



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIA DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN
TRANSFORMADORES DE POTENCIA”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingenieros Eléctricos en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autores:

Mora Reinozo Franklin Vinicio
Quituzaca Tigre Klever Ismael

Tutor:

Ing. MSc. Wilian Patricio Guamán Cuenca

Latacunga – Ecuador

2021



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **MORA REINOZO FRANKLIN VINICIO** y **QUITUIZACA TIGRE KLEVER ISMAEL** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “**ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA**”, siendo el Ing. MSc. **GUAMÁN CUENCA WILIAN PATRICIO** el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

.....
Mora Reinozo Franklin Vinicio

CC: 050447552-6

.....
Quituzaca Tigre Klever Ismael

CC: 140098153-4



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA”, de **MORA REINOZO FRANKLIN VINICIO** y **QUITUIZACA TIGRE KLEVER ISMAEL**, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Marzo 2021

El Tutor

.....

Ing. MSc. Guamán Cuenca Wilian Patricio

CC: 060357895-6



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes **MORA REINOZO FRANKLIN VINICIO** y **QUITUIZACA TIGRE KLEVER ISMAEL** con el título de Proyecto de titulación “**FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Marzo 2021

Para constancia firman:

.....

Ing. Quinatoa Caiza Carlos.

(Presidente)

CC: 050328786-4

.....

Ing. Jiménez Jiménez Diego.

CC: 050349370-2

.....

Ing. Proaño Maldonado Xavier.

CC: 050265642-4

AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios por permitirme culminar esta etapa académica de mi vida, por la sabiduría e inteligencia que me ha dotado durante todo el proceso.

A mi madre, quien fue la primera maestra que tuve, quien con amor y dedicación me inculco en este largo camino que es el conocimiento.

A mis hermanos, en especial a hermano mayor quien ha sido un pilar fundamental en la culminación de esta etapa formativa, con su apoyo incondicional y siendo un ejemplo a seguir.

A mi tutor de tesis y los docentes, quienes supieron guiarnos con sus conocimientos para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros quienes me apoyaron y acompañaron en los momentos de alegría y dificultades que atravesamos en esta etapa académica.

Klever Quituzaca

AGRADECIMIENTO

Principalmente agradezco a Dios por otorgarme una vida llena de bendiciones, que me han permitido crecer como persona y hoy en día profesionalmente.

A mis queridos padres, Franklin, que siempre estuvo apoyándome en cada paso desde pequeño y hasta hoy que a pesar de mis tropiezos ha estado para sostenerme. A mi madre Bertha, que jamás me descuidó y siempre me demostró su amor en cada momento con sus abrazos, mimos y en especial siempre dándome los mejores consejos.

A mis hermanas por estar ahí siempre apoyándome en todo lo que puedan, a mis sobrinos que son el motor en mi vida. También agradezco a Alexandra Paredes quien fue y es la persona que me inspira y me apoya cada día a alcanzar nuevas metas, este logro también es tuyo.

Finalmente agradezco a mis compañeros, amigos y docentes que me impartían sus conocimientos y apoyo, lo que me ayudo a alcanzar esta gran meta.

Franklin Mora

DEDICATORIA

La familia es lo más preciado de la vida, es por ello que dedico de todo corazón mi trabajo de grado a toda mi familia, quienes han sido una parte fundamental para el desarrollo de mi formación académica, y sus consejos me ha dado la fortaleza en mis momentos de angustia, para no desfallecer y poder culminar esta etapa formativa.

Klever Quituizaca

DEDICATORIA

A Dios, mis padres, hermanas y especialmente a mi amada novia,
mi motor, mi vida entera, este logro es de todos ustedes.

Franklin Mora

TEMA: ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

Autores: Mora Reinozo Franklin Vinicio

Quituzaca Tigre Klever Ismael

RESUMEN

La transformación de la energía es uno de los aspectos más importantes dentro de un sistema eléctrico de potencia, donde el transformador cumple una función esencial, por lo que se debe proteger al transformador ante los eventos que puedan afectar su integridad. La ferresonancia ocasiona perturbaciones dentro del sistema eléctrico, que provocan variaciones de voltaje causando problemas de calidad y seguridad. Este trabajo analiza el fenómeno de Ferresonancia en Transformadores de Potencia, para el desarrollo del estudio presentado, se utilizó el método de investigación analítico y sintético, que se basa en la investigación literaria, recopilando información de distintos autores, y permiten conocer a profundidad los principios teóricos, causas y efectos característicos del fenómeno de ferresonancia. Se consideran tres herramientas de simulación para el análisis de fenómenos transitorios ampliamente utilizados en el área eléctrica, como son: ATPDraw, PSCAD y Simulink, donde se pretende comprobar la respuesta de los transformadores frente al fenómeno de ferresonancia, determinando que la conmutación de las fases que alimentan al transformador es una condición clave para la formación de ferresonancia, también se determina la influencia del valor de capacitancia y la conexión del devanado primario del transformador, donde el valor de la capacitancia es determinante en la magnitud de la sobretensión resultante.

Palabras clave: Ferresonancia, transformador, saturación, sobretensión.

THEME: " ANALYSIS OF THE FERRORESONANCE PHENOMENON IN POWER TRANSFORMERS."

Authors: Mora Reinozo Franklin Vinicio

Quituzaca Tigre Klever Ismael

ABSTRACT

Energy transformation is one of the most critical aspects of an electrical power system. The transformer performs an essential function, so the transformer must be protected from events that may affect its integrity. The Ferroresonance causes disturbances within the electrical system, causing voltage variations causing quality and safety problems. This work analyzes the phenomenon of Ferroresonance in Power Transformers. It uses analytical and synthetic research, with literary research, collecting information from different authors and allowing to know in-depth the theoretical principles, causes, and effects characteristic of the phenomenon of ferroresonance. Three simulation tools analyze transient phenomena widely used in the electrical area, such as ATPDraw, PSCAD, and Simulink. These tools aimed to check transformers' response to the ferroresonance phenomenon, determining that switching the phases that feed the transformer is a necessary condition for ferroresonance formation. This influence of the capacitance value and the connection of the transformer's primary winding is also determined. The value of capacitance is decisive in the magnitude of the resulting overvoltage.

Keywords: Ferroresonance, transformer, saturation, overvoltage.



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por los señores Egresados de la Carrera de **INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS: MORA REINOZO FRANKLIN VINICIO y QUITUZACA TIGRE KLEVER ISMAEL**, cuyo título versa **“ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA”**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, marzo del 2021

Atentamente,

Lic. Mayra Clemencia Noroña Heredia Mg.
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 0501955470

1803027935 Firmado
digitalmente por
VICTOR HUGO ROMERO GARCIA
1803027935
VICTOR HUGO ROMERO GARCIA
Fecha: 2021-03-05 09:42:25 -05'00'

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA.....	vii
DEDICATORIA.....	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN.....	3
2.1. EL PROBLEMA	3
2.1.1. Situación Problemática	3
2.1.2. Formulación del problema.....	3
2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	4
2.3. BENEFICIARIOS	4
2.4. JUSTIFICACIÓN	4
2.5. HIPÓTESIS	5
2.6. OBJETIVOS	5
2.6.1. General.....	5
2.6.2. Específicos.....	5
2.7. SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS...6	
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
3.1. ANTECEDENTES	7
3.2. SOBRETENSIONES EN SISTEMAS DE POTENCIA.....	8
3.2.1. Sobretensión permanente (Frecuencia industrial)	9
3.2.2. Sobretensión temporal	9
3.2.3. Sobretensión de frente lento	10
3.2.4. Sobretensión de frente rápido	10

3.2.5.	Sobretensión de frente muy rápido.....	10
3.2.5.1.	Sobretensiones por maniobra	11
3.2.5.2.	Sobrevoltajes atmosféricos	11
3.3.	FENÓMENOS FERRORESONANTES.....	12
3.3.1.	Resonancia.....	12
3.3.1.1.	Resonancia serie	13
3.3.1.2.	Resonancia en paralelo	14
3.3.2.	Ferroresonancia	15
3.3.2.1.	Ferroresonancia serie	16
3.3.2.2.	Ferroresonancia paralelo.....	18
3.3.3.	Ferroresonancia por variación de los parámetros	19
3.3.3.1.	Ferroresonancia por variación de la capacitancia.....	19
3.3.3.2.	Ferroresonancia por variación de la fuente de alimentación	19
3.3.3.3.	Ferroresonancia por variación de frecuencias	20
3.3.4.	Diferencia entre resonancia y ferresonancia	21
3.4.	CLASIFICACIÓN DE RÉGIMEN FERRORESONANTE	21
3.4.1.	Régimen fundamental.....	22
3.4.2.	Régimen subarmónico	22
3.4.3.	Régimen casi-periódico	23
3.4.4.	Régimen caótico	23
3.4.5.	Armónicos	23
3.4.6.	Subarmónicos e interarmónicos.....	24
3.4.7.	Configuraciones susceptibles de sufrir ferresonancia	25
3.4.8.	Evitar o minimizar la ferresonancia	26
3.5.	EL TRANSFORMADOR	28
3.5.1.	Constitución del transformador	28
3.5.1.1.	Núcleo.....	28
3.5.1.2.	Devanados	29
3.5.2.	Principio de funcionamiento de un transformador ideal	30
3.5.3.	Funcionamiento de un transformador real.....	32
3.5.4.	Circuito equivalente del transformador	32

3.5.4.1.	F.e.m.s. y tensiones.....	33
3.5.4.2.	Corrientes	33
3.5.4.3.	Impedancias	34
3.5.5.	El transformador trifásico	37
3.5.6.	Circuitos equivalentes del transformador trifásico	37
3.5.7.	Conexiones de los transformadores trifásicos	38
3.5.8.	Transformador trifásico de 3 devanados	40
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
4.1.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN UTILIZADA.....	43
4.2.	PROCEDIMIENTO APLICABLE PARA EL ANÁLISIS.....	43
4.2.1.	Caso 1: Transformador de 3 devanados con una fase abierta(Y/y/d).....	44
4.2.2.	Caso 2: Transformador de 3 devanados con dos fases abiertas(Y/y/d).....	44
4.2.3.	Caso 3: Transformador de 3 devanados con una fase abierta (Yg/y/d).....	45
4.3.	INSTRUMENTOS	45
4.3.1.	ATPDraw.....	45
4.3.2.	PSCAD	46
4.3.3.	Simulink	46
4.4.	COMPONENTES DEL SISTEMA.....	46
4.4.1.	Fuente de tensión	46
4.4.2.	Líneas de transmisión	47
4.4.3.	Banco de capacitores	52
4.4.4.	El transformador	52
4.5.	PARÁMETROS DE SATURACIÓN	52
4.5.1.	Determinación de parámetros del transformador para PSCAD.....	58
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	61
5.1.	ANÁLISIS DEL CASO 1	61
5.1.1.	Resultados en el software ATPDraw (una fase abierta – Y/y/d).....	62
5.1.2.	Resultados en el software PSCAD (una fase abierta – Y/y/d)	63
5.1.3.	Resultados en el software Simulink (una fase abierta – Y/y/d).....	65

5.2.	ANÁLISIS DEL CASO 2	66
5.2.1.	Resultados en el software ATPDraw (dos fases abiertas– Y/y/d).....	67
5.2.2.	Resultados en el software PSCAD (dos fases abiertas– Y/y/d).....	68
5.2.3.	Resultados en el software Simulink (dos fases abiertas – Y/y/d).....	70
5.3.	ANÁLISIS DEL CASO 3	71
5.3.1.	Resultados en el software ATPDraw (una fase abierta – Yg/y/d).....	72
5.3.2.	Resultados en el software PSCAD (una fase abierta – Yg/y/d)	74
5.3.3.	Resultados en el software Simulink (una fase abierta – Yg/y/d).....	75
5.4.	ANÁLISIS DE ARMÓNICO DEL SISTEMA FERRORESONANTE.	77
5.4.1.	CASO 1: Sistema con una fase abierta (S1), banco de capacitores de 1 <i>uf</i>	77
5.4.2.	CASO 2: Sistema con dos fases abiertas (S1, S3), banco de capacitores de 0.1 <i>uf</i> . 78	
5.4.3.	CASO 3: Sistema con una fase abierta (S1), banco de capacitores de 1 <i>uf</i> , con el devanado primario del transformador aterrizado.....	80
5.5.	ANÁLISIS DE MITIGACIÓN DE FERRORESONANCIA.	81
5.5.1.	Erradicación de maniobras monopolares (reconexión del sistema)	81
5.5.2.	Conexión del devanado primario transformador a tierra.....	82
5.5.3.	Operación del transformador con carga.....	83
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
6.1.	CONCLUSIONES.....	85
6.2.	RECOMENDACIONES.	86
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	87
8.	ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Descarga atmosférica [13].	12
Figura 3.2. Flameo inverso [13].	12
Figura 3.3. Circuito RLC resonante serie.	14
Figura 3.4. Circuito RLC resonante paralelo.	15
Figura 3.5. Configuración de un sistema ferroresonante [14].	16
Figura 3.6. Circuito ferroresonante serie [14].	17
Figura 3.7. Análisis gráfico de la aparición de ferroresonancia [14].	17
Figura 3.8. Circuito ferroresonante paralelo [14].	19
Figura 3.9. Circuito ferro-resonante con dos puntos de operación [20].	19
Figura 3.10. Circuito ferroresonante con variación en el voltaje [20].	20
Figura 3.11. Ferroresonancia por variación de la frecuencia [20].	20
Figura 3.12. Ferroresonancia en régimen fundamental [21].	22
Figura 3.13. Ferroresonancia en régimen subarmónico [21].	22
Figura 3.14. Ferroresonancia en régimen casi-periódico [21].	23
Figura 3.15. Ferroresonancia en régimen caótico [21].	23
Figura 3.16. Frecuencia fundamental más tercera armónica.	24
Figura 3.17. Sistemas desequilibrados con riesgo de ferroresonancia [21].	27
Figura 3.18. Tipos de núcleos [26].	29
Figura 3.19. Devanados concéntricos y alternados [26].	30
Figura 3.20. Transformador monofásico con núcleo real [26].	30
Figura 3.21. Transformador real considerando la resistencia y dispersión del flujo [26].	32
Figura 3.22. Circuito equivalente del transformador real reducido al primario [26].	33
Figura 3.23. Circuito equivalente del transformador real reducido al primario [26].	35
Figura 3.24. Circuito equivalente exacto reducido al primario [26].	35
Figura 3.25. Circuito equivalente exacto reducido al secundario [26].	35
Figura 3.26. Circuito equivalente aproximado reducido al primario completo [26].	36
Figura 3.27. Circuito equivalente aproximado reducido al primario completo [26].	37
Figura 3.28. Circuito magnético de un transformador trifásico [28].	38
Figura 3.29. El diagrama equivalente del transformador de tres devanados [29].	40
Figura 3.30. El circuito equivalente del transformador de tres devanados [29].	40
Figura 4.1. Esquema general del sistema.	43

Figura 4.2. Sistema del caso 1 (Interruptor abierto, Fase A).....	44
Figura 4.3. Sistema del caso 2 (Interruptores abiertos, Fase A y C)	44
Figura 4.4. Sistema del caso 3 (Interruptor abierto, Fase A).....	45
Figura 4.5. Fuentes de tensión en A.C.	47
Figura 4.6. Torre de transmisión de 500 kV, con dimensiones en metros [30].....	47
Figura 4.7. Línea LCC <i>template</i>	48
Figura 4.8. Línea de transmisión en PSCAD.	49
Figura 4.9. Línea con parámetros distribuidos.	49
Figura 4.10. Configuración del haz de conductores de la línea de 500 kV.....	50
Figura 4.11. Banco de capacitores.....	52
Figura 4.12. Transformador trifásico de tres devanados.	52
Figura 4.13. Curva de saturación del Transformador El Inga	55
Figura 5.1. Diagrama implementado en ATPDraw para el Caso 1.....	61
Figura 5.2. Resultados de ATPDraw - Caso 1	62
Figura 5.3. Resultados de PSCAD - Caso 1	64
Figura 5.4. Resultados de Simulink - Caso 1	65
Figura 5.5. Diagrama implementado en ATPDraw para el Caso 2.....	67
Figura 5.6. Resultados de ATPDraw - Caso 2	68
Figura 5.7. Resultados de PSCAD - Caso 2	69
Figura 5.8. Resultados de Simulink - Caso 2	70
Figura 5.9. Diagrama implementado en ATPDraw para el Caso 3	72
Figura 5.10. Resultados de ATPDraw - Caso 3	73
Figura 5.11. Resultados de PSCAD - Caso 3	74
Figura 5.12. Resultados de Simulink - Caso 3	76
Figura 5.13. Armónicos presentes para condiciones del Caso 1.....	78
Figura 5.14. Armónicos presentes en la fase C para condiciones del caso 2.	79
Figura 5.15. Armónicos presentes en la fase C para condiciones del caso 3.	81
Figura 5.16. Reconexión del sistema (Caso 1), capacitancia de 1 μF	81
Figura 5.17. Reconexión del sistema (Caso 2), capacitancia de 0,1 μF	82
Figura 5.18. Transformador aterrizado (Caso 1), capacitancia de 1 μF	82
Figura 5.19. Transformador aterrizado (Caso 2), capacitancia de 0,1 μF	83
Figura 5.20. Transformador con carga (Caso 1), capacitancia de 1 μF	83

Figura 5.21. Transformador con carga(Caso 2), capacitancia de $0,1 \mu F$ 84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Estudios transitorios según el rango de frecuencias [10].	9
Tabla 3.2. Rango de frecuencias para algunos fenómenos transitorios [10].	10
Tabla 3.3. Tipos de conexión en los devanados.	39
Tabla 4.1. Parámetros generales de la L/T 500 kV San Rafael – El Inga 500kV [31].	48
Tabla 4.2. Especificaciones técnicas del conductor ACAR 1100 [32].	48
Tabla 4.3. Especificaciones técnicas del conductor KCM 3/8” [32].	49
Tabla 4.4. Especificaciones técnicas del conductor OPGW (<i>Optical Ground Wire</i>) [32].	49
Tabla 4.5. Parámetros del transformador - El Inga [32].	53
Tabla 4.6. Prueba de corto circuito transformador monofásico El Inga [32].	53
Tabla 4.7. Prueba de Vacío del transformador monofásico El Inga [32].	54
Tabla 4.8. Puntos de la curva de saturación del Transformador El Inga [32].	54
Tabla 4.9. Reactancias de dispersión de los devanados del transformador de El Inga.	57
Tabla 4.10. Inductancias de los devanados del transformador de El Inga.	57
Tabla 4.11. Parámetros calculados para el Transformador en ATPDraw y Simulink.	58
Tabla 4.12. Parámetros en delta calculados para el Transformador en PSCAD	60
Tabla 5.1. Errores presentados entre los distintos simuladores – Caso 1.	66
Tabla 5.2. Errores presentados entre los distintos simuladores – Caso 2.	71
Tabla 5.3. Errores presentados entre los distintos simuladores – Caso 3.	76

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título:

“Análisis del fenómeno de ferresonancia en transformadores de potencia.”

Fecha de inicio:

Octubre – 2020

Fecha de finalización:

Marzo – 2021

Lugar de ejecución:

Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Parroquia Eloy Alfaro, Barrio El Ejido

Facultad que auspicia:

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicia:

Ingeniería Eléctrica.

Proyecto de investigación vinculado:

Estudios de campos electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia: Caso, provincia de Cotopaxi.

Equipo de trabajo:

Tutor del Proyecto de Investigación

Nombre: Ing. MSc. Wilian Patricio Guamán Cuenca

Cédula de ciudadanía: 060357895-6

Domicilio: Riobamba

Numero de celular: 0960561262

E-mail: wilian.guaman8956@utc.edu.ec

Estudiante:

Nombre: Mora Reinozo Franklin Vinicio

Cédula de ciudadanía: 050447552-6

Domicilio: Salcedo - Cotopaxi

Numero de celular: 0995625058

E-mail: franklin.mora5526@utc.edu.ec

Estudiante:

Nombre: Quituzaca Tigre Klever Ismael.

Cédula de ciudadanía: 140098153-4

Domicilio: Macas – Morona Santiago

Numero de celular: 0998470972

E-mail: klever.quituizaca1534@utc.edu.ec

Área de Conocimiento:

Ingeniería, industria y construcción

Línea de investigación:

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Explotación y diseño de sistemas eléctricos de potencia.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. EL PROBLEMA

2.1.1. Situación Problemática

La transformación de la energía para el transporte y distribución de la misma, es uno de los aspectos más importantes dentro de un sistema eléctrico de potencia, donde uno de los elementos con mayor relevancia es el transformador, encargado de adaptar los diferentes niveles de tensión que requiere el sistema, por lo que se debe tener especial cuidado a los eventos que pueden afectar su integridad.

La ferresonancia es un término general que se aplica a varias interacciones entre los condensadores y los inductores, que pueden causar altas sobretensiones y provocar fallas en el transformador, la ferresonancia en los sistemas de energía modernos puede involucrar grandes transformadores de subestaciones, transformadores de distribución o transformadores de instrumentos.

El análisis de los fenómenos ferresonantes en los transformadores de potencia es de vital importancia, ya que, se originan debido a cambios inesperados en la configuración de un sistema energizado, los cuales generalmente provocan una variación del voltaje a unas magnitudes elevadas, que pueden ocasionar daños y ser peligrosos para los transformadores.

Los principales problemas ocasionados por la ferresonancia en los transformadores es la distorsión de las ondas de corriente y voltaje, en consecuencia, esto lleva consigo un gran contenido de armónicos, que afectan directamente a los equipos conectados al sistema. Otra consecuencia de este fenómeno es el sobrecalentamiento del núcleo del transformador provocado por la pérdida de calor debido al efecto Joule, lo que conlleva un acortamiento de la vida útil del equipo.

2.1.2. Formulación del problema

El análisis del fenómeno de ferresonancia mediante software, permite determinar el efecto producido por la asociación de la inductancia no lineal de transformadores de potencia y elementos potencialmente capacitivos.

2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

El presente proyecto investiga el análisis del fenómeno de ferresonancia en los transformadores de potencia, por otra parte, de acuerdo a la Nomenclatura Internacional de la UNESCO que define los códigos para los campos de Ciencia y Tecnología se define para este proyecto los siguientes: 330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnologías Eléctricas / 330602 Aplicaciones Eléctricas.

2.3. BENEFICIARIOS

El propósito de este proyecto de investigación es beneficiar a estudiantes y profesionales del campo de la investigación en ingeniería eléctrica, como también al sector energético responsable de la operación y mantenimiento de los transformadores de potencia.

2.4. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación forma parte del proyecto generativo denominado “Estudio de campos electromagnéticos en los sistemas eléctricos de potencia, caso provincia de Cotopaxi”, enmarcado en el segundo objetivo, que está enfocado en el diseño, simulación y elaboración de proyectos destinados al estudio de sistemas eléctricos de potencia, cumpliendo así con los parámetros establecidos por la institución.

Por otra parte, el análisis de las condiciones de operación de los transformadores en los sistemas de potencia se utiliza como indicador básico y fundamental para el estudio de problemas relacionados con la integridad del sistema. Por lo tanto, la confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia depende de la correcta operación de los equipos que lo conforman, ya que, se pueden presentar varios acontecimientos que pueden conducir a la aparición de los fenómenos de ferresonancia, las sobretensiones asociadas a dicho fenómeno pueden generar un deterioro en los equipos y disminuir los índices de confiabilidad afectando la calidad y continuidad del servicio.

Para lo cual se efectúa una investigación enmarcada en la operación en condiciones de estrés del equipo ocasionado por fenómenos ferresonantes, con los cuales pueden estar sometidos a mayores riesgos de inestabilidad e incertidumbres. Este fenómeno puede ocasionar diversos problemas, que se derivan de los picos de tensión que aparecen en fragmentos de segundos, pero que provocan grandes daños.

Este estudio se efectúa con el fin de realizar la tarea de análisis y simulación de los diferentes comportamientos que puede tener un transformador ante este fenómeno, sin necesidad de recurrir a uno real, se pretenden utilizar herramientas de simulación que permiten analizar y resolver problemas complejos en los sistemas eléctricos, siendo la opción simulada más viable económica y técnicamente [1] [2].

2.5. HIPÓTESIS

Al simular transformadores de potencia utilizando software especializado se podrá determinar el comportamiento de estos ante el fenómeno de ferresonancia.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. General

Analizar el fenómeno de Ferresonancia en Transformadores de Potencia, mediante simulación en Software, para determinar el comportamiento del mismo ante dicho fenómeno.

2.6.2. Específicos

- Determinar el estado del arte de las perturbaciones en los transformadores de potencia producidos por el fenómeno de ferresonancia.
- Simular sistemas ferresonantes utilizando software especializado (ATPDraw, PSCAD, Simulink).
- Evaluar el comportamiento de transformadores de potencia, frente al fenómeno de ferresonancia.

2.7. SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Objetivos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
<p>Recopilar información mediante investigaciones bibliográficas, referentes a la ferresonancia en transformadores de potencia.</p>	<p>Indagación de los fundamentos requeridos para el análisis de los fenómenos de ferresonancia en transformadores de potencia y sus efectos asociados.</p>	<p>Base de datos para el diseño del sistema de potencia. Configuraciones susceptibles para ferresonancia. Modelos equivalentes de fuentes de tensión, líneas de transmisión, transformadores de potencia.</p>	<p>Fuentes Literarias:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Libros. • Tesis. • Artículos. • Cuaderno Técnico N° 190 Schneider. • Manuales de usuario de los simuladores empleados.
<p>Simular sistemas ferresonantes utilizando software especializados.</p>	<p>Cálculo de los parámetros de líneas de transmisión. Determinación de los parámetros del transformador Implementación de los componentes fundamentales para recrear el fenómeno de ferresonancia</p>	<p>Diseño de un sistema de potencia con configuraciones propensas a presentar ferresonancia, a partir de 3 valores capacitivos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ATPDraw • PSCAD • SIMULINK
<p>Evaluar el comportamiento de transformadores de potencia, frente al fenómeno de ferresonancia.</p>	<p>Evaluación del comportamiento del sistema planteado en distintos escenarios.</p>	<p>Graficas del comportamiento de sobretensiones. Tablas de errores obtenidos de los diferentes simuladores.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hojas de cálculo de Microsoft Excel • Mediciones de sobretensión. • Tablas comparativas. • Análisis gráfico.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

La ferresonancia es un término bien establecido entre los ingenieros de sistemas de potencia, esto se debe a que desde la creación del primer transformador se ha producido este fenómeno, el primer trabajo sobre este tema fue realizado por Joseph Bethenod en 1907, quien describió el fenómeno de ferresonancia simplemente como resonancia de transformador [3]. Más tarde en, 1920, el ingeniero francés Paul Boucherot utilizó por primera vez este término, para especificar el fenómeno de dos puntos de operación de frecuencia fundamental estables, que se encuentran en un circuito en serie que contiene una resistencia, un inductor no lineal y un condensador [4].

Pero no fue hasta la década de 1930 cuando hubo interés en estudiarlo. Desde entonces, la ferresonancia se ha convertido en uno de los fenómenos de interés investigativo en el campo de la ingeniería eléctrica, ya que hoy en día, los sistemas ferresonantes aun producen efectos catastróficos en los equipos que constituyen los sistemas eléctricos.

En el área de los sistemas eléctricos de potencia, se han realizado estudios respecto a la ferresonancia, asociadas mayormente con líneas de transmisión. En vista de que existen apertura o cierre por maniobra, por lo cual existen fallas permanentes, temporales y atmosféricas en las líneas de transmisión, simultáneamente conexión y desconexión de carga mediante interruptores. Se analizan los intervalos de tiempo que van desde un lapso de tiempo muy cortos e incluso pueden llegar a un estado permanente, lo que provoca la aparición de transitorios electromagnéticos.

Años después de los estudios mencionados anteriormente, en el año 2014, en la facultad de ingeniería eléctrica de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba se estudió los fenómenos transitorios en circuitos eléctricos de primer orden para ocasionar la sustitución del empleo de interruptores en la ejecución de las prácticas, lo que produjo ventajas relacionadas con la supresión del ruido que estos dispositivos transmitían en las señales [5].

En el año 2015 un grupo de ingenieros electromecánicos y eléctricos pertenecientes a distintos países de América Latina, llevaron a cabo un estudio de simulación numérica, donde se analizó en transformadores de tensión inductivos para uso metrológico, el análisis de ferresonancia. Posteriormente, se establece los valores de la fuente de tensión y capacitancia que produce

ferroresonancia, para ello, se hizo uso de los datos del transformador real. Por otro lado, se verifico que tanto la tensión del origen, como el interruptor con capacitancia paralela utilizados para la energización del transformador tienen dominio en la visión del fenómeno de ferroresonancia.

En el año 2016 se realizó una investigación de parte del ingeniero peruano Wilber Aragonéz, donde analizó la aplicación de la electrónica en la mitigación de la ferroresonancia en transformadores de tensión. Descubriendo que la introducción de los dispositivos electrónicos en el mercado para la mitigación de ferroresonancia es muy beneficioso, debido a que no se requiere una ingeniería muy complicada para su selección; solamente comprender la tensión secundaria residual [6].

En nuestro país en el año 2015 un grupo de estudiantes de la Universidad Politécnica del Ecuador, estudiaron sobre los transitorios electromagnéticos debido a la energización de un transformador de potencia, determinando que el análisis de los picos de corrientes en el instante de la energización de un transformador, accederá a la correcta calibración de protecciones, no obstante, el tiempo que tendrá lugar será pequeño hasta conseguir nuevamente el valor nominal [7].

Recientemente en nuestro país se ha realizado estudios importantes relacionados con la ferroresonancia, un estudio realizado por el ingeniero Andrés Guevara en el año 2018, sobre la estimación de parámetros eléctricos transitorios de un transformador trifásico, concluyendo que los programas matemáticos, son muy útiles en el momento de poner en funcionamiento modelos y resolución de ecuaciones, en dicho estudio sirvió para la solución de ecuaciones no lineales, como también para conseguir la función de transferencia para un transformador de 50 kVA [8].

A continuación, se revisan los fundamentos asociados al estado del arte, referente al fenómeno de ferroresonancia en los transformadores del sistema de potencia, donde se muestran los detalles a interpretar dentro de esta investigación:

3.2. SOBRETENSIONES EN SISTEMAS DE POTENCIA

La sobretensión se refiere al aumento repentino (brusco) de la tensión, este valor es mucho más elevado que el valor nominal, y se produce entre distintas condiciones. Las sobretensiones de origen transitorio suelen ser provocadas usualmente por fallas en el sistema, maniobras o descargas atmosféricas, aunque se pueden dar por muchas más razones [9].

Actualmente, mediante el uso de computadoras se puede estimar la sobretensión en el sistema. Hay varias razones para usar la tecnología digital para el cálculo de sobretensión: el sistema de energía real es enorme y complejo, el modelo matemático utilizado para calcular los transitorios electromagnéticos es muy confiable, si se utilizan el modelo y los parámetros de sobretensión, el cálculo digital puede ser muy exacto.

De la variedad de fenómenos transitorios que ocurren en el transformador se modela uno correspondiente a cada rango de frecuencia de las que se presentan en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Estudios transitorios según el rango de frecuencias [10].

	Estudio Transitorio	Rango de frecuencias
1	Baja frecuencia	0 Hz – 2kHz
2	Estudios de media frecuencia	2 kHz – 250 kHz
3	Fenómenos de alta frecuencia	250 kHz – 50 MHz

Si bien existen varias formas de clasificar las sobretensiones, una primera clasificación se puede realizar según su origen: interno (maniobra de conmutación) o externo (rayos) del sistema de alimentación. Para realizar una clasificación más completa se considera las principales características de la sobretensión: rango de frecuencia, duración, tamaño y forma de la tensión máxima. Según la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), los tipos que se deben considerar son los siguientes [11]:

3.2.1. Sobretensión permanente (Frecuencia industrial)

Son tensiones generadas en condiciones normales de trabajo, por lo que su frecuencia es igual o cercana a la frecuencia de funcionamiento del sistema, la tensión en estas condiciones cambiará con el tiempo y puede ser diferente de un punto a otro en el sistema [12].

3.2.2. Sobretensión temporal

Este tipo de sobretensión presenta pequeñas variaciones de frecuencia-potencia con un tiempo de caída relativamente largo (desde unos pocos milisegundos hasta unos pocos segundos). Estas son caracterizadas por su forma de onda, amplitud y duración, estos parámetros pueden cambiar, mientras dure la sobretensión. Suelen ser causados por fallas, condiciones de

resonancia, no lineales (ferroresonancia), supresión de carga o una combinación de estos factores [11].

3.2.3. Sobretensión de frente lento

Son sobretensiones transitorias altamente amortiguadas de relativamente corta duración (que va desde unos breves milisegundos a unos pocos ciclos). Pueden ser oscilatorias o unidireccionales, y su rango de frecuencia va de 2 a 20 kHz. Por lo general, son causados por fallas, operaciones de maniobra, energización y recierres de líneas [11].

3.2.4. Sobretensión de frente rápido

Es una sobretensión transitoria de muy corta duración (menor a un milisegundo). Están muy amortiguados y generalmente son unidireccionales. Pueden ser causados por operaciones de conmutación, descargas atmosféricas o fallas [11].

3.2.5. Sobretensión de frente muy rápido

Son sobretensiones transitorias de muy corta duración (menor a un milisegundo). Pueden ser oscilatorias o unidireccionales, y su rango de frecuencia puede variar de 100 kHz a 50 MHz. Los orígenes más frecuentes de estas sobretensiones son las fallas, operación de los seccionadores y las operaciones de conmutación en subestaciones con aislamiento de gas (GIS) [11].

Tabla 3.2. Rango de frecuencias para algunos fenómenos transitorios [10].

Origen		Rango de Frecuencias
1	Ferro-resonancia en transformadores	0,1Hz-1KHz
2	Cambio Instantáneo de carga	0,1Hz- 3kHz
3	Energización de líneas	50Hz- 20kHz
4	Recierre de líneas	50Hz- 20kHz
5	Fallas en líneas	50Hz- 20kHz
6	Tensión transitoria de recuperación	50Hz- 20kHz
7	Arco secundario en interruptores	10kHz- 1MHz
8	Descargas atmosféricas	10kHz- 3MHz

La **Tabla 3.2**, muestra una clasificación generalizada acorde al rango de frecuencias donde ocurre el tipo de fenómeno transitorio [10]. Dentro de la clasificación mencionada anteriormente se detalla las principales causas:

3.2.5.1. Sobretensiones por maniobra

Este tipo de sobretensiones ocurren cuando se conectan o se desconectan los equipos del sistema, esto generalmente ocurre en las subestaciones por medio de conexiones cortas, se producirá una rápida sobretensión de conmutación de entrada. La sobretensión pico máxima depende del tipo y comportamiento del dispositivo de maniobra. Dado que el valor máximo de sobretensión en la clase I, suele ser menor que el pico causado por un rayo, su importancia es poco relevante, pero las sobretensiones causadas en la clase II toman mayor importancia [12].

3.2.5.2. Sobrevoltajes atmosféricos

La sobretensión de origen atmosférico (truenos y relámpagos) es provocada por la actividad eléctrica natural en la atmósfera, que se manifiesta en una descarga, esta descarga afectará las instalaciones directamente expuestas a la red eléctrica y las cercanas a lugares [9].

La sobretensión atmosférica inducida, generalmente conduce a una sobretensión en la línea aérea inferior a 400 kV, y esto representa un peligro para sistemas con menor voltaje. Debido a la alta resistencia de aislamiento, el flameo inverso de clase II es menor que el de clase I, y tienen menos probabilidades de ocurrir en sistemas de 500 kV y más [12].

El impacto de los rayos y las sobretensiones resultantes de los mismos dependen de la ubicación en donde impacte el rayo con relación a la red. Esto da lugar, a la ocurrencia de los siguientes eventos:

a. Descarga directa e indirecta

La descarga directa ocurre cuando un rayo impacta el conductor de fase directamente, debido a una falla del apantallamiento en la línea. Dando lugar a que dos ondas viajeras de sobretensión se propaguen en direcciones opuestas desde el punto de incidencia del rayo, este tipo de incidencia genera una alta sobretensión [13].

En cambio, la descarga indirecta surge cuando se impactan el suelo cerca de la línea e induce sobretensión en la misma. Las tensiones inducidas alcanzan valores de alrededor de 500 kV, por lo que solo son significativas en sistemas en los que el nivel de aislamiento es menor que

la tensión inducida. Por lo tanto, para sistemas con una tensión superior a 69 kV, no se considera la tensión inducida.

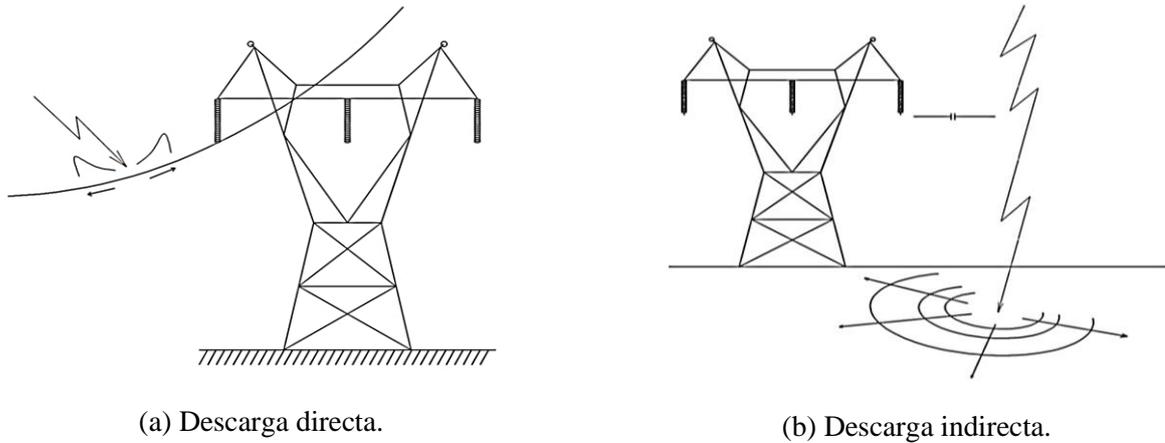


Figura 3.1. Descarga atmosférica [13].

b. Flameo inverso

Este evento tiene lugar cuando la descarga atmosférica cae sobre el cable de guarda o la torre de transmisión, y la diferencia de potencial entre la estructura y el conductor de fase supera el nivel de aislamiento de la cadena de aisladores.

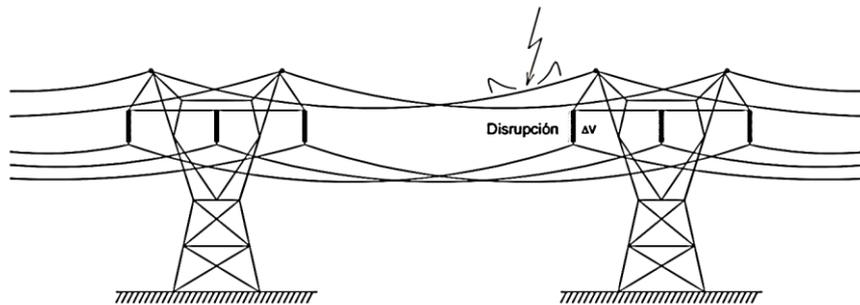


Figura 3.2. Flameo inverso [13].

3.3. FENÓMENOS FERRORESONANTES

3.3.1. Resonancia

Cuando se presenta en un circuito eléctrico una configuración de condensadores e inductores que tienen reactancia capacitiva e inductiva respectivamente, y en estas condiciones, en el circuito se presenta una frecuencia para la cual estas reactancias son iguales, en este caso se puede producir intercambios periódicos de energía, que puede mantenerse o no a lo largo del tiempo, a este fenómeno particular se denomina resonancia [14].

En un circuito resonante, la reactancia capacitiva e inductiva del circuito son iguales entre sí. Si se toma en cuenta que la resistencia del sistema es la única que se opone a la corriente, y esta tiene un valor despreciable, pueden provocar sobretensiones y sobrecorrientes indeseables a la frecuencia de resonancia. El funcionamiento del efecto de resonancia presenta normalmente un estado estable, y se puede reducir controlando la frecuencia del sistema o introduciendo una resistencia pura en el mismo [15].

Para abordar de mejor manera este fenómeno a continuación se describen las configuraciones que se pueden presentar:

3.3.1.1. Resonancia serie

Dado un circuito serie R, L, C, como el que se presenta en la **Figura 3.3**, la impedancia resultante se presenta como:

$$Z = R + j\omega L - \frac{1}{j\omega C} \quad (3.1)$$

Se debe tener en cuenta que $1 / \omega C$ es dominante para bajas frecuencias, por otra parte, para frecuencias elevadas ωL es predominante, por lo que el circuito será inductivo. Si en el circuito se presenta una frecuencia tal que $j\omega L = 1/j\omega C$, la impedancia se reduce a R, lo que significa que cuando se aplica el voltaje E, la corriente alcanza un valor muy alto ($I = E/R$), por lo tanto, se está hablando de resonancia en serie a una frecuencia angular de resonancia cuando:

$$j\omega L = \frac{1}{j\omega C} \quad (3.2)$$

Donde ω es igual a:

$$\omega = 2\pi f \quad (3.3)$$

Remplazando la ecuación (3.2) en la ecuación (3.3) se obtiene:

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3.4)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.5)$$

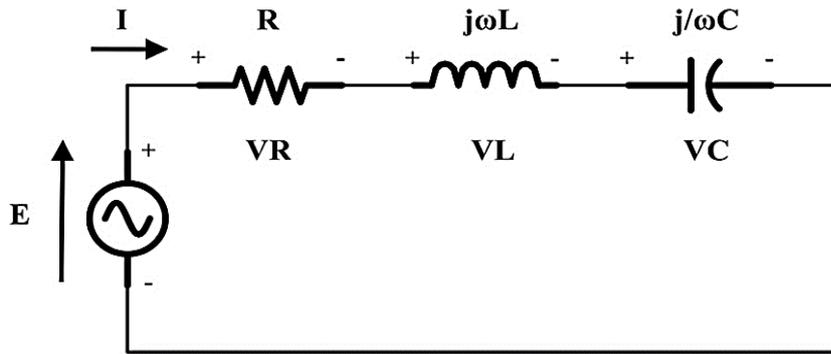


Figura 3.3. Circuito RLC resonante serie.

Para calcular los voltajes basta con multiplicar la reactancia inductiva y capacitiva por la corriente del sistema puesto a que todos los componentes están en serie.

$$V_R = IR \quad (3.6)$$

$$V_L = (j\omega L)I = (X_L)I \quad (3.7)$$

$$V_C = \left(\frac{1}{j\omega C}\right)I = (-X_C)I \quad (3.8)$$

La ecuación de voltaje de este circuito se puede escribir de la siguiente manera:

$$E = V_R + V_L + V_C = I(R + X_L - X_C) \quad (3.9)$$

Despejando la corriente se obtiene:

$$I = \frac{E}{R + X_L - X_C} \quad (3.10)$$

3.3.1.2. Resonancia en paralelo

Para una combinación en paralelo de R, L, C, como en la **Figura 3.4**, la admitancia se presenta con la siguiente expresión:

$$Y = \frac{1}{R} + j\omega C - \frac{j}{\omega L} \quad (3.11)$$

Si se aplica un voltaje E, la corriente que fluye a través del inductor disminuira con la frecuencia y la corriente que fluye a través del condensador aumentara con la frecuencia. Si en el circuito se presenta una frecuencia tal que $j\omega L = j/\omega C$, la admitancia disminuye a $1/R$ (la impedancia aumenta a R). Esto significa que, si se aplica un cierto voltaje E, el valor de la corriente sera mínimo.

En cambio, si se inyecta una corriente total I determinada, la tensión aplicada a los elementos alcanza un valor elevado. Por otro lado, si se inyecta una determinada corriente total I , la tensión aplicada al elemento alcanza un valor elevado. Se refiere a una resonancia paralela, cuando la frecuencia angular resonante presenta las siguientes condiciones:

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.12)$$

Para bajas frecuencias, la impedancia neta del circuito será inductiva, porque dominará la influencia de ωL , por el contrario, para altas frecuencias la inductancia será capacitiva.

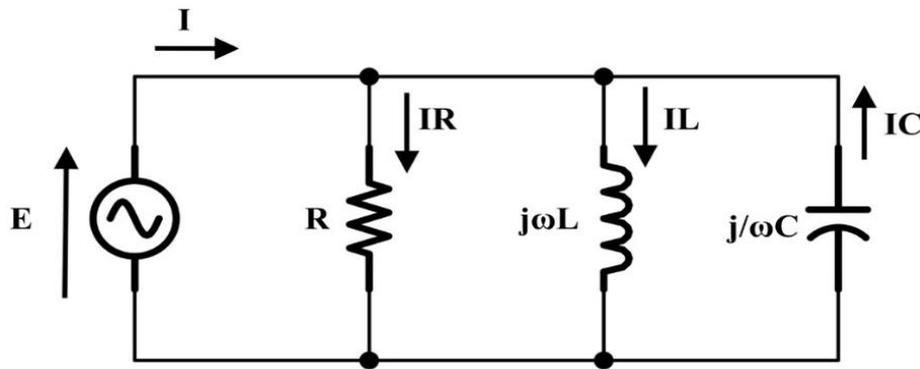


Figura 3.4. Circuito RLC resonante paralelo.

3.3.2. Ferroresonancia

La ferroresonancia es un fenómeno no lineal, típico de las conexiones serie LC y se denomina ferroresonancia, porque los inductores implicados tienen un núcleo ferromagnético. Este se origina en redes eléctricas con transformadores y reactores saturables, generalmente produce sobretensiones transitorias o permanentes, lo cual es peligroso para los equipos eléctricos e incluso para el personal relacionado con el equipo.

El fenómeno de ferroresonancia generalmente aparece después de una perturbación transitoria (sobretensión transitoria, sobretensión por rayo o falla temporal) u operación de conmutación (activación del transformador o eliminación de fallas). Se caracteriza por sobretensiones y sobrecorrientes elevadas, así como niveles de distorsión continua de las formas de onda de corriente y tensión, lo que tiene como resultado consecuencias extremadamente peligrosas [15], [16].

Las condiciones necesarias para que aparezca este fenómeno en el circuito eléctrico son, la presencia de inductancias no lineales, capacitancias, fuentes de tensión y pérdidas débiles.

Cuando se cumplen estas condiciones, el circuito puede entrar en un estado ferresonante o permanecer en un régimen no ferresonante. Que esté en un estado u otro depende de las condiciones iniciales del sistema [1], [17].

En la mayoría de las situaciones, la ferresonancia es una resonancia en serie que implica una inductancia no lineal y una capacitancia. Para entender mejor este fenómeno, se analiza la resonancia de un circuito LC serie lineal.

En un sistema eléctrico los inductores no lineales suelen estar compuestos por transformadores de potencia, transformadores de tensión inductivos, reactancias en derivación, etc. Por su parte las capacitancias están compuestas por cables subterráneos, líneas de transmisión largas, condensadores de voltaje, entre otros. Este fenómeno ocurre cuando la amortiguación no es óptima y la red tiende a asumir una configuración propicia a la presencia de ferresonancia. En un SEP, la inductancia suele estar compuesta por la capacitancia que aparece en la red en serie con la inductancia magnetizante del transformador de potencia [18] , [19].

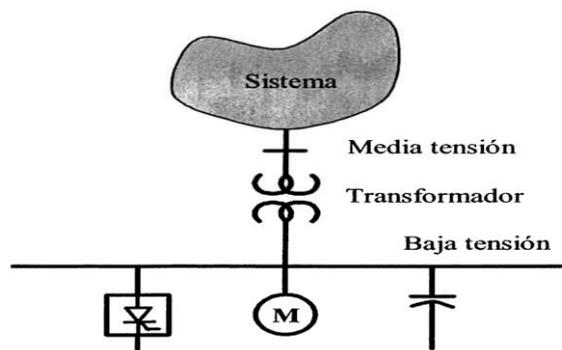


Figura 3.5. Configuración de un sistema ferresonante [14].

Dentro de los sistemas se puede presentar el fenómeno de ferresonancia en las siguientes configuraciones:

3.3.2.1. Ferresonancia serie

Al igual que en un sistema resonante serie, la ferresonancia serie presenta una configuración de una inductancia no lineal y una capacitancia serie como se muestra en la **Figura 3.6**. En este caso, un ligero aumento de voltaje (transitorios causados por cortocircuito a tierra, operaciones de conmutación, conexión o desconexión de equipos, rayos, etc.) es suficiente para reducir en gran medida la reactancia. Como resultado, es posible igualar las reactancias, lo que da como

resultado una resonancia en serie. A medida que ocurre la resonancia, la corriente aumentará y el transformador se saturará aún más, manteniendo la resonancia [14].

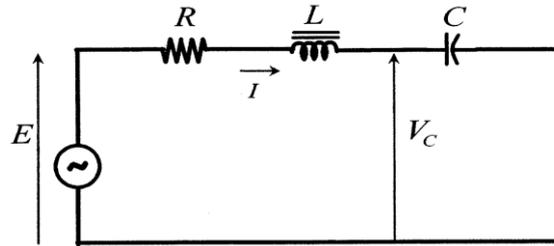
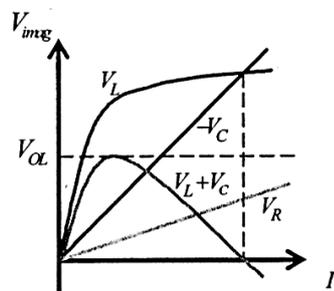


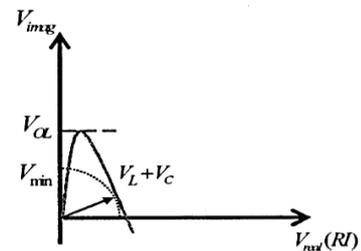
Figura 3.6. Circuito ferroresonante serie [14].

El análisis numérico es complicado debido a que, el material magnético funciona según una curva de histéresis, lo que hace que se desconozca la situación real inicial, de manera que no siempre tienen la misma respuesta al mismo estímulo. Por lo tanto, suele haber un cierto rango de frecuencias de resonancia, la cual se producirá bajo determinados parámetros del sistema.

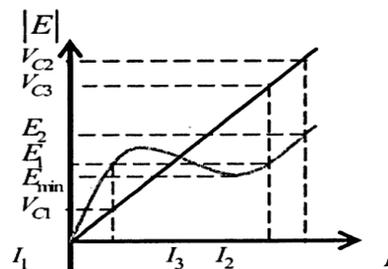
El análisis del circuito en serie de la **Figura 3.7** se lo realiza en forma simplificada, en la **Figura 3.7 (a)**, en la que se muestran las tensiones en la inductancia y el capacitor, así como su suma, en función de la corriente. En la **Figura 3.7 (b)** se muestra su combinación con la tensión en la resistencia.



(a) Tensiones en la inductancia y el capacitor



(b) Combinación con la tensión en la resistencia



(c) Magnitud de tensión

Figura 3.7. Análisis gráfico de la aparición de ferroresonancia [14].

Finalmente, en la **Figura 3.7 (c)** se muestra la magnitud de la tensión E aplicada a este circuito $E = V_R + j(V_L + V_C)$, en función de la corriente que por él circula. Nótese que la tensión aplicada E debe disminuir una vez que V , entra en la zona de saturación, debido a que V_C crece más rápido que V_L . La tensión E llega a su mínimo cuando $V_C = V_L$, es decir, cuando se opera en resonancia. Para corrientes más altas, E vuelve a crecer, debido a que V_C sigue creciendo.

Las consecuencias de la aparición de ferresonancia son, elevadas sobretensiones, tanto entre fases como de una fase a tierra, alcanzan valores hasta del orden de 4,5 p.u. también elevadas sobrecorrientes permanentes, alto contenido de armónicas y, como resultado, calentamiento del transformador, incremento del ruido, daños en equipos vecinos y falsas operaciones de las protecciones.

Las condiciones que llevan a la aparición de ferresonancia son transformadores de potencia o de medida fabricados con materiales fuertemente saturables, la existencia de capacitores cercanos (bancos de condensadores, transformadores de medida capacitivos, cables subterráneos, etcétera), una baja resistencia amortiguadora (carga del sistema) y la existencia de al menos un punto o situación de operación en que haya un lugar cuyo potencial no está fijo.

Una vez detectada una ferresonancia, existen pocas herramientas para combatirla, siendo la más usada conectar resistencias que amortigüen el fenómeno, aceptando pérdidas permanentes adicionales. Otra solución es modificar las características del circuito, a manera de evitar este fenómeno.

3.3.2.2. Ferresonancia paralelo

La combinación en paralelo de capacitores e inductancias saturables ocurre también en los sistemas de potencia de manera que es posible que se presenten casos de ferresonancia paralelo.

La aplicación de tensiones constantes a tales circuitos no acarrea problemas, mientras la fuente de alimentación esté conectada a tierra. Pero si no lo está, las tensiones entre fases seguirán fijas, mientras que las tensiones fase-tierra quedan libres, el neutro puede desplazarse y aparecer sobretensiones fase-tierra peligrosas. Una situación típica es la de la **Figura 3.8**, en la que dos circuitos idénticos (inductancia saturable en paralelo con un capacitor) son alimentados por una fuente levantada de tierra.

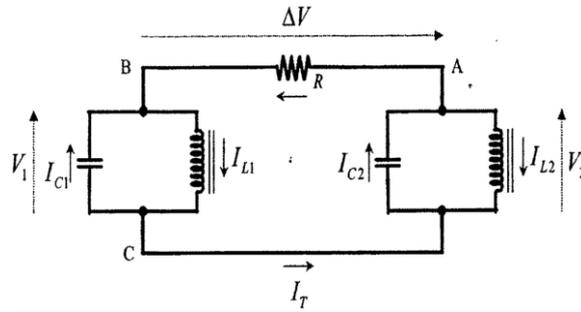


Figura 3.8. Circuito ferroresonante paralelo [14].

3.3.3. Ferroresonancia por variación de los parámetros

Como ya se habló anteriormente la ferroresonancia puede producirse debido a varias razones, a continuación, se analiza las principales circunstancias en las que se puede producir:

3.3.3.1. Ferroresonancia por variación de la capacitancia

Para que se forme el fenómeno de ferroresonancia producido por el cambio de valor capacitivo, se debe considerar que todos los parámetros del circuito tienen que ser constantes [20].

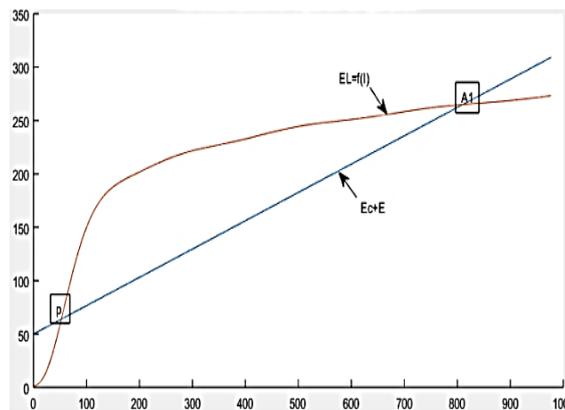


Figura 3.9. Circuito ferro-resonante con dos puntos de operación [20].

El rápido aumento de la intensidad, provoca un aumento de voltaje en los conectores del capacitor, y ya que esta actúa en igual sentido que el voltaje de la fuente, este efecto incrementa el voltaje en el punto del segmento no lineal, lo cual, causa el aumento súbito de la tensión del inductor, provocando una fuerza electromotriz, que es inversa al sentido de la corriente y a su vez mayor a la generada por el capacitor [20].

3.3.3.2. Ferroresonancia por variación de la fuente de alimentación

El fenómeno de ferroresonancia se puede obtener mediante la variación de la fuente de alimentación, por medio de un rango capacitivo dado en los parámetros de configuración, ya

que, produce varios puntos de corte en la pendiente capacitiva para los diversos valores de la fuente de una alimentación. El aumento de voltajes cambia el comportamiento del circuito provocando el cambio de un estado inductivo a uno capacitivo, el cual, no puede revertirse cuando el voltaje disminuye [20].

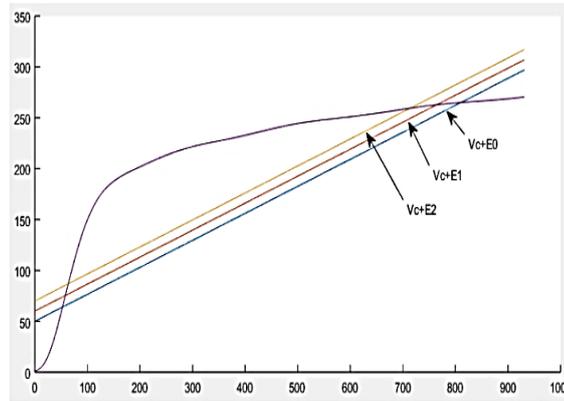


Figura 3.10. Circuito ferresonante con variación en el voltaje [20].

3.3.3.3. Ferresonancia por variación de frecuencias

Si se varía la frecuencia se cambia los valores del circuito, debido a que, las reactancias inductiva y capacitiva están controladas por el mismo factor, la inductancia tiene una relación $X_L = wL$ y $X_C = 1/W_C$, donde $w = 2\pi f$, se deduce que la función del inductor permanece casi igual en la mayoría de las frecuencias asignadas, y en cambio por la variación de frecuencias, la capacitancia en los puntos de operación se tiene una variación de pendientes [20].

Esto da a conocer que con frecuencias inestables en función del tiempo esta incrementan la posibilidad del fenómeno de ferresonancia y la duración de sus transitorios [20].

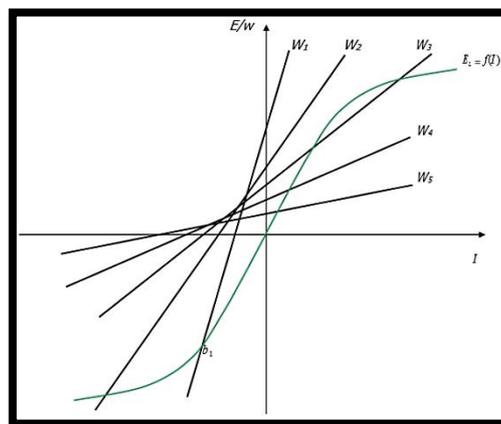


Figura 3.11. Ferresonancia por variación de la frecuencia [20].

3.3.4. Diferencia entre resonancia y ferresonancia

Como se observó anteriormente la resonancia se presenta en circuitos RLC y, como todos los fenómenos lineales, no es sensible al estado inicial del sistema, debido a esto para que se presente este fenómeno, la frecuencia debe ser forzada por un elemento externo, logrando que las reactancias inductiva y capacitiva se igualen. También se puede lograr al variar el valor de la capacitancia o la inductancia.

En lo que respecta a la ferresonancia, es un fenómeno más complicado que también se presenta en circuitos con condensadores, inductores y resistencias. La diferencia aquí es que al menos uno de los inductores del circuito no es lineal. Cuando el flujo magnético que pasa a través del inductor no lineal es suficiente para provocar que el inductor se sature, se produce la ferresonancia. Esta presenta varios estados estables, uno de los cuales es el estado en condiciones lineales (la forma de onda o la frecuencia no cambia), y los otros estados tienen cambios de amplitud debido a factores externos. La forma de onda y la frecuencia de oscilación del sistema, este último presenta condiciones potencialmente dañinas para el sistema.

Además, la ferresonancia es muy sensible al estado inicial del sistema, que es un comportamiento típico de los sistemas no lineales.

3.4. CLASIFICACIÓN DE RÉGIMEN FERRORESONANTE

En muchas soluciones de sistemas de potencia, puede haber más de un estado de ferresonancia, y la operación puede entrar y salir del modo de ferresonancia de acuerdo con los parámetros del sistema y el modelo del núcleo del transformador. Dado que es difícil distinguir el transitorio normal del transitorio de ferresonancia, el tipo de ferresonancia puede detectarse por el espectro de frecuencia de las señales de corriente y voltaje o por la imagen estroboscópica obtenida midiendo la corriente y el voltaje en determinado tramo del sistema. Y también de manera gráfica en el plano v, i corresponde al valor instantáneo del momento separado por el período de la red [21], [2].

El análisis de estas diferentes señales permite clasificar las señales observadas en 4 tipos distintos para el estado estacionario. A continuación, se detallan las características de cada una de ellas:

3.4.1. Régimen fundamental

El voltaje y la corriente son periódicos, el período T es igual al período de la red y puede contener más o menos armónicos. El espectro de frecuencia de la señal es un espectro discontinuo formado por el f_0 básico de la red y sus armónicos ($2f_0, 3f_0 \dots$). La imagen estroboscópica se reduce a un punto alejado del representado por el estado normal [21].

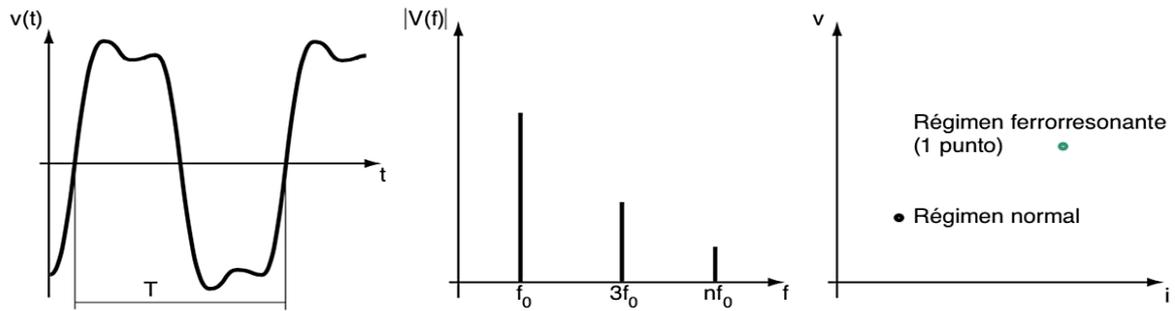


Figura 3.12. Ferroresonancia en régimen fundamental [21].

3.4.2. Régimen subarmónico

Este tipo de régimen aparece a menudo en circuitos ferroresonantes. La señal es periódica y su período es nT es múltiplo del período de la red. Este estado se llama subarmónico n o armónico $1/n$. El periodo subarmónico en régimen ferroresonante suele ser de nivel impar. La frecuencia básica del espectro viene definida como f_0/n (donde f_0 simboliza la frecuencia de la red y n es un número entero) y sus armónicos (este espectro tiene como parte a la frecuencia fundamental f_0). El seguimiento estroboscópico hace que aparezcan n puntos [21].

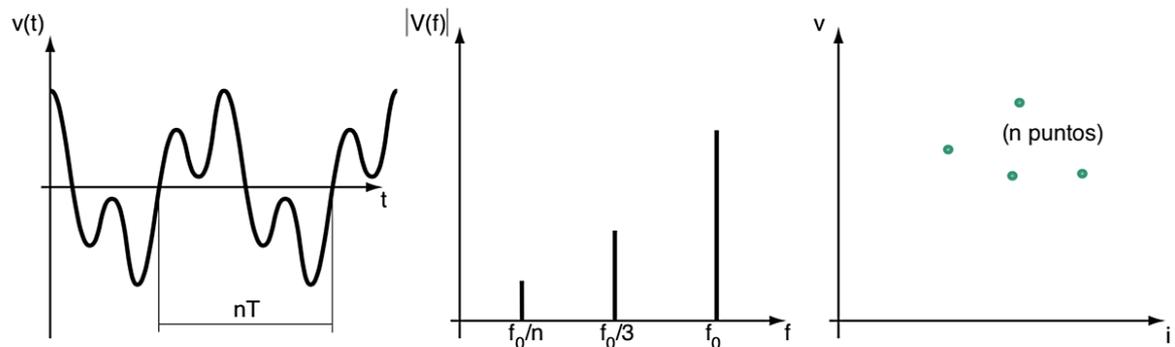


Figura 3.13. Ferroresonancia en régimen subarmónico [21].

3.4.3. Régimen casi-periódico

También llamado régimen pseudoperiódico, no cuenta con una señal periódica. El espectro es un espectro rayado, donde la frecuencia se expresa de la siguiente forma: $f_r = nf_1 + mf_2$ (donde n y m son valores enteros y f_1 / f_2 un número real no fraccionario). En la imagen estroboscópica se visualiza una curva cerrada [21].

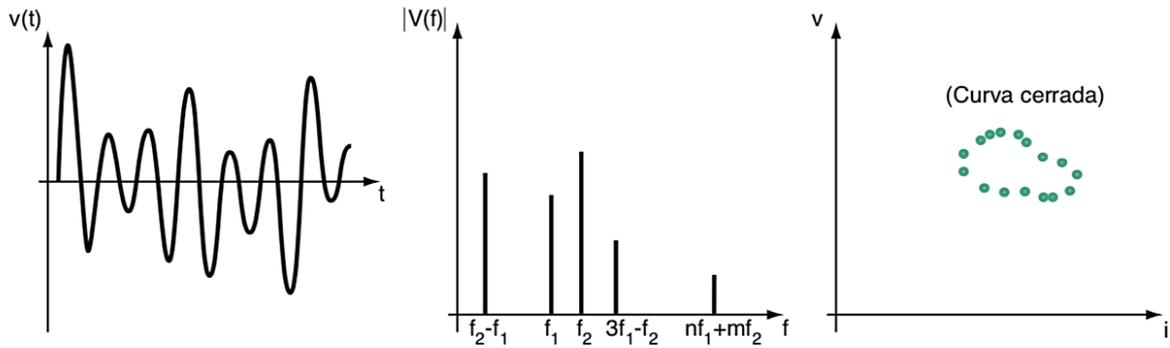


Figura 3.14. Ferroresonancia en régimen casi-periódico [21].

3.4.4. Régimen caótico

También de nominado régimen irregular, el espectro de frecuencia correspondiente se presenta de manera constante, de este modo, no se cancela para ninguna frecuencia. La imagen estroboscópica se compone de diferentes puntos, todos los cuales ocupan una superficie en el plano v, lo que se denomina "atracción rara" [21].

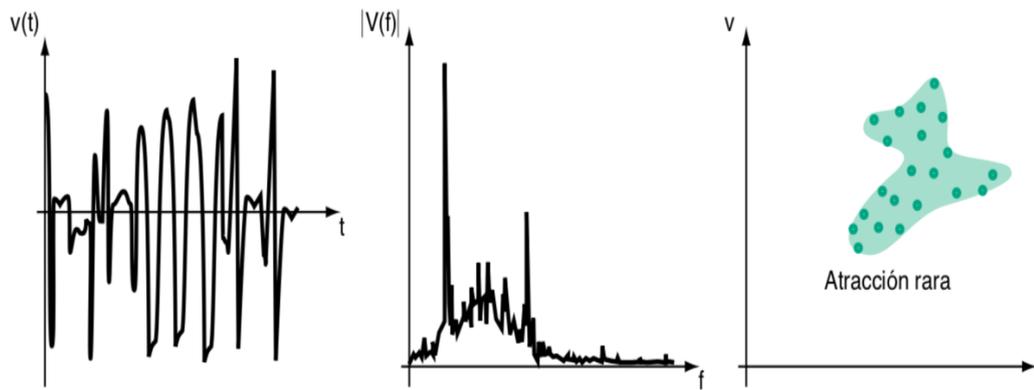


Figura 3.15. Ferroresonancia en régimen caótico [21].

3.4.5. Armónicos

Generalmente, el voltaje y la corriente en el circuito de potencia no son ondas sinusoidales puras. El voltaje de línea casi siempre tiene una forma de onda satisfactoria, pero la corriente a

veces puede parecer muy distorsionada. La deformación puede ser causada por saturación magnética en el núcleo del transformador, acción de conmutación de tiristores o cualquier otra carga no lineal. La onda distorsionada consta de una componente fundamental y uno o más armónicos [22].

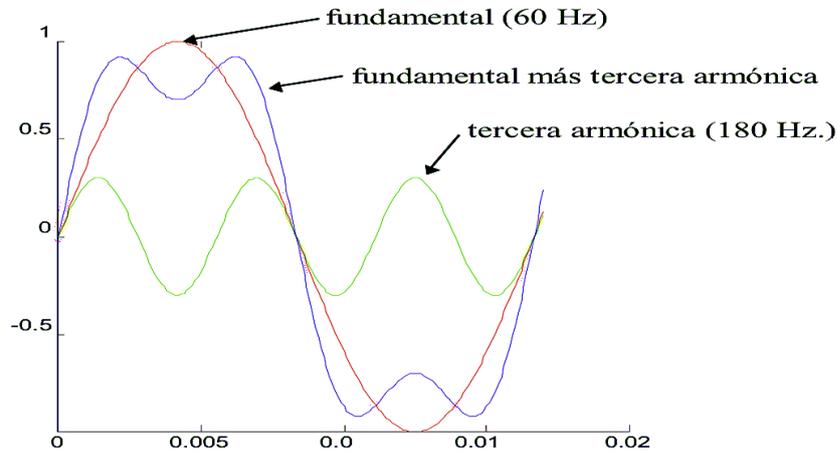


Figura 3.16. Frecuencia fundamental más tercera armónica.

Las formas de onda periódicas no sinusoidales se pueden representar mediante series de Fourier. Cada término de la serie de Fourier se denomina componente armónico de la forma de onda distorsionada. La frecuencia de los armónicos es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Los armónicos pares e impares de una función no sinusoidal corresponden a sus números pares (por ejemplo, 2, 4, 6, 8 ...) e impares (por ejemplo, 3, 5, 7, 9 ...) de las series de Fourier. Los armónicos de orden 1 y 0 se asignan respectivamente a la frecuencia fundamental y al componente de CC de la forma de onda [22].

3.4.6. Subarmónicos e interarmónicos.

La frecuencia del subarmónico es menor que la frecuencia fundamental. Es muy raro que se presenten subarmónicos en los sistemas de energía. Sin embargo, debido a varias razones, los interarmónicos y subarmónicos se generan en la corriente de entrada. La resonancia entre la corriente o voltaje armónico y la capacitancia e inductancia (serie) del sistema de potencia causará subarmónicos, lo que se denomina resonancia subsincrónica. Estas señales pueden generarse cuando el sistema tiene una inductancia alta o cuando el sistema de suministro de energía contiene un banco de condensadores de gran capacidad para la corrección o filtrado del factor de potencia [22].

Por otro lado, la suma de dos o más ondas sinusoidales diferentes amplitudes, donde la frecuencia de cada una no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental no necesariamente resulta en una forma de onda periódica. Este múltiplo no entero de la frecuencia fundamental se conoce comúnmente como frecuencia interarmónica, es decir, $f_{ih} = h_i f_0$ donde h_i es un número no entero mayor que la unidad. Así, en términos prácticos, las frecuencias interarmónicas son frecuencias entre dos frecuencias armónicas adyacentes [23].

3.4.7. Configuraciones susceptibles de sufrir ferroresonancia

Los sistemas eléctricos de potencia pueden presentar innumerable cantidad de configuraciones susceptibles de sufrir la ferroresonancia, que es difícil de identificar, ya que los indicios que suelen aparecer cuando este se produce, también se pueden presentar otros casos. Si hay datos registrados disponibles, estos se pueden comparar con formas de onda típicas de (fundamental, subarmónica, casi-periódica y caótica). Si no tiene estos datos, se debe observar la configuración del sistema cuando aparezcan los síntomas, y tener en cuenta los eventos previos a estos síntomas, que pueden provocar fenómenos ferroresonantes, pero gracias a la experiencia se puede enumerar los casos en los que es más probable que ocurra este fenómeno.

Basándose en las características generales de la ferroresonancia se pueden afirmar algunos criterios básicos para la aparición de ferroresonancia [19], [24]:

- Presencia de capacitancia en serie con la inductancia magnetizante del núcleo del transformador.
- Transformador ligeramente cargado o en vacío (generalmente por debajo de 10 - 20% de la carga nominal).
- Procedimientos de conmutación de un solo polo o dispositivos de interrupción en un sistema.
- Componentes del sistema con poca carga.

Transformadores de cualquier tipo pueden estar involucrados. Algunos casos obvios son:

- Transformadores de potencia monofásicos y transformadores de voltaje energizados a través de una capacitancia en serie,
- Transformadores de distribución trifásicos sujetos a conmutación o interrupción de un solo polo.

- Reactores de derivación con núcleos saturables.

Las capacitancias involucradas pueden ser en forma de bancos de capacitores reales, o como acoplamiento capacitivo. A continuación, se muestran algunos ejemplos en los que puede producirse ferresonancia.

- Condensador de serie para compensación de línea.
- Bancos de condensadores de derivación.
- Cables subterráneos.
- Acoplamiento capacitivo, capacidades de acoplamiento entre líneas de doble circuito.
- Acoplamiento capacitivo interno en transformadores.

Los síntomas más frecuentes que se manifiesta con la ferresonancia son [24]:

- Grandes sobre tensiones permanentes en modo diferencial (de fase a fase) y en modo común (de fase a tierra).
- Grandes sobre tensiones permanentes en modo común. Sobre corrientes permanentes.
- Grandes distorsiones permanentes en las formas de onda de tensiones y corrientes.
- Desplazamiento del punto neutro de tensión.
- Calentamiento del transformador (en operación sin carga).
- Ruido continuo, fuerte y excesivo en transformadores y reactancias.
- Equipo eléctrico dañado debido a efectos térmicos de la ruptura de aislamientos.
- Un síntoma característico de transformadores destruidos por ferresonancia es el destrozado del bobinado primario con el secundario intacto.

3.4.8. Evitar o minimizar la ferresonancia

La ferresonancia no puede ser controlada, sin embargo, sus efectos se pueden mitigar cambiando las configuraciones del sistema, para lo cual existen medidas prácticas que permiten minimizar su impacto, cuyas sobretensiones, sobrecorrientes y distorsiones de onda son muy peligrosas por el hecho que generan valores que oscilan entre 2 a 5 p.u, provocando esfuerzos térmicos o dieléctricos los cuales son peligrosos para los materiales eléctricos [21] [25]:

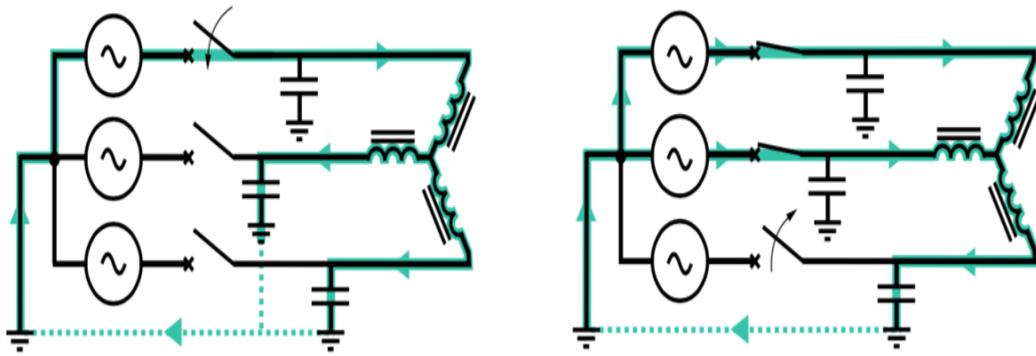


Figura 3.17. Sistemas desequilibrados con riesgo de ferroresonancia [21].

Para evitar que los transformadores entren en ferroresonancia por la conmutación de una o dos fases alimentadas como se muestra en la figura anterior, las medidas más prácticas para solucionarlo son las que se listan a continuación [21]:

- Para un transformador alimentado por una red con presencia de capacitancia, la mejor solución es evitar una configuración de riesgo, es decir, que el consumo de la potencia activa sea inferior al 10% de la potencia nominal del transformador. Este riesgo es importante durante los períodos de baja carga (horas base).
- La ferroresonancia generalmente se puede amortiguar con una cantidad relativamente pequeña de carga resistiva.
- Prohibir las labores bajo tensión en un conjunto de cable-transformador cuando la longitud del cable exceda una longitud crítica establecida.
- Conectar a tierra el punto neutro del centro de transformación a través de una resistencia
- Conectar a tierra el punto neutro del transformador directamente (permanente o solo en el momento de la conexión y desconexión en momentos de maniobra), cuando el devanado primario del transformador tiene una configuración en estrella (neutro accesible).
- Se deben evitar las maniobras monofásicas cuando el transformador se encuentre en vacío, como también la utilización de protecciones con fusibles, que realicen una desconexión unipolar. Una medida razonable y acertada para mitigar el fenómeno de ferroresonancia sería utilizar dispositivos de conmutación trifásicos donde el sistema tenga una alta probabilidad de se forme este fenómeno [23].

3.5. EL TRANSFORMADOR

El transformador de potencia es uno de los elementos más importantes del sistema eléctrico de potencia, porque es responsable de conectar el sistema de generación con el sistema de transmisión de energía, también se lo utiliza para vincular sistemas con diferentes niveles de voltaje. Una definición clásica del transformador sería como la que se muestra a continuación:

El transformador es una máquina estática capaz de transformar un valor de corriente y voltaje a otro valor distinto según sus características constructivas [26].

Todo transformador está constituido por tres partes principales (parte activa, parte pasiva y accesorios) [27]:

- **Parte activa:** esta parte está formada por los circuitos, los cuales son las principales responsables del proceso en la transformación, y está conformada principalmente por el núcleo y los arrollamientos.
- **Parte pasiva:** En esta parte se contiene la parte activa. El tanque de almacenamiento debe ser hermético, capaz de soportar el vacío absoluto sin deformarse, así como proteger el transformador en aspectos eléctricos y mecánicos, su constitución debe ser robusta para su transporte, montaje y desmontaje, soportar enfriadores, bombas de aceite, ventiladores y accesorios especiales.
- **Accesorios:** Los accesorios del transformador son un conjunto de piezas y equipos que facilitan su funcionamiento y simplifican las tareas de mantenimiento.

3.5.1. Constitución del transformador

El presente análisis se centra en la parte activa del transformador, debido a que, en esta se producen los efectos de transformación eléctrica.

3.5.1.1. Núcleo

Es el sistema que conforma el circuito magnético, y está constituido por láminas de acero al silicio, laminadas en frío (grano orientado), estas láminas de acero al silicio son sometidas a un tratamiento químico especial, y están recubiertas con una muy fina capa aislante (0.01 mm), que disminuye en gran medida las pérdidas en el hierro [26].

Este circuito magnético está compuesto por columnas, en las cuales los devanados se enrollan y la culata es donde establece la unión entre columnas. El espacio entre el cilindro a través del

cual pasa el devanado y la culata se denomina ventana del núcleo. Según la ubicación del devanado y el núcleo de hierro, el transformador se clasifica como acorazados, donde el devanado está rodeado principalmente por el núcleo magnético, como se muestra en la **Figura 3.18 (a)** y por su parte el de columnas, los devanados rodean casi por completo el núcleo **Figura 3.18 (b)**.

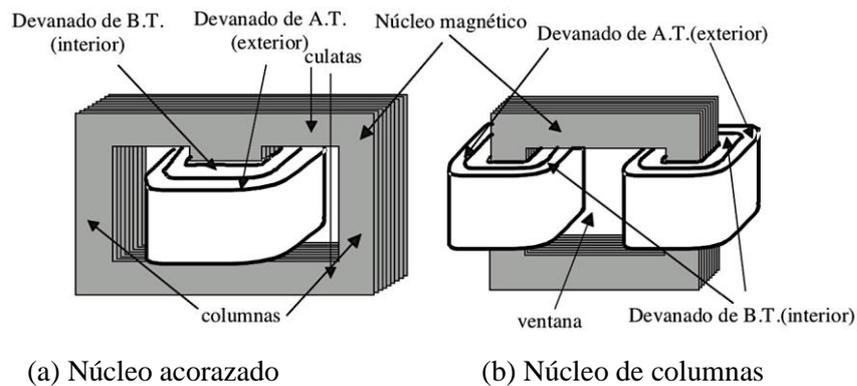


Figura 3.18. Tipos de núcleos [26].

3.5.1.2. Devanados

Estas conforman el circuito eléctrico, comúnmente están conformadas de espiras de alambre de cobre recubierto con material aislante. Consta de dos bobinas, primaria y secundaria. La relación de espiras de cobre entre el devanado primario y el secundario indicará la relación de transformación. Los nombres de primario y secundario tienen un significado simbólico: por definición, donde se aplica el voltaje de entrada, será el primario, y donde se obtenga el voltaje de salida, será el secundario [26].

Según sea la disposición relativa entre los arrollamientos de alta tensión (AT) y baja tensión (BT), los devanados pueden ser concéntricos o alternados, los mismos que tienen la forma de un cilindro coaxial mostrado en la **Figura 3.19 (a)**; en general, debido a que los devanados de baja tensión (BT) son más fáciles de aislar que los devanados de alta tensión (AT), se inserta un cilindro aislante fabricado en cartón o papel baquelizado entre los dos bobinados.

En el devanado alternado como se observa en la **Figura 3.19 (b)**, el devanado se subdivide en varias partes o "galletas" de modo que AT y BT aparezcan alternativamente a lo largo de la columna. Para reducir el flujo dispersivo, generalmente se coloca una media bobina en cada extremo. Por razones obvias de aislamiento, la bobina es un bobinado de B.T.

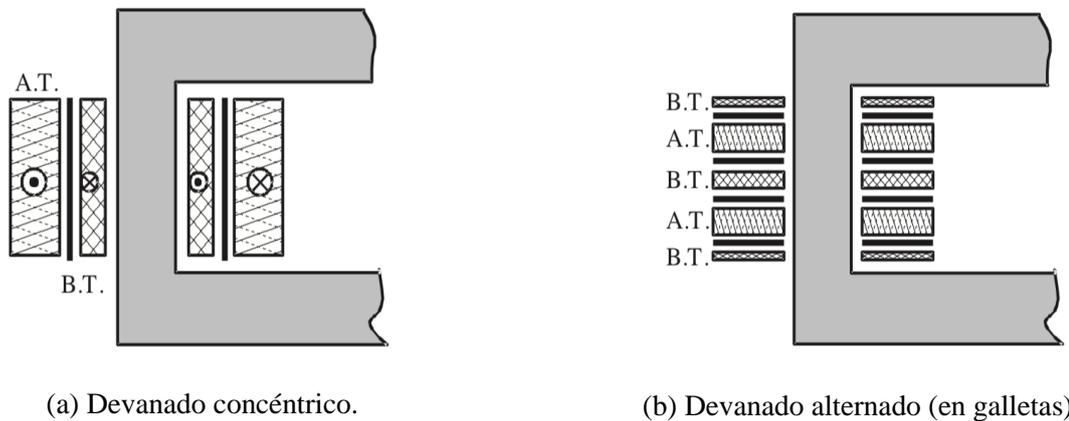


Figura 3.19. Devanados concéntricos y alternados [26].

3.5.2. Principio de funcionamiento de un transformador ideal

Para el análisis se considera un transformador monofásico como el de la **Figura 3.20**, que consiste en un núcleo magnético real con permeabilidad finita, la pérdida del núcleo de hierro (P_{Fe}), y el número de vueltas de los devanados primario (N_1) y secundario (N_2). Suponiendo que el transformador está alimentado por un devanado de mayor voltaje, es decir, que funcionará como un transformador reductor.

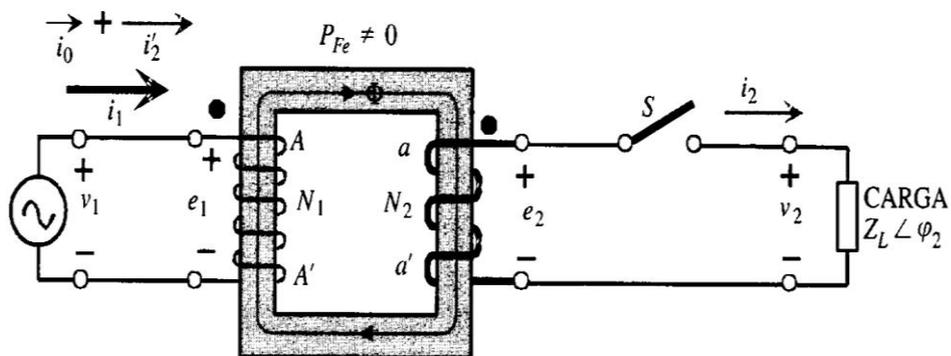


Figura 3.20. Transformador monofásico con núcleo real [26].

Con el fin de entender de mejor manera su funcionamiento, se va a suponer que no existen defectos en la máquina, se supone que inicialmente se cumplen las siguientes condiciones ideales [26]:

- Se puede ignorar la resistencia óhmica de los devanados primario y secundario, Esto significa que no hay pérdida debido al efecto Joule ni caída de voltaje. La resistencia del transformador en los sistemas reales es muy pequeña, pero no llegan ser nulas.

- No hay flujo magnético perdido (dispersión), lo que significa que todo el flujo magnético está dentro del núcleo y conecta los devanados primario y secundario. En un transformador real, solo una pequeña parte del flujo magnético pasa por el núcleo, el flujo de fuga del devanado se disipa a través del aire.

Si se aplica una tensión alterna (V) a la bobina primaria, la corriente alterna circulará en la bobina primaria, que a su vez generará un flujo magnético alterno en el núcleo, cuya dirección estará determinada por la ley de Ampere aplicada a este devanado. En la **Figura 3.21**, la dirección positiva de la corriente y el flujo magnético muestra el momento definido por la polaridad del voltaje aplicado. Debido al cambio periódico del caudal, f.e.m.s. inducidos en los devanados, según la ley de Faraday, responderán a la siguiente ecuación:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} ; e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.13)$$

En la teoría de circuitos con acoplamiento magnético, los terminales de aquellas bobinas que tienen la misma polaridad instantánea suelen estar marcados con un punto como se muestra en la **Figura 3.21**. También se ha aplicado al esquema la recomendación de la CEI (Comité Electrotécnico Internacional) la cual propone que se deben utilizar las letras mayúsculas del lado primario (AT) para especificar terminales de la misma polaridad. Las letras minúsculas del secundario (BT), de manera que los terminales positivos (A - a) y la negativa es (A' - a'), para los transformadores trifásicos (se utilizan las letras B y C para las otras dos fases); en la **Figura 3.21**, se puede verificar estas recomendaciones de puntos y letras [26].

Una vez establecido la f.e.m.s. y la corriente en el transformador, es interesante comprender la relación entre voltaje, flujo y f.e.m.s. Dado que el bobinado es ideal, se deben usar la segunda teoría de Kirchoff para los circuitos primario y secundario de la **Figura 3.21**, la cual se presenta en la siguiente ecuación:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (3.14)$$

Donde la relación de transformación está representada por (m), donde para un transformador ideal, la relación de voltaje (V) coincide con el número de vueltas del conductor (N).

3.5.3. Funcionamiento de un transformador real

Una vez comprendido el principio de funcionamiento de un transformador ideal, en donde los devanados no tienen resistencia ni flujo de dispersión. Ahora en los transformadores reales, ambas cualidades deben considerarse, debido a que, la resistencia es evidente en los devanados compuestos de hilos de cobre.

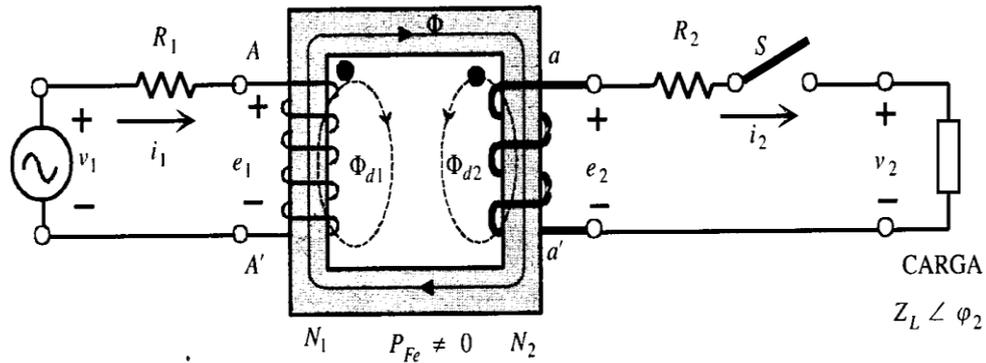


Figura 3.21. Transformador real considerando la resistencia y dispersión del flujo [26].

La **Figura 3.21** presenta el circuito que considera las resistencias de los devanados R_1 y R_2 fuera de la bobina. También se puede observar en el transformador real, que una parte de los flujos magnéticos generados por el devanado es común para los dos, y se representa por Φ . Esto se debe al flujo disperso que aparece en los devanados, que se distribuye a través de caminos no magnéticos, especialmente a través de los conductores y el aire que rodea la bobina. Si se denomina Φ_1 y Φ_2 a los flujos totales a través del devanado primario y secundario respectivamente, por su parte, Φ_{d1} y Φ_{d2} a los flujos magnéticos dispersos, se cumplirá la siguiente condición:

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{d1} ; \Phi_2 = \Phi + \Phi_{d2} \quad (3.15)$$

3.5.4. Circuito equivalente del transformador

Para hacer el circuito equivalente del transformador se comienza reduciendo los dos arrollamientos al mismo valor de espiras. Por lo general, el segundo devanado es el que se disminuye, lo que da como resultado, que el transformador original se reemplaza por otro transformador con el mismo devanado primario que N_1 y un nuevo devanado secundario con el número de vueltas N'_2 . Para que este nuevo transformador sea semejante al transformador original, se tienen que conservar las condiciones energéticas de la máquina, ya que, la potencia activa y reactiva y su organización entre los diferentes componentes del circuito secundario.

Todas las proporciones similares con el nuevo devanado están representadas por el mismo símbolo del transformador real, pero están representadas por la marca ('), como se expone en la **Figura 3.22**, donde los valores de voltaje y corriente se representan en valores complejos [26].

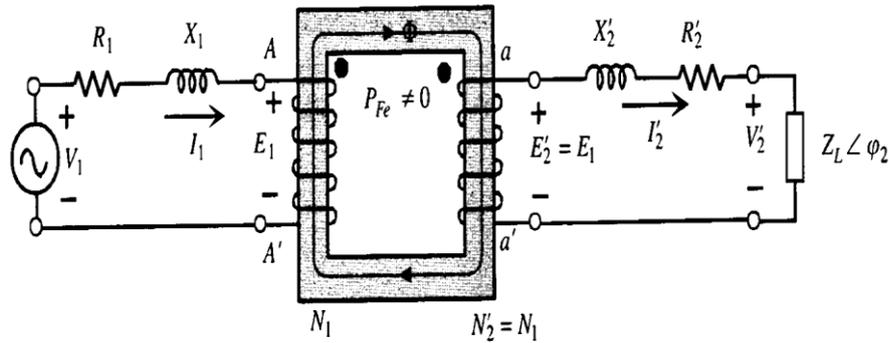


Figura 3.22. Circuito equivalente del transformador real reducido al primario [26].

De acuerdo con el principio de igualdad de potencias, pérdidas, etc., se obtienen las siguientes relaciones entre las magnitudes secundarias de los transformadores real y equivalente:

3.5.4.1. F.e.m.s. y tensiones

En el transformador real se cumple:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \rightarrow E_1 = mE_2 \quad (3.16)$$

y en el transformador equivalente, al ser $N'_2 = N_1$, se tiene:

$$\frac{E_1}{E'_2} = \frac{N_1}{N'_2} = 1 \rightarrow E'_2 = \frac{E_1}{1} \quad (3.17)$$

$$E'_2 = E_1 = mE_2 \quad (3.18)$$

Es decir, la f.e.m. E ; del nuevo devanado secundario es m veces mayor que la f.e.m. E , que existía en el transformador real. De forma análoga se tendrá para la tensión V'_2 :

$$V'_2 = mV_2 \quad (3.19)$$

3.5.4.2. Corrientes

La conservación de la potencia aparente de ambos secundarios indica que:

$$S_2 = V_2 I_2 = V'_2 I'_2 \quad (3.20)$$

y teniendo en cuenta la relación (3.19) se obtiene:

$$V_2 I_2 = (m V_2) I'_2 \rightarrow I'_2 = \frac{I_2}{m} \quad (3.21)$$

Es decir, la corriente I'_2 , del nuevo devanado secundario es m veces menor que la corriente I_2 que existía en el transformador real.

3.5.4.3. Impedancias

Al igualar las potencias activas que se disipan en las resistencias, se obtiene:

$$R_2 I_2^2 = R'_2 I'^2_2 \quad (3.22)$$

de donde se deduce la siguiente expresión, teniendo en cuenta (3.21):

$$R'_2 = m^2 R_2 \quad (3.23)$$

Es decir, la resistencia R'_2 del nuevo secundario es m^2 veces la resistencia R_2 que existía en el transformador real. De forma similar, planteando la conservación de la potencia reactiva en las reactancias, resulta:

$$X'_2 = m^2 X_2 \quad (3.24)$$

Es decir, la reactancia X'_2 del nuevo secundario es m^2 veces la reactancia X_2 que existía en el transformador real.

En conclusión, cualquier impedancia conectada en el devanado secundario del transformador real, por ejemplo, la impedancia de carga $Z_L \angle \varphi$, se disminuirá al primario siguiendo las relaciones (3.23) o (3.24), por lo que se transformará en una impedancia Z'_L .

$$Z'_L = m^2 Z_L \quad (3.25)$$

lo que indica que cualquier impedancia Z_L conectada en el devanado secundario del transformador se convierte en un valor $m^2 Z_L$ en el transformador equivalente. Téngase en cuenta, para demostrar la igualdad anterior de un modo general, que en la **Figura 3.22** del transformador real se cumple:

Teniendo en cuenta la ecuación (3.21) se obtiene:

$$I_1 = I_0 + \frac{N_2}{N_1} I_2 = I_0 + \frac{I_2}{m} = I_0 + I'_2 \quad (3.26)$$

Estas corrientes a su vez, tienen dos componentes, una parte activa I_{Fe} y otra reactiva I_{μ} , que se representan un circuito paralelo que consta de una resistencia R_{Fe} cuyas pérdidas por efecto Joule indican las pérdidas en el hierro del transformador y por una reactancia X_{μ} en la que se deriva la corriente de magnetización de la máquina. De acuerdo con estos análisis, el circuito de la **Figura 3.23** se transforma en el de la **Figura 3.24**, que indica el circuito equivalente exacto del transformador reducido al primario [26].

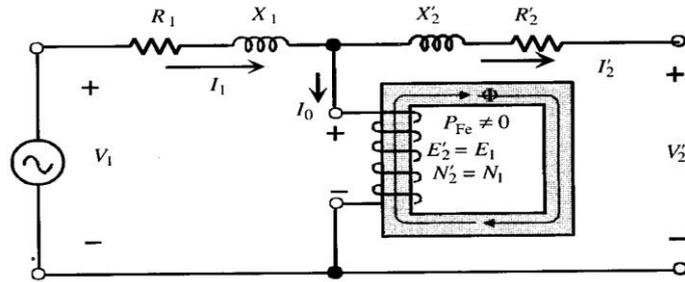


Figura 3.23. Circuito equivalente del transformador real reducido al primario [26].

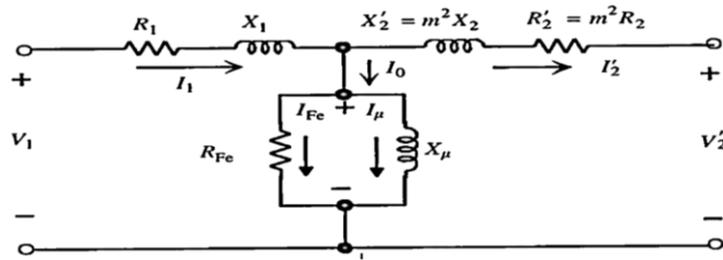


Figura 3.24. Circuito equivalente exacto reducido al primario [26].

Del mismo modo, el proceso seguido hasta aquí para obtener el circuito equivalente del transformador reducido al primario se puede utilizar en sentido inverso, es decir, tomando el primario con un número de espiras $N'_1 = N_2$, y dejando intacto al secundario; de este modo se obtiene el llamado circuito equivalente reducido al secundario cuyo esquema se indica en la **Figura 3.25**.

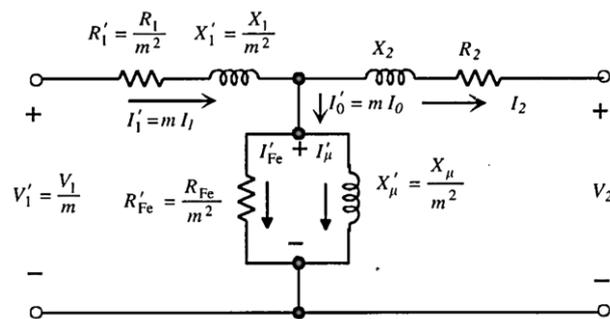


Figura 3.25. Circuito equivalente exacto reducido al secundario [26].

El circuito de la **Figura 3.25** corresponde al comportamiento del transformador real y por eso se le denomina circuito equivalente exacto. En la práctica, y debido al bajo valor de I_0 , frente a las corrientes I_1 e I_2 se suele utilizar un circuito equivalente aproximado que se obtiene cambiando la rama en paralelo por la que se deriva la corriente de vacío a los bornes de entrada del primario, resultando el esquema de la **Figura 3.26**.

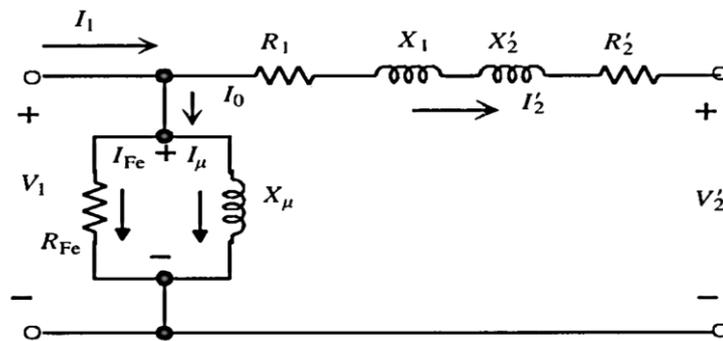


Figura 3.26. Circuito equivalente aproximado reducido al primario completo [26].

Con este circuito no se presentan errores en el cálculo y sin embargo se simplifica enormemente el estudio de la máquina. El esquema puede reducirse aún más observando la conexión en serie constituida por las ramas primaria y secundaria. Si se denomina:

$$R_{cc} = R_1 + R_2' \rightarrow \text{Resistencia de cortocircuito} \quad (3.27)$$

$$X_{cc} = X_1 + X_2' \rightarrow \text{Reactancia de cortocircuito} \quad (3.28)$$

el circuito de la **Figura 3.26** se transforma en el de la **Figura 3.26**. Con apoyo de este último circuito más simple se tiene la posibilidad de resolverse una serie de inconvenientes que afectan a la utilización del transformador; en especial para el cálculo de la caída de tensión y el desempeño. De hecho, si en un inconveniente real se necesita solamente la determinación de la caída de tensión del transformador, se puede prescindir de la rama en paralelo, dado que no interfiere fundamentalmente en el cálculo de la misma; de esta forma el circuito final va a ser la impedancia serie $R_{cc} + X_{cc}$.

Además, que en los enormes transformadores se cumple que X_{cc} es mucho mayor que R_{cc} , se puede usar únicamente la reactancia serie X_{cc} para representar el circuito semejante del transformador. Este esquema final es el que se usa cuando se hacen estudios de enormes redes en sistemas eléctricos de potencia: análisis de estabilidad, cortocircuitos, etc.

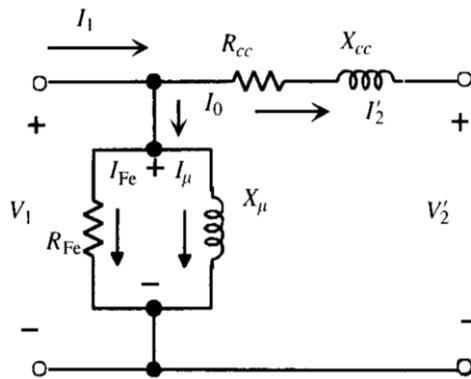


Figura 3.27. Circuito equivalente aproximado reducido al primario completo [26].

3.5.5. El transformador trifásico

La transformación de tensiones y corrientes en los sistemas trifásicos puede hacerse de dos formas diferentes. La primera de ellas radica en usar un transformador monofásico en cada una de las tres fases, de tal forma que se formen circuitos magnéticos independientes. La segunda forma radica en usar un solo núcleo magnético en el que se integran todos los devanados necesarios. En esta situación, el sistema está compuesto por tres columnas iguales sobre las que se arrollan las espiras que conforman los bobinados primario y secundario de cada etapa, como sugiere la **Figura 3.28**.

3.5.6. Circuitos equivalentes del transformador trifásico

En el estudio del transformador trifásico hay que considerar cada columna como un transformador monofásico, de tal manera que los ensayos, esquemas equivalentes, etc., deben expresarse en valores simples, pudiéndose aplicar entonces las mismas técnicas de análisis empleadas en el estudio de los transformadores monofásicos.

Por ejemplo, la relación de transformación será el cociente entre el número de espiras por fase del primario y el número de espiras por fase del secundario, que coincidirá con la relación entre las f.e.m.s. por fase entre primario y secundario.

La designación de terminales en los devanados se realizará siguiendo las sugerencias expresadas anteriormente, empleando las letras A, B, C para denominar los principios de las bobinas del devanado de A.T. ubicado en el primario; las mismas letras en minúscula, a, b, c, indicarán los terminales de la misma polaridad en el devanado secundario. Los otros terminales se expresarán con las mismas letras con tilde, como se expone en la **Figura 3.28**.

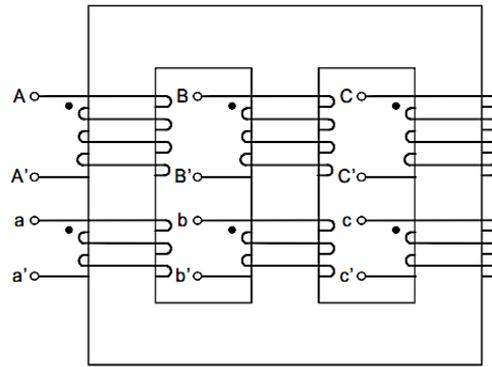


Figura 3.28. Circuito magnético de un transformador trifásico [28].

3.5.7. Conexiones de los transformadores trifásicos

Las formas que más frecuentemente se emplean para realizar las conexiones de los arrollamientos son: en estrella (con o sin hilo neutro), en triángulo y en Zig-Zag.

Las diferentes conexiones se designan con letras, de acuerdo a la siguiente nomenclatura:

Tabla 3.3. Tipos de conexión en los devanados.

CONEXIÓN (AT-BT)	CARACTERÍSTICA	VENTAJAS
Y-y (Estrella)	Un transformador conectado de esta forma contiene un menor número de espiras y una mayor sección transversal	<ul style="list-style-type: none"> • Ofrecen devanados mecánicamente fuertes que soportan mayores esfuerzos debidos a enormes corrientes de cortocircuito. • Ventajosa cuando se enlazan dos sistemas de tensiones subjetivamente altas
D-y	Esta conexión muestra las mismas virtudes y el mismo movimiento de fase que la conexión Y-d. Se usa como transformador elevador en las redes de A.T. Además, es muy usada en los transformadores de distribución, correspondiendo los terminales estrella al de baja tensión, que facilita de esta forma alimentar cargas trifásicas y cargas monofásicas	<ul style="list-style-type: none"> • Facilita poner a tierra el punto neutro, con lo que limita el potencial sobre las fases de tensión, reduciéndose de forma simultanea el coste de los devanados de A.T. • El primario en triángulo tiende a compensar los desbalances producidos por las cargas monofásicas.
D-d (Triangulo)	Esta conexión es utilizada en transformadores de B.T., ya que se necesitan más espiras/fase de menor sección. Este montaje puede trabajar al 58 por 100 (es decir, $1/\sqrt{3}$ y de la potencia asignada trabajando como triángulo abierto en el caso de un banco trifásico con transformadores monofásicos)	<ul style="list-style-type: none"> • Se comporta bien frente a cargas desequilibradas
Y-z (Zig - Zag)	Esta conexión en costumbre sólo se utiliza en el lado de menor tensión, ya que, radica en subdividir en dos partes iguales los devanados secundarios, una sección se conecta en estrella y después cada rama se une en serie con las bobinas invertidas de las fases adyacentes, siguiendo un preciso orden cíclico. Requiere un 15 por 100 más de espiras que en una conexión en estrella común.	<ul style="list-style-type: none"> • Facilita la utilización de un neutro en el secundario. • Se comporta bien frente a desbalances de cargas

3.5.8. Transformador trifásico de 3 devanados

El diseño del circuito del transformador de tres devanados se muestra en la **Figura 3.29**. La rama de magnetización se puede asignar a cualquiera de los tres devanados del transformador. Todos los devanados están acoplados magnéticamente a través del núcleo del transformador [29].

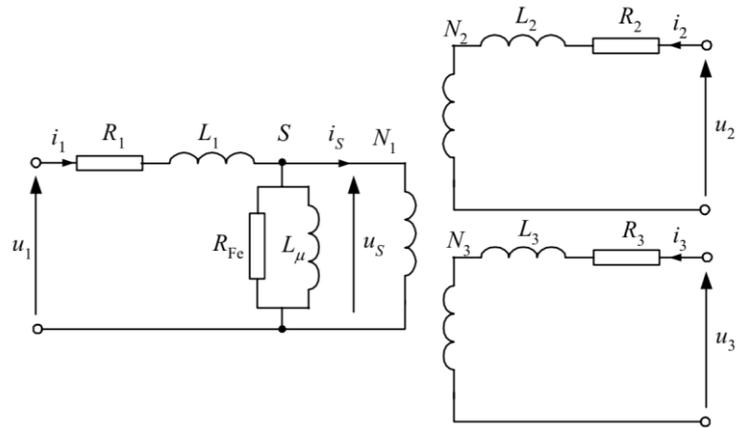
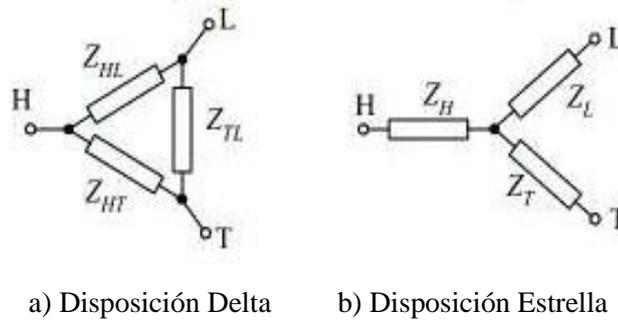


Figura 3.29. El diagrama equivalente del transformador de tres devanados [29].

Los dígitos del subíndice en la **Figura 3.29**, hace referencia a los números de bobinado. También se utilizan las notaciones H, L, T para referirse a los respectivos devanados.



a) Disposición Delta b) Disposición Estrella

Figura 3.30. El circuito equivalente del transformador de tres devanados [29].

Los parámetros del circuito equivalente se determinan mediante las pruebas de vacío y corto circuito aplicadas al transformador. Las respectivas impedancias están determinadas por las ecuaciones:

$$Z_{12} = \frac{U_{12\%} U_1^2}{100 S_b} \quad (3.29)$$

$$Z_{13} = \frac{U_{13\%} U_1^2}{100 S_b} \quad (3.30)$$

$$Z_{23} = \frac{U_{23\%} U_1^2}{100 S_b} \quad (3.31)$$

Donde:

- $U_{12\%}, U_{13\%}, U_{23\%}$ = Son los voltajes de corto circuito en porcentaje.
- U_1, U_2, U_3 = Son los voltajes nominales en [kV].
- S_b = Es la potencia base en [MVA].

Generalmente, la potencia y el voltaje más elevado de los devanados son considerados como base.

El cálculo de las pérdidas del cobre para cada devanado viene dado por:

$$\Delta P_{Cu1} = I_1^2 * R_1 = \frac{S_b^2}{U_1^2} * R_1 \quad (3.32)$$

$$\Delta P_{Cu2} = I_2^2 * R_2 = \frac{S_b^2}{U_2^2} * R_2 \quad (3.33)$$

$$\Delta P_{Cu3} = I_3^2 * R_3 = \frac{S_b^2}{U_3^2} * R_3 \quad (3.34)$$

Las pérdidas del cobre totales serán:

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{Cu3} \quad (3.35)$$

Del mismo modo, conociendo la potencia disipada en los devanados del transformador, sus resistencias se pueden calcular a partir de las ecuaciones:

$$R_{12} = \frac{3\Delta P_{Cu1} U_1^2}{S_b^2} \quad (3.36)$$

$$R_{13} = \frac{3\Delta P_{Cu2} U_2^2}{S_b^2} \quad (3.37)$$

$$R_{23} = \frac{3\Delta P_{Cu3} U_3^2}{S_b^2} \quad (3.38)$$

Los parámetros del circuito de la **Figura 3.29**, se pueden determinar mediante la transformación del diagrama de la (**Figura 3.30 (a)**) en una disposición en Y (**Figura 3.30 (b)**):

$$Z_1 = \frac{1}{2} (Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}) \quad (3.39)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} (Z_{12} + Z_{23} - Z_{13}) \quad (3.40)$$

$$Z_3 = \frac{1}{2} (Z_{13} + Z_{23} - Z_{12}) \quad (3.41)$$

Donde todos los valores de las impedancias están referidas al lado de alto voltaje.

El valor de la reactancia para cada devanado en delta viene dado por:

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} \quad (3.42)$$

$$X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} \quad (3.43)$$

$$X_3 = \sqrt{Z_3^2 - R_3^2} \quad (3.44)$$

Para el cálculo de las inductancias se obtiene:

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f} \quad (3.45)$$

$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi f} \quad (3.46)$$

$$L_3 = \frac{X_3}{2\pi f} \quad (3.47)$$

Los parámetros de la rama de magnetización se determinan de manera semejante al transformador de dos devanados, a partir de los resultados de la prueba del transformador:

$$R_m = \frac{U_1}{\Delta P_{Fe}} \quad (3.48)$$

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN UTILIZADA

Para el desarrollo del estudio presentado se utilizaron diferentes métodos de investigación entre los cuales se tiene: el método de investigación analítico, dado que el método utilizado se basa en la investigación literaria de distintas fuentes, introduce los principios teóricos, causas y efectos particulares de este fenómeno, De la misma forma, se revisan manuales y guías de usuario que permitan la familiarización en el manejo de los paquetes computacionales de cada simulador empleado. Haciendo uso del método sintético, es posible sintetizar y unificar los diversos criterios establecidos por varios autores referentes al fenómeno investigado.

Una vez adquiridos los conocimientos básicos para la simulación y análisis del fenómeno de resonancia, se procede con la implementación del sistema y se analiza los resultados de la simulación generados por tres herramientas de simulación distintas, aplicando los criterios de análisis establecidos por el autor [16], el cual presenta un estudio donde pretende determinar la respuesta de los transformadores frente al fenómeno de la ferresonancia.

4.2. PROCEDIMIENTO APLICABLE PARA EL ANÁLISIS

Un sistema clásico en el que se presenta el fenómeno de ferresonancia es el que se presenta en la **Figura 4.1**, en el que se consideran los componentes que son fundamentales para recrear este fenómeno como: una fuente de tensión, las líneas para conectar el transformador con la fuente, un banco de condensadores, una inductancia saturable(transformador) y una amortiguación muy baja (transformador sin carga). La capacitancia puede presentarse por un banco de capacitores, líneas de transmisión o cables subterráneos, por su parte la inductancia saturable generalmente es representada por el transformador.

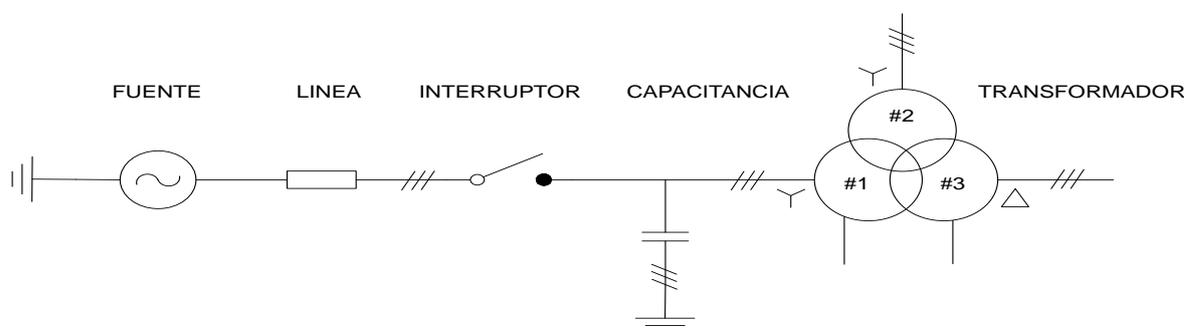


Figura 4.1. Esquema general del sistema.

En el sistema presentado, una condición favorable para la ocurrencia de este fenómeno se da por la apertura de una o dos de sus fases ya sea por causa de una maniobra o falla, cuando el transformador esta con poca carga o en vacío. Partiendo de este esquema general se establecen los siguientes escenarios:

4.2.1. Caso 1: Transformador de 3 devanados con una fase abierta(Y/y/d)

El primer caso se lo realiza en las condiciones como se muestra en la **Figura 4.2**, que consta de un sistema trifásico con una fuente de tensión desfasada 120 grados entre sus fases, el transformador trifásico está compuesto de tres devanados, donde el primario como el secundario están en conexión estrella sin aterrizar y el devanado terciario está en delta.

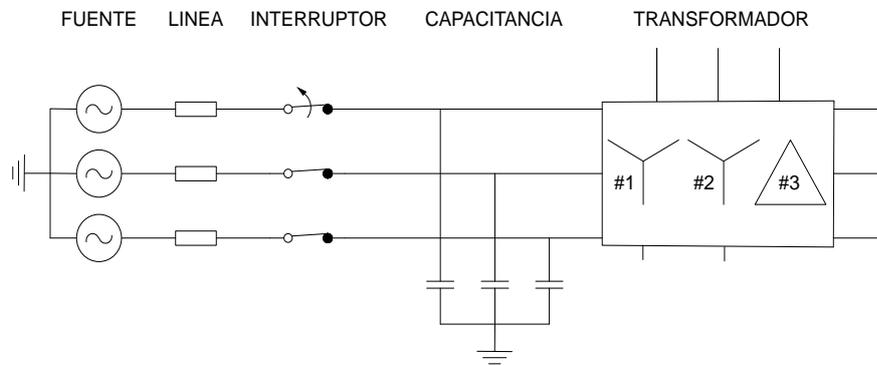


Figura 4.2. Sistema del caso 1 (Interruptor abierto, Fase A).

4.2.2. Caso 2: Transformador de 3 devanados con dos fases abiertas(Y/y/d)

El segundo caso involucra la apertura de la fase A y C del sistema trifásico, el transformador tiene una conexión estrella sin aterrizar tanto en el devanado primario como en el secundario, el devanado terciario está en delta.

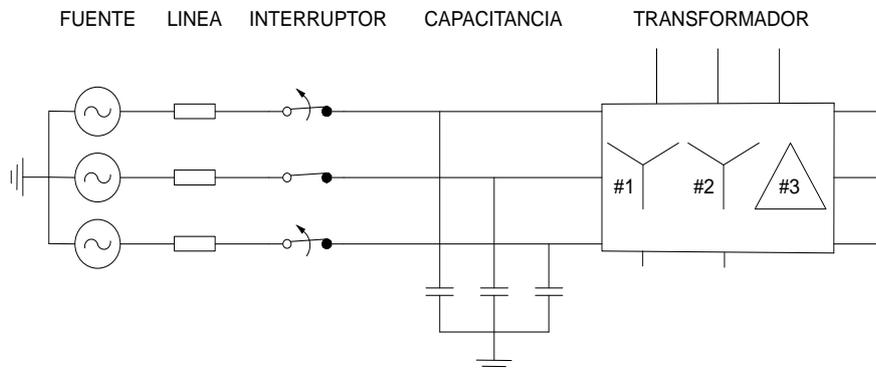


Figura 4.3. Sistema del caso 2 (Interruptores abiertos, Fase A y C)

4.2.3. Caso 3: Transformador de 3 devanados con una fase abierta (Yg/y/d)

El análisis del tercer caso plantea un sistema trifásico, como el que se muestra en la **Figura 4.4**, en el cual el transformador tiene una conexión estrella aterrizada en el devanado primario, el secundario está en estrella sin aterrizar y el terciario está en delta. La desconexión para este caso ocurre en el interruptor de la fase A.

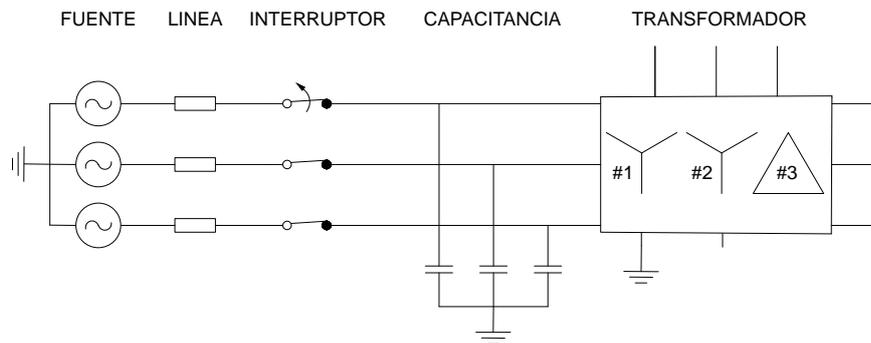


Figura 4.4. Sistema del caso 3 (Interruptor abierto, Fase A).

4.3. INSTRUMENTOS

En la actualidad existen muchas herramientas tecnológicas, que permiten realizar un análisis detallado, mediante la simulación de diversos fenómenos que se presentan en un sistema eléctrico, para el presente estudio se consideran tres herramientas de simulación para fenómenos transitorios, como lo son: ATPDraw, PSCAD y Simulink las cuales se detallan a continuación:

4.3.1. ATPDraw

ATPDraw es un programa especializado en la simulación de transitorios electromagnéticos, y sistemas de control en sistemas eléctricos de potencia, posee un preprocesador gráfico para la versión ATP (*Alternative Transient Program*) del Programa de Transitorios Electromagnéticos EMTP (*ElectroMagnetic Transient Program*). Esta plataforma de simulación gráfica permite construir circuitos eléctricos seleccionando componentes de los menús disponibles en sus librerías, los que pueden modificar sus parámetros con la finalidad de realizar el diseño y análisis de los sistemas eléctricos. Para la ejecución del presente trabajo se utiliza la versión 7.0 de ATPDraw.

4.3.2. PSCAD

PSCAD (*Power System Computer Aided Design*), descrito por sus acrónimos en inglés, es una herramienta de simulación para analizar fenómenos transitorios en sistemas de potencia, tiene una interfaz gráfica donde se puede ver la respuesta transitoria en el dominio del tiempo, que también se conoce comúnmente como el transitorio electromagnético de un sistema eléctrico. Presenta una interfaz muy amigable, donde los componentes más utilizados se pueden encontrar directamente en la biblioteca principal “Master Library”, desde la cual se tiene acceso a las librerías de componentes de PSCAD. La versión utilizada para el desarrollo del presente trabajo es 4.5 de PSCAD.

4.3.3. Simulink

Simulink es una herramienta grafica desarrollada por *MathWorks*, Inc. la cual se encuentra incluida como parte integral dentro del paquete de MATLAB, esta permite simular sistemas dinámicos no lineales, su entorno es muy amigable presentados por diagramas de bloques para cada elemento. Dentro de las múltiples librerías con las que cuenta esta herramienta, las cuales están enfocadas a distintos campos de investigación, se encuentra la librería *Simscape/SimPowerSystems*, que cuenta con diversos elementos eléctricos que permiten simular diversos sistemas eléctricos con parámetros específicos. En la presente investigación se utiliza la versión de MATLAB (R2016b).

4.4. COMPONENTES DEL SISTEMA

Para desarrollar la simulación de un circuito ferroresonante, es necesario ejecutar una serie de procedimientos para modelar un sistema, de manera que este fenómeno pueda reproducirse en condiciones similares a la realidad. Para realizar este cometido se considera el transformador de la subestación El Inga, el cual esta interconectado con la línea de transmisión San Rafael – El Inga. A continuación, se determinan los parámetros de los componentes que establecerá las características más importantes del sistema donde ocurre el fenómeno.

4.4.1. Fuente de tensión

Este componente está formado por una fuente de voltaje trifásica balanceada para los tres casos presentados (ATPDraw, PSCAD y Simulink) respectivamente tal como se indica a continuación:

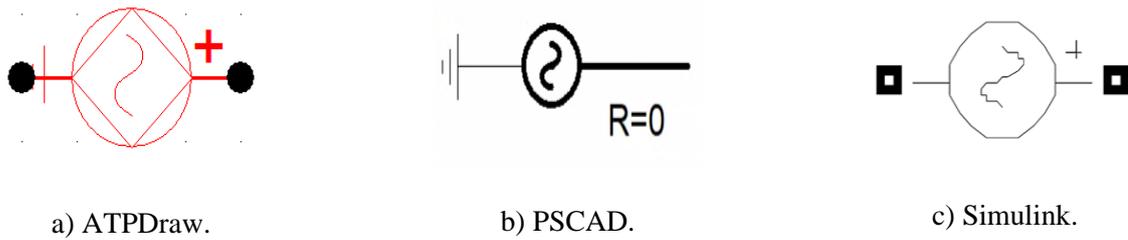


Figura 4.5. Fuentes de tensión en A.C.

Debido a que la fuente de tensión no es un parámetro determinante en este tipo de fenómenos, solo se consideró una fuente de tensión de 500 kV con un desfase (0, 120, -120) entre las Faces A, B y C. Los parámetros ingresados en cada generador se detallan en el **Anexo D**.

4.4.2. Líneas de transmisión

Para efectos de la simulación, solo se consideró uno de los dos circuitos que comprende la línea de transmisión San Rafael-El Inga de 500 kV, tomando como referencia la geometría típica de una torre de esta ruta, como la que se muestra en la **Figura 4.6**, la misma que se compone de un haz de 4 conductores por fase, con una separación de 45 cm entre ellos [30].

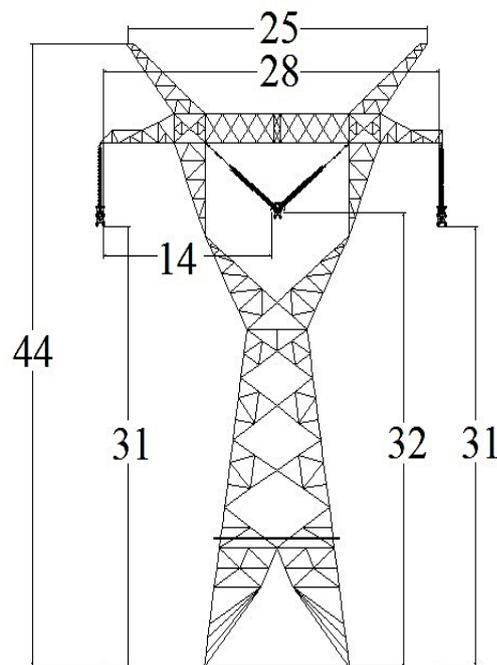


Figura 4.6. Torre de transmisión de 500 kV, con dimensiones en metros [30].

Para el desarrollo del presente trabajo, se utiliza el modelo de línea con parámetros distribuidos, en la herramienta ATPDraw, se puede determinar los parámetros mediante la configuración de la torre, y características del conductor, los datos ingresados se presentan en la **Tabla 4.1** y **Tabla 4.2** para las dimensiones y características del conductor.

Tabla 4.1. Parámetros generales de la L/T 500 kV San Rafael – El Inga 500kV [31].

Línea de transmisión	Longitud	Descripción
L/T san Rafael – El Inga	119 km	Dispone de un haz de 4 conductores ACAR 1100 MCM, simple circuito, 500 KV.

Tabla 4.2. Especificaciones técnicas del conductor ACAR 1100 [32].

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro exterior	30,65	[mm]
Resistencia DC	0,0557	[ohm/km]
Inductancia interna	0,1429	T/D
Capacidad de corriente	64,5	[kA]
Peso aproximado	1533	[kg/km]

El modelo que se utiliza para el caso de ATPDraw es un tipo Bergeron, el cual es un modelo que se caracteriza por la propagación de las ondas en una línea de transmisión con parámetros inductivos (L) y capacitivos (C). Estos datos se detallan de mejor manera en el **Anexo E. 1**.

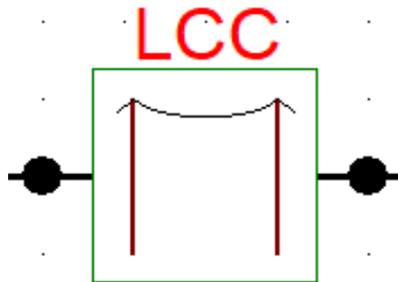


Figura 4.7. Línea LCC *template*.

Para la configuración de los hilos de guarda se tiene los valores presentados en la **Tabla 4.3** y **Tabla 4.4**, el tipo de línea seleccionado de los componentes es la LCC *template* que permite un ingreso más completo de los parámetros de una línea de transmisión.

Tabla 4.3. Especificaciones técnicas del conductor KCM 3/8” [32].

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro exterior	0,914	[cm]
Diámetro hilos de aleación de aluminio	0,372	[cm]
Resistencia DC	0,05	[ohm/km]
Inductancia interna	0,407	T/D

Tabla 4.4. Especificaciones técnicas del conductor OPGW (*Optical Ground Wire*) [32].

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro exterior	1,6	[cm]
Diámetro hilos de aleación de aluminio	0,51	[cm]
Resistencia DC	0,31875	[ohm/km]
Inductancia interna	0,318	T/D

Del mismo modo que ATPDraw, PSCAD ocupa un modelo de línea de transmisión muy parecido, este se elige de la librería maestra, se ingresa dentro de la misma para a asignar los parámetros, como se detallan en el **Anexo E. 2**.

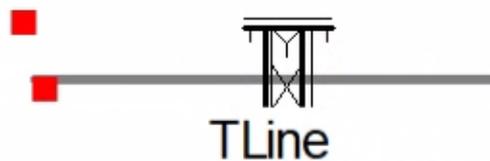


Figura 4.8. Línea de transmisión en PSCAD.

Para el caso de la herramienta de Simulink se utiliza una línea con parámetros distribuidos como el que se muestra en la **Figura 4.9**, este modelo se basa en el método de onda viajera de Bergeron utilizado por el Programa de Transitorios Electromagnéticos (EMTP).

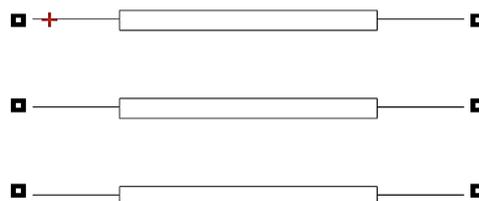


Figura 4.9. Línea con parámetros distribuidos.

Este tipo de línea permite ingresar valores característicos como el número de fases, la frecuencia, resistencia, inductancia, capacitancia y longitud. Estos datos se pueden calcular manualmente mediante ecuaciones matemáticas tomando en consideración la configuración de la torre y las características del conductor, los resultados se presentan a continuación:

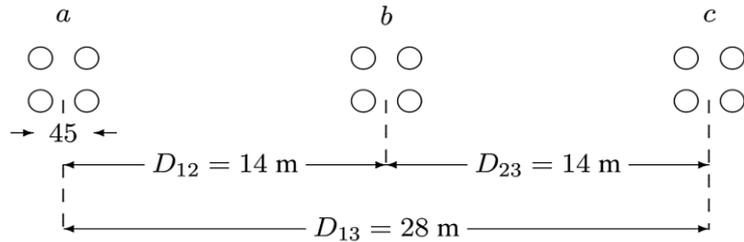


Figura 4.10. Configuración del haz de conductores de la línea de 500 kV.

La distancia media geométrica para la configuración con un haz de 4 conductores se obtiene a partir de:

$$DMG = \sqrt[3]{(D_{12}) * (D_{23}) * (D_{13})} \quad (4.1)$$

Remplazando con los valores para la configuración del haz de conductores presentados en la **Figura 4.10**, se tiene:

$$DMG = \sqrt[3]{(14) * (14) * (24)} = 17,64$$

El radio del conductor ACAR 1100 en metros se extrae de la **Tabla 4.2**.

$$r = \frac{30,65}{2} [mm] \left(\frac{1 [m]}{1000 [mm]} \right) = 15,325 * 10^{-3} m$$

Donde r' es la corrección por enlaces de flujos y está definida como:

$$r' = r * e^{-\frac{1}{4}} \quad (4.2)$$

$$r' = (15,325 * 10^{-3}) * e^{-\frac{1}{4}} = 0,011935 m$$

El radio medio geométrico inductivo viene dado por:

$$RMG = \sqrt[4]{r' * d^3 * \sqrt{2}} \quad (4.3)$$

$$RMG = \sqrt[4]{(0,011935) * (0,45)^3 * \sqrt{2}} = 0,198$$

La inductancia está definida por:

$$L = 2 * 10^{-7} \ln\left(\frac{DMG}{RMG}\right) \quad (4.4)$$

$$L = 2 * 10^{-7} \ln\left(\frac{17,64}{0,198}\right) = 0,8979 * 10^{-6} \frac{H}{m}$$

$$L = 2 * 10^{-7} \ln\left(\frac{17,64}{0,198}\right) = 0,8979 * 10^{-3} \frac{H}{Km}$$

El cálculo del radio medio geométrico capacitivo viene dado por:

$$RMG = \sqrt[4]{r * d^3 * \sqrt{2}} \quad (4.5)$$

$$RMG_c = \sqrt[4]{(15,325 * 10^{-3}) * (0,45)^3 * \sqrt{2}} = 0,2108$$

La capacitancia está definida por:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{DMG}{RMG}\right)} \quad (4.6)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{17,64}{0,2108}\right)} = 1,2566 * 10^{-11} \frac{F}{m}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{17,64}{0,2108}\right)} = 1,2566 * 10^{-8} \frac{F}{Km}$$

Otra solución para calcular estos parámetros es utilizar el bloque “Powergui”, en la cual proporciona la herramienta “RLC Line Parameters”, esta herramienta permite calcular resistencia, inductancia y capacitancia por unidad de longitud en función de la geometría de la torre de transmisión y las características del conductor como se muestra en el **Anexo E. 3**. Estos últimos cálculos fueron los que finalmente se implementaron.

4.4.3. Banco de capacitores

Para la determinación del valor capacitivo del banco de condensadores, se realizaron pruebas en rango de capacitancias, tomando como referencia el simulador ATPDraw, donde los valores seleccionados son tres valores representativos los cuales son de 0.1 nf , 0.1 uf , 1 uf y 0.005 mf , los mismos que representan un estado estable, en condición crítica con presencia de picos de tensión y por último presencia de armónicos.

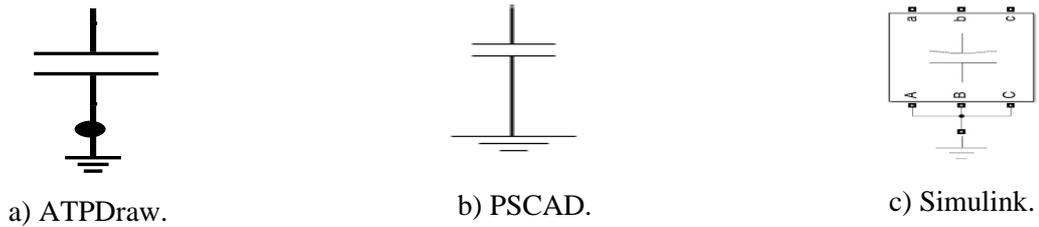


Figura 4.11. Banco de capacitores.

4.4.4. El transformador

Uno de los componentes más importantes al momento de simular el fenómeno de ferresonancia, es el transformador de potencia, debido a que se debe representar de manera correcta el núcleo y la saturación del transformador, en el presente estudio se considera un transformador de tres devanados con una tensión nominal de $500/230/34,5 \text{ kV}$ y una potencia nominal de 600 MVA para el banco de transformadores, los parámetros ingresados en cada transformador se detallan en el **Anexo F**.

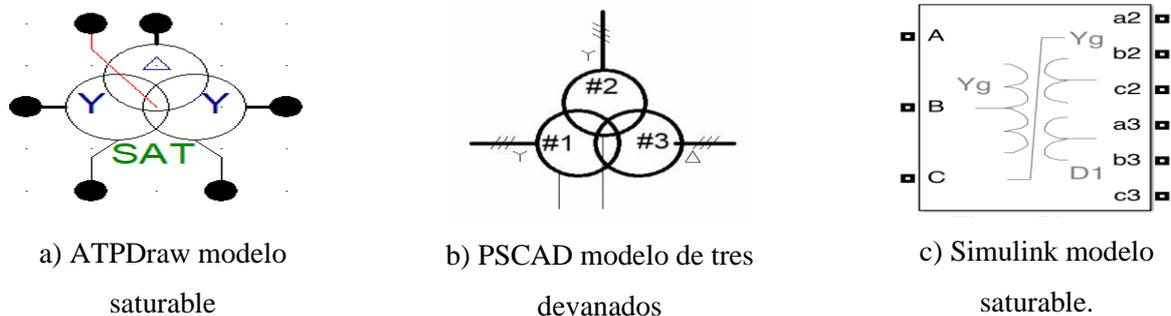


Figura 4.12. Transformador trifásico de tres devanados.

4.5. PARÁMETROS DE SATURACIÓN

Para calcular los parámetros de los transformadores, se tomó como referencia los datos proporcionados en el trabajo “Análisis de transitorios electromagnéticos en el sistema nacional interconectado (S.N.I.) a nivel de 230 kV y 500 kV usando el simulador digital en tiempo real

HYPERSIM”, realizado por el autor [32], referentes a la subestación El Inga, la cual está conformada de un banco de tres transformadores monofásicos con una tensión de 500 kV, y las especificaciones de cada conjunto se muestran detalladas en la **Tabla 4.5**:

Tabla 4.5. Parámetros del transformador - El Inga [32].

Parámetro	Valor	Unidades
S_b	600	MVA
U_1	500	kV
U_2	230	kV
U_3	34,5	kV
$U_{12\%}$	11,61	%
$U_{13\%}$	26,93	%
$U_{23\%}$	13,92	%
R_1	0,2372	ohm
R_2	0,1067	ohm
R_3	0,012	ohm
m_{12}	2,17	
m_{13}	14,49	

A partir de las pruebas de cortocircuito y vacío realizadas al banco de transformadores, se calculan los parámetros que serán ingresados en cada modelo de transformador implementado en los distintos simuladores.

Tabla 4.6. Prueba de corto circuito transformador monofásico El Inga [32].

Devanado	Tap	Impedancia		Parámetros Nominales		Pérdidas (kW)	
		Ucc (%)	Zk (ohm/fase)	Potencia (MVA)	Corriente (A)	Valor medido (kW)	Corregido 75°C
1-3	-	26.93	112.21	200	692.8	75.22	80.8
1-2	1	10.21	42.53	200	692.8	221.38	236.43
1-2	9	11.61	48.39	200	692.8	227.08	242.01
1-2	17	13.87	57.8	200	692.8	294.47	315.25
2-3	1	14.36	15.32	200	1369.2	71.04	78.6
2-3	9	13.92	12.28	200	1506.1	72.88	80.81
2-3	17	13.92	9.94	200	1673.5	82.57	91.54

Tabla 4.7. Prueba de Vacío del transformador monofásico El Inga [32].

V nominal	r.m.s (kV)	Promedio (kV)	Corriente sin carga		Pérdidas sin carga (kW)		
			A	% de la corriente nominal	Valor medido	Valor corregido	Valor garantizado
10%	4.009	3.49	0.3134	0.005	1.229	1.05	-
50%	17.43	17.2	1.249	0.022	19.16	18.9	-
60%	21.01	20.79	1.5268	0.026	27.17	26.88	-
70%	24.43	24.14	1.8037	0.031	36.18	35.75	-
80%	28.03	27.65	2.093	0.036	47.19	46.54	-
90%	31.57	31.14	2.3684	0.041	60.15	59.32	-
95%	33.25	32.77	2.5	0.043	67.19	66.21	-
100%	35.18	34.5	2.7533	0.048	76.23	74.75	86
105%	37.17	36.19	3.5228	0.061	88.35	85.96	-
110%	39.8	37.96	7.6519	0.132	110.9	105.52	-
115%	42.29	39.06	17.098	0.295	133.2	122.19	-

Las curvas de saturación se obtienen de la prueba de vacío del transformador, los mismos que se muestran en la **Tabla 4.8**.

Tabla 4.8. Puntos de la curva de saturación del Transformador El Inga [32].

Isat (A)	Flux(Wb)
0,611	78,124
0,8036	99,588
1,1887	116,9486
1,9588	129,42
3,499	137,76
6,579	143,159

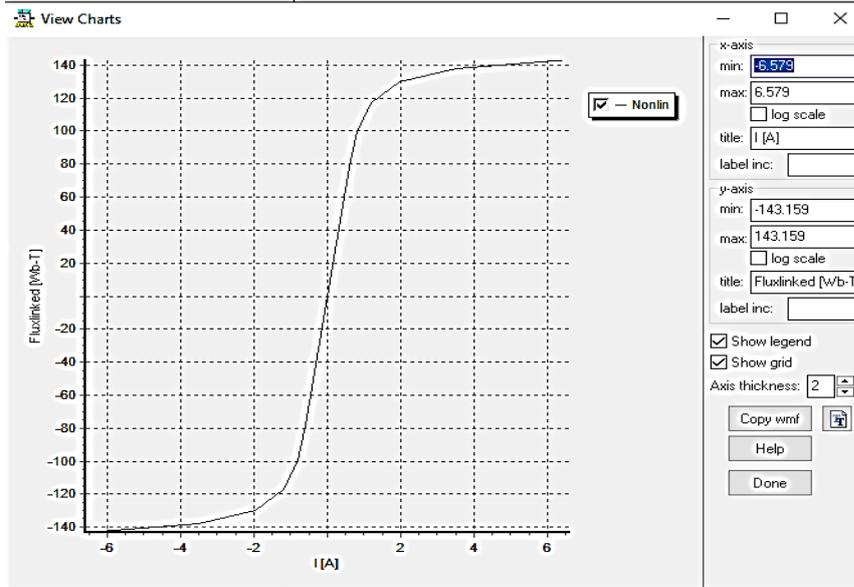


Figura 4.13. Curva de saturación del Transformador El Inga

Utilizando las ecuaciones del modelo del transformador de tres devanados expuestas en el capítulo anterior en la sección 3.5.8, se puede calcular los datos necesarios para el ingreso en los distintos simuladores.

Configuración delta:

$$Z_{12} = \frac{U_{12\%} U_1^2}{100 S_b} = \frac{11,61(500 * 10^3)^2}{100(600 * 10^6)} = 48,375 \Omega$$

$$Z_{13} = \frac{U_{13\%} U_1^2}{100 S_b} = \frac{26,93(500 * 10^3)^2}{100(600 * 10^6)} = 112,208 \Omega$$

$$Z_{23} = \frac{U_{23\%} U_1^2}{100 S_b} = \frac{13,92(500 * 10^3)^2}{100(600 * 10^6)} = 58 \Omega$$

Evaluando los valores obtenidos se obtienen las impedancias para los respectivos devanados:

$$Z_1 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{13} - Z_{23})$$

$$Z_1 = \frac{1}{2}(48,375 + 112,208 - 58) = 51,292 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{23} - Z_{13})$$

$$Z'_2 = \frac{1}{2}(48,375 + 58 - 112,208) = -2,917 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z'_2}{m_{12}} = \frac{-2,917}{(2,17)^2} = -0,617 \Omega$$

$$Z_3 = \frac{1}{2}(Z_{13} + Z_{23} - Z_{12})$$

$$Z'_3 = \frac{1}{2}(112,208 + 58 - 48,375) = 60,917 \Omega$$

$$Z_3 = \frac{Z'_3}{m_{13}} = \frac{60,917}{(14,49)^2} = 0,29 \Omega$$

El valor de la reactancia en delta será:

$$X_1 = \sqrt{Z_i^2 - R_i^2}$$

$$X_1 = \sqrt{(51,292)^2 - (0,2372)^2} = 51,291 \Omega$$

$$X_2 = \sqrt{(-0,617)^2 - (0,1067)^2} = 0,608 \Omega$$

$$X_3 = \sqrt{(0,29)^2 - (0,012)^2} = 0,29 \Omega$$

Para la configuración en estrella se tiene:

$$Z_{12} = \frac{Z_{12}}{3} = \frac{48,375}{3} = 16,125 \Omega$$

$$Z_{13} = \frac{Z_{13}}{3} = \frac{112,208}{3} = 37,403 \Omega$$

$$Z_{23} = \frac{Z_{23}}{3} = \frac{58}{3} = 19,333 \Omega$$

$$Z_1 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{13} - Z_{23})$$

$$Z_1 = \frac{1}{2}(16,125 + 37,403 - 19,333) = 17,097 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{23} - Z_{13})$$

$$Z'_2 = \frac{1}{2}(16,125 + 19,333 - 37,403) = -0,972 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z'_2}{m_{12}} = \frac{-0,972}{(2,17)^2} = -0,206 \Omega$$

$$Z_3 = \frac{1}{2}(Z_{13} + Z_{23} - Z_{12})$$

$$Z'_3 = \frac{1}{2}(37,403 + 19,333 - 16,125) = 20,306 \Omega$$

$$Z_3 = \frac{Z'_3}{m_{13}} = \frac{20,306}{(14,49)^2} = 0,097 \Omega$$

El valor de la reactancia en estrella será:

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2}$$

$$X_1 = \sqrt{(17,097)^2 - (0,2372)^2} = 17,096 \Omega$$

$$X_2 = \sqrt{(-0,206)^2 - (0,1067)^2} = 0,176 \Omega$$

$$X_3 = \sqrt{(0,097)^2 - (0,012)^2} = 0,096 \Omega$$

Tabla 4.9. Reactancias de dispersión de los devanados del transformador de El Inga

Reactancia [Ω]	Delta	Estrella
X_1	51,291	17,096
X_2	0,608	0,176
X_3	0,290	0,096

Para el cálculo de las inductancias se tiene:

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f} = \frac{17,096}{2\pi(60)} = 0,045347 [H]$$

$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi f} = \frac{0,176}{2\pi(60)} = 0,000467 [H]$$

$$L_3 = \frac{X_3}{2\pi f} = \frac{0,096}{2\pi(60)} = 2,54 * 10^{-4} [H]$$

Tabla 4.10. Inductancias de los devanados del transformador de El Inga

Inductancia [H]	Estrella
L_1	0,045347
L_2	0,000467
L_3	0,000254

El valor de la resistencia equivalente de magnetización se determina con los valores obtenidos de la prueba de vacío:

$$R_m = \frac{U_1}{\Delta P_{Fe}} = \frac{\left(\frac{500KV}{\sqrt{3}}\right)}{86KW} = 968,99K\Omega$$

Tabla 4.11. Parámetros calculados para el Transformador en ATPDraw y Simulink

Parámetro	Valor	Unidades
Potencia nominal	600	MVA
Resistencia de magnetización	96,899	MΩ
Voltaje primario	500	KV
Resistencia del primario	0,2372	Ω
Inductancia del primario	0,045347	H
Voltaje secundario	230	KV
Resistencia del secundario	0,1067	Ω
Inductancia del secundario	0,00046656	H
Voltaje terciario	34,5	KV
Resistencia del terciario	0,012	Ω
Inductancia del terciario	0,00025445	H

4.5.1. Determinación de parámetros del transformador para PSCAD

Cálculo de las pérdidas del cobre para el banco de transformadores.

$$\Delta P_{Cu1} = I_1^2 * R_1 = \frac{S_b^2}{U_1^2} * R_1$$

$$\Delta P_{Cu1} = \frac{(200 * 10^6)^2}{\left(\frac{500 * 10^3}{\sqrt{3}}\right)^2} * (0,2372) = 113856 \text{ W}$$

$$\Delta P_{Cu2} = I_2^2 * R_2 = \frac{S_2^2}{U_2^2} * R_2$$

$$\Delta P_{Cu2} = \frac{(200 * 10^6)^2}{\left(\frac{230 * 10^3}{\sqrt{3}}\right)^2} * (0,1067) = 242041,5879 \text{ W}$$

$$\Delta P_{Cu3} = I_3^2 * R_3 = \frac{S_3^2}{U_3^2} * R_3$$

$$\Delta P_{Cu3} = \frac{(200 * 10^6)^2}{(34,5 * 10^3)^2} * (0,012) = 403276,6226 \text{ W}$$

Las pérdidas del cobre en cada bobinado por unidad son:

$$\Delta P_{Cu1} = \frac{113856}{200 * 10^6} = 0,00056928 \text{ pu}$$

$$\Delta P_{Cu2} = \frac{242041,5879}{200 * 10^6} = 0,001210208 \text{ pu}$$

$$\Delta P_{Cu3} = \frac{403276,6226}{200 * 10^6} = 0,002016383 \text{ pu}$$

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{Cu3} = 0,003796 \text{ pu}$$

Del mismo modo, sabiendo la potencia disipada en los bobinados del transformador se puede determinar sus resistencias:

$$R_{12} = \frac{3\Delta P_{Cu1} U_1^2}{S_b^2} = \frac{3 * (113856)(500 * 10^3)^2}{(200 * 10^6)^2} = 2,1348 \Omega$$

$$R_{13} = \frac{3\Delta P_{Cu2} U_2^2}{S_b^2} = \frac{3 * (242041,5879)(500 * 10^3)^2}{(200 * 10^6)^2} = 4,5383 \Omega$$

$$R_{23} = \frac{3\Delta P_{Cu3} U_3^2}{S_b^2} = \frac{3 * (403276,6226)(500 * 10^3)^2}{(200 * 10^6)^2} = 7,5614 \Omega$$

Las reactancias de fuga en delta serán:

$$X_{12} = \sqrt{Z_{12}^2 - R_{12}^2} = \sqrt{(145,125)^2 - (2,1348)^2} = 145,1093 \Omega$$

$$X_{13} = \sqrt{Z_{13}^2 - R_{13}^2} = \sqrt{(335,625)^2 - (4,5383)^2} = 336,5944 \Omega$$

$$X_{23} = \sqrt{Z_{23}^2 - R_{23}^2} = \sqrt{(174)^2 - (7,5614)^2} = 173,8356 \Omega$$

Las reactancias de fuga en por unidad en delta para una base de 600 MVA serán:

$$Z_{base} = \frac{(500 * 10^3)^2}{600 * 10^6} = 416,667 \Omega$$

$$X_{12} = \frac{(145,1093)}{416,667} = 0,3483 \text{ pu}$$

$$X_{13} = \frac{(336,59443)}{416,667} = 0,8078 \text{ pu}$$

$$X_{23} = \frac{(173,8356)}{416,667} = 0,4172 \text{ pu}$$

Tabla 4.12. Parámetros en delta calculados para el Transformador en PSCAD

Parámetro	Valor	Unidades
Potencia nominal	600	MVA
Perdidas en vacío	0,000435	pu
Perdidas del cobre	0,0038	pu
Reactancia del núcleo de aire	1,6156	pu
Voltaje primario	500	KV
Reactancia (#1 - #2)	0,3483	pu
Voltaje secundario	230	KV
Reactancia (#1 - #3)	0,8078	pu
Voltaje terciario	34,5	KV
Reactancia (#2 - #3)	0,4172	pu

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En esta sección se describen los resultados obtenidos en el presente trabajo, evaluando los escenarios presentados en el capítulo anterior. Estos valoran el comportamiento del transformador para cada caso en distintos simuladores: ATPDraw, PSCAD y Simulink.

Para la capacitancia se han seleccionado 3 valores: como se muestra en la sección 4.4.3, debido a que con estos tres valores se identificarán los escenarios de sobretensión y distorsión de la onda. El modelo de la línea se obtendrá de la sección 4.4.2, mientras que el transformador se tiene de la sección 4.4.4, Se considera una Fuente ideal de 500 kV, la frecuencia industrial de 60 Hz. Como circuito base se utilizó el grafico de ATPDraw.

5.1. ANÁLISIS DEL CASO 1

Una vez implementado el sistema e ingresado los valores en el simulador para la configuración del Caso 1 presentada en el capítulo anterior, la simulación se inicia con los tres interruptores ($S1, S2$ y $S3$) cerrados, es decir, el sistema está operando en régimen permanente. Transcurrido un tiempo t de 0.1 segundos se realiza la apertura de la Fase A ($S1$), con un valor de capacitancia ($C1, C2$ y $C3$) de $0,1 \text{ nF}$, luego se aumenta el valor de la capacitancia a $1 \text{ }\mu\text{F}$ y se repite el proceso, finalmente se realiza la apertura de la fase con un valor de capacitancia de $0,005 \text{ mF}$.

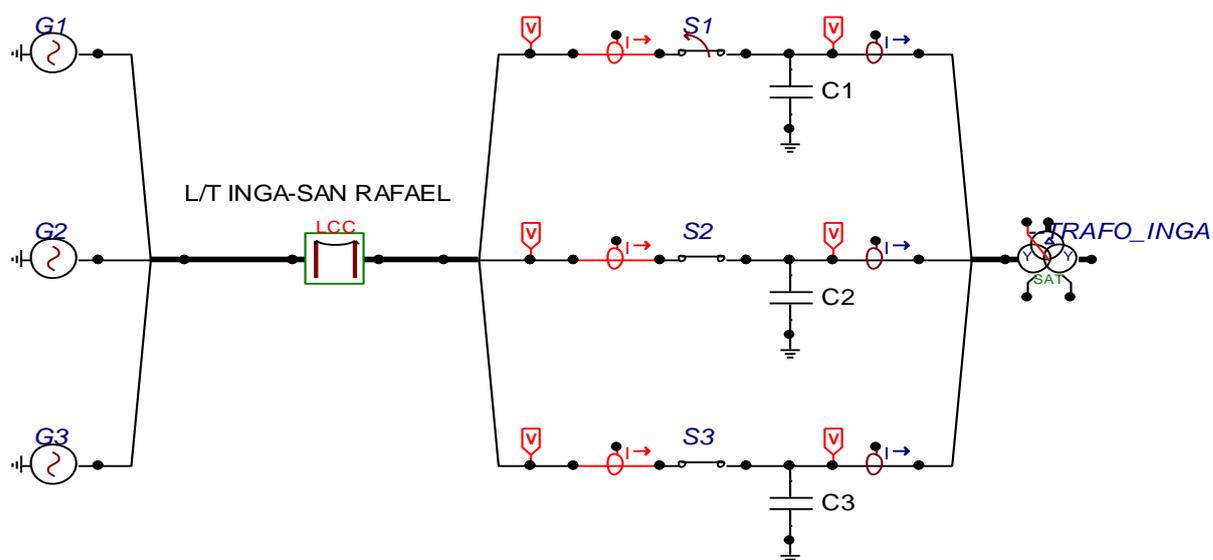
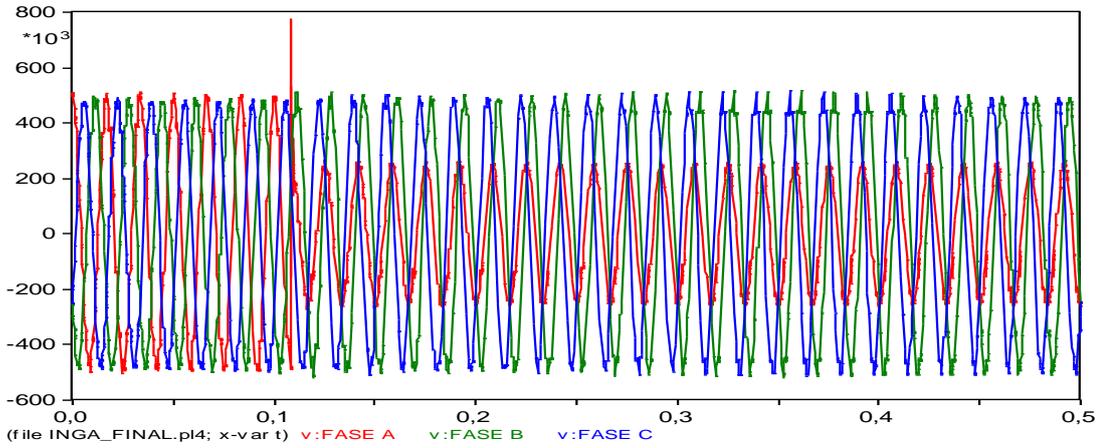
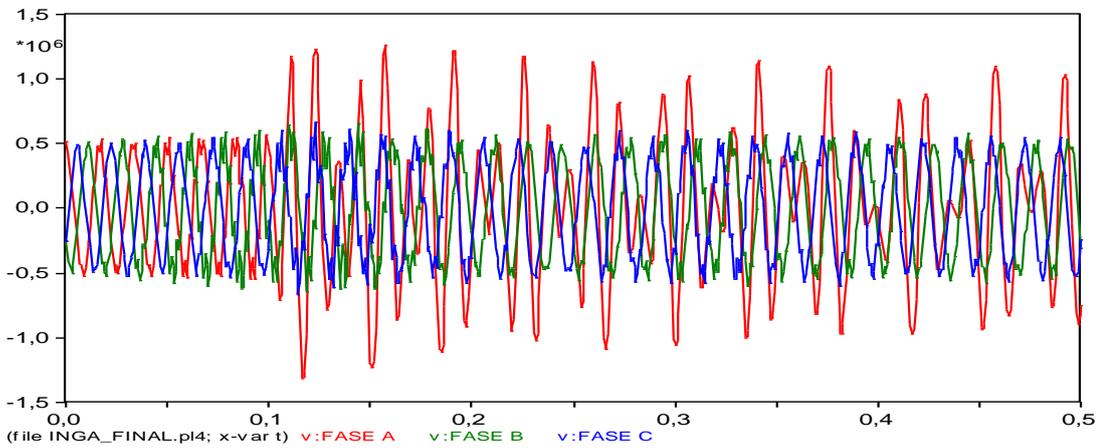


Figura 5.1. Diagrama implementado en ATPDraw para el Caso 1.

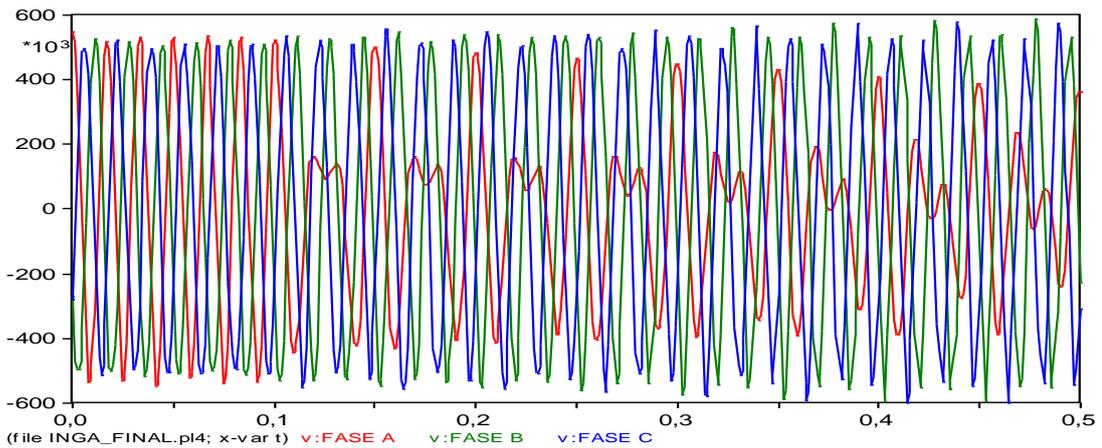
5.1.1. Resultados en el software ATPDraw (una fase abierta – Y/y/d)



(a) Capacitancia de $0,1 \text{ nF}$



(b) Capacitancia de $1 \mu F$



(c) Capacitancia de $0,005 \text{ mF}$

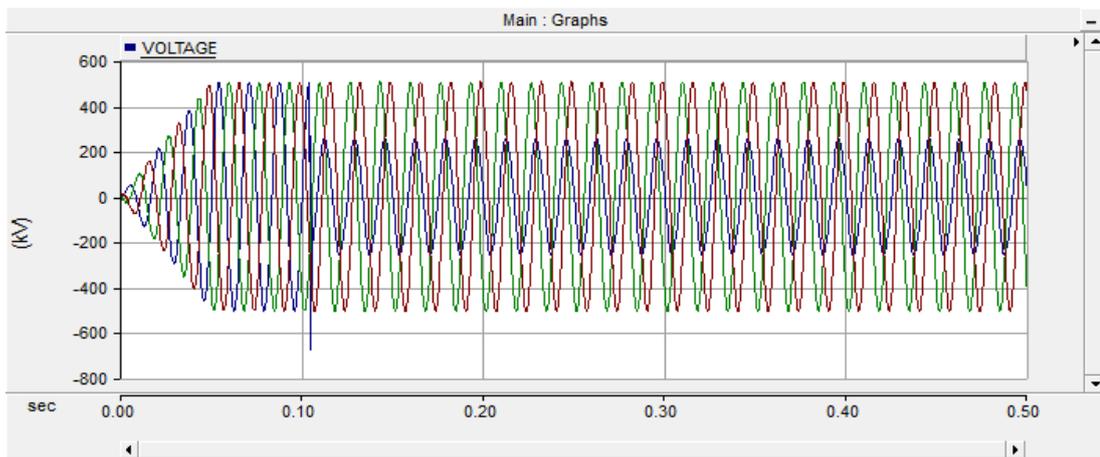
Figura 5.2. Resultados de ATPDraw - Caso 1

El resultado obtenido en ATPDraw se muestra en la **Figura 5.2 (a)** para un valor de $0,1 \text{ nF}$ en el banco de condensadores, en el instante que la fase interrumpida se abre en 0.1 segundos, existe un pico de sobretensión con un valor de 775.24 kV , y seguidamente su voltaje se reduce en la fase abierta, mas no presenta distorsiones en la forma de onda.

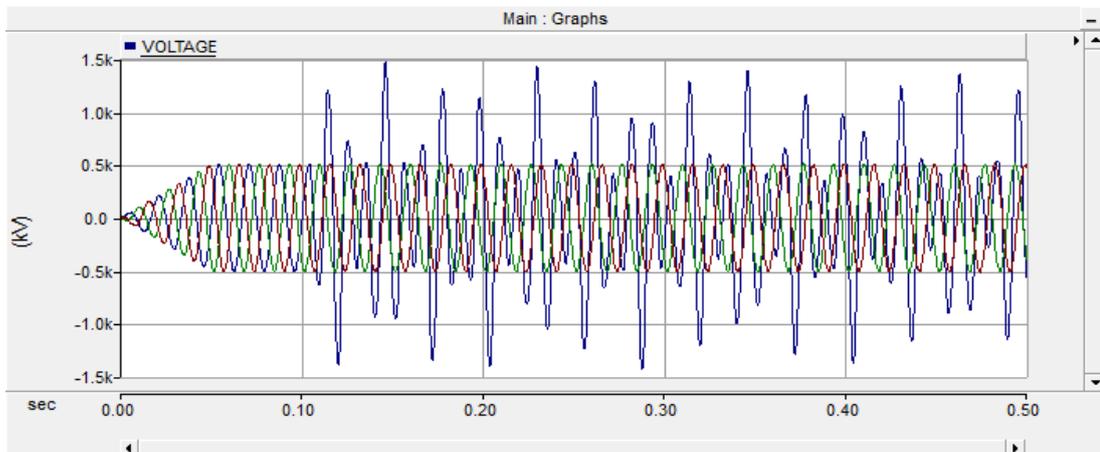
Luego de elevar el valor de la capacitancia a $1 \mu\text{F}$, se presenta un abrupto cambio en los picos de la tensión de 1315.90 kV en el pico más alto en la fase abierta como se muestra en la **Figura 5.2 (b)**, la sobretensión y distorsión presentadas es uno de los síntomas característicos más frecuentes ante la manifestación de la ferresonancia.

Por su parte, para un valor de capacitancia de $0,005 \text{ mF}$, se presenta una considerable distorsión de las ondas que se mantienen periódicas a lo largo del tiempo y que se encuentran dentro del rango de 551.21 kV como se observa en la **Figura 5.2 (c)**.

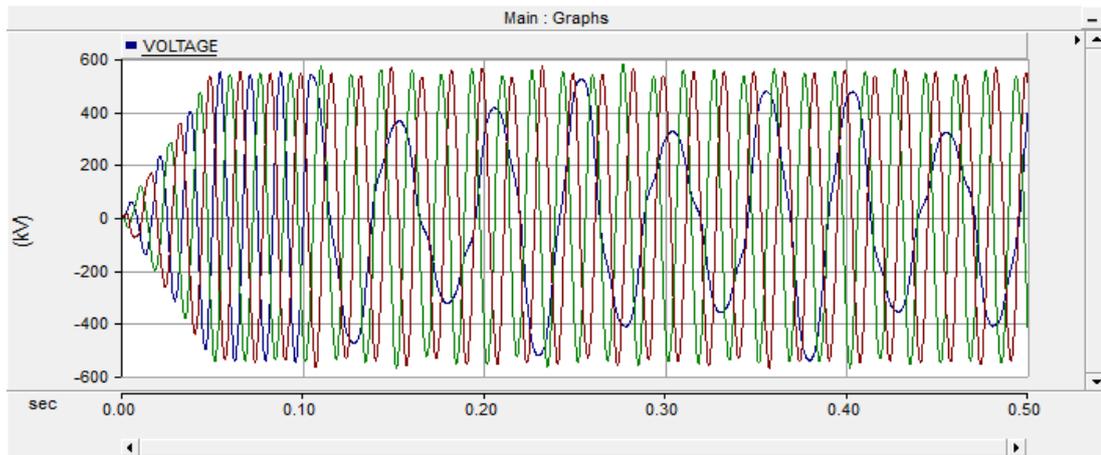
5.1.2. Resultados en el software PSCAD (una fase abierta – Y/y/d)



(a) Capacitancia de $0,1 \text{ nF}$



(b) Capacitancia de $1 \mu\text{F}$



(c) Capacitancia de 0,005 mF

Figura 5.3. Resultados de PSCAD - Caso 1

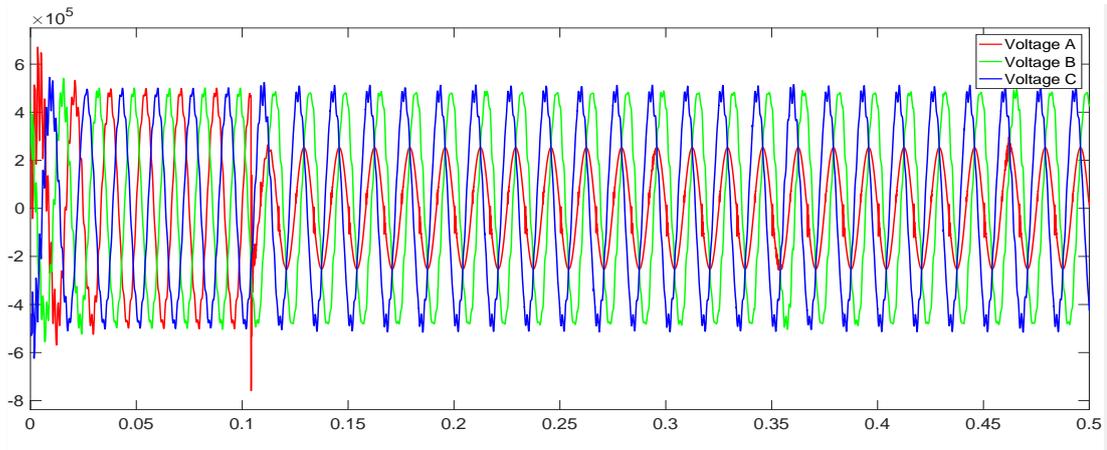
Análisis

En el caso del software PSCAD el resultado de la simulación se muestra en la **Figura 5.3 (a)**, se puede apreciar un comportamiento parecido al simulador ATPDraw, una de las diferencias es el pico de tensión originado después de la apertura del interruptor en la Fase A, debido a que su amplitud es menor, llegando a un valor de 674,25 kV, mas no presenta condiciones de ferresonancia.

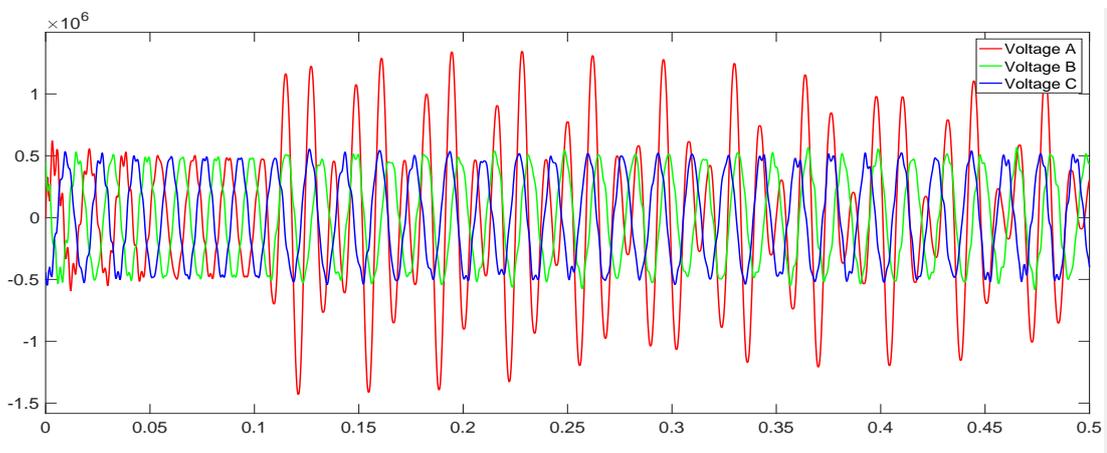
Por otro lado, al incrementar el valor de capacitancia a 1 μf como es el caso de la **Figura 5.3 (b)**, se evidencia que la tensión se eleva considerablemente llegando a presentar picos elevados de sobretensión con un valor de 1465,45 kV.

En la **Figura 5.3 (c)** para un valor de una capacitancia de 0,005 mF , tanto en ATPDraw como en Simulink, se presenta una considerable distorsión en la forma de onda de voltaje, a diferencia de la respuesta de PSCAD, donde la respuesta presenta una forma de onda más sinusoidal con un valor promedio de 550.09 kV.

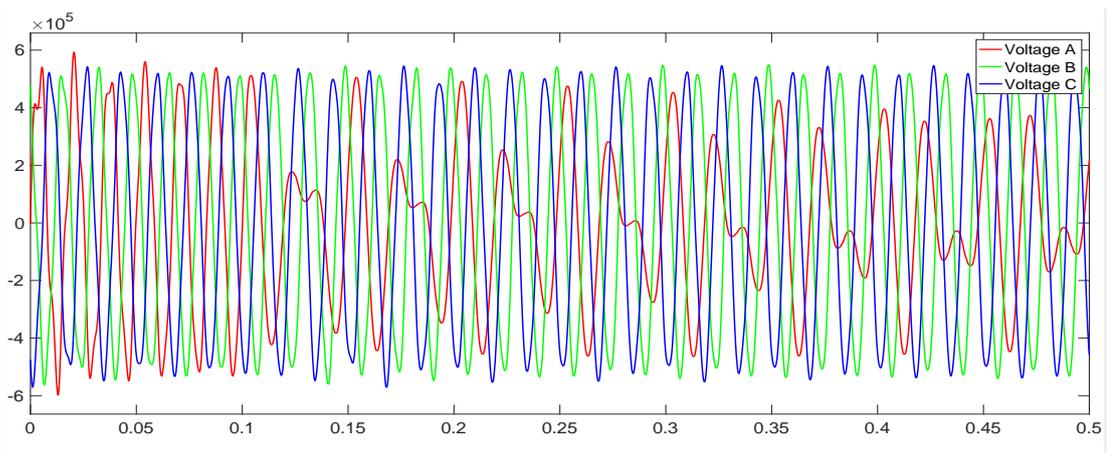
5.1.3. Resultados en el software Simulink (una fase abierta – Y/y/d)



(a) Capacitancia de 0,1 nF



(b) Capacitancia de 1 μF



(c) Capacitancia de 0,005 mF

Figura 5.4. Resultados de Simulink - Caso 1

El análisis del software Simulink se deriva de la respuesta en la **Figura 5.4 (a)**, donde presenta una respuesta muy semejante a los otros simuladores, el pico de tensión tiene un valor pico de 777.23 kV, que aparece luego de la apertura del interruptor en la Fase A, en los tres simuladores no se muestran condiciones de ferresonancia.

Conforme aumenta el valor de la capacitancia a 1 μF se presentan sobretensiones como las que se exponen en la **Figura 5.4 (b)**, siendo estos valores de 1350.17 kV.

Cuando el valor de capacitancia es de 0,005 mF , la respuesta obtenida muestra una distorsión de la onda, que se mantiene en régimen casi-periódico, como se puede ver en la **Figura 5.4 (c)** con un valor promedio de 554.26 kV.

Tabla 5.1. Errores presentados entre los distintos simuladores – Caso 1.

Valor	Voltaje en kV			Comparación ATPDraw- PSCAD Error 1	Comparación ATPDraw- Simulink Error 2
	ATPDraw	PSCAD	Simulink		
0,1 <i>nf</i>	775,24	674,25	777,23	-13,03	0,26
1 μf	1315,90	1465,45	1350,17	11,36	2,60
0,005 <i>mf</i>	551,21	550,09	554,26	-0,20	0,55
Error promedio				8,20	1,14

5.2. ANÁLISIS DEL CASO 2

Una vez configurado el sistema de acuerdo a las especificaciones del Caso 2, se realiza el análisis cuando el sistema esta con los tres interruptores ($S1, S2$ y $S3$) cerrados, es decir, el sistema está operando en régimen permanente, transcurrido un tiempo t de 0.1 segundos se realiza la apertura de los interruptores ($S2$ y $S3$) y el valor del banco de capacitores inicia con de 0,1 nF , luego se aumenta el valor de la capacitancia a 0.1 μF y finalmente a 0,005 mF , los resultados en estas condiciones se presentan a continuación:

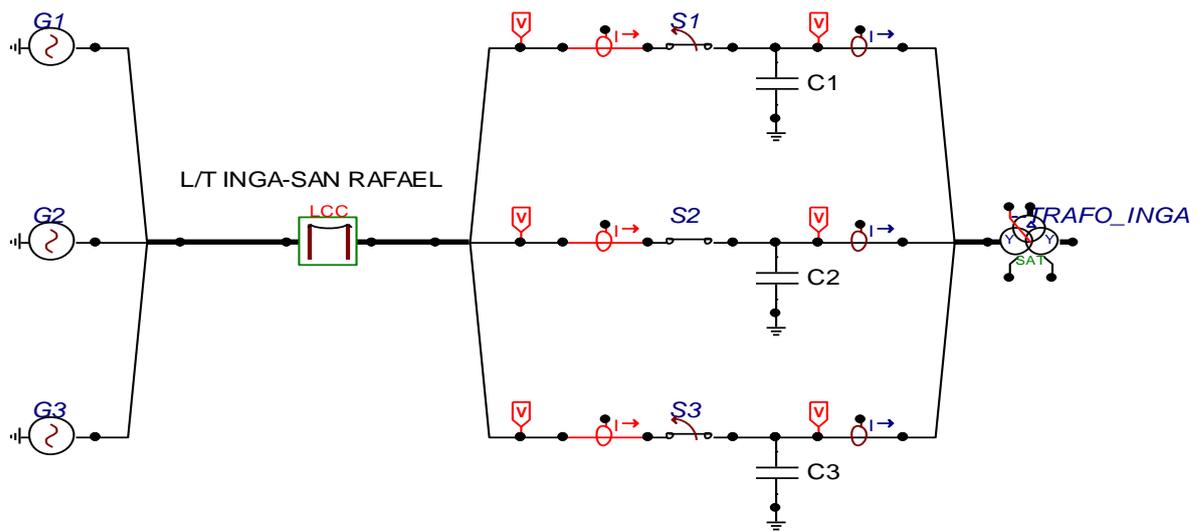
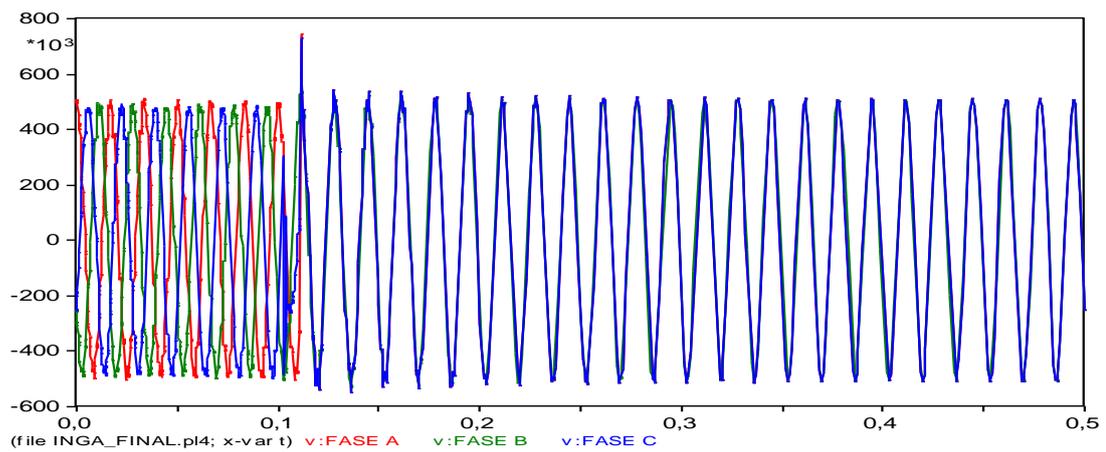
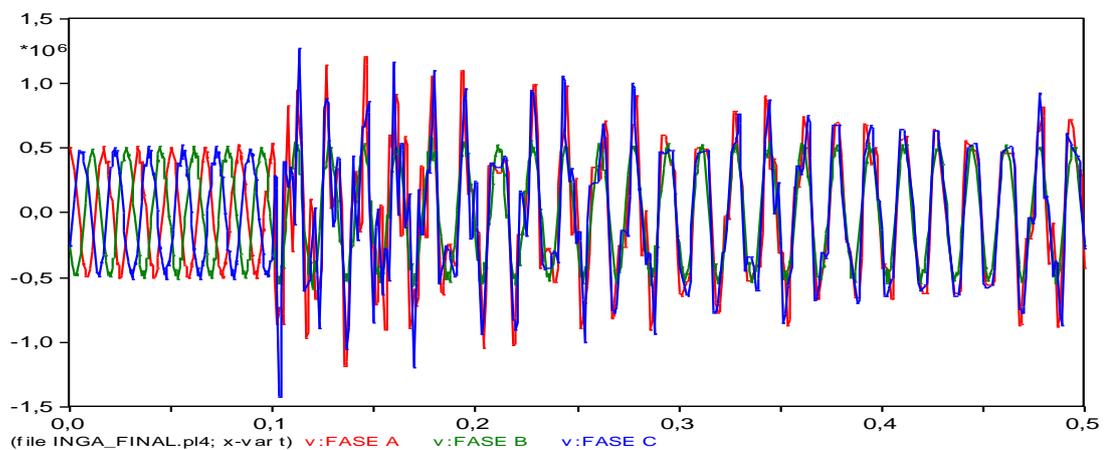


Figura 5.5. Diagrama implementado en ATPDraw para el Caso 2.

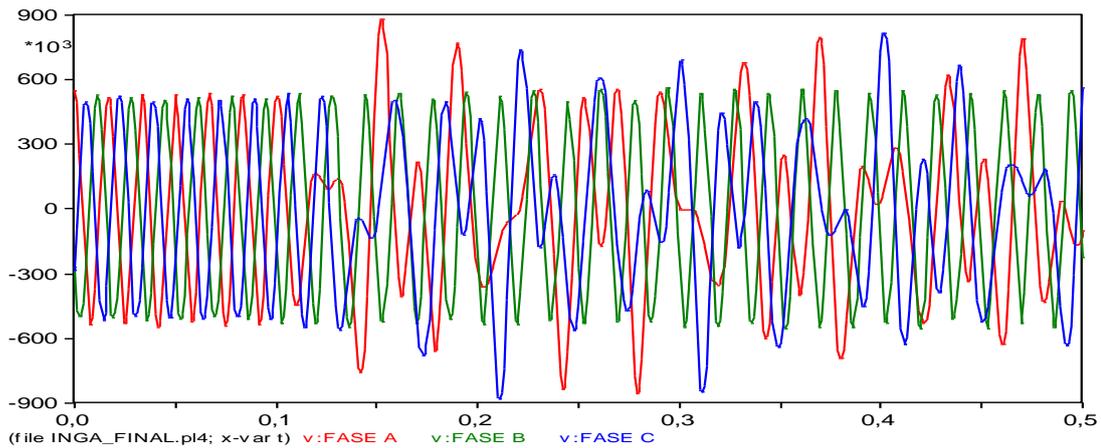
5.2.1. Resultados en el software ATPDraw (dos fases abiertas– Y/y/d)



(a) Capacitancia de 0,1 nF



(b) Capacitancia de 0,1 μF



(c) Capacitancia de 0,005 mF

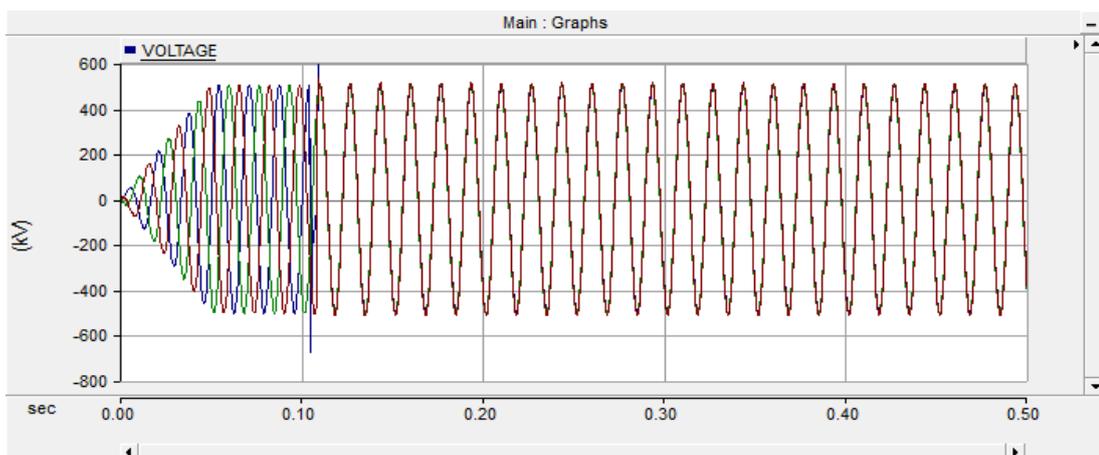
Figura 5.6. Resultados de ATPDraw - Caso 2

En la **Figura 5.6 (a)** luego de la apertura de los interruptores de las fases A y C, se produce un pico de tensión similar al caso con una fase abierta, el valor del pico es igual a 743.14 kV, posteriormente las 3 tensiones igualan su periodo de oscilación.

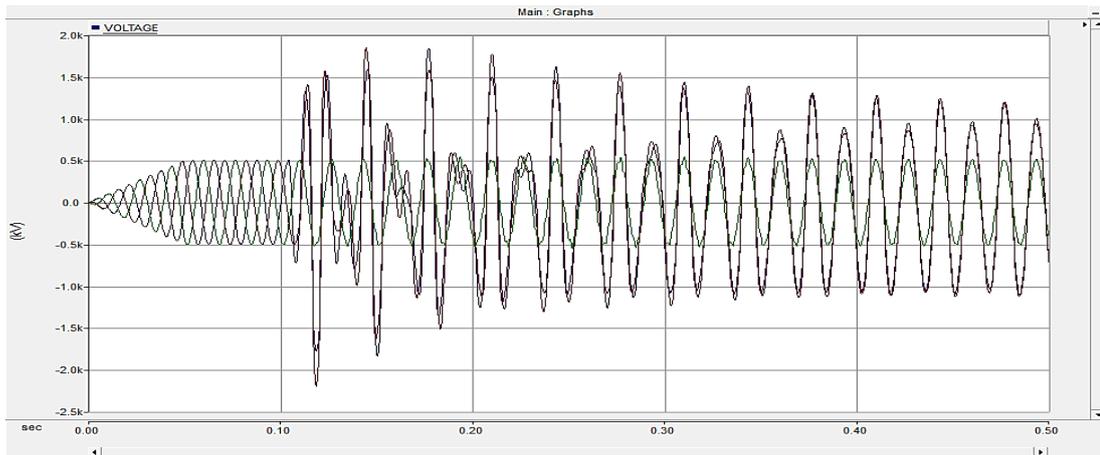
En la **Figura 5.6 (b)** la amplitud del pico más elevado de la sobretensión se eleva a un valor de 1427.30 kV luego de la apertura de las fases, presentando una distorsión de onda mayores que en el caso anterior, iniciando en forma caótica que posteriormente se amortiguan igualando su periodo de oscilación en un tiempo de 0,3 segundos aproximadamente.

En la **Figura 5.6 (c)** las sobretensiones tienen una distorsión de onda con un comportamiento casi-periódico en el instante de la apertura de la fase, con un valor promedio que llega a los 738.67 kV

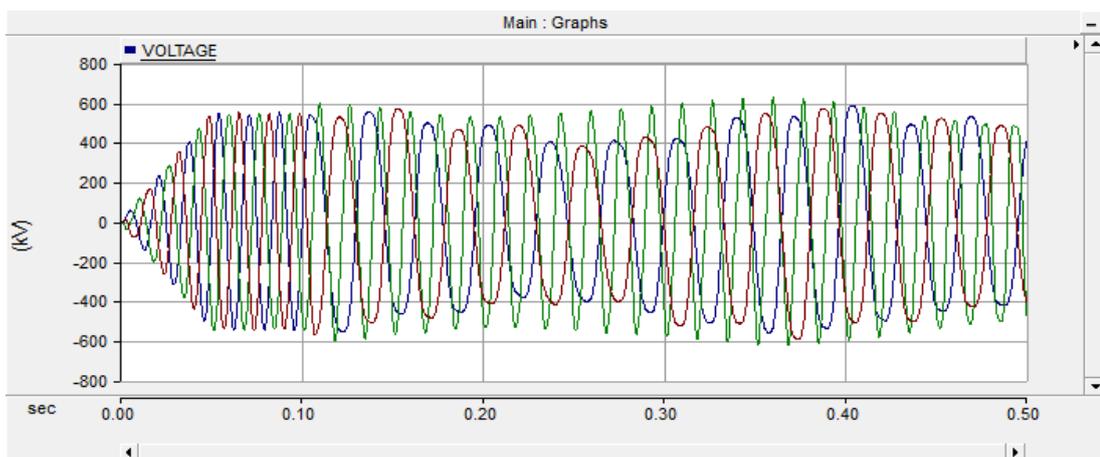
5.2.2. Resultados en el software PSCAD (dos fases abiertas– Y/y/d)



(a) Capacitancia de 0,1 nF



(b) Capacitancia de $0.1 \mu F$



(c) Capacitancia de $0,005 mF$

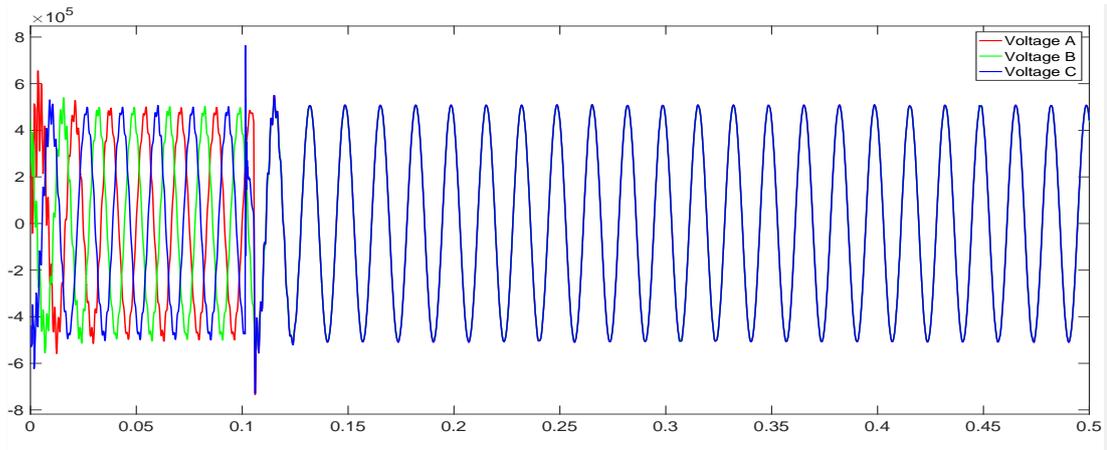
Figura 5.7. Resultados de PSCAD - Caso 2

Con un valor de capacitancia de $0,1 nF$, se observa que luego de la apertura de los interruptores se produce un pico de tensión con un valor de $674.48 kV$ y posteriormente igualan su periodo de oscilación, manteniéndose constantes en amplitud y forma como se puede ver en la **Figura 5.7 (a)**.

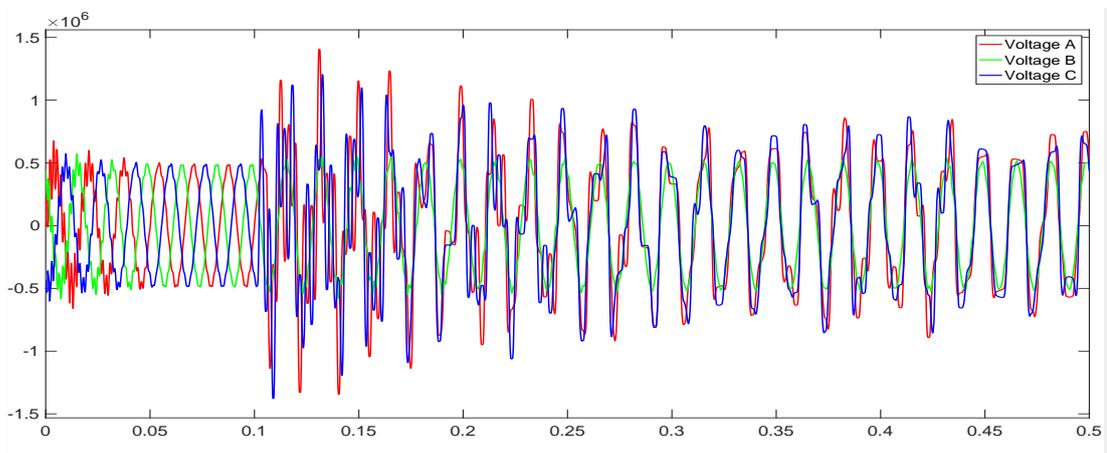
Los mayores picos de tensión y deformaciones de la onda se producen al aumentar el valor de la capacitancia a $0.1 \mu F$, como se puede observar en la **Figura 5.7 (b)**.

Para un valor de $0,005 mF$, se obtiene una respuesta con variaciones en el periodo de oscilación en las fases abiertas y pequeñas sobretensiones que crecen y decrecen a medida que transcurre el tiempo, manteniéndose en un valor promedio de $628.89 kV$, como se muestra en la **Figura 5.7 (c)**.

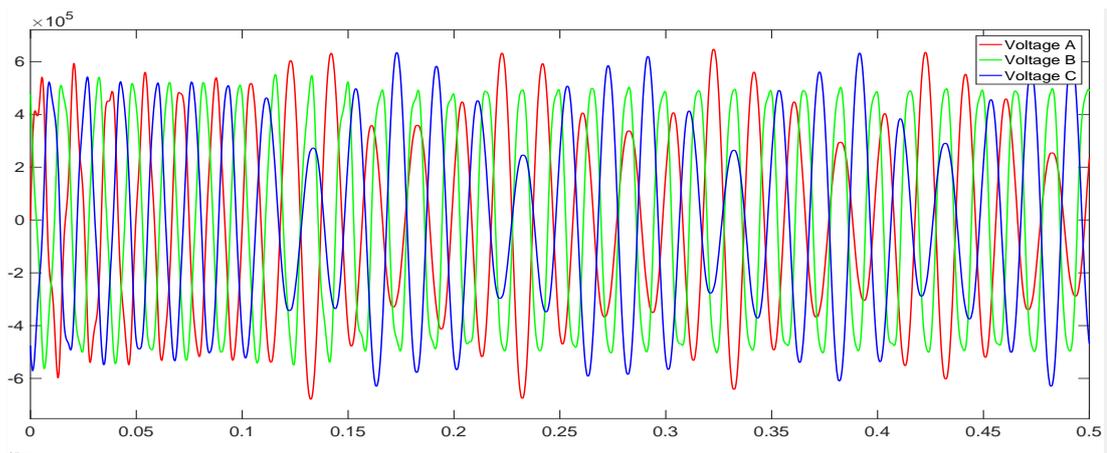
5.2.3. Resultados en el software Simulink (dos fases abiertas – Y/y/d)



(a) Capacitancia de $0,1 \text{ nF}$



(b) Capacitancia de $0,1 \mu F$



(c) Capacitancia de $0,005 \text{ mF}$

Figura 5.8. Resultados de Simulink - Caso 2

En la **Figura 5.8 (a)** se visualiza un comportamiento similar al presentado en ATPDraw y PSCAD, donde luego de la apertura de los interruptores se produce un pico de tensión que alcanza los 763.65 kV y posteriormente igualan su periodo de oscilación, sin presentar sobretensiones.

Luego de aumentar el valor de la capacitancia a 0.1 μF , en la **Figura 5.8 (b)** se observa como la tensión presenta formas de onda con picos de tensión elevados que tiene un valor máximo de 1404.41 kV y posteriormente su comportamiento es similar al de ATPDraw.

Con un valor de capacitancia de 0.005 mF luego de la apertura de las fases, se obtuvo una distorsión de las ondas en las fases abiertas, las sobretensiones son menores a comparación de ATPDraw con un valor promedio de tensión de 635.15 kV y teniendo una oscilación casi-periódica en las fases abiertas como se aprecia en la **Figura 5.8 (c)**.

Tabla 5.2. Errores presentados entre los distintos simuladores – Caso 2.

Valor	Voltaje en kV			Comparación ATPDraw- PSCAD Error 1	Comparación ATPDraw- Simulink Error 2
	ATPDraw	PSCAD	Simulink		
0.1 <i>nf</i>	743,14	674,27	763,65	-9,24	2,76
0.1 <i>uf</i>	1427,30	1851,84	1404,41	29,72	-1,60
0.005 <i>mf</i>	738,67	628,89	635,15	-14,86	-14,01
Error promedio				17,94	6,13

5.3. ANÁLISIS DEL CASO 3

Para el análisis del siguiente caso se considera que el sistema está aterrizado en el devanado primario, con la finalidad de estimar los cambios producidos en el sistema al encontrarse conectado de esta forma, de igual manera que el Caso 1, se utiliza los mismos valores de capacitancia y tiempo de apertura, para este caso la apertura se la realiza en la fase A(S1).

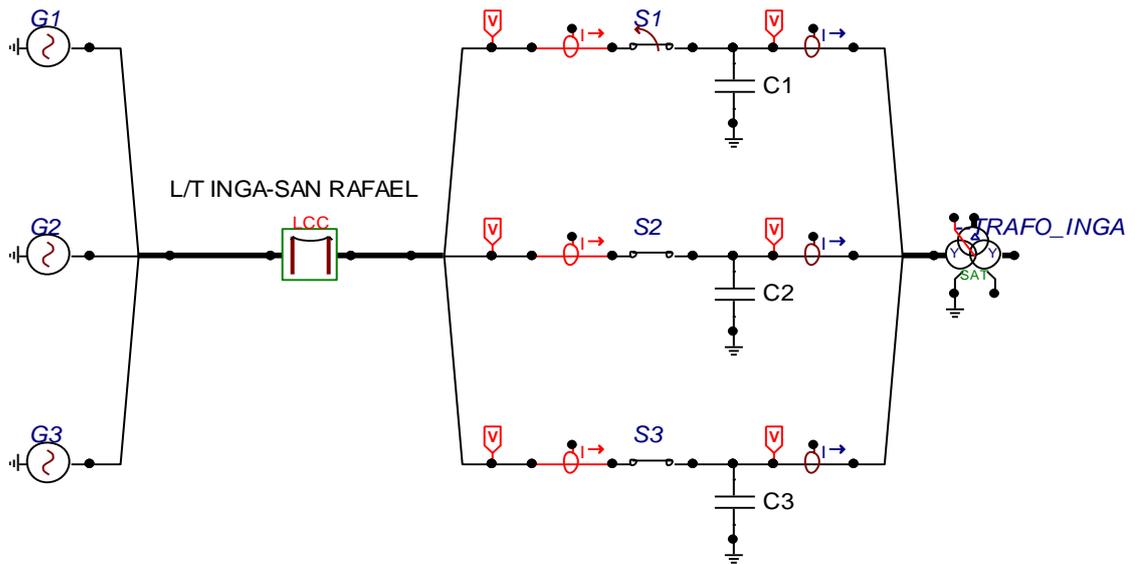
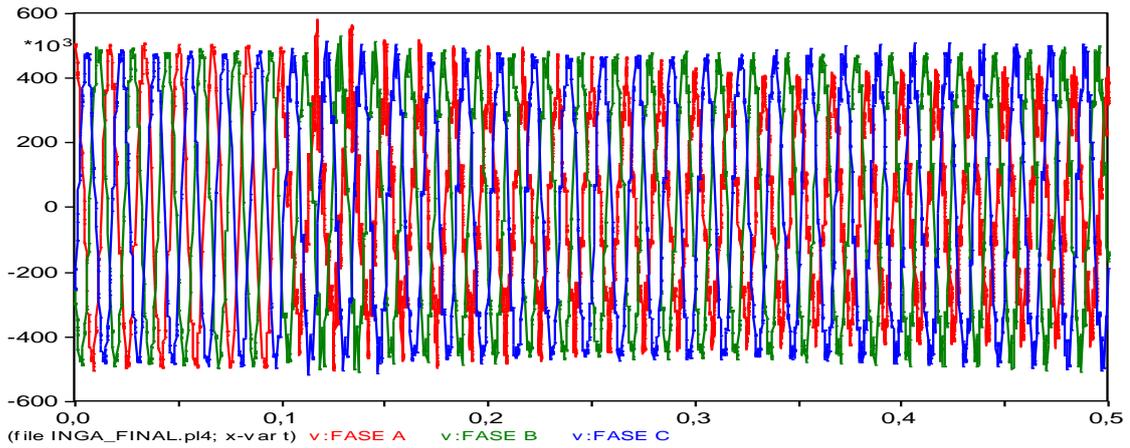
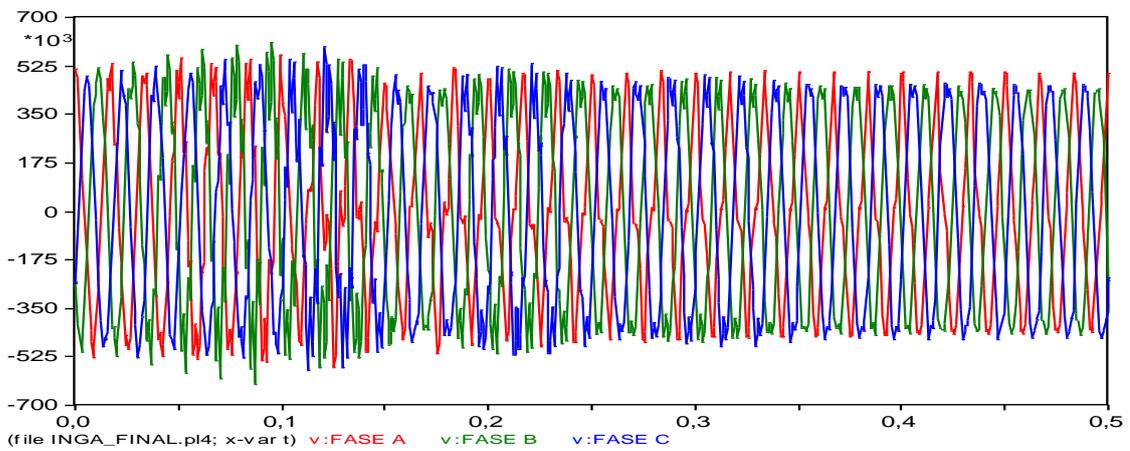


Figura 5.9. Diagrama implementado en ATPDraw para el Caso 3

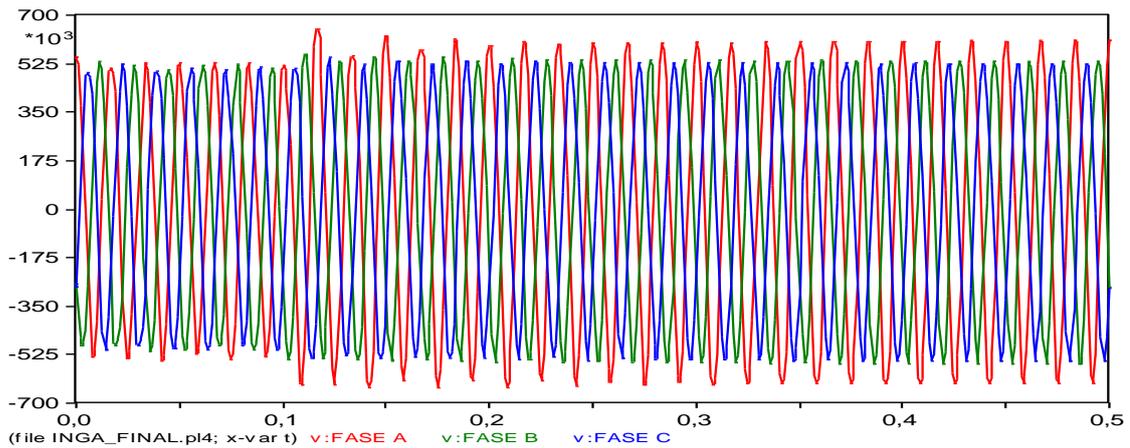
5.3.1. Resultados en el software ATPDraw (una fase abierta – $Y_g/y/d$)



(a) Capacitancia de $0,1 \text{ nF}$



(b) Capacitancia de $1 \mu F$



(c) Capacitancia de 0,005 mF

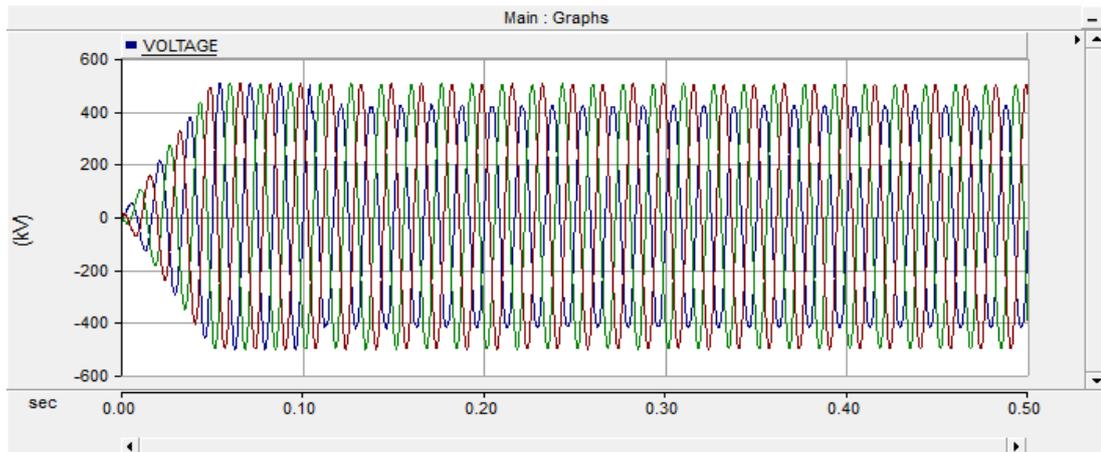
Figura 5.10. Resultados de ATPDraw - Caso 3

Con la implementación de este escenario se puede constatar que, al aterrizar el transformador, se produce una variación significativa respecto a la condición presentada en el caso uno, se logra observar, que para un valor de capacitancia de 0,1 nF, el pico de tensión presentado en la configuración sin aterrizar, se reduce a un valor pico de 582.14 kV y las tensiones tienden a igualar su amplitud como se muestra en la **Figura 5.10 (a)**.

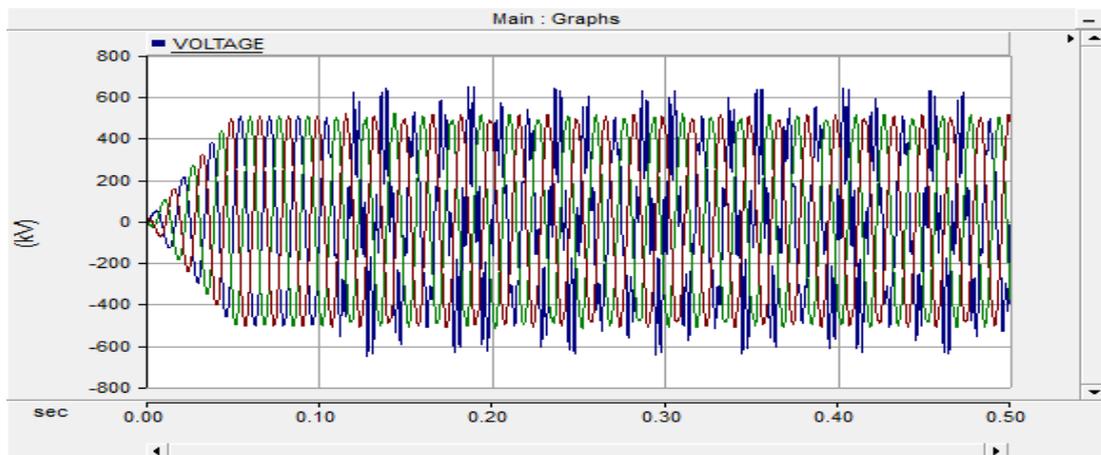
Cuando en el sistema se cambia el valor del banco de condensadores por un valor de 1 μF se presenta una respuesta como la que se detalla en la **Figura 5.10 (b)**, la cual tiene un valor promedio de 591.39 kV y distorsión de las formas de onda, manteniendo su amplitud cercanos a los valores nominales.

Para el caso de la **Figura 5.10 (c)** se observa que desaparece la distorsión de onda presentada en la fase abierta producida en el caso sin aterrizar, manteniendo unos pequeños picos de voltaje con un valor promedio de 649.58 kV y su forma de onda es más sinusoidal.

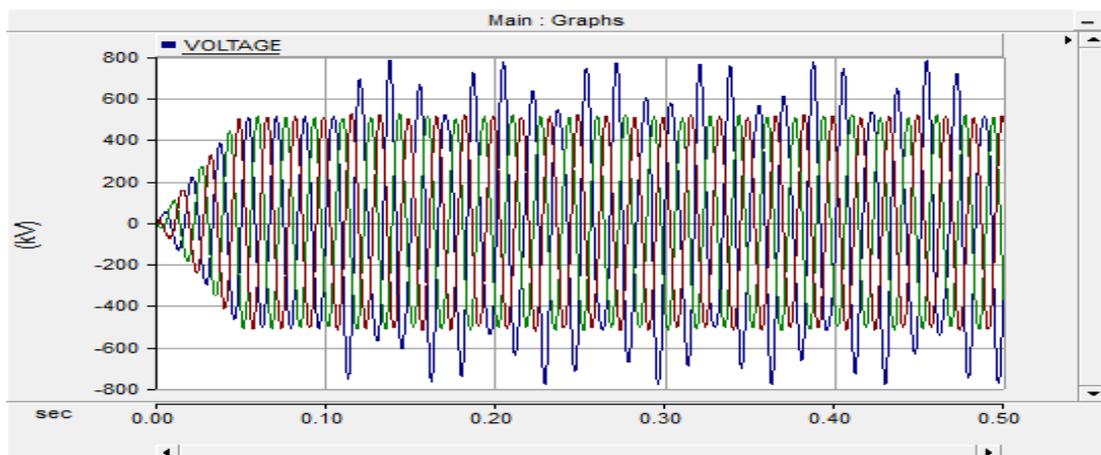
5.3.2. Resultados en el software PSCAD (una fase abierta – Yg/y/d)



(a) Capacitancia de $0,1 \text{ nF}$



(b) Capacitancia de $1 \mu\text{F}$



(c) Capacitancia de $0,005 \text{ mF}$

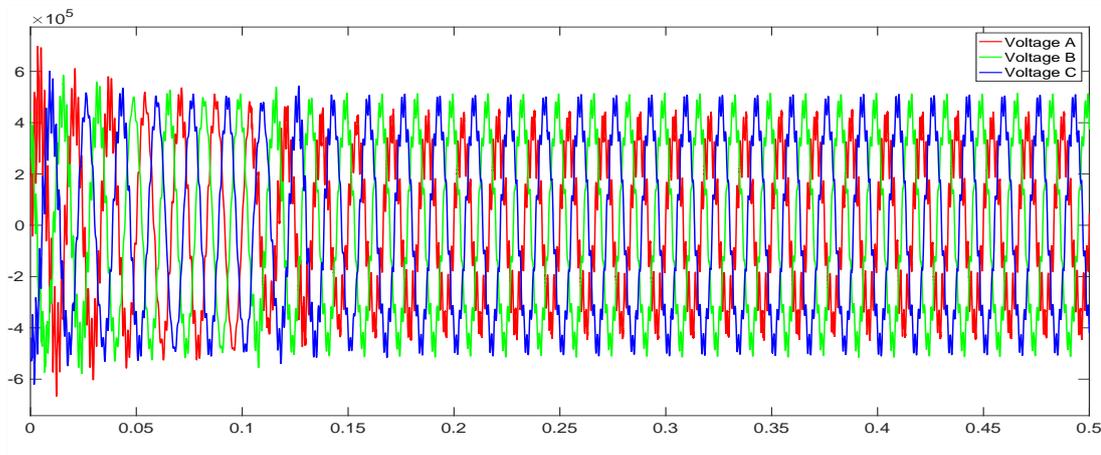
Figura 5.11. Resultados de PSCAD - Caso 3

La respuesta obtenida en PSCAD para este caso no difiere de la respuesta presentada en los demás simuladores, con la diferencia que las formas de onda tienen menor distorsión y su valor del mismo modo se reduce a 504,78 kV, como la que se muestra en la **Figura 5.11 (a)**.

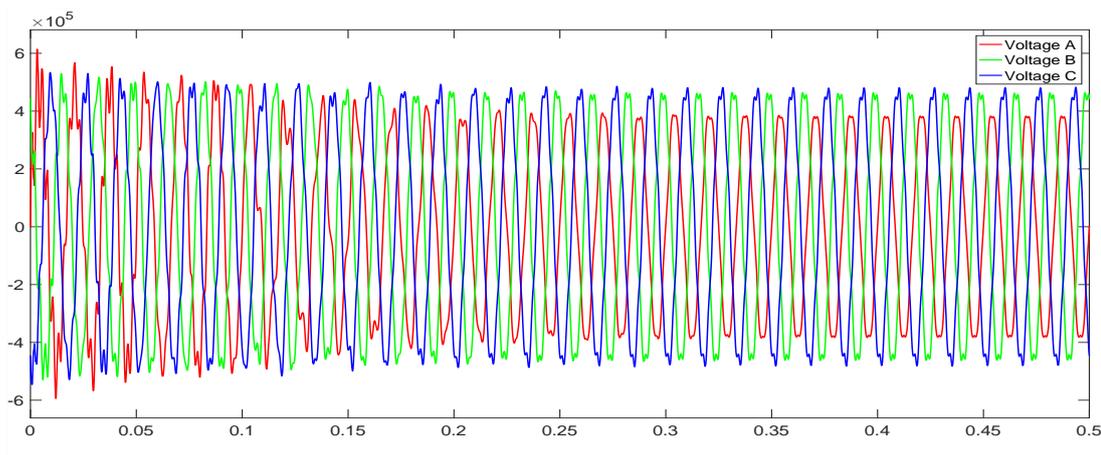
Con la prueba realizada para el valor de $1 \mu F$, la respuesta obtenida presenta una amortiguación menor, los picos de tensión alcanzan un valor de 642,5 kV.

En la **Figura 5.11 (c)** se observa del mismo modo sobretensiones, que alcanzan un valor de 665,67 kV, presentando una diferencia entre los resultados de los demás simuladores, que se atribuye al transformador utilizado y su ajuste de saturación.

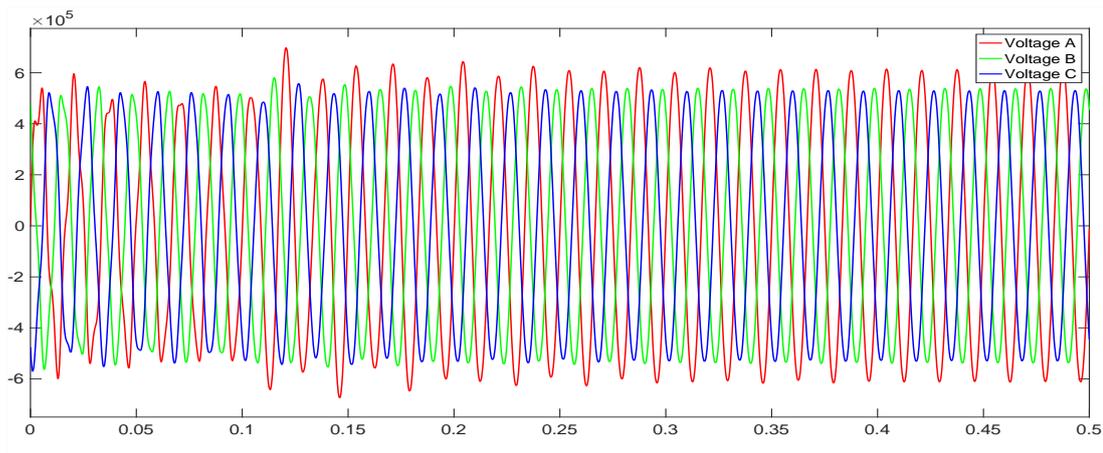
5.3.3. Resultados en el software Simulink (una fase abierta – Yg/y/d)



(a) Capacitancia de $0,1 \text{ nF}$



(b) Capacitancia de $1 \mu F$



(c) Capacitancia de 0,005 mF

Figura 5.12. Resultados de Simulink - Caso 3

Del mismo modo que ATPDraw y PSCAD, las respuestas obtenidas en Simulink muestran un comportamiento similar como se aprecia en la **Figura 5.12 (a)**, se puede notar como la fase abierta tiende a igualar a las fases en operación, teniendo una forma de onda muy irregular y alcanzando un valor promedio de 543.01 kV.

Cuando se eleva más el valor de la capacitancia a 1 μF se obtiene la respuesta que se muestra en la **Figura 5.12 (b)**, se observa una reducción de los picos de tensión llegando a un valor promedio de 496.99 kV.

En la **Figura 5.12 (c)** se aprecia una onda más sinusoidal, donde prácticamente han desaparecido los armónicos, y presenta pequeñas sobretensiones que alcanzan el valor promedio de 703.52 kV después que la fase A se interrumpió.

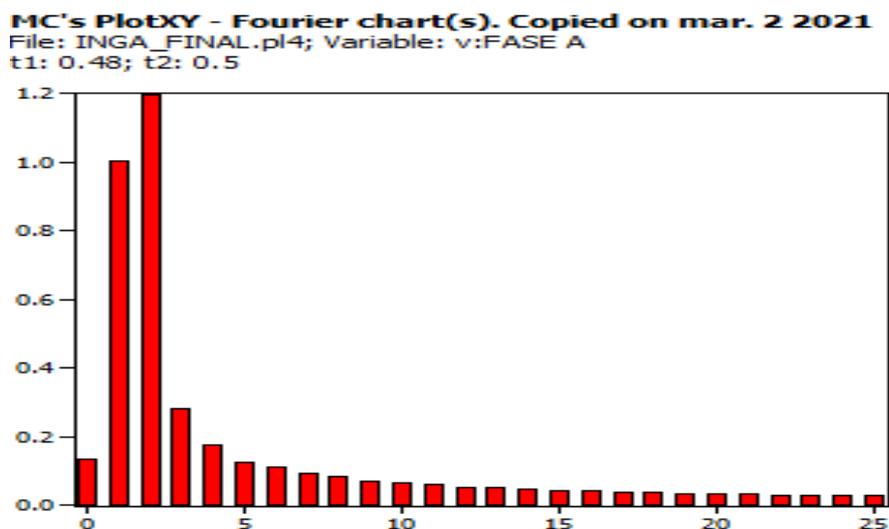
Tabla 5.3. Errores presentados entre los distintos simuladores – Caso 3.

Valor	Voltaje en kV			Comparación ATPDraw- PSCAD Error 1	Comparación ATPDraw- Simulink Error 2
	ATPDraw	PSCAD	Simulink		
0,1 <i>nf</i>	582,14	504,78	543,01	-13,29	-6,72
1 μf	591,39	642,5	496,99	8,64	-15,96
0,005 <i>mf</i>	649,58	665,67	703,52	2,48	8,30
Error promedio				11,43	10,33

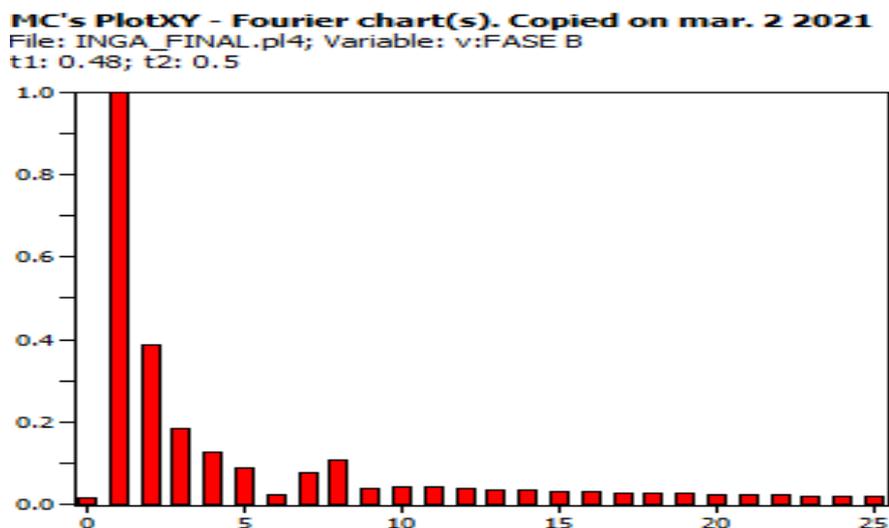
5.4. ANÁLISIS DE ARMÓNICO DEL SISTEMA FERRORESONANTE.

A continuación, se presenta el análisis del espectro armónico de voltaje para los casos en los cuales se presenta ferresonancia y se analiza las armónicas que se producen en el sistema, para lo cual se utiliza como base el programa ATPDraw, los datos se analizan de manera independiente, debido a que el programa realiza el cálculo de Fourier en cada fase.

5.4.1. CASO 1: Sistema con una fase abierta (S1), banco de capacitores de 1 μf .

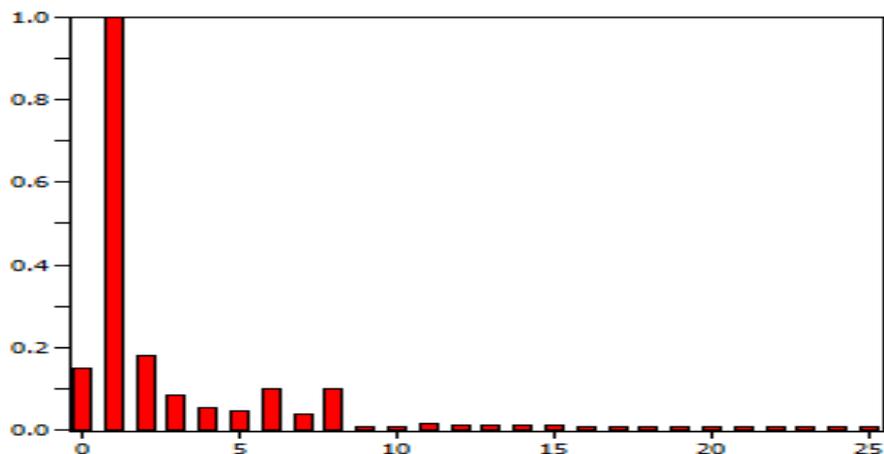


a) Espectro armónico fase A.



b) Espectro armónico fase B.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copied on mar. 2 2021
 File: INGA_FINAL.pl4; Variable: v:FASE C
 t1: 0.48; t2: 0.5



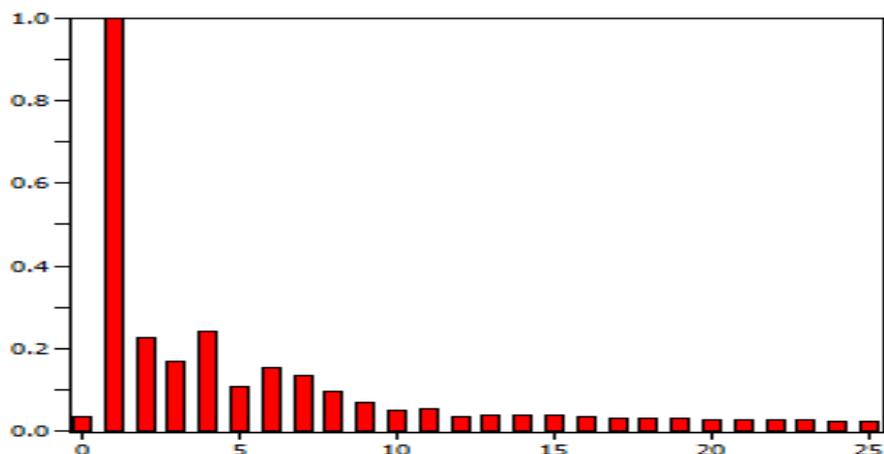
c) Espectro armónico fase C.

Figura 5.13. Armónicos presentes para condiciones del Caso 1.

Como se observa en la **Figura 5.13 (a)**, el segundo armónico es predominante debido a la interrupción de la fase A, la cual produce un desequilibrio del sistema y esto conlleva a la aparición de armónicos pares, con respecto a la **Figura 5.13 (b y c)**, el armónico predominante es el fundamental, del mismo modo que la **Figura 5.13 (a)**, existe la presencia de armónicos pares e impares en proporciones decrecientes, con la ligera diferencia que en la **Figura 5.13 (c)** desde el noveno armónico ay una disminución notoria de la amplitud de los armónicos.

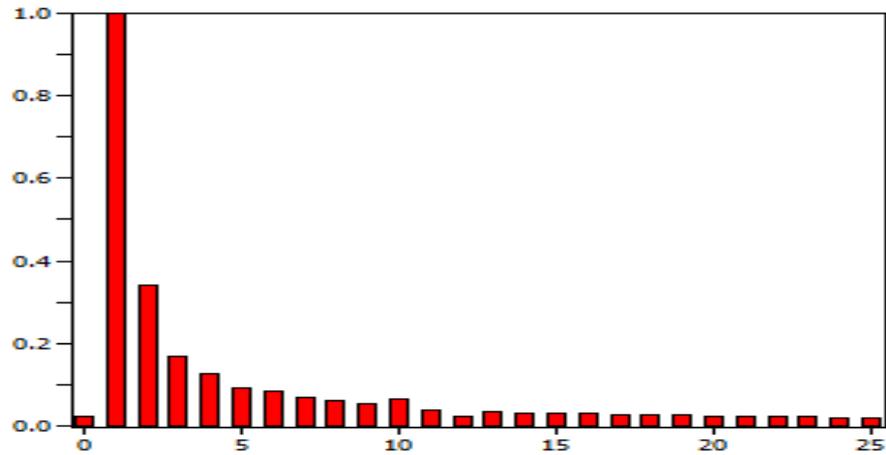
5.4.2. CASO 2: Sistema con dos fases abiertas (S1, S3), banco de capacitores de 0.1 uf.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copied on mar. 2 2021
 File: INGA_FINAL.pl4; Variable: v:FASE A
 t1: 0.48; t2: 0.5



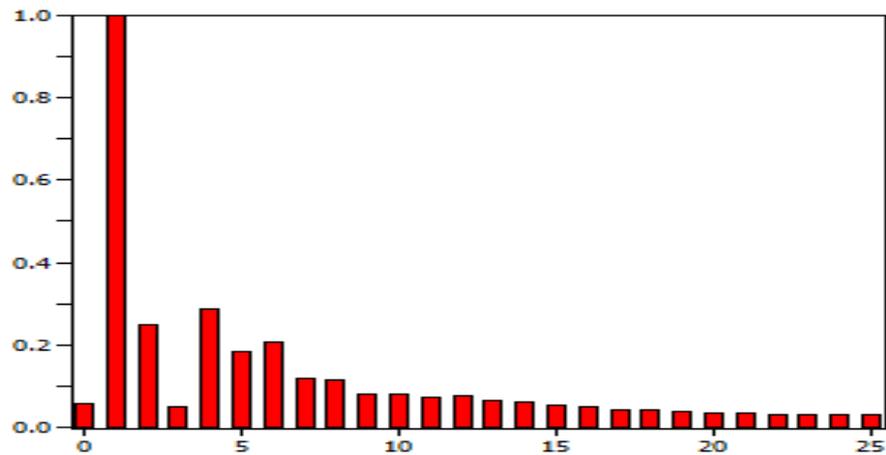
a) Espectro armónico fase A.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copied on mar. 2 2021
 File: INGA_FINAL.pl4; Variable: v:FASE B
 t1: 0.48; t2: 0.5



b) Espectro armónico fase A.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copied on mar. 2 2021
 File: INGA_FINAL.pl4; Variable: v:FASE C
 t1: 0.48; t2: 0.5



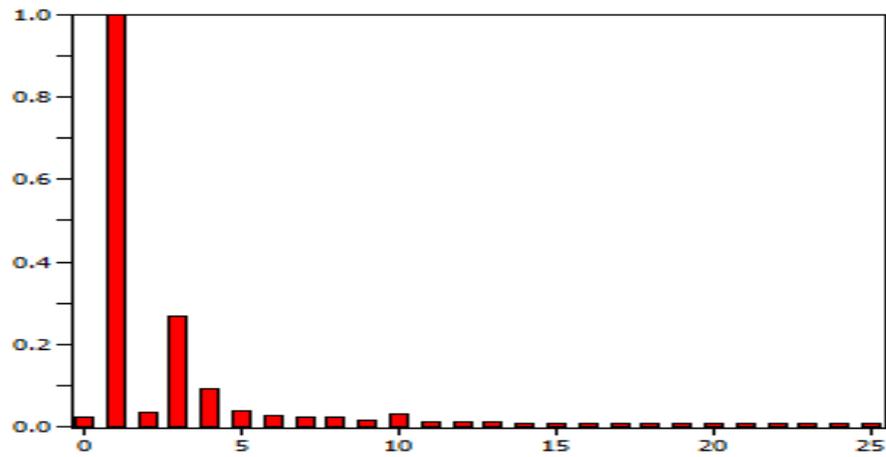
c) Espectro armónico fase A.

Figura 5.14. Armónicos presentes en la fase C para condiciones del caso 2.

Para el caso dos, con la apertura de las dos fases ($S1$ y $S2$), el desbalance del sistema es más evidente, lo cual conlleva a que las armónicas de orden par tengan una mayor ponderación con respecto a las armónicas de orden impar, que se evidencia en **Figura 5.14 (a y c)**, del mismo modo en el sistema se observa la presencia de distorsiones, ocasionadas por los armónicos de orden impar presentes en el sistema eléctrico.

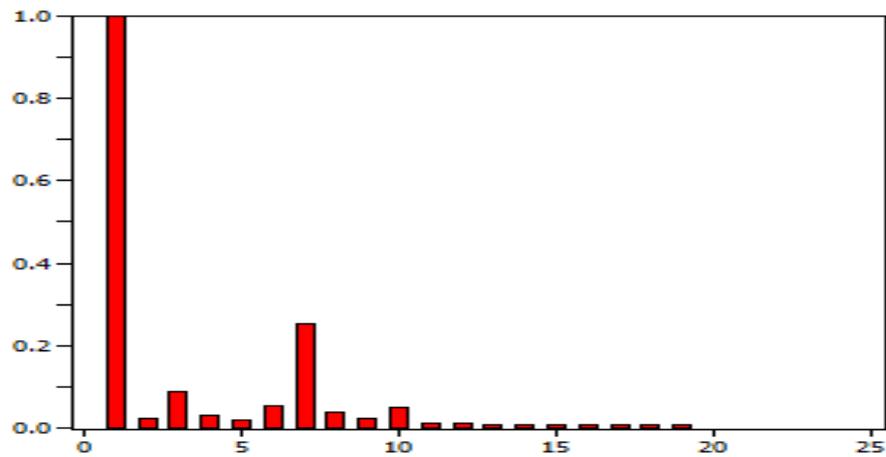
5.4.3. CASO 3: Sistema con una fase abierta (S1), banco de capacitores de $1\mu f$, con el devanado primario del transformador aterrizado.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copied on mar. 3 2021
File: INGA_FINAL.pl4; Variable: v:FASE A
t1: 0.1; t2: 0.1166



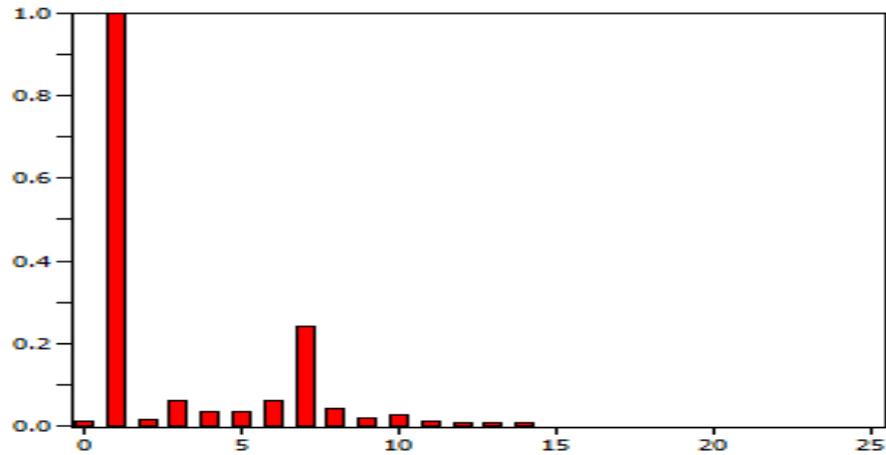
a) Espectro armónico fase A.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copied on mar. 3 2021
File: INGA_FINAL.pl4; Variable: v:FASE B
t1: 0.1; t2: 0.1166



b) Espectro armónico fase B.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copied on mar. 3 2021
 File: INGA_FINAL.pl4; Variable: v:FASE C
 t1: 0.1; t2: 0.1166



c) Espectro armónico fase C.

Figura 5.15. Armónicos presentes en la fase C para condiciones del caso 3.

Para el Caso 3 se observa una disminución en el porcentaje armónico en comparación con los Casos 1 y 2, en este caso tienen una mayor amplitud los armónicos de orden impar como es el caso de la **Figura 5.14 (a)** en la cual se observa una mayor amplitud en el tercer armónico con respecto a la fundamental, en el caso de las **Figura 5.14 (b y c)** presenta una mayor incidencia del séptimo armónico.

5.5. ANÁLISIS DE MITIGACIÓN DE FERRORESONANCIA.

5.5.1. Erradicación de maniobras monopolares (reconexión del sistema)

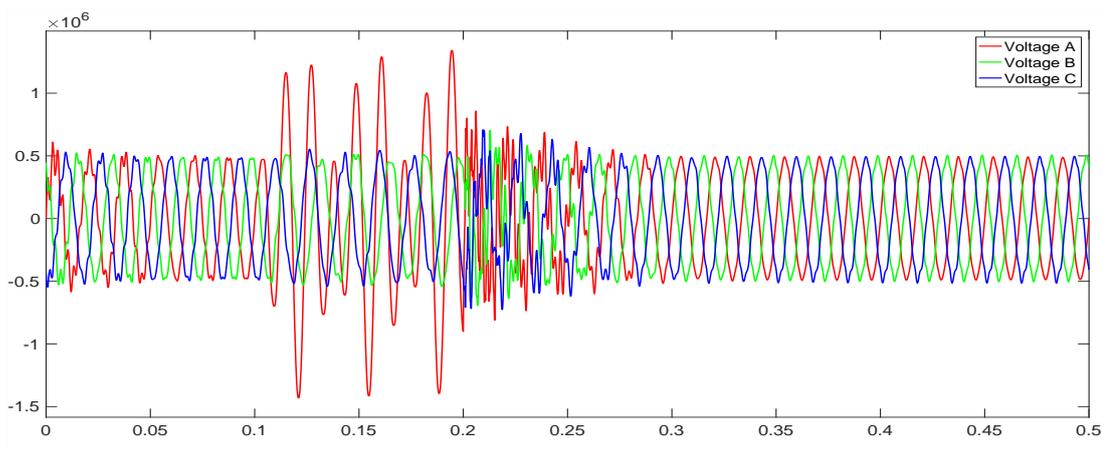


Figura 5.16. Reconexión del sistema (Caso 1), capacitancia de $1 \mu F$.

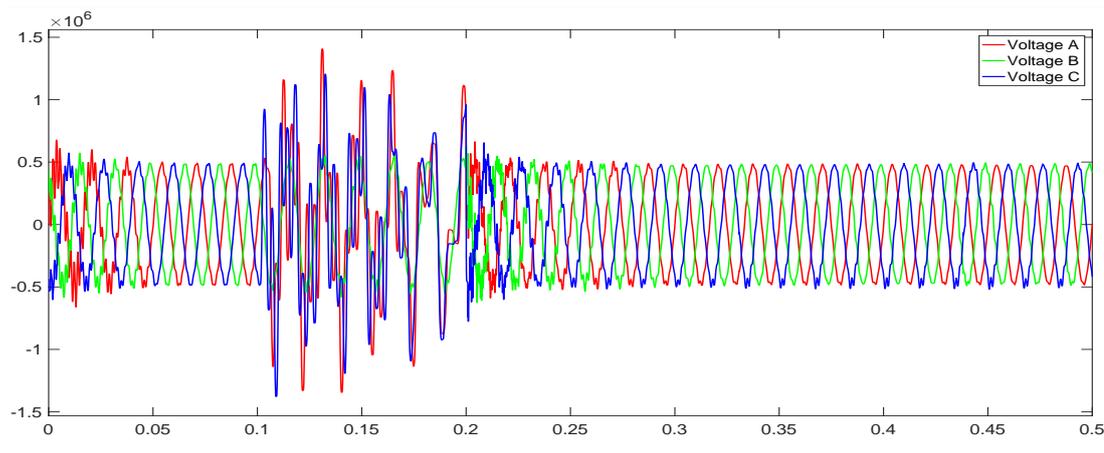


Figura 5.17. Reconexión del sistema (Caso 2), capacitancia de $0,1 \mu F$.

Al realizar la restauración del sistema se puede notar como el efecto de la ferroresonancia es eliminado luego del recierre del interruptor ($S1$) en un tiempo de 0,2 segundos, en la **Figura 5.16** se observa un efecto transitorio luego de realizar la operación de maniobra, estabilizando el sistema en un tiempo de 0,3 segundos. Para el análisis del Caso 2 (**Figura 5.17**), se tiene un tiempo de recierre de los interruptores ($S1$ y $S3$) de 0,2 segundos, presentando un tiempo transitorio menor, llegando a estabilizarse el sistema en 0,27 segundos.

5.5.2. Conexión del devanado primario transformador a tierra

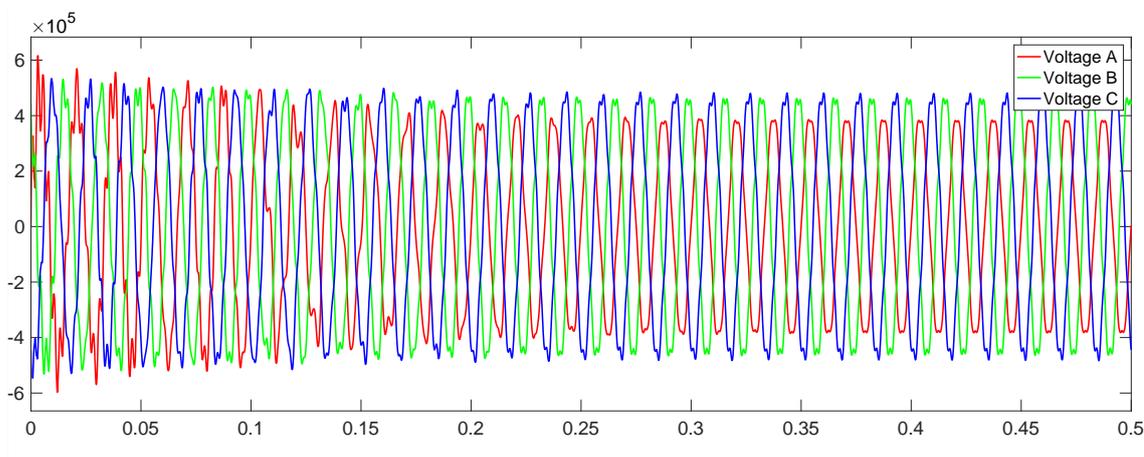


Figura 5.18. Transformador aterrizado (Caso 1), capacitancia de $1 \mu F$.

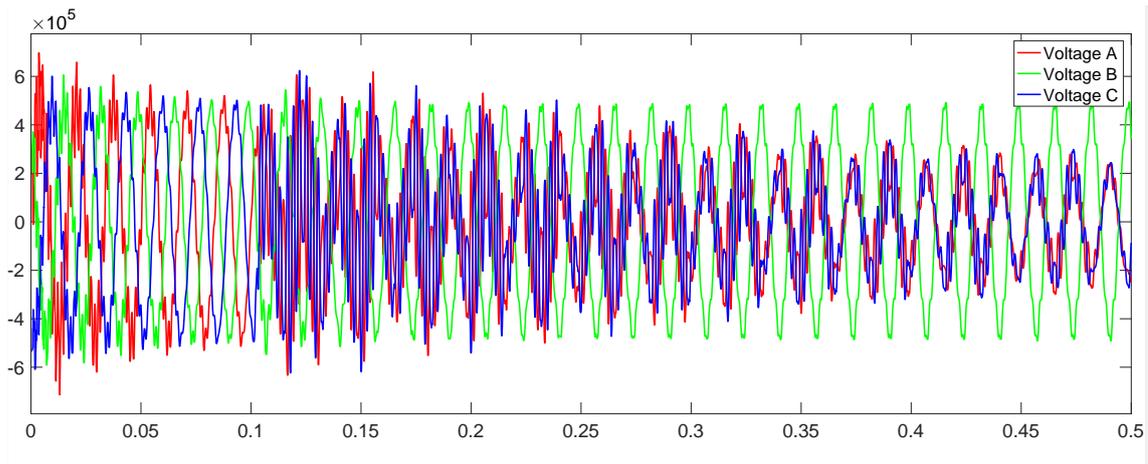


Figura 5.19. Transformador aterrizado (Caso 2), capacitancia de $0,1 \mu F$.

La solución implementada mediante el aterrizado del devanado primario del transformador permite que las corrientes de desbalance fluyan por la conexión a tierra del transformador, disminuyendo en gran medida las sobretensiones existentes, en la **Figura 5.18** se presencia una reducción prácticamente total de las sobretensiones presenciadas ocasionadas por la apertura de la fase ($S1$), para el Caso 2 en donde se desconectan las fases ($S1$ y $S3$) el desbalance del sistema es mucho mayor y al aterrizar el devanado primario del transformador se produce un ruido considerable, que si se mantiene por un periodo de tiempo prolongado puede ocasionar severos daños al transformador (**Figura 5.19**).

5.5.3. Operación del transformador con carga

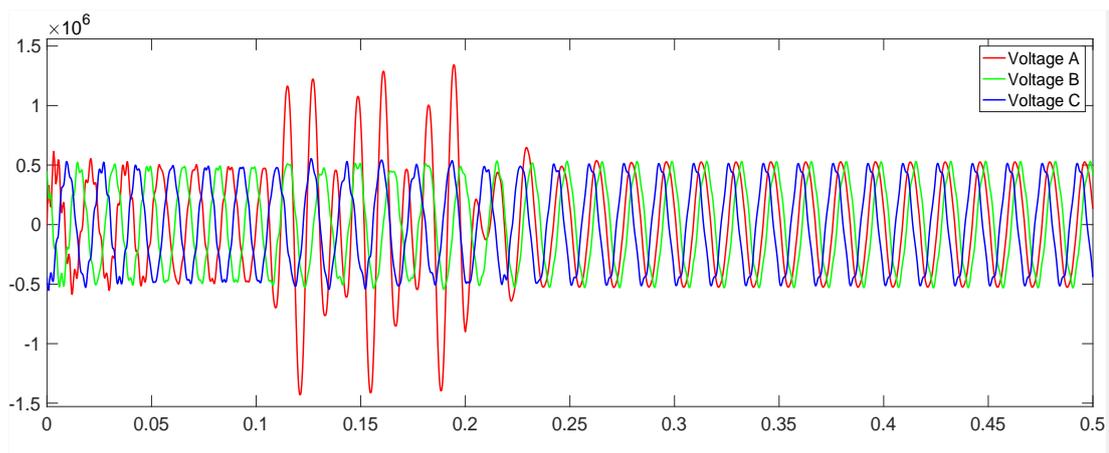


Figura 5.20. Transformador con carga (Caso 1), capacitancia de $1 \mu F$.

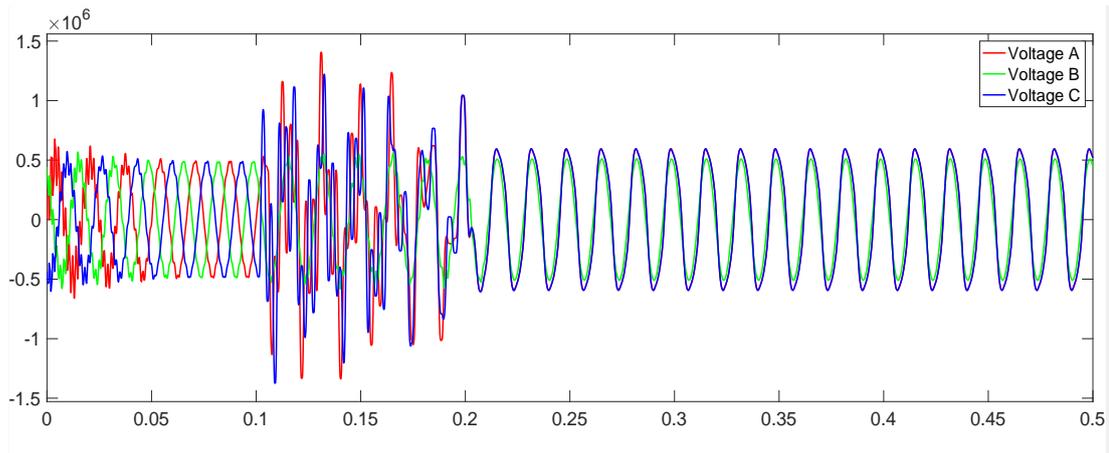


Figura 5.21. Transformador con carga (Caso 2), capacitancia de $0,1 \mu F$.

Una de las maneras de mitigar los efectos de la ferroresonancia es que el transformador opere con carga, en las figuras mostradas (**Figura 5.20** y **Figura 5.21**), se considera un consumo de la potencia activa del 10% de la potencia nominal del transformador, mediante una carga puramente resistiva (ver **Anexo J**), en la cual se evidencia que las sobretensiones se reducen luego de que se inserta la carga en el sistema, mediante el cierre de los interruptores (S4, S5 y S6) en un tiempo de 0,2 segundos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se planteó analizar el fenómeno de ferresonancia en transformadores de potencia mediante simulación, donde se confirmó que la conmutación de las fases que alimentan al transformador es una condición clave para la formación de ferresonancia, otros aspectos fundamentales ante la aparición de este fenómeno, son influencia del valor de la capacitancia, la caracterización de saturación del transformador y la conexión del devanado primario del transformador.
- Mediante las pruebas implementadas para determinar el comportamiento del sistema efectuado, se evidenció que la ferresonancia se presenta cuando el devanado primario del transformador está conectado en estrella sin aterrizar, esta configuración tiene los niveles de tensión más elevados y una mayor distorsión en las formas de onda, debido a que las corrientes fluyen a través de la capacitancia hacia tierra en la fase que fue interrumpida.
- Con la evaluación comparativa tomando como base el programa ATPDraw, se logró determinar que el simulador PSCAD, presenta mayores variaciones en los resultados obtenidos con un error promedio de 11,43 % para los 3 casos evaluados, los cuales se puede atribuir al ajuste de los parámetros de saturación que este permite ingresar en su modelo, por su parte el error de Simulink con respecto a ATPDraw se tiene un error promedio de 5,86 %.
- Para el Caso I y II, los resultados obtenidos para un valor del banco de capacitores de 1 μF y 0,1 μF respectivamente, indican la presencia de ferresonancia, elevando el voltaje nominal (1 p.u.) hasta 2,63 p.u. para una fase abierta ($S1$) y 2,85 pu para dos fases abiertas ($S1 - S3$), en los picos más elevados del simulador base. Estableciendo que el peor escenario es cuando las dos fases están abiertas con el devanado primario sin aterrizar.
- Implementando las pruebas al transformador con el devanado primario aterrizado y una fase abierta ($S1$) se logró constatar una reducción significativa de las sobretensiones y distorsión de las ondas, que se presenciaban cuando el transformador no se encontraba aterrizado (Caso 1), esto debido a que las corrientes de desbalance fluyen por la conexión a tierra.

- Las componentes armónicas presentes en el sistema, para los escenarios donde se presenta ferresonancia comprenden una amplia gama de armónicos, en los cuales se evidencia la presencia de armónicos pares debidos al desbalance del sistema, ocasionados por la apertura de las fases, así como la presencia de armónicos de orden impar los cuales son los causantes de distorsionar la onda periódica de voltaje.

6.2. RECOMENDACIONES.

Debido al tiempo y la complejidad del fenómeno analizado, se implementó un sistema con los componentes más fundamentales que recrean este fenómeno, por lo que para mejorarlo se realizan las siguientes recomendaciones:

- Abordar más a profundidad las variables asociadas al comportamiento de los generadores, debido a que se consideró una fuente de tensión ideal, con la finalidad de evaluar el comportamiento dinámico del generador. De la misma manera, se puede considerar el efecto capacitivo asociado a la apertura de los interruptores.
- Realizar un análisis más amplio modelando un sistema de puesta a tierra en torres de transmisión cercanas al transformador en estudio, con la finalidad de evaluar el efecto que produce esta configuración en el fenómeno de ferresonancia.
- Implementar un sistema más completo, considerando un mayor número de generadores, líneas de transmisión, transformadores y cargas características, para analizar cómo afecta estas condiciones al resto del sistema.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Berdugo López, «Diseño de un circuito de supresión de la ferorrresonancia no lineal,» 2018.
- [2] J. A. Corea Araujo, J. A. Barrado, F. Gonzalez Molina y L. Guasc Pesquer, «Ferroresonance Analysis on Power Transformers Interconnected to Self-excited Induction Generators,» 14 January 2016.
- [3] J. Bethenod, «Sur le Transformateur à Résonance,» *L'Éclairage Électrique*, vol. vol. 53, pp. 289-96, 1907.
- [4] P. Boucherot, «Éxistence de Deux Régimes en Ferrorésistance,» *Rev. Gen. de L'Élec*, vol. vol. 8, n° 24, pp. 827-828, 1920.
- [5] B. S. Gonzales, F. G. Merconchini y L. C. Carnero, «Estudio de fenómenos transitorios en circuitos eléctricos de primer orden,» Santiago de Cuba, 2014.
- [6] W. Aragonéz, «Aplicación de la electrónica en la mitigación de la ferorrresonancia en transformadores de tensión,» Lima, 2016.
- [7] B. Castillo, L. Cadena y C. S., «Transitorios Electromagnéticos en la energización de un Transformador de potencia,» Quito, 2015.
- [8] A. Guevara, «ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS TRANSITORIOS DE UNA TRANSFORMADOR TRIFASICO UTILIZANDO MATLAB-SIMULINK,» ECUADOR, 2018.
- [9] D. M. VILLALBA NORIEGA, «COMPARACIÓN ENTRE NORMAS IEEE E IEC SOBRE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO (EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN HASTA 69kV),» Quito, 2016.
- [10] V. A. –. Galván Sanchez, J. A. Gutiérrez Robles, V. H. Ortiz Muro y R. Sanchez Herrera, «APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN "Modelado del transformador para eventos de alta frecuencia",» 2012.
- [11] A. Gomez Exposito, A. J. Conejo y C. Canizares, *Electric energy systems : analysis and operation*, New York: Taylor & Francis Group, 2009.
- [12] C. F. Ramírez, *SUBESTACIONES DE ALTA Y EXTRA ALTA TENSIÓN*, vol. Segunda edición, Mejía Villegas S.A., 2003.
- [13] N. E. Morales Mariño, «COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN SUBESTACIONES A NIVEL DE 500 kV,» Quito, 2008.
- [14] W. Brokering Christie, R. Palma Behnke y L. Vargas Díaz, *Ñom Liifke (El Rayo Domado) o Los Sistemas Eléctricos de Potencia*, Santiago de Chile: Prentice Hall - Pearson Educación, 2008.
- [15] V. Valverde, A. J. Mazón, I. Zamora y G. Buigues, «Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations,» vol. Vol. 1, n° No. 5, pp. 1-7, 2007.
- [16] R. Pérez Pineda, R. Rodrigues y A. Aguila Telléz, «Analysis and Simulation of Ferroresonance in Power Transformers using Simulink,» *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. VOL. 16, n° NO. 2, pp. 1-7, 2018.
- [17] «Analysis and Simulation of Ferroresonance in Power Transformers using Simulink,» vol. VOL. 16, n° No. 2, pp. 1-7, 2018.

- [18] S. I. Kim, B. C. Sung, S. N. Kim, Y. C. Choi y H. J. Kim, «A Study on Ferroresonance Mitigation Techniques for Power Transformer,» pp. 1-7, 2015.
- [19] G. Engdahl, «Ferroresonance in Power Systems,» Energiforsk, Swedish, 2017.
- [20] D. J. FREIRE MACIAS y V. X. GARCÍA ALAÑA, «ANÁLISIS MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN EN MATLAB DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN BANCO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS,» Guayaquil, 2018.
- [21] P. Ferracci, «Cuaderno Técnico no 190 "La ferorrresonancia",» Schneider Electric España S.A., España, 2000.
- [22] M. Masoum y E. Fuchs, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, San Diego - California, 2015.
- [23] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso y . B. H. Wayne , «Electrical Power Systems Quality, Second Edition,» McGraw-Hill, 2003, 2003.
- [24] C. F. Bogado Martínez, «Análisis de Osciladores No Lineales de Segundo Orden. Caso de Estudio: Ferroresonancia en Transformadores,» San Lorenzo - Paraguay, 2012.
- [25] G. J. Correa Henao, «Efectos de la Ferorrresonancia en la Energización de Transformadores,» *CINTEX*, vol. 20, nº 1, pp. 139-163, 2015.
- [26] J. Fraile Mora, MÁQUINAS ELÉCTRICAS, vol. Sexta edición, M. España, Ed., Copyright © 2008. , 2008.
- [27] H. Harper, «Elementos de diseño de Subestaciones Eléctricas,» LIMUSA, 2003.
- [28] A. B. Osleni Antonio , «Modelación de Transitorios Electromagnéticos en Transformadores Eléctricos,» Santa Clara, 2016.
- [29] M. Michalik y E. Rosołowski, «Simulation and Analysis of Power System Transients,» Copyright, Wrocław, 2010.
- [30] J. Ramírez, K. Cabezas, P. Jiménez, R. Canelos y B. Escobar, «Cálculo de la distribución de voltajes en las cadenas de aisladores de una línea de transmisión de 500 kV utilizando el método de los elementos finitos,» *scielo*, vol. vol.11, nº 3, pp. 5-14, 2020.
- [31] MEER, «Ministerio de Electricidad y Energía Renovable,» [En línea]. Available: <http://historico.energia.gob.ec/sistema-de-transmision-500-kv/>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [32] . L. A. Pazmiño Morillo, «ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO (S.N.I.) A NIVEL DE 230 kV Y 500 kV USANDO EL SIMULADOR DIGITAL EN TIEMPO REAL HYPERSIM,» Quito, 2018.
- [33] L. Prikler y H. K. Høidalen, «ATPDRAW version 5.6 - Users' Manual,» ATPDrawTM, 2009.
- [34] PSCAD, «www.pscad.com,» [En línea]. Available: https://www.pscad.com/webhelp/ol-help.htm#Opening_Screen.htm. [Último acceso: 15 Noviembre 2019].
- [35] Mathworks, «[Mathworks.com](http://la.mathworks.com),» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/saturabletransformer.html>. [Último acceso: 22 Diciembre 2020].

8. ANEXOS

Anexo A: Saturación del transformador en ATPDraw

El bloque Saturable trifásico se encuentra en el menú de selección de componentes y se puede editar y conectar al circuito principal como cualquier otro componente.

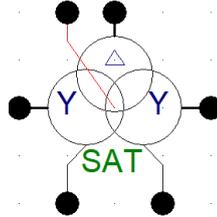


Figura A. 1. Transformador general saturable trifásico de 3 bobinados.

La característica de la rama de magnetización no lineal de los tres transformadores de tipo saturable se puede dar en la ficha Característica del cuadro de diálogo del componente.

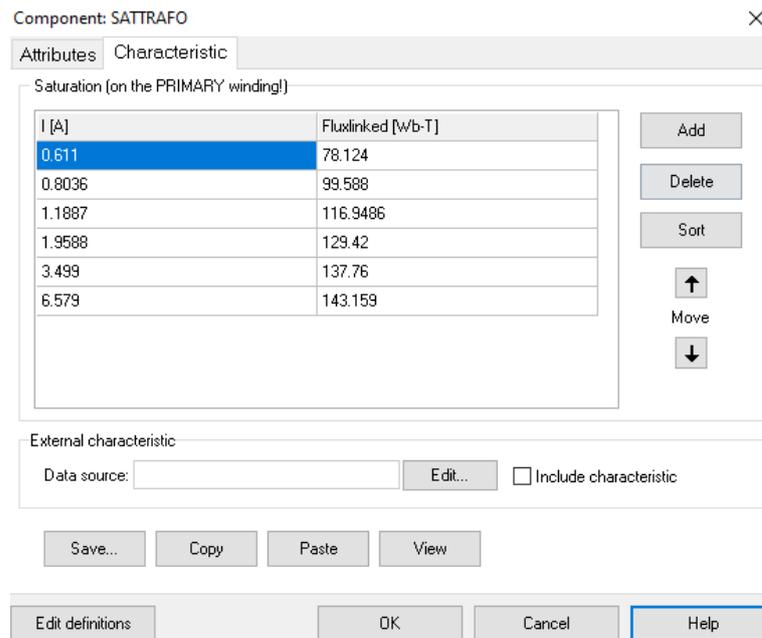


Figura A. 2. Pestaña de Característica de los componentes no lineales.

Los transformadores saturables tienen una ventana de entrada como la de la **Figura A. 2**. En esta ventana se puede introducir la rama de magnetización en las coordenadas I_{RMS}/V_{RMS} o $I_A/FLUX_{VS}$. La marca RMS de la página Atributos selecciona entre los dos formatos de entrada. Si la casilla Incluir característica está activada en la página Atributos, se utilizará un archivo de disco al que se hace referencia en el campo \$Include en el archivo de entrada de ATP. Si la característica no lineal se da en I_{RMS}/V_{RMS} , ATPDraw calculará los valores de flujo/corriente automáticamente y los utilizará en el archivo de entrada ATP final [33].

Transformador saturable de 3 fases

La comprobación del núcleo de 3 columnas convierte el transformador en un tipo transformador trifásico con alta renuencia homopolar que se puede especificar en el campo R_0 que aparece. Con el botón de núcleo de 3 patas sin comprobar, el modelo es un transformador saturable con baja renuencia homopolar (por ejemplo, un transformador de 3 fases con al menos un bobinado delta).

El cuadro de diálogo de componentes de este modelo de transformador se muestra en la **Figura A. 3**. Este cuadro de diálogo también tiene una página Atributos y Característica, pero la primera difiere en gran medida del diseño estándar. La función de los campos *Order*, *Label*, *Comment and Output* es la misma que en cualquier otro cuadro de diálogo de componentes, el significado de los otros campos se da a continuación. El par I_0, F_0 define la inductancia de la rama de magnetización en estado estable. R_m es la resistencia de la rama de magnetización que representa la histéresis y las pérdidas por corrientes parásitas del núcleo de hierro. I_0, F_0, R_m puede dejarse en blanco si se desprecia la rama de magnetización en la simulación.

Al habilitar el núcleo de 3 ramales, convierte el transformador en un tipo transformador trifásico con alta reluctancia homopolar que se puede especificar en el campo R_0 que aparece. Con el núcleo del botón de 3 columnas sin marcar, el modelo es un transformador saturable con baja reluctancia homopolar (por ejemplo, un transformador trifásico con al menos un devanado delta).

	Prim.	Sec.	Tert.
U [V]	500000	230000	34500
R [ohm]	0.2372	0.1067	0.012
L [mH,ohm]	45.347	0.46656	0.25445

NODE	PHASE	NAME
Primary	ABC	×0001
Secondary	ABC	×0005
Starpoint	ABC	×0006
Prim-N	1	××0007
Sec-N	1	××0008
Tertiary	ABC	×0009

Figura A. 3. Pestaña general del transformador saturable.

Al marcar el botón RMS se habilita la especificación de la característica de saturación en valores rms para corriente y voltaje en la pestaña de característica. Una conversión a valores de corriente de flujo se realiza internamente en ATPDraw. Si el botón no está marcado, se deben ingresar los valores normales de corriente y flujo. El devanado terciario puede activarse o desactivarse comprobando el botón del devanado terciario. La tensión nominal de los devanados del transformador se expresa en voltios. Las inductancias de cortocircuito se pueden especificar en [mH] si el parámetro X_{opt} es 0 (predeterminado en el ATP - Página de configuración / simulación). De lo contrario, la impedancia se da en [Ω] a la frecuencia X_{opt} .

Anexo B: Saturación del transformador en PSCAD

El modelo clásico utilizado por PSCAD, modela un transformador trifásico de 3 devanados basándose en el enfoque de modelado clásico.

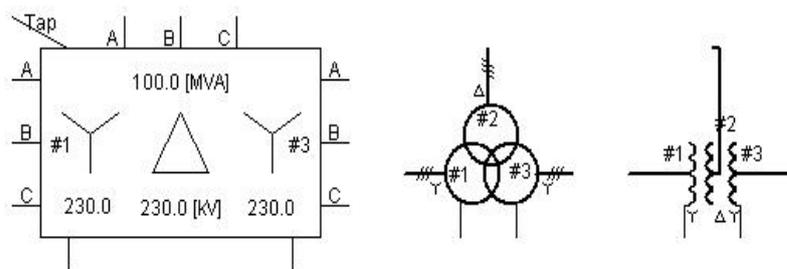


Figura B. 1. Transformador clásico de tres devanados

El modelo ofrece a la opción de elegir entre ramas de magnetización (núcleo lineal) o rutinas de inyección de corriente para modelar las características de magnetización. Si se desea, la rama de magnetización se puede quitar completamente para hacer que el transformador esté en modo "ideal", donde todo lo que queda es una reactancia de fuga en serie. También se proporciona un modelo de histéresis en este componente [34].

Ajuste de las propiedades de saturación

La saturación se representa en los modelos de transformadores clásicos con una inyección de fuente de corriente compensadora a través del devanado seleccionado, basada en una combinación de voltaje de devanado medido y parámetros de entrada de componentes.

En el modelo de transformador clásico, la saturación está representada por la combinación del voltaje medido del devanado, los parámetros de entrada del componente y la fuente de corriente de compensación inyectada en el devanado seleccionado [34].

Método de saturación clásico

En esta pestaña se detallan las propiedades del método clásico de saturación de núcleos.

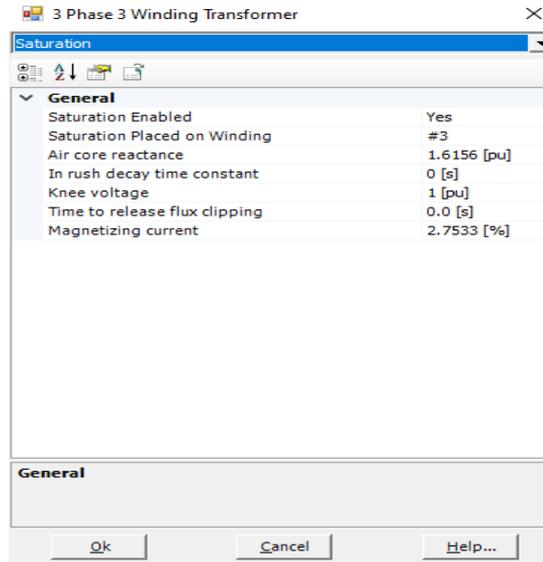


Figura B. 2. Pestaña general del transformador saturable.

Los parámetros de entrada del transformador directamente involucrados en el ajuste de la característica clásica de saturación del núcleo son:

- Reactancia del núcleo de aire
- Voltaje de rodilla
- Corriente de magnetización

La reactancia del núcleo de aire, el voltaje de la rodilla y la corriente de magnetización proporcionan tres grados de libertad a la conformación de la característica continua del núcleo (curva de la rodilla o curva de punto de inflexión) que se muestra a continuación [34]:

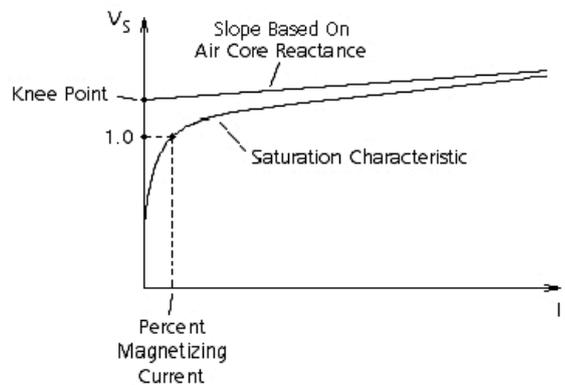


Figura B. 3. Característica típica de saturación del núcleo clásica

Reactancia del núcleo de aire

El ajuste de la entrada de reactancia del núcleo de aire afecta la pendiente de la línea asintótica indicada en la figura anterior.

Voltaje de rodilla

El ajuste del voltaje de la rodilla desplaza verticalmente la intersección en Y de la línea asintótica de reactancia del núcleo de aire en la figura anterior.

Corriente magnetizante

El ajuste de la corriente de magnetización determina la posición horizontal, a lo largo de la línea de voltaje $V_S = 1.0$ pu, del punto de inflexión efectivo. Es decir, un valor creciente de la corriente de magnetización tenderá a hacer que la característica de saturación sea menos aguda.

Saturación del núcleo

Se requiere una corriente excitante para la transformación de voltaje mediante un transformador. La característica de excitación de un transformador está determinada completamente por el diseño del núcleo, y el diseño del devanado afecta a la característica solo en la medida en que determina la densidad de flujo en el núcleo. Los transformadores están limitados en su desempeño por las limitaciones de flujo magnético del núcleo. Dado que los materiales ferromagnéticos no pueden soportar densidades de flujo magnético infinitas y tienden a saturarse a un cierto nivel [34].

Anexo C: Saturación del transformador en Simulink

El modelo de bloque utilizado por Simulink para simular un transformador saturable tiene la configuración que se muestra en la **Figura C. 1**, que consta de tres devanados acoplados y enrollados en el mismo núcleo de hierro.

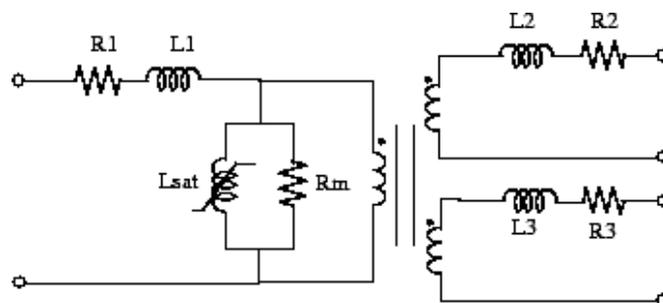


Figura C. 1. Transformador saturable [35].

El modelo tiene en cuenta la resistencia de cada devanado ($R_1 R_2 R_3$) y la inductancia de fuga ($L_1 L_2 L_3$), las características de magnetización del núcleo son modelados por una resistencia de magnetización (R_m), que simula las pérdidas efectivas del núcleo y la inductancia de saturación (L_{sat}) [35].

En la configuración del transformador, se puede seleccionar una de las siguientes dos opciones para modelar las características de corriente de flujo no lineal:

1. Modelo de saturación sin histéresis. Las pérdidas totales del hierro (corrientes parásitas + histéresis) se modela mediante la resistencia lineal R_m .

2. Modelo de histéresis y saturación. La especificación de histéresis se completa utilizando la herramienta de diseño de histéresis en el bloque Powergui. La pérdida por corrientes parásitas en el núcleo se modela mediante la resistencia lineal R_m .

Característica de saturación sin histéresis

Si no se modela la histéresis, la característica de saturación del bloque del transformador saturable se define por la relación lineal por partes entre el flujo y la corriente de excitación [35].



a) No se puede especificar ningún flujo residual

b) Se puede especificar un flujo residual entre los puntos 2 y -2

Figura C. 2. Curva de saturación flujo vs corriente [35].

Si se desea especificar un flujo residual (ϕ_0), el segundo punto de la característica de saturación debe corresponder a la corriente cero, como se muestra en la **Figura C. 2 (b)**.

La característica de saturación se ingresa como conjuntos pares de (i , ϕ) en unidades, comenzando con par (0, 0). El software convierte el vector de flujo magnético Φ_{pu} y el vector

de corrientes I_{pu} en unidades estándar para el modelo de saturación del bloque del transformador saturable:

$$\Phi = \Phi_{pu} \Phi_{base}$$

$$I = I_{pu} I_{base}$$

Donde el de flujo de base (Φ_{base}) y la corriente de base (I_{base}) son los valores pico obtenidos bajo la tensión nominal de potencia y frecuencia:

$$I_{base} = \frac{P_n}{V_1} \sqrt{2}$$

$$\Phi_{base} = \frac{V_1}{2\pi f_n} \sqrt{2}$$

El flujo base se define como el valor pico del flujo sinusoidal en Weber, cuando el devanado primario está conectado a una fuente de voltaje sinusoidal de 1 pu (voltaje nominal). El valor Φ_{base} definido anteriormente representa la cadena de flujo base (en voltios-segundos). Se relaciona con el flujo base mediante la siguiente fórmula:

$$\Phi_{base} = \text{flujo base} \times \text{número de vueltas del devanado}$$

Anexo D: Parámetros ingresados en cada generador.

Anexo D. 1: Parámetros ingresados en cada generador del simulador ATPDraw.

The screenshot shows the 'Component: ACSOURCE' configuration window. It features a table of attributes, a table of nodes, and several configuration options.

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	500000
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	A	X0003

Attributes table below the main table:

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	500000
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

Configuration options:

- Type of source: Current, Voltage
- Num phases: Single, 3-phase, 3*1-phase
- Angle units: Degrees, Seconds
- Amplitude: Peak L-G, RMS L-G, RMS L-L
- Grounding: Grounded, Ungrounded
- Hide

Buttons: Edit definitions, OK, Cancel, Help

(a) Parámetros ingresados en ATPDraw para el generador A.

Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	500000
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	120
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	B	X0003

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: Current Voltage

Num phases: Single 3-phase 3*1-phase

Angle units: Degrees Seconds

Amplitude: Peak L-G RMS L-G RMS L-L

Grounding: Grounded Ungrounded Hide

Edit definitions OK Cancel Help

(b) Parámetros ingresados en ATPDraw para el generador B.

Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	500000
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	-120
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	C	X0003

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: Current Voltage

Num phases: Single 3-phase 3*1-phase

Angle units: Degrees Seconds

Amplitude: Peak L-G RMS L-G RMS L-L

Grounding: Grounded Ungrounded Hide

Edit definitions OK Cancel Help

(c) Parámetros