar aceptar en este diálogo y en todos los anteriormente usados.

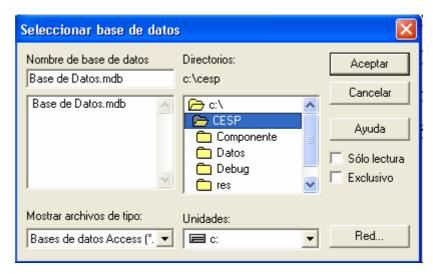


Fig.4.13. Ventana para Seleccionar Base de Datos.

4.1.5.4 Registro de Componente para la Instalación de C.E.S.P.

En algunas computadoras pudiera no encontrarse el componente mshflexgrid.ocx, necesario para el correcto funcionamiento del programa, por lo que el usuario luego de percatarse de este problema al no mostrar los resultados del cálculo, pudiera solucionarlo registrando el componente mshflexgrid.ocx, ubicado en la carpeta llamada componente que posee el programa.

El registro de este componente se realiza de la siguiente manera:

- 1) Pulsar en la ventana principal de Windows el botón de inicio.
- 2) Seleccionar el comando ejecutar.

- 3) Aparecerá un cuadro de diálogo donde se debe escribir regsvr32 y la ruta del componente como por ejemplo: regsvr32 C:\CESP\Componente\mshflxgrd.ocx y presionar aceptar.
- 4) Aparecerá un cuadro de diálogo informando que el componente ha sido registrado.

4.1.6 Ventana Principal de C.E.S.P

Para dar inicio al programa CESP se debe hacer doble click sobre el ícono mostrado en la figura 4.14 el cual se encuentra dentro de la carpeta llamada CESP.



Fig.4.14. Icono de C.E.S.P

La ventana principal del programa C.E.S.P se muestra en la figura 4.15 y la misma consiste en un cuadro de diálogo con la identificación del software y una serie de botones que enlazan con los diferentes módulos de cálculo de forma automática, con la característica de poderse abrir al mismo tiempo dos o más de dichos módulos.

En la figura 4.15 se aprecian tres botones ya identificados como cálculo de fallas, flujo de carga y estabilidad, así como también se crearon tres botones a aplicaciones en blanco como reserva a futuros creadores.



Fig.4.15. Ventana principal del C.E.S.P.

Una vez inicializada la ventana principal del programa C.E.S.P se da inicio a los módulos anteriormente nombrados y en el siguiente capitulo se describirá el funcionamiento del módulo de fallas.

Capítulo V - Módulo de Cálculo de Fallas.

5.1 Módulo de Cálculo de Fallas.

Este módulo provee una interfaz gráfica altamente amigable al usuario y cuya finalidad es el cálculo de los distintos tipos de cortocircuitos en los sistemas de potencia según lo especifique el usuario, a través de la introducción de los datos de los equipos que están conectados a la red numerados adecuadamente según la cantidad de barras del sistema, a través de ventanas y plantillas de fácil manejo.

El módulo de cálculo de fallas está en capacidad de calcular cortocircuitos por el método denominado clásico así como también puede calcular cortocircuitos usando la normativa ANSI IEEE C37-010-1999.

El módulo deja abierta la posibilidad de integrársele posteriormente cálculos de fallas por apertura de líneas y cálculos de cortocircuito bajo la normativa IEC.

5.1.2 Cálculo de Cortocircuito ANSI/IEEE C37-010-1999.

El cálculo bajo la normativa ANSI IEEE-C37-010-1999 define claramente que para la selección de los interruptores es muy importante la determinación de las magnitudes de la corriente de cortocircuito y que se debe tomar en cuenta solo el tipo más severo, que en la mayoría de los casos es la falla trifásica y en otros casos puede ser la falla monofásica a tierra.

Es por esta razón es que el algoritmo de cálculo ANSI IEEE C37-010-1999 sólo realiza este par de operaciones según se le solicite. En ambos casos el procedimiento es muy similar y solo varía en algunos parámetros y operaciones.

Este algoritmo incluye el cálculo de la corriente de cortocircuito simétrica y asimétrica de primer ciclo así como del ciclo de interrupción, los cuales son valores necesarios para la selección de los interruptores.

El algoritmo de cálculo trabaja para el sistema operado en vacío, a pesar de este hecho si se desea colocar la tensión pre falla distinta a la nominal es posible tal y como se muestra en la figura 5.3. Así también es de hacer notar que el algoritmo calcula el método con decaimiento AC y DC solamente y no incluye el método simplificado por ser el menos exacto de los dos.

5.1.3 Cálculo de Cortocircuito Clásico.

El cálculo de cortocircuito clásico no comprende muchas simplificaciones ni se asumen valores, mas bien se trata de tomar en cuenta todos los modelos matemáticos lo más cercanos a la realidad, por lo que se hace mucho más complejo su cálculo y se obtienen valores más exactos pero no muy diferentes a los de las normas, y en algunos casos esas diferencias no son relevantes o solo actúan a favor de la protección del sistema.

En este método se calculan todos los cortocircuitos posibles (trifásico, bifásico, bifásico a tierra y monofásico), por tratarse de un uso por lo general académico o de casos muy específicos.

5.1.4 Diagrama del algoritmo de Cálculo de Cortocircuito.

Para el cálculo de cortocircuito se presenta el diagrama de flujo mostrado en la figura 5.1 el cual se describe paso a paso a continuación:

- · Carga de datos.
- Lectura de la base de datos.
- Cálculo de las Tensiones Base.
- Conversión de los valores en por unidad.
- Solicitud del tipo de cálculo.
- Formación de las Matrices de Admitancias, para el Cálculo Clásico y para el Cálculo ANSI IEEE C37-010-1999.
- Solicitud del Punto Fallado.
- Obtención de las Matrices L y U (superior e inferior).
- Obtención de la Impedancia de Thevenin equivalente en la barra fallada.
- Cálculo de las Tensiones y Corrientes en las Barras.
- Impresión de resultados.

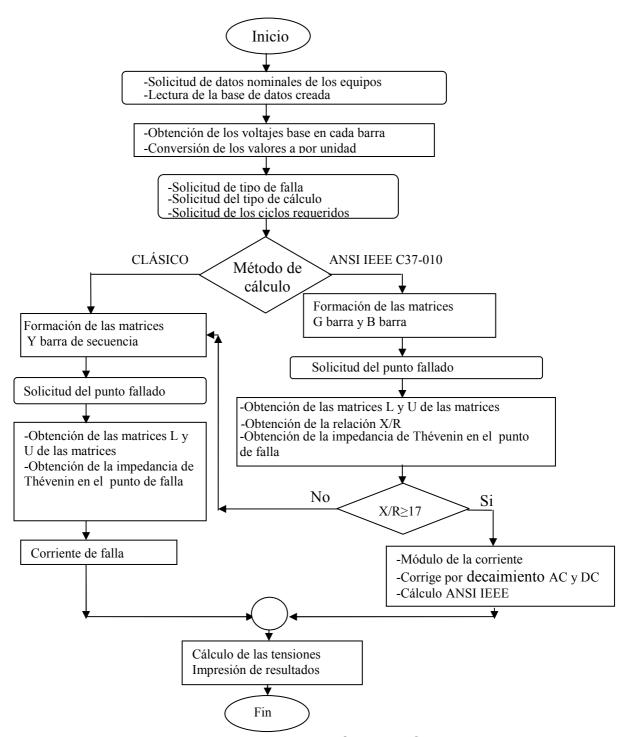


Fig.5.1 Diagrama de Flujo del Módulo de Cortocircuito

5.1.4.1 Carga de datos.

El programa solicita al usuario que introduzca los datos nominales de cada uno de los elementos del sistema (Generador, Carga, Líneas, Transformadores) y su asociación con las barras previamente definidas por el usuario, esto genera una base de datos en Microsoft Access propia para ese sistema el cual puede ser modificado según se necesite.

5.1.4.2 Lectura de la base de datos.

El programa toma los datos previamente creados en la base de datos haciendo uso de un controlador ODBC (Open Data Base Conectivity), para enviar la data a solicitud del mismo.

5.1.4.3 Cálculo de las Tensiones Base.

Mediante un algoritmo de lectura de datos se extraen los valores necesarios de la base de datos como son las tensiones y la conexión entre los elementos, para luego relacionar estos elementos a través de todo el sistema asignando así, a partir de una tensión base un nuevo valor de tension a cada una de las barras del sistema.

5.1.4.4 Conversión de los valores en por unidad.

El programa le solicita a la base de datos la información de los datos de los equipos y con la información de los valores de las tensiones bases calculadas en el paso anterior y la potencia base dada, se relacionan a través de las ecuaciones enunciadas en el capítulo II, para obtener los valores bajo un mismo patrón de referencia y eliminar las relaciones de transformación.

5.1.4.5 Solicitud del tipo de cálculo.

Al usuario se le muestra una pantalla de carga de datos en la cual se le solicita el tipo de cálculo requerido como son: el tipo de normativa a usar (normativa ANSI IEEE C37-010-1999, normativa IEC, método clásico), el tipo de falla (trifásica, bifásica, bifásica a tierra y monofásica) y el tiempo para el cual se desea el valor de corriente de cortocircuito (subtransitorio, transitorio y régimen permanente).

5.1.4.6 Formación de las Matrices de Admitancias.

La formación de las matrices necesarias depende del tipo de cálculo solicitado.

5.1.4.6.1 Matrices Para el Cálculo Clásico.

Para este tipo de cálculo se puede formar la matriz de admitancia "Y" (compleja) para cada una de las secuencias (positiva, negativa y cero), dependiendo del tipo de falla a calcular. En el caso de falla trifásica solo es necesario la matriz de secuencia positiva, en la falla bifásica solo son necesarias las matrices de secuencia negativa y positiva, en las fallas bifásica a tierra y monofásica a tierra son necesarias las tres matrices de secuencias.

5.1.4.6.2 Matrices Para el Cálculo ANSI IEEE C37-010-1999.

Para este tipo de cálculo se formarán la matriz de conductancia G y la matriz de suceptancia B que son matrices de números reales, y al igual que en el apartado anterior, se pueden formar las de secuencias positiva, negativa y cero dependiendo del tipo de falla a calcular. En el caso trifásico solo es necesario la formación de la secuencia positiva, en la bifásica solo es necesario la secuencia positiva y negativa, en la fallas bifásica a tierra y monofásica a tierra son necesarias la formación de las tres secuencias.

5.1.4.7 Solicitud del Punto Fallado.

El programa solicita el punto de falla el cual debe coincidir con una de las barras del sistema y a partir de allí se realizan las reducciones de las matrices.

5.1.4.8 Obtención de las Matrices L y U (superior e inferior).

El algoritmo de cálculo contempla la factorización de matrices conocida con el nombre de triangularización LU superior-inferior, con el fin de ser utilizado en la obtención de la matriz Z barra en un procedimiento que no requiere la inversión total de la matriz Y barra.

5.1.4.9 Obtención de la Impedancia de Thevenin.

Haciendo uso de las matrices triangular e inferior provenientes de la Y barra se realiza un proceso de sustitución inversa, el cual obtiene solo la columna asociada a la barra fallada de la matriz Z barra, y de ésta se selecciona la Z de Thevenin en el punto de falla requerido.

Si se trata del cálculo ANSI IEEE C37-010-1999 además se realiza la división de X/R el cual es requerido en la norma para aplicar los factores de corrección por decaimiento AC y decaimiento DC, así como también define la eficacia del método sugiriendo otra clase de cálculo.

5.1.4.10 Cálculo de las Tensiones y Corrientes en las Barras.

Una vez obtenida la corriente de falla se realiza un cómputo de cada una de las tensiones y las corrientes en cada barra que posee el sistema para un instante de tiempo en las condiciones de cortocircuito.

5.1.4.11 Impresión de resultados.

Luego de obtenidos los diversos cómputos durante la ejecución del programa se genera un documento el cual muestra la matriz Y barra, la impedancia de Thevenin en el punto de la falla, la relación X/R, la corriente de falla, las tensiones y corrientes en cada una de las barras.

Las interfaces de salida permiten visualizar la corriente falla, la impedancia equivalente de Thevenin en el punto fallado y también la relación X/R. Además muestra todas las corrientes y todos los voltajes del sistema una vez ocurrida la falla.

Si el usuario lo desea también, tiene la posibilidad de visualizar la matriz de admitancias del sistema (Ybus).

Tanto los resultados como los datos de entrada podrán ser exportados como archivos del tipo "*.wri" a las carpetas Datos y Resultados respectivamente.

5.2 Introducción de los datos del sistema de potencia a analizar.

En la Figura 5.2 se muestra la ventana principal del CESP en la cual se encuentran los diferentes botones que enlazan con las aplicaciones.



Fig.5.2. Ventana principal del Módulo del CESP.

Al seleccionar el botón de **fallas** mostrado en la figura 5.2, aparece la ventana principal del módulo de Fallas mostrado en la Figura 5.3 la cual es la aplicación principal del módulo de cálculo de fallas.

En esta ventana se pueden apreciar los datos de entrada del sistema solicitados para realizar el cálculo de la falla en el sistema deseado. En donde la selección de la duración de la falla indicada como: 3 ciclos, 5 ciclos y 30 ciclos, se refieren a las corrientes subtransitoria (l''), transitoria (l') y de régimen permanente respectivamente, enunciadas en el capitulo numero dos de este trabajo.

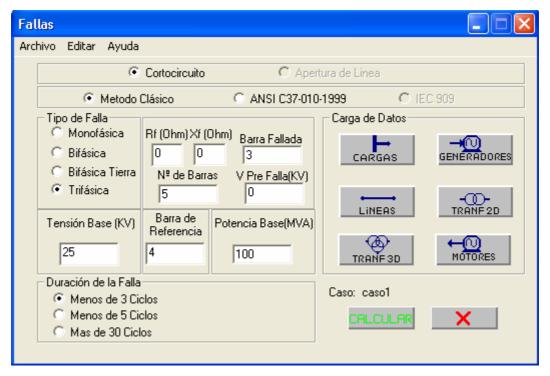


Fig.5.3. Ventana principal del Módulo de Fallas.

Existen tres maneras de introducir los datos del sistema.

- La primera es a través de las plantillas de datos de los equipos las cuales aparecen al pulsar en los botones llamados cargas, líneas, generadores, transformadores 2 devanados, transformadores 3 devanados y motores.
- La segunda forma es modificando los datos directamente en la base de datos.
- La tercera forma es pulsando en cualquiera de los menús llamados "Archivo" mostrados en las figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9. y luego de allí de desplegará una pestaña llamada "Abrir", que al pulsarla mostrará un diálogo solicitando el nombre de algún caso guardado con anterioridad y así poder cargar los datos de dicho caso.

5.2.1 Uso de las plantillas de entrada de datos de los elementos del sistema.

Las plantillas se dividen en cargas, líneas, generadores, transformadores 2 devanados , transformadores 3 devanados y motores.

Un ejemplo de las plantillas se muestra en la figura 5.4 allí se pueden ingresar los datos necesarios y luego moverse por los registros para comprobar que estén correctos los datos por medio de los botones identificados como: moverse al primer registro, moverse al anterior registro, moverse al siguiente registro y moverse al último registro.

También se tienen cuatro botones llamados adicionar, eliminar, limpiar y cargar.

El botón de **adicionar** se debe pulsar cuando se escriben los datos de un equipo y se quiere que sean ingresados en la base de datos.

Este paso es necesario realizarlo para que la base de datos incluya los registros.

El botón de **eliminar** se debe pulsar cuando se desea eliminar algún equipo previamente ingresado de la base de datos.

El botón **limpiar** tiene la función de eliminar todos los datos que se encuentren en los cuadros de edición para así ayudar al ingreso de los datos de una manera más rápida.

El botón cargar se debe pulsar una vez que se han ingresado todos los elementos y equipos del sistema y el programa los tomará para realizar los cálculos. Una vez pulsado dicho botón se cerrará la plantilla y se volverá a la aplicación principal.

Los datos contenidos en los cuadros de edición permiten ser borrados, copiarse, pegarse, cortarse, menos el primero de ellos (Nº del elemento) ya que es un valor que se auto numera, cada vez que se ingresa algún equipo.

La plantilla permite moverse a través de los elementos de la misma, usando la tecla de tabulación del teclado para facilitar el manejo del programa.

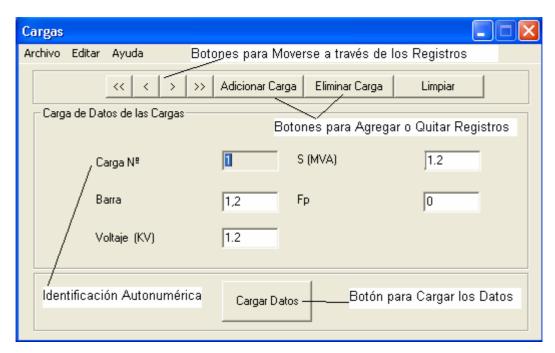


Fig.5.4. Plantilla para la introducción de datos.

5.2.1.1 Uso de la plantilla de Introducción de los Generadores.

Se debe indicar la numeración de la barra a la que se encuentra conectado cada generador según el esquema fijado en el diagrama unifilar del sistema, así como también se deben especificar los valores de tensión y potencia nominal del equipo, además de los valores de resistencia y reactancias de secuencia, (de dejarse en blanco estas últimas serán asumidas como cero), tal como se muestran en la figura 5.5.

Para que los equipos queden registrados en la base de datos necesaria para el cálculo de la falla, se debe pulsar el botón de **adicionar**.

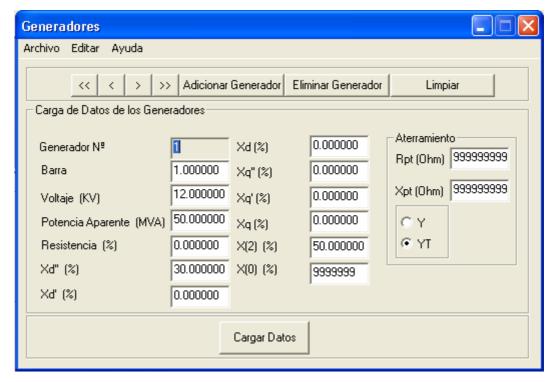


Fig.5.5. Plantilla para la Introducción de Datos de los Generadores.

5.2.1.2 Uso de la plantilla de Introducción de los Transformadores de dos devanados.

Se debe indicar la numeración de las barras a la que se encuentra conectado cada transformador según el esquema fijado en el diagrama unifilar del sistema, así como también se deben especificar los valores de tensión del primario, tensión del secundario y potencia nominal del equipo, además de los valores de resistencia y reactancias de secuencia, (de dejarse en blanco estas últimas serán asumidas como infinitas).

Los valores de potencia y de las tensiones que solicita la plantilla de los transformadores de 2 devanados son trifásicos.

La modelación de los tap del transformador asume que se encuentra del lado de alta.

También deben ingresarse los valores de las reactancias de puesta a tierra del primario y del secundario y el tipo de conexión realizada al equipo, tal como se muestran en la figura 5.6.

Para que los equipos queden registrados en la base de datos necesaria para el cálculo de la falla, se debe pulsar el botón de **adicionar**.



Fig.5.6. Plantilla para la Introducción de Datos de los Transformadores de dos Devanados.

5.2.1.3 Uso de la Plantilla de Introducción de los Transformadores de tres devanados.

Se debe indicar la numeración de las barras a la que se encuentra conectado cada transformador según el esquema fijado en el diagrama unifilar del sistema, así como también se deben especificar los valores de tensión del primario, tensión del secundario, tensión del terciario y potencia nominal del equipo, además de los valores de las reactancias de secuencia, (de dejarse en blanco estas últimas serán asumidas como infinitas).

Los valores de potencia y de las tensiones que solicita la plantilla de los transformadores de 3 devanados son trifásicos.

La modelación de los taps del transformador asume que se encuentra del lado de alta.

También deben ingresarse los valores de las reactancias de puesta a tierra del primario, del secundario y del terciario así como también el tipo de conexión realizada al equipo, tal como se muestran en la figura 5.7.

Para que los equipos queden registrados en la base de datos necesaria para el cálculo de la falla, se debe pulsar el botón de **adicionar**.

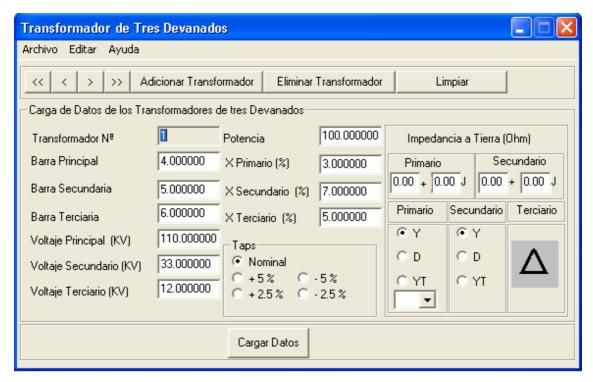


Fig.5.7. Plantilla para la Introducción de Datos de los Transformadores de tres Devanados.

5.2.1.4 Uso de la Plantilla de Introducción de las Líneas.

Se debe indicar la numeración de las barras a las que se encuentra conectada cada línea según el esquema fijado en el diagrama unifilar del

sistema, además de los valores de resistencia, reactancias de secuencia, (de dejarse en blanco estas últimas serán asumidas como infinitas) y admitancia de efecto capacitivo dividido entre dos (Y Shunt/2), tal como se muestran en la figura 5.8.

Para que los equipos queden registrados en la base de datos necesaria para el cálculo de la falla, se debe pulsar el botón de **adicionar**.



Fig.5.8. Plantilla para la Introducción de Datos de las Líneas.

5.2.1.5 Uso de la plantilla de Introducción de las cargas.

Se debe indicar la numeración de la barra a la que se encuentra conectada cada carga según el esquema fijado en el diagrama unifilar del sistema, así como también se deben especificar los valores de tensión y potencia nominal del equipo, además de los valores de resistencia y reactancias de secuencia, (de dejarse en blanco estas últimas serán asumidas como infinitas), tal como se muestran en la figura 5.9.

Para que los equipos queden registrados en la base de datos necesaria para el cálculo de la falla, se debe pulsar el botón de **adicionar**.

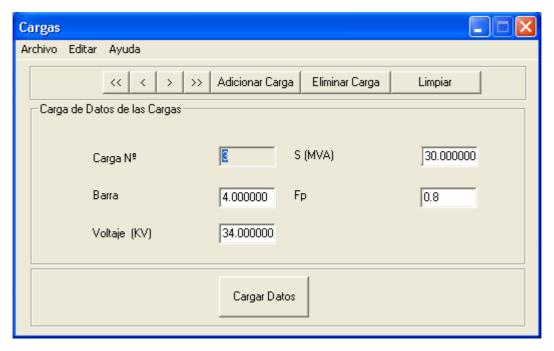


Fig.5.9. Plantilla para la Introducción de Datos de las Cargas.

5.2.1.6 Uso de la plantilla de Introducción de los Motores.

Se debe indicar la numeración de la barra a la que se encuentra conectado cada motor según el esquema fijado en el diagrama unifilar del sistema, así como también se deben especificar los valores de tensión y potencia nominal del equipo, además de los valores de resistencia y reactancias de secuencia, (de dejarse en blanco estas últimas serán asumidas como cero), tal como se muestran en la figura 5.10.

Para que los equipos queden registrados en la base de datos necesaria para el cálculo de la falla, se debe pulsar el botón de **adicionar**.

En los sistemas de potencia normalmente no se modelan los motores, pero en este caso se ha querido indicar el modelo para tener un algoritmo de cálculo más versátil.

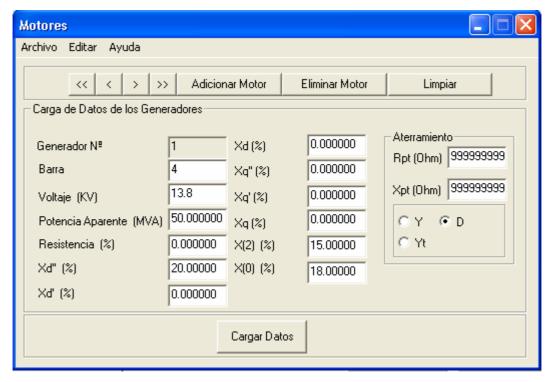


Fig.5.10. Plantilla para la Introducción de Datos de los Motores.

5.3 Visualización de resultados.

Para la visualización de los resultados del cálculo se genera un cuadro de diálogo con la indicación de la barra fallada y cuadros de edición que muestran el valor de la corriente de falla tanto en módulo y ángulo, además del valor de la impedancia de Thevenin en el punto de la falla y de la relación X/R del sistema.

También se muestran dos rejillas de datos en los cuales se puede visualizar del lado izquierdo todas las tensiones que poseen las barras en el instante de la falla, y del lado derecho todas las corrientes en los tramos en el instante de la falla, datos dados en valores en por unidad.

En la parte superior se tienen dos botones, uno indicado como "guardar" para exportar estos resultados como documento de texto y otro para pasar a visualizar la matriz de admitancias del sistema en la cual se basó el cálculo, tal como se muestran en la figura 5.11.

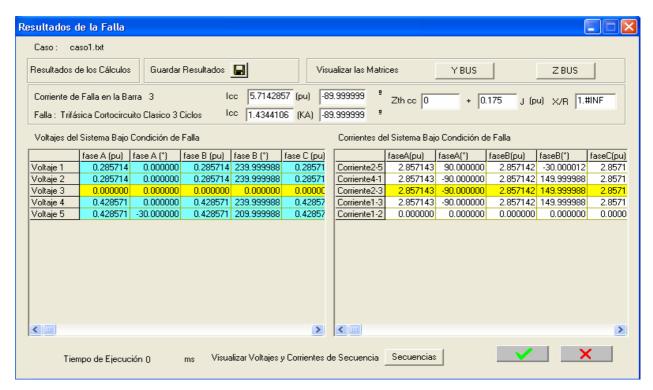


Fig.5.11. Visualización de los Resultados del Cálculo de Cortocircuito.

5.3.1 Visualización de la matriz de Admitancias.

Si el usuario lo desea puede acceder a la matriz de admitancias, pulsando en el botón Ybus, en el diálogo resultados de la falla y se desplegara un diálogo el cual posee una rejilla en la que están contenidos los valores de la matriz con los datos en forma de parte real y parte imaginaria.

Además en la parte superior posee un botón el cual al ser presionado permite la opción de guardar la matriz en la carpeta resultados, tal como se muestran en la figura 5.12.

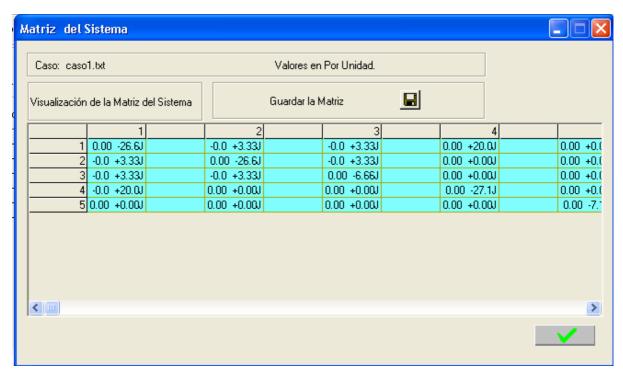


Fig.5.12. Visualización de la Y barra.

5.4 Impresión de Resultados.

Los datos obtenidos en las figuras 5.11 y 5.12 muestran los resultados de la falla tanto de las tensiones como de las corrientes, estos valores obtenidos pueden ser guardados en la carpeta de resultados con dos modalidades el informe de la falla con la extensión ". Falla" y la Ybus con la extensión ".Ybus" ambas bajo un formato de texto (*.wri) desde el cual luego podrá ser trasladado a otra ubicación, editado e impreso de ser necesario.

Una muestra de estos archivos se muestra en las figuras 5.13 y 5.14.

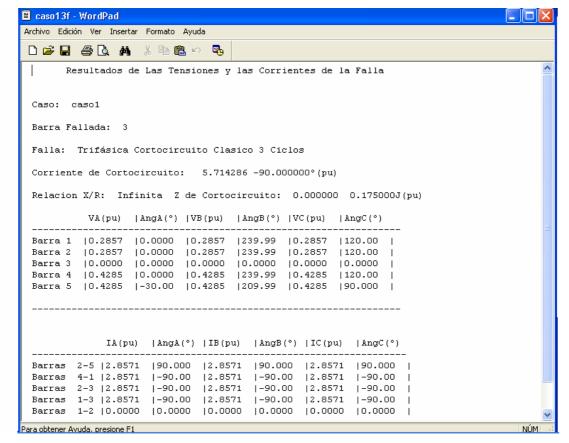


Fig.5.13. Resultados del Cálculo de Cortocircuito Exportados para Impresión.

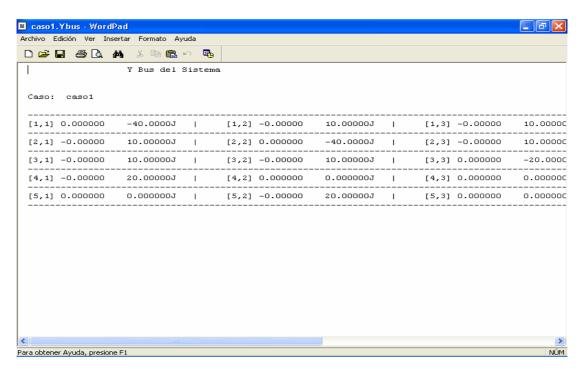


Fig.5.14. Visualización de la Ybus del Sistema Exportados para Impresión.

5.5 Validación.

Para la validación del programa de cálculo C.E.S.P se han usado cuatro ejemplos realizados en distintas bibliografías como lo son:

- Caso: 1 "Protecciones II" del autor Antonio Palacios 1984 Universidad de Carabobo.
- Caso: 2 "Electrical Transmission and Distribution" de Westinghouse
 Electric Corporation 1964.
- Caso: 3 "IEEE C37-10 Application guide for AC High-Voltage Circuit breakers rated on a Symmetrical Current Basis". De IEEE Standards 1999.
- Caso: 4 "Applied Protective Relaying" de Westinghouse Electric Corporation 1964.

La Bibliografía mencionada posee ejercicios en los cuales se plantean diferentes configuraciones de los sistemas, fallas y métodos de cálculo de los cuales se comprobaron que los resultados obtenidos sean parecidos a los arrojados por el programa con solo pequeñas diferencias debido al uso de más o menos decimales según sea el caso.

5.5.1Caso 1.

El caso 1 fue extraído del texto Protecciones II, del autor Antonio Palacios 1984 Universidad de Carabobo.

5.5.1.1 Sistema.

El sistema mostrado en la figura 5.15 presenta una configuración en anillo con dos generadores, dos transformadores y tres líneas, con los siguientes datos:

Tabla 5.1 Datos Generales del Caso 1

N° de	Potencia	Voltaje Base	Barra Fallada	Barra de
Barras	Base(MVA)	(KV)		Referencia
5	100	25	3	4

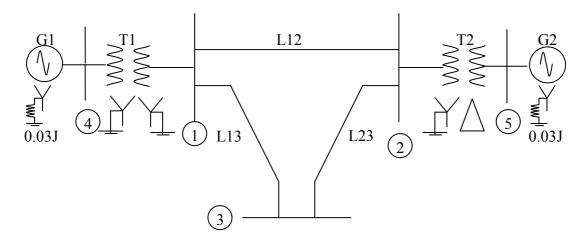


Fig. 5.15 Sistema del Caso 1.

Tabla 5.2. Datos de los Equipos del Caso 1

Equipo	Potencia (MVA)	Voltaje (KV)	X1(pu)	X2 (pu)	X0 (pu)
G1	100	25	0.2	0.2	0.05
G2	100	13.8	0.2	0.2	0.05
T1	100	25/230	0.05	0.05	0.05
T2	100	13.8/230	0.05	0.05	0.05
L12	100	230	0.1	0.1	0.3
L23	100	230	0.1	0.1	0.3
L13	100	230	0.1	0.1	0.3

5.5.1.2 Resolución planteada en el texto.

El cálculo realizado en la bibliografía realiza algunos redondeos por aproximación con lo cual se generan algunas diferencias decimales con lo obtenido en el C.E.S.P y los resultados de las secuencias son:

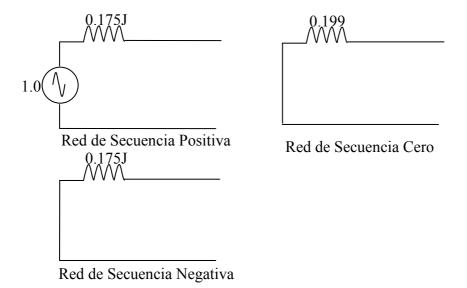


Fig. 5.16 Circuitos Equivalentes de Secuencia.

La conexión de los circuitos para las distintas fallas es la que se muestra a continuación.

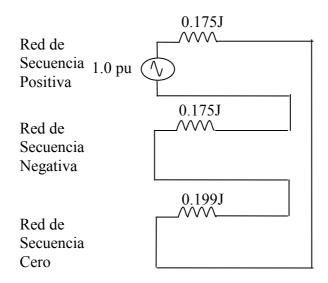


Fig. 5.17 Red Para Falla Monofásica.

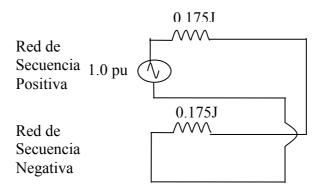


Fig. 5.18 Red Para Falla Bifásica.

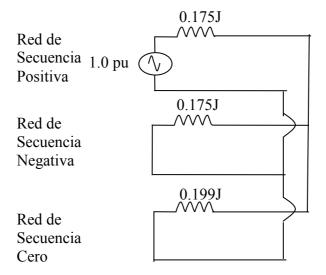


Fig. 5.19 Red Para Falla Bifásica a Tierra.

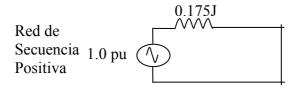


Fig. 5.20 Red Para Falla Trifásica a Tierra.

La tabla 5.3 muestra las corrientes subtransitorias en el tramo L13 y las tensiones en la barra 3 para las distintas secuencias y distintas fallas.

Tabla 5.3. Resultados del Caso 1.

Secuencia	Corrientes(pu)			Voltajes(pu)		
Falla	0	1	2	0	1	2
3Ф	0	2.85/-90	0	0	0.286/ 0	0
1Ф	0.9 1/-90	0.91/-90	0.91/-90	0.12/180	0.77/0	0.23/180
2ФТ	0.78/90	1.87/-90	0.99/90	0.11/0	0.53/0	0.25/0
2Ф	0	1.43/-90	1.43/90	0	0.64/0	0.35/0

5.5.1.3 Resultados Obtenidos con C.E.S.P.

Las corrientes de cortocircuito obtenidas con C.E.S.P son las totales, y las calculadas en el texto son las de secuencias, en la tabla 5.4 se puede apreciar las corrientes de cortocircuito obtenidas con C.E.S.P. Resultados mostrados en los anexos [D1], [D2] y [D3].

Tabla 5.4. Resultados del Cálculo con C.E.S.P del Caso 1.

Falla	Corriente de Cortocircuito(pu)	Voltajes(pu)
3Ф	2.8571/-90	0.2857/0
1Ф	2.73 /-90	0.2933/-180
2ФТ	2.7995 /150.98	0.9114/21.22
2Ф	2.4743/-180	0.7438/0

Para obtener las corrientes de falla total con los resultados del texto debe aplicarse la teoría de las componentes simétricas ya que los resultados vienen dados en función de las mismas.

Corriente de cortocircuito de la falla 1Φ:

Para calcular esta corriente se realiza el siguiente cálculo

$$Ia = 3Ia_0 = 3Ia_1 = 3Ia_2$$
 (5.1)
 $Ia = -0.91J*3=2.73J pu$

Corriente de cortocircuito de la falla 2Φ:

Para calcular esta corriente se realiza el siguiente cálculo

$$lb = (a^2-a) la1$$
 (5.2)

$$lb = 1.73205J * (-1.43J) = -2.4768 pu$$
 (5.3)

Corriente de cortocircuito de la falla 2Φt:

Para calcular esta corriente se realiza el siguiente cálculo

$$Ib = Ia_0 + a^2 Ia_1 + a Ia_2 (5.4)$$

Ib =
$$0.78J + a^2 (-1.87J) + a (0.99J) = 2.7608/153.77^{\circ} pu$$
 (5.5)

Tabla 5.5. Comparación de Resultados entre C.E.S.P y el Texto en el Caso 1.

Falla	Icc Texto(pu)	C.E.S.P(pu)	Error (%)
3Ф	2.85/-90	2.8571/-90	0,2491
1Ф	2.73/-90	2.73 /-90	0
2ФТ	2.7608/153.77	2.7995 /150.98	1,4017
2Ф	2.4768 /-180	2.4743/-180	0,1009

5.5.2 Caso 2.

El Caso 2 fue extraído del texto "Electrical Transmission and Distribution" de Westinghouse Electric Corporation 1964.

5.5.2.1 Sistema del Caso 2.

El sistema mostrado presenta una configuración en anillo con dos generadores, cinco transformadores y tres líneas, con los siguientes datos:

Tabla 5.6 Datos Generales del Sistema Caso 2.

N° de	Potencia	Voltaje Base	Barra Fallada	Barra de
Barras	Base(MVA)	(KV)		Referencia
7	50	13.8	5	4

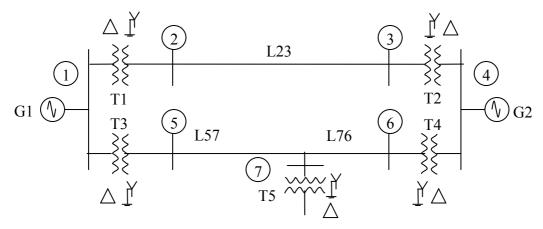


Fig. 5.21 Sistema del Sistema Caso 2.

Tabla 5.7. Datos de los Equipos del Sistema Caso 2.

Equipo	Potencia (MVA)	Voltaje (KV)	X1(pu)	X2 (pu)	X0 (pu)
G1	50	13.8	0.21	0.12	0.06
G2	37.5	13.8	0.333	0.227	0.066
T1	25	13.8/110	0.2	0.2	0.2
T2	20	110/13.8	0.225	0.225	0.225
T3	25	13.8/66	0.16	0.16	0.16
T4	15	66/13.8	0.267	0.267	0.267
T5	5	66/13.8			0.5
L23			0.14	0.14	0.338
L57			0.276	0.276	0.774
L76			0.092	0.092	0.258

5.5.2.2 Resolución planteada en el texto.

El cálculo realizado en la bibliografía realiza algunos redondeos por aproximación con lo cual se generan algunas diferencias decimales con lo obtenido en el C.E.S.P y los resultados de las secuencias son:

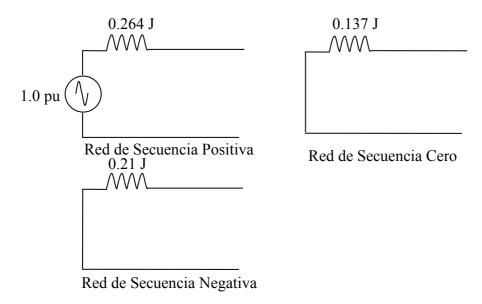


Fig. 5.22 Circuitos equivalentes de Secuencia.

La conexión de los circuitos para las distintas fallas es la que se muestra a continuación.

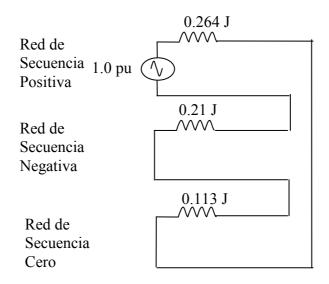


Fig. 5.23 Red para Falla Monofásica.

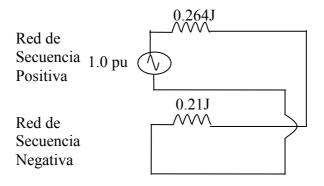


Fig. 5.24 Red Para Falla Bifásica.

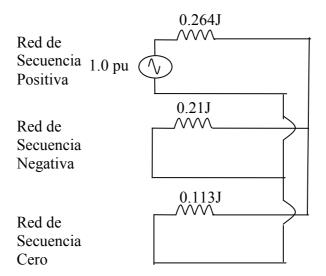


Fig. 5.25 Red Para Falla Bifásica a Tierra.

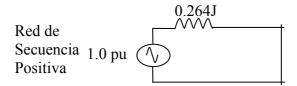


Fig. 5.26 Red Para Falla Trifásica a Tierra.

La tabla 5.10 muestra las corrientes en la barra 5 para las distintas secuencias y distintas fallas.

Tabla 5.8. Resultados del Cálculo para el Caso 2.

Falla	Corrientes(pu)		
Secuencia	0	1	2
3Ф	0	3.7878/-90	0
1Ф	1.637/-90	1.637/-90	1.637/-90
2ФТ	1.7444/90	2.8825/-90	1.138/90
2Ф	0	2.1097/-90	2.1097/90

5.5.2.3 Resultados Obtenidos con C.E.S.P.

Las corrientes de cortocircuito obtenidas con C.E.S.P son las totales, y las calculadas en el texto son las de secuencias, en la tabla 5.9 se puede apreciar las corrientes de cortocircuito obtenidas con C.E.S.P. Resultados mostrados en los anexos [D4], [D5] y [D6].

Tabla 5.9. Resultados del Cálculo con C.E.S.P del Sistema Caso 2.

Falla	Corrientes(pu)
3Ф	3,6558/-90
1Ф	4.7546/-90
2ФТ	4.2043/143.31
2Ф	3.5455/-180

Para obtener las corrientes de falla total del texto debe aplicarse la teoría de las componentes simétricas ya que los resultados vienen dados en función de las mismas.

Corriente de cortocircuito de la falla 1Φ:

Para calcular esta corriente se realiza el siguiente cálculo

$$Ia = 3Ia_0 = 3Ia_1 = 3Ia_2$$
 (5.6)
 $Ia = -1.637J*3=-4.911J pu$

Corriente de cortocircuito de la falla 2Φ:

Para calcular esta corriente se realiza el siguiente cálculo

Ib =
$$(a^2-a)$$
 Ia1 (5.7)

$$lb = 1.73205J * (-2.1097J) = -3.6541 pu$$
 (5.8)

• Corriente de cortocircuito de la falla 2Φt:

Para calcular esta corriente se realiza el siguiente cálculo

$$Ib = Ia_0 + a^2 Ia_1 + a Ia_2 (5.9)$$

lb =
$$1.7444$$
J+ a^2 (- 2.8825 J) + a (1.138 J) = $4.3554/143.07$ ° pu (5.10)

Tabla 5.10. Comparación de Resultados entre C.E.S.P y el Caso 2.

Falla	Icc Texto(pu)	C.E.S.P(pu)	Error (%)
3Ф	3.7878/-90	3.6558/-90	3.61
1Ф	4.911/-90	4.7546/-90	3.289
2ФТ	4.3554/143.07	4.2043/143.31	3.593
2Ф	3.6541/-180	3.5455/-180	3.063

5.5.3 Caso 3.

El ejemplo del caso 3 fue extraído de la Norma ANSI IEEE C37- 010- 1999.

5.5.3.1 Sistema.

El sistema mostrado presenta una configuración en anillo con dos generadores, dos transformadores y dos líneas, con los siguientes datos:

Tabla 5.11 Datos Generales del Caso 3.

N° de	Potencia	Voltaje Base	Barra Fallada	Barra de
Barras	Base(MVA)	(KV)		Referencia
4	100	46	4	3

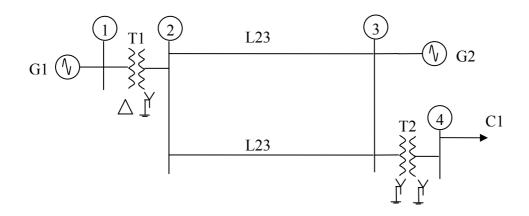


Fig. 5.27 Sistema del caso 3.

Tabla 5.12. Datos de los Equipos del Caso 3.

Equipo	Potencia	Voltaje	R1(pu)	X1(pu)	R0(pu)	X0(pu)
	(MVA)	(KV)				'
G1	100	13.8	0.0017	0.15		
G2	100	46	0.0005	0.02	0.001	0.03
T1	100	13.8/46	0.0015	0.07	0.0015	0.07
T2	100	46/34.5	0.004	0.2	0.004	0.2
L23	100	46	0.012	0.12	0.03	0.3
L23	100	46	0.012	0.12	0.03	0.3
C1	100	34.5				

5.5.3.2 Resolución planteada en el texto.

El cálculo realizado en la bibliografía realiza algunos redondeos por aproximación con lo cual se generan algunas diferencias decimales con lo obtenido en el C.E.S.P y los resultados de las secuencias son:

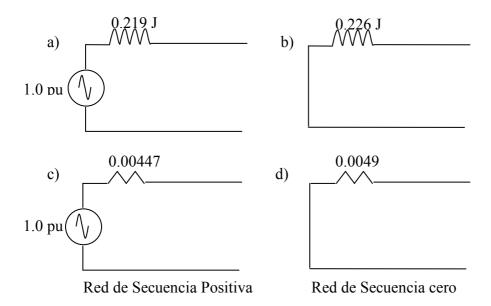


Fig. 5.28 Circuitos equivalentes de Las Secuencias.

La conexión de los circuitos para las distintas fallas es la que se muestra a continuación.

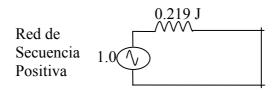


Fig. 5.29 Red Para Falla Trifásica a Tierra.

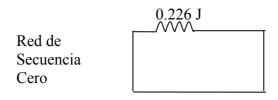


Fig. 5.30 Red Para Falla Monofásica a Tierra.

La tabla 5.13 muestra las corrientes en la barra 4 para las fallas monofásica y trifásica.

Tabla 5.13. Resultados del cálculo para el caso 3.

Secuencia	Corrientes(pu)
3Ф	4.5022/-90
1Ф	4.4548 /-90

5.5.3.3 Resultados Obtenidos con C.E.S.P.

La tabla 5.14 muestra las corrientes obtenidas con C.E.S.P en la barra 4 para las fallas monofásica y trifásica. Resultados mostrados en los anexos [D1], [D7] y [D8].

Tabla 5.14. Resultados del Cálculo con C.E.S.P del Caso 3.

Secuencia	Corrientes (pu)
3Ф	4.5091/-90
1Ф	4.4566/-90

La tabla 5.15 muestra la comparación entre las corrientes obtenidas con C.E.S.P y la norma en la barra 4 para las fallas monofásica y trifásica.

Tabla 5.15. Comparación de Resultados entre C.E.S.P y el Texto del Caso 3.

Secuencia	Icc Texto (pu)	C.E.S.P (pu)	Error (%)
3Ф	4.5022/-90	4.5091/-90	0.153
1Ф	4.4568/-90	4.4566/-90	0.004

5.5.4 Caso 4.

El ejemplo del caso 4 fue extraido del Texto Applied Protective Relaying de Westinghouse.

5.5.4.1 Sistema.

El sistema mostrado presenta una configuración en anillo con dos generadores, cinco transformadores y tres líneas. Con los siguientes datos:

Tabla 5.16 Datos Generales del Sistema del Caso 4.

N° de	Potencia	Voltaje Base	Barra Fallada	Barra de
Barras	Base(MVA)	(KV)		Referencia
8	100	12	8	1

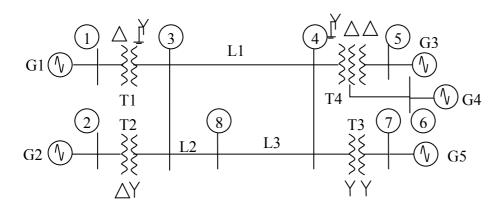


Fig. 5.31 Sistema del Caso 4.

Tabla 5.17. Datos de los equipos del Sistema del Caso 4.

Equipo	Potencia (MVA)	Voltaje (KV)	X1(pu)	X2 (pu)	X0 (pu)
G1	50	12	30	50	
G2	20	12	35	60	
G3	50	33	10	10	
G4	50	12	9	9	
G5	25	12	12	12	
T1	50	12/110	8	8	8
T2	20	12/110	8	8	8
Т3	60	12/110	8	8	8
T4	100	110/33/12	30/10/50	30/10/50	30/10/50
L1		110	40Ω	40 Ω	140 Ω
L2		110	10 Ω	10 Ω	35 Ω
L3		110	30 Ω	30 Ω	105 Ω

5.5.4.2 Resolución planteada en el texto.

El cálculo realizado en la bibliografía realiza algunos redondeos por aproximación con lo cual se generan algunas diferencias decimales con lo obtenido en el C.E.S.P y los resultados de las secuencias son:

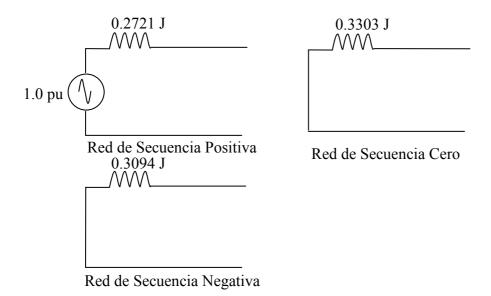


Fig. 5.32 Circuitos equivalentes de Las Secuencias.

La conexión de los circuitos para las distintas fallas es la que se muestra a continuación.

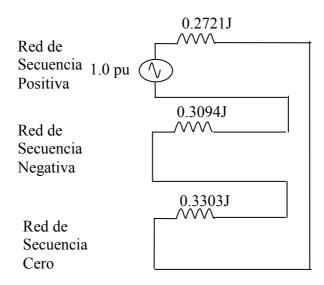


Fig. 5.33 Red para Falla Monofásica.

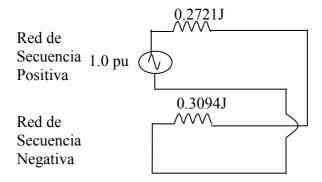


Fig. 5.34 Red para Falla Bifásica.

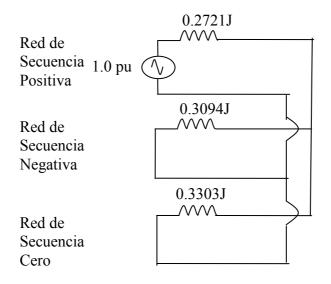


Fig. 5.35 Red para Falla Bifásica a Tierra.

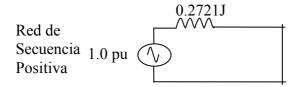


Fig. 5.36 Red para Falla Trifásica a Tierra.

La tabla 5.20 muestra las corrientes en la barra 5 para las distintas secuencias y distintas fallas.

Tabla 5.18. Resultados del Cálculo para el Caso 4.

Falla	Corrientes(A)
3Ф	1889.3/-90
1Ф	1702.2/-90
2ФТ	1791.21/119.33
2Ф	1528.01/-180

5.5.4.3 Resultados Obtenidos con C.E.S.P.

La tabla 5.19 muestra las corrientes obtenidas con C.E.S.P en la barra 4 para las fallas monofásica y trifásica.

Tabla 5.19. Resultados del Cálculo con C.E.S.P del Sistema del Caso 4.

Secuencia	Corrientes(A)
3Ф	1928.79/-90
1Ф	1726.7/-90
2ФТ	1823.21/151.08
2Ф	1563.29/-180

Para obtener las corrientes de falla total del texto debe aplicarse la teoría de las componentes simétricas ya que los resultados vienen dados en función de las mismas.

Corriente de cortocircuito de la falla 1Φ:

Para calcular esta corriente se realiza el siguiente cálculo

$$la = 3la_0 = 3la_1 = 3la_2$$
 (5.11)
 $la = -567.4J*3 = -1702.2J pu$

Corriente de cortocircuito de la falla 2Φ:

Para calcular esta corriente se realiza el siguiente cálculo:

$$Ib = (a^{2}-a) Ia1$$
 (5.12)

$$Ib = 1.73205J * (-882.2J) = -1528.01/-180^{\circ} pu$$

Corriente de cortocircuito de la falla 2Φt:

Para calcular esta corriente se realiza el siguiente cálculo:

$$Ib = Ia_0 + a^2 Ia_1 + a Ia_2$$

$$Ib = -585.1J + a^2 (1194.1J) + a (609J) = 1791.21/-119.33^{\circ} pu$$
(5.13)

Tabla 5.20. Comparación de Resultados entre C.E.S.P y el Texto del Sistema del Caso 4.

Falla	Icc Texto(A)	C.E.S.P(A)	Error (%)
3Ф	1889.3/-90	1928.79/-90	2,0901
1Ф	1702.2/-90	1726.7/-90	1,4393
2ФТ	1791.21/119.33	1823.21/151.08	1,7865
2Ф	1528.01/-180	1563.29/-180	2,3088

5.5.5 Análisis de resultados.

Los resultados obtenidos con el programa C.E.S.P se compararon con diferentes literaturas especializadas en el área de las fallas en los sistemas de potencia, de esta comparación se encontró una diferencia porcentual variable dependiendo del cada caso.

Para los casos 1, 2 y 3 la diferencia porcentual fue menor al 1% y se produjo por el uso de más o menos decimales en algunos casos y del redondeo en otros casos.

Para el caso 4 la diferencia porcentual estuvo alrededor del 2% dependiendo de la falla calculada y se produjo por el uso de más o menos decimales en algunos casos y del redondeo en otros casos, pero además en este ejemplo el texto realizó los cálculos en unidades mientras que el programa C.E.S.P los realizó en por unidad generando una diferencia un poco mayor.

Conclusiones y Recomendaciones

Con la culminación de este trabajo especial de grado se cuenta con un programa general de cálculo de parámetros eléctricos el cual contiene un módulo de cálculo de cortocircuito.

El módulo de cálculo de cortocircuito permite analizar sistemas bajo condiciones de falla de una forma rápida y eficiente, con sistemas de "n" cantidad de barras.

Los algoritmos utilizados reducen y operan las matrices de una forma eficiente y permiten una precisión numérica en los cálculos bastante amplia.

El programa permite realizar cálculos bajo dos métodos el clásico y bajo la normativa ANSI IEEE C37-010-1999 permitiendo hacer comparaciones y análisis para los diseños de las protecciones de los sistemas.

Los resultados arrojados pueden ser almacenados convenientemente en documentos de texto que luego pueden ser pasados a cualquier formato para ser analizados.

Los resultados de la corriente de cortocircuito y los voltajes y corrientes del sistema presentan una diferencia porcentual de 1.179 con respecto a los ejemplos tomados, debido al uso de más o menos decimales en los textos.

El desarrollo de un software de alto nivel requiere de un período largo de desarrollo y pruebas para lograr alcanzar una perfección en la aplicación realizada, debido a que se generan detalles que se van corrigiendo o mejorando sobre la marcha ya que durante la planificación se plantea el problema de forma global hasta llegar a lo especifico.

Se recomienda realizar mejoras en la codificación de ser necesario a medida que el usuario se encuentre con detalles, lo cual es normal en el desarrollo de cualquier aplicación de alto nivel.

Se recomienda dar conocer por parte de los profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo en especial a los Profesores de Sistemas de Potencia I el programa para un mayor provecho del programa.

También es recomendable la continuación de este trabajo especial de grado por parte de futuros tesistas en cálculos como flujo de carga, estabilidad, flujo de carga de armónicos, cálculo de parámetros de líneas de transmisión, arranque de motores, parámetros de maquinas sincrónicas, cortocircuito bajo normativa IEC. Cálculos en sistemas industriales entre otros.

Bibliografía

- [1] Arias, Fidias (1999). El proyecto de investigación: Guía para su elaboración (3^{era} Ed). Caracas: Episteme c.a.
- [2] IEEE STD C37.010- 1979: IEEE Application Guide for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis.
- [3] Lukostchuk, Alejandro (2002). Fallas en Sistemas de Potencia, Valencia, Universidad de Carabobo, Venezuela.
- [4] Pandare, José (2001). Software para la enseñanza de los Sistemas de Potencia en condiciones de Cortocircuito. Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela.
- [5] Rodríguez, Carlos (2004). Implementación de un Módulo de Cálculo de Cortocircuito bajo la Norma ANSI IEEE C37-010-1999 para el software ASP (Analizador de Sistemas de Potencia) perteneciente a la UNEFA (Universidad Experimental de las Fuerzas Armadas). Maracay. Venezuela.
- [6] Stevenson William (1998). Análisis de los Sistemas de Potencia (3^{ra} Ed). Editorial: Mc Graw Hill.
- [7] David J Kruglinski (1999). Programación avanzada con Microsoft Visual C++. Mc Graw-Hill/ Interamericana de España.
- [8] Cesar Pérez. MySql para Windows y Linux. Alfa Omega Ra-Ma.
- [9] Stephen D Gilbert, Hill McCarty (1999), Visual C++ Programming. Coriolis Group USA.
- [10] Westinghouse Electric Corporation. Applied Protective Relaying.
- [11] Bermúdez Juan F. Análisis de Fallas Transversales y Longitudinales Multiples. Universidad Simón Bolívar.
- [12] Paiva Pedro C (1981). Métodos Computacionales Aplicados a los sistemas de Potencia. Universidad Simón Bolívar.
- [13] Palacios Alfredo (1984). Protecciones II. Universidad de Carabobo.
- [14] Westinghouse Electric Corporation (1964). Electrical Transmission and Distribution.
- [15] IEEE Standards (1999). IEEE C37-10 1999 Application guide for AC High-Voltage Circuit breakers rated on a Symmetrical Current Basis.

[16] James P Cohoon, Jack W Davidson (2000). Programación y diseño en C++. Mc Graw-Hill/ Interamericana de España.

Anexos

Anexo A

Código de Programación del C.E.S.P.

Anexo A

Código de Programación del C.E.S.P.

A.1 Rutina de cálculo de la falla monofásica del método clásico.

```
switch (m Ciclos){
case 0://****cortocircuito clasico 3 ciclos falla monofasica*********
Tipo="Monofásica Cortocircuito Clasico 3 Ciclos";
Ymonoc(5,10,4,7,10);
ccclasico(myr,myx);
rcero=rcc;
xcero=xcc;
ycompleja(4,4,3,6,7);
ccclasico(myr,myx);
rpos=rcc;
xpos=xcc;
ycompleja(4,7,3,6,7);
ccclasico(myr,myx);
rneg=rcc;
xneg=xcc;
lcc=3*(pre/modulo(rcero+rpos+rneg,xcero+xpos+xneg+3*m_zt));
Aicc=-angulo(rcero+rpos+rneg,xcero+xpos+xneg+3*m_zt);
rcc=rcero+rpos+rneg;
xcc=xcero+xpos+xneg+3*m zt;
}
break;//-----
case 1://*****cortocircuito clasico 5 ciclos falla monofasica***********
```

```
Tipo="Monofásica Cortocircuito Clasico 5 Ciclos";
Ymonoc(5,11,4,7,10);
ccclasico(myr,myx);
rcero=rcc;
xcero=xcc;
ycompleja(4,5,3,6,7);
ccclasico(myr,myx);
rpos=rcc;
xpos=xcc;
ycompleja(4,8,3,6,7);
ccclasico(myr,myx);
rneg=rcc;
xneg=xcc;
lcc=3*(pre/modulo(rcero+rpos+rneg,xcero+xpos+xneg+3*m zt));
Aicc=-angulo(rcero+rpos+rneg,xcero+xpos+xneg+3*m zt);
rcc=rcero+rpos+rneg;
xcc=xcero+xpos+xneg+3*m zt;
}
break;//-----
case 2://*****cortocircuito clasico 30 ciclos falla monofasica********
Tipo="Monofásica Cortocircuito Clasico 30 Ciclos";
Ymonoc(5,12,4,7,10);
ccclasico(myr,myx);
rcero=rcc;
xcero=xcc;
ycompleja(4,6,3,6,7);
ccclasico(myr,myx);
rpos=rcc;
xpos=xcc;
ycompleja(4,9,3,6,7);
ccclasico(myr,myx);
rneg=rcc;
xneg=xcc;
```

```
lcc=3*(pre/modulo(rcero+rpos+rneg,xcero+xpos+xneg+3*m_zt));
Aicc=-angulo(rcero+rpos+rneg,xcero+xpos+xneg+3*m_zt);
rcc=rcero+rpos+rneg;
xcc=xcero+xpos+xneg+3*m_zt;
}
```

Anexo B

Obtención de los Elementos de la Z_{barra} a partir de la Y_{barra} .

Anexo B

Obtención de los elementos de la Z_{barra} a partir de la Y_{barra}.

Se puede calcular la matriz Z_{barra} a partir de la Y_{barra} ya que una es la inversa de la otra, lo cual puede ser muy útil en el cálculo de la impedancia de cortocircuito debido a que la obtención de la Y_{barra} es muy sencillo y rápido.

Debido a que solo interesa un término de la matriz la inversión total de la misma puede llegar a ser innecesaria, además de que el tiempo requerido para hacerlo sería muy alto y se abarcaría mucho espacio de memoria en un computador.

Debido a esto se utiliza un método más eficiente y rápido de reducción matricial denominado inversión por reducción, el cual se basa en la siguiente deducción:

Si se tiene una matriz de impedancias (Z) y se multiplica por un vector columna con todos los elementos iguales a cero menos el elemento de la barra fallada el cual será igual a uno, resultará una matriz de una sola columna igual a la columna de la barra fallada de la matriz impedancia.

$$\begin{bmatrix} Z11 & Z12 & Z1k & Z1n \\ Z21 & Z22 & Z2k & Z2n \\ Z31 & Zk2 & Zkk & Zkn \\ Zn1 & Zn2 & Znk & Znn \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1k \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z1k \\ Z2k \\ Zkk \\ Znk \end{bmatrix}$$
(a.1)

La matriz resultante se denominara Z^(k)barra.

Como el producto de Y_{barra} por Z_{barra} es igual a uno por ser inversas si se multiplica la matriz Y_{barra} por la matriz $Z^{(k)}_{barra}$ el resultado será un vector con todos los elementos iguales a cero menos el elemento de la barra fallada el cual será igual a uno. De allí se deduce que es posible obtener el término de la Z_{barra} en el sitio de la falla.

Para esto se utiliza el método de eliminación de variables y sustitución inversa el cual consiste en Obtener la matrices triangular inferior (L) y la matriz triangular superior (U) de la matriz Y_{barra} con el siguiente procedimiento.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ L_{21} & 1 & 0 \\ L_{31} & L_{32} & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ 0 & U_{22} & U_{23} \\ 0 & 0 & U_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{pmatrix}$$
(a.2)

Se van alternando filas y columnas en ese orden, es decir, empezando con la primera fila de la matriz L y multiplicando a todas las columnas de la matriz U. Después se toma la segunda fila y se multiplica portadas las columnas, y así sucesivamente hasta terminar.

Primera fila por Primera columna Y₁₁

$$(1 \quad 0 \quad 0) * \begin{pmatrix} U_{11} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = Y_{11} \Rightarrow U_{11} = Y_{11}$$
 (a.3)

Primera fila por Segunda columna Y₁₂

$$(1 \quad 0 \quad 0) * \begin{pmatrix} U_{12} \\ U_{22} \\ 0 \end{pmatrix} = Y_{12} \Rightarrow U_{12} = Y_{12}$$
 (a.4)

Primera fila $\,$ por Tercera columna $\,$ Y $_{13}$

$$(1 \quad 0 \quad 0) * \begin{pmatrix} U_{13} \\ U_{23} \\ U_{33} \end{pmatrix} = Y_{13} \Rightarrow U_{13} = Y_{13}$$
(a.5)

Segunda fila por Primera columna Y₂₁

$$(L_{21} \quad 1 \quad 0) * \begin{pmatrix} U_{11} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = Y_{21} \Rightarrow L_{21} = \frac{Y_{21}}{U_{11}}$$
(a.6)

Segunda fila por Segunda columna Y₂₂

$$(L_{21} \quad 1 \quad 0) * \begin{pmatrix} U_{12} \\ U_{22} \\ 0 \end{pmatrix} = Y_{22} \Rightarrow U_{22} = Y_{22} - U_{12}L_{12}$$
(a.7)

Segunda fila por Tercera columna Y23

$$(L_{21} \quad 1 \quad 0) * \begin{pmatrix} U_{13} \\ U_{23} \\ U_{33} \end{pmatrix} = Y_{23} \Rightarrow U_{23} = Y_{23} \quad -L_{21}U_{13}$$
 (a.8)

Tercera fila por Primera columna Y₃₂

$$(L_{31} \quad L_{32} \quad 1) * \begin{pmatrix} U_{11} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = Y_{32} \Rightarrow L_{31} = \frac{Y_{32}}{U_{11}}$$
 (a.9)

Tercera fila por Segunda columna Y₃₂

$$(L_{31} \quad L_{32} \quad 1) * \begin{pmatrix} U_{12} \\ U_{22} \\ 0 \end{pmatrix} = Y_{32} \Rightarrow L_{32} = \frac{Y_{32} - L_{31}U_{12}}{U_{22}}$$
(a.10)

Tercera fila por Tercera columna Y₃₃

$$(L_{31} \quad L_{32} \quad 1) * \begin{pmatrix} U_{13} \\ U_{23} \\ U_{33} \end{pmatrix} = Y_{33} \Rightarrow U_{33} = Y_{33} - L_{31}U_{13} - L_{32}U_{23}$$
(a.11)

Una vez obtenidas las matrices L y U y aplicando las definiciones de las ecuaciones 2.33 y 2.34 se deducen las siguientes ecuaciones:

$$L*U*Zbarra = \begin{pmatrix} Z_{1k} \\ Z_{2k} \\ Z_{3k} \end{pmatrix}$$
 (a.12)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ L_{21} & 1 & 0 \\ L_{31} & L_{32} & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ 0 & U_{22} & U_{23} \\ 0 & 0 & U_{33} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} Z_{1k} \\ Z_{2k} \\ Z_{3k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1_k \\ 0 \end{pmatrix}$$
(a.13)

La solución de esta ecuación se puede realizar en dos etapas en la siguiente forma.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ L_{21} & 1 & 0 \\ L_{31} & L_{32} & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1_k \\ 0 \end{pmatrix}$$
 (a.14)

Donde

$$\begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ 0 & U_{22} & U_{23} \\ 0 & 0 & U_{33} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} Z_{1k} \\ Z_{2k} \\ Z_{3k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \end{pmatrix}$$
(a.15)

De la ecuación 2.46 queda

$$X1=0$$

 $X2=1$ (a.16)
 $X3=-L_{32}$

Y por sustitución inversa de los resultados obtenidos encuentran los elementos de la matriz Z requeridos

$$Z3k = \frac{-L_{32}}{U_{33}}$$

$$Z2k = \frac{1 - U_{23}Z_{3k}}{U_{22}}$$

$$Z1k = \frac{-U_{12}Z_{2k} - U_{13}Z_{3k}}{U_{11}}$$
(a.17)

De esta manera se obtiene el valor de la barra fallada sin tener que invertir toda la matriz y por consiguiente la impedancia equivalente de Thevenin en la barra fallada.

Anexo C

Salida de los Resultados Obtenidos con CESP.

Anexo C1.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso13f.wri

Barra Fallada: 3

Falla: Trifásica Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 5.714286 -90.000000° (pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.434411 -90.000000°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.175000J(pu)

		VA(pu)	AngA(°)	VB (pu)	AngB(°)	VC(pu)	AngC(°)	
Barra	1	0.2857	0.0000	0.2857	239.99	0.2857	120.00	1
Barra	2	0.2857	10.0000	0.2857	239.99	0.2857	120.00	
Barra	3	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	
Barra	4	0.4285	10.0000	0.4285	239.99	0.4285	120.00	1
Barra	5	0.4285	1-30.00	0.4285	1209.99	0.4285	190.000	

	IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	_
	2-5 2.8571	•	•	•	•	•	
Barras	4-1 2.8571	-90.00	2.8571	-90.00	2.8571	1-90.00	
Barras	2-3 2.8571	1-90.00	2.8571	1-90.00	2.8571	1-90.00	
Barras	1-3 2.8571	1-90.00	2.8571	1-90.00	2.8571	1-90.00	
Barras	1-2 0.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	

Anexo C2.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso1 2f.wri

Barra Fallada: 3

Falla: Bifasica a Tierra Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 5.599036 152.110517°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.405480 152.110517°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.268085J(pu)

		VA(pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC(pu)	AngC(°)	
Barra	1	0.8948	0.0000	0.3720	221.69	0.3720	138.30	
Barra	2	0.8392	10.0000	0.4151	216.58	0.4151	143.41	
Barra	3	1.0416	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	
Barra	4	0.9087	10.0000	0.4962	228.41	0.4962	131.58	
Barra	5	0.7462	- 16.68	0.7462	196.68	0.4285	190.000	

	IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	_
Barras 2 Barras 1	2-5 0.8730 4-1 0.2777 2-3 0.0925 1-3 0.0925 1-2 0.1851	270.00 0.0000 0.0000	0.2777 0.0925 0.0925	270.00 0.0000 0.0000	0.2777 0.0925 0.0925	270.00 0.0000 0.0000	-

Anexo C3.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso1 2.wri

Barra Fallada: 3

Falla: Bifasica Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 4.948717 -180.000000°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.242236 -180.000000°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.350000J(pu)

		VA(pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC(pu)	AngC(°)	
Barra	1	1.0000	0.0000	0.5578	206.32	0.5578	153.67	
Barra	2	1.0000	10.0000	0.5578	1206.32	0.5578	153.67	
Barra	3	1.0000	10.0000	10.5000	180.00	10.5000	180.00	
Barra	4	1.0000	10.0000	0.6227	216.58	0.6227	143.41	
Barra	5	0.8921	-13.89	0.8921	193.89	0.4285	190.000	

	IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	_
Barras Barras Barras	2-5 0.0000 4-1 0.0000 2-3 0.0000 1-3 0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-
Barras	1-2 0.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	

Anexo C4.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: casol lf.wri

Barra Fallada: 3

Falla: Monofásica Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 5.465839 -90.000000°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.372045 -90.000000°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.548864J(pu)

		VA(pu)	AngA(°)	VB (pu)	AngB(°)	VC (pu)	AngC(°)	
Barra	1	0.4265	0.0000	0.9499	245.74	0.9499	114.25	
Barra	2	0.4844	10.0000	0.9275	1249.00	0.9275	110.99	
Barra	3	10.0000	10.0000	11.0224	237.88	11.0224	122.11	
Barra	4	0.5486	10.0000	0.9559	244.94	0.9559	115.05	
Barra	5	0.7436	1-42.25	0.7436	222.25	1.0000	190.000	

IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	
	•	•	•	•	•	_
2-3 2.8295	270.00	12.8295	270.00	12.8295	270.00	
1-3 2.6363	270.00	12.6363	270.00	12.6363	270.00	
1-2 0.1932	190.000	0.1932	190.000	0.1932	190.000	
	2-5 1.8219 4-1 2.4430 2-3 2.8295 1-3 2.6363	2-5 1.8219 90.000 4-1 2.4430 -90.00 2-3 2.8295 270.00 1-3 2.6363 270.00	2-5 1.8219 90.000 1.8219 4-1 2.4430 -90.00 2.4430 2-3 2.8295 270.00 2.8295 1-3 2.6363 270.00 2.6363	2-5 1.8219 90.000 1.8219 90.000 4-1 2.4430 -90.00 2.4430 -90.00 2-3 2.8295 270.00 2.8295 270.00 1-3 2.6363 270.00 2.6363 270.00	2-5 1.8219 90.000 1.8219 90.000 1.8219 4-1 2.4430 -90.00 2.4430 -90.00 2.4430 2-3 2.8295 270.00 2.8295 270.00 2.8295 1-3 2.6363 270.00 2.6363 270.00 2.6363	IA(pu) AngA(°) IB(pu) AngB(°) IC(pu) AngC(°) 2-5 1.8219 90.000 1.8219 90.000 1.8219 90.000 4-1 2.4430 -90.00 2.4430 -90.00 2.4430 -90.00 2-3 2.8295 270.00 2.8295 270.00 2.8295 270.00 1-3 2.6363 270.00 2.6363 270.00 2.6363 270.00 1-2 0.1932 90.000 0.1932 90.000 0.1932 90.000

Anexo C5.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso2 3f.wri

Barra Fallada: 5

Falla: Trifásica Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 3.655825 -90.000000°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.599009 -90.000000°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.273536J(pu)

	VA(pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC (pu)	AngC(°)	
Barra 1 Barra 2 Barra 3 Barra 4 Barra 5 Barra 6 Barra 7	0.4478 0.4818 0.5055 0.5437 0.0000 0.3152 0.2364	-30.00 -30.00 90.000 90.000 0.0000 120.00	0.4478 0.4818 0.5055 0.5437 0.0000 0.3152 0.2364	209.99 209.99 -30.00 -30.00 0.0000 -0.000	0.4478 0.4818 0.5055 0.5437 0.0000 0.3152 0.2364	90.000 90.000 210.00 210.00 0.0000 240.00	

	IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	
Barras Barras Barras	1-2 0.1697 6-4 0.8567 3-4 0.1697	60.000 180.00	0.1697 0.8567 0.1697	60.000 60.000 180.00	0.1697 0.8567 0.1697	60.000 60.000 180.00	
Barras	$1-5 \mid 2.7990$	•	2.7990	1-0.000	12.7990	1-0.000	
Barras	2-3 0.1697	•	0.1697	190.000	0.1697	190.000	
Barras	5-7 0.8567		0.8567	210.00	0.8567	210.00	
Barras	7-6 0.8567	210.00	0.8567	210.00	0.8567	210.00	

Anexo C6.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso2 2ft.wri

Barra Fallada: 5

Falla: Bifasica a Tierra Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 4.204344 143.317883°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.838924 143.317883°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.359214J(pu)

		VA(pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC(pu)	AngC(°)	
Barra	1	0.6355	-22 . 15	0.6355	202.15	0.4793	190.000	
Barra	2	0.6575	1-22.87	0.6575	202.87	0.5112	190.000	1
Barra	3	0.5335	190.000	0.6729	1-23.35	0.6729	203.35	1
Barra	4	0.5694	190.000	0.6978	1-24.07	0.6978	1204.07	1
Barra	5	0.7155	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	1
Barra	6	0.3895	132.77	0.6760	1-0.000	0.3895	227.22	1
Barra	7	0.2921	132.77	0.6859	1-0.000	0.2921	227.22	

		IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	
Barras Barras Barras Barras Barras	6-4 3-4 1-5	0.1171 0.5708 0.1593 2.9961 0.0992	47.163 38.203 180.00 -0.000 0.0000	0.1171 0.5708 0.1593 2.9961 0.0992	47.163 38.203 180.00 -0.000 0.0000	0.1171 0.5708 0.1593 2.9961 0.0992	47.163 38.203 180.00 -0.000	
Barras Barras	-	0.8682	206.50 206.50	0.8682 0.8682	206.50 206.50	0.8682 0.8682	206.50 206.50	

Anexo C7.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso2 2f.wri

Barra Fallada: 5

Falla: Bifasica Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 3.545537 -180.000000°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.550770 -180.000000°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.488516J(pu)

		VA(pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC (pu)	AngC(°)	
Barra Barra Barra	2 3	0.8107	-18.45 -19.30 90.000	0.7994 0.8107 0.8188	198.45 199.30 -19.89	0.5060 0.5361 0.8188	90.000 90.000 199.89	
Barra Barra		0.5910 0.8801	190.000	0.8319 0.4400	-20.80 180.00	0.8319 0.4400	200.80 180.00	
Barra	6	0.5351	146.31 153.36	0.8904	-0.000 -0.000	10.5351	213.68 206.63	

	IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	
Barras	1-2 0.0827	10.0000	0.0827	10.0000	0.0827	10.0000	
Barras	6-4 0.4662	12.9972	0.4662	12.9972	0.4662	12.9972	
Barras	3-4 0.1505	180.00	0.1505	180.00	0.1505	180.00	
Barras	1-5 3.1627	10.0000	3.1627	10.0000	3.1627	10.0000	
Barras	2-3 0.0395	10.0000	0.0395	10.0000	0.0395	10.0000	
Barras	5-7 0.8066	180.99	0.8066	180.99	0.8066	180.99	
Barras	7-6 0.8066	180.99	0.8066	180.99	0.8066	180.99	

Anexo C8.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso2 1f.wri

Barra Fallada: 5

Falla: Monofásica Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 4.754618 -90.000000° (pu)

Corriente de Cortocircuito: 2.079606 -90.000000°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.630966J(pu)

	VA(pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC (pu)	AngC(°)	
Barra 1 Barra 2 Barra 3 Barra 4	0.7176 0.9141 0.9210	-40.19 -39.34 90.000 90.000	0.7001 0.7176 0.7299 0.7498	220.19 219.34 -38.76 -37.88	0.9037 0.9098 0.7299 0.7498	90.000 90.000 218.76 217.88	
Barra 5 Barra 6 Barra 7	0.8446	0.0000 110.21 111.00	0.8555 0.4447 0.3335	246.68 -0.000 -0.000	0.8555 0.8446 0.8471	113.31 249.78 248.99	

	IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	
Barras Barras Barras Barras Barras Barras Barras Barras	1-2 0.1020 6-4 0.6245 3-4 0.0306 1-5 0.0217 2-3 0.1165 5-7 0.1876 7-6 0.1876	81.363 89.000 0.0000 0.0000 90.000 264.22	0.1020 0.6245 0.0306 0.0217 0.1165 0.1876	81.363 89.000 0.0000 0.0000 90.000 264.22	0.1020 0.6245 0.0306 0.0217 0.1165 0.1876	81.363 89.000 0.0000 0.0000 90.000 264.22 264.22	

Anexo C9.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso3 1f.wri

Barra Fallada: 4

Falla: Monofásica Cortocircuito Ansi 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 4.518796 -88.865041°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 7.562111 -88.865041°(KA)

Relacion X/R: -1.#IND00 Z de Cortocircuito: 0.004485 0.226400J(pu)

		VA (pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC (pu)	AngC(°)	
Barra	1	1.0000	239.99	1.0000	120.00	1.0000	10.0000	
Barra	2	0.9989	240.11	1.0008	120.10	0.9997	1-0.006	
Barra	3	0.9999	1-0.069	0.9999	240.14	1.0000	120.14	
Barra	4	0.0112	10.0000	0.8772	269.35	0.8548	89.364	

		IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	_
								Ξ.
Barras	1-2	0.0325	0.0000	0.0325	0.0000	0.0325	10.0000	
Barras	3-4	2.4394	87.680	12.4394	87.680	12.4394	87.680	
Barras	2-3	0.0080	10.0000	0.0080	10.0000	0.0080	10.0000	
Barras	2-3	0.0080	10.0000	0.0080	10.0000	0.0080	10.0000	

Anexo C10.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso3 3f.wri

Barra Fallada: 4

Falla: Trifásica Cortocircuito Ansi 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 4.571495 -90.000000°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 7.650301 -90.000000°(KA)

Relacion X/R: -1.#IND00 Z de Cortocircuito: 0.000000 0.218747J(pu)

	VA (pu)	AngA(°)	VB (pu) 	AngB(°)	VC (pu) 	AngC(°)	
Barra 2 Barra 3	0.9997	239.85 -0.143	0.9997	119.85 239.85	0.9997	-0.000 -0.140 119.85 0.0000	İ

	IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	
Barras 1-Barras 2-Barras 2-Barras 2-	4 4.9988 3 0.0034	1148.71	14.9988	1148.71	14.9988	1148.71	

Anexo C11.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso4 lf.wri

Barra Fallada: 8

Falla: Monofásica Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 2.951596 -90.000000°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.549186 -90.000000°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 1.016399J(pu)

		VA(pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC(pu)	AngC(°)	
Barra Barra Barra	2	0.9583 0.7325 0.9973	251.75 225.82 244.62	0.9583 1.0508 0.9973	108.24 89.999 115.37	0.6001 0.7325 0.3489	0.0000 -45.82 0.0000	
Barra	-	0.2948	1-0.000	11.1153	1232.76	11.1153	127.23	i
Barra	5	0.9034	10.0000	0.9820	242.61	0.9820	117.38	
Barra	6	0.9616	10.0000	0.9926	241.02	0.9926	118.97	
Barra	7	0.7233	10.0000	0.9544	247.73	0.9544	112.26	
Barra	8	10.0000	10.0000	1.1035	234.44	1.1035	125.55	
Barra	9	1.0307	121.90	0.7379	1-0.000	1.0307	238.09	

IA(pu)	AngA(°) IB	(pu) An	ngB(°) IC	(pu) An	igC(°)		
Barras	1-3 0.2642	102.37	0.2642	102.37	0.2642	102.37	
Barras	2-3 0.1561	94.755	0.1561	94.755	0.1561	94.755	
Barras	7-4 0.2903	82.914	0.2903	82.914	0.2903	82.914	
Barras	3-4 0.2318	90.000	0.2318	190.000	0.2318	90.000	į
Barras	3-8 1.9818	270.00	1.9818	270.00	1.9818	270.00	
Barras	8-4 0.9697	90.000	0.9697	90.000	0.9697	90.000	
Barras	4-9 0.6252	90.000	0.6252	90.000	0.6252	90.000	
Barras	9-5 887763	225.00	887763	225.00	887763	225.00	
Barras	9-6 887763	225.00	887763	225.00	887763	1225.00	İ

Anexo C12.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso4 2f.wri

Barra Fallada: 8

Falla: Bifasica Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 2.978468 -180.000000° (pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.563290 -180.000000°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.581524J(pu)

	VA(pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC(pu)	AngC(°)	
Barra 1 Barra 2	0.6037 0.9534	205.59 188.51	0.6037 0.2824	154.40 89.999	1.0889 0.9534	0.0000 -8.518	
Barra 3	0.5523	194.23	0.5523	165.76	1.0707	10.0000	
Barra 4	11.0443	1-0.000	0.6182	212.36	0.6182	147.63	
Barra 5	1.0121	1-0.000	0.8799	234.89	0.8799	125.10	
Barra 6	1.0048	1-0.000	0.9514	238.12	0.9514	121.87	
Barra 7	1.0346	1-0.000	0.6839	220.84	0.6839	139.15	
Barra 8	1.0641	1-0.000	0.5320	180.00	0.5320	180.00	
Barra 9	0.8231	128.20	1.0181	1-0.000	0.8231	231.79	

	IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	
Barras Barras	1-3 0.7833 2-3 0.1618	175.81 165.98	0.7833 0.1618	175.81 165.98	0.7833 0.1618	175.81 165.98	
Barras	7-4 0.8731	182.37	0.8731	182.37	0.8731	182.37	
Barras	3-4 0.0797	10.0000	0.0797	10.0000	0.0797	10.0000	
Barras	3-8 0.0797	10.0000	0.0797	10.0000	0.0797	10.0000	
Barras	8-4 0.0797	10.0000	0.0797	10.0000	0.0797	10.0000	
Barras	4-9 0.0872	10.0000	0.0872	10.0000	0.0872	10.0000	
Barras	9-5 887763	225.00	887763	225.00	887763	225.00	
Barras	9-6 887763	225.00	887763	225.00	887763	225.00	

Anexo C13.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso4 2ft.wri

Barra Fallada: 8

Falla: Bifasica a Tierra Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 3.327625 155.559116°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.746550 155.559116°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.452902J(pu)

		VA(pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC(pu)	AngC(°)	
Barra	1	0.5270	210.94	0.5270	149.05	0.9040	10.0000	
Barra	2	0.7921	190.68	0.2938	189.999	0.7921	-10.68	
Barra	3	0.3005	207.69	10.3005	152.30	11.0042	10.0000	
Barra	4	1.2082	10.0000	0.3504	251.35	0.3504	108.64	
Barra	5	0.9672	10.0000	0.8675	236.11	0.8675	123.88	
Barra	6	0.9870	10.0000	0.9468	238.58	0.9468	121.41	
Barra	7	0.9062	10.0000	0.6373	224.68	10.6373	135.31	
Barra	8	11.1974	10.0000	0.0000	10.0000	10.0000	10.0000	
Barra	9	0.7436	119.49	1.0602	1-0.000	0.7436	240.50	

	IA(pu)	AngA(°)	IB(pu)	AngB(°)	IC(pu)	AngC(°)	
Barras Barras Barras Barras Barras Barras Barras	1-3 0.8402 2-3 0.2002 7-4 0.8760 3-4 0.2483 3-8 0.2483 8-4 0.2483 4-9 0.3013 9-5 1887763	167.73 145.84 173.59 90.000 90.000 90.000 90.000	0.8402 0.2002 0.8760 0.2483 0.2483 0.2483 0.3013 887763	167.73 145.84 173.59 90.000 90.000 90.000 90.000	0.8402 0.2002 0.8760 0.2483 0.2483 0.2483 0.3013 887763	167.73 145.84 173.59 90.000 90.000 90.000 90.000	
Barras	9-6 887763	1225.00	1887763	1225.00	1887763	1225.00	İ

Anexo C14.

Resultados de Las Tensiones y las Corrientes de la Falla

Caso: caso4 3f.wri

Barra Fallada: 8

Falla: Trifásica Cortocircuito Clasico 3 Ciclos

Corriente de Cortocircuito: 3.674844 -90.000000°(pu)

Corriente de Cortocircuito: 1.928793 -90.000000°(KA)

Relacion X/R: Infinita Z de Cortocircuito: 0.000000 0.272120J(pu)

	VA(pu)	AngA(°)	VB(pu)	AngB(°)	VC(pu)	AngC(°)	
Barra 1	0.3483	240.00	0.3483	119.99	0.3483	0.0000	 I
Barra 2	0.3281	210.00	0.3281	189.999	0.3281	1-29.99	ĺ
Barra 3	0.1746	240.00	0.1746	119.99	0.1746	10.0000	
Barra 4	0.3872	10.0000	0.3872	239.99	0.3872	120.00	
Barra 5	0.8326	10.0000	0.8326	239.99	0.8326	120.00	
Barra 6	0.9335	10.0000	0.9335	239.99	0.9335	120.00	
Barra 7	0.5204	10.0000	0.5204	239.99	0.5204	120.00	
Barra 8	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	
Barra 9	0.7489	120.00	0.7489	1-0.000	0.7489	240.00	

	IA(p	ou) AngA(°) IB(pu) AngB(°) IC(pu)	AngC(°)	
Barras	1-3 1.08	60 150.0	0 1.086	0 150.00	1.0860	150.00	
Barras	2-3 0.38	38 120.0	0 0.383	8 120.00	0.3838	120.00	
Barras	7-4 0.99	90 150.0	0 0.999	0 150.00	0.9990	150.00	
Barras	3-4 0.64	31 90.00	0 0.643	1 90.000	0.6431	190.000	
Barras	3-8 2.11	30 -90.0	0 2.113	0 -90.00	2.1130	1-90.00	
Barras	8-4 1.56	18 90.00	0 1.561	8 90.000	1.5618	190.000	
Barras	4-9 1.20	58 90.00	0 1.205	8 90.000	1.2058	190.000	
Barras	9-5 8877	63 225.0	0 88776	3 225.00	887763	225.00	
Barras	9-6 8877	63 225.0	0 88776	3 225.00	887763	225.00	

Anexo D

Norma ANSI IEEE Std C37-010-1999.

Application Guide for AC High Voltage

Circuit Braker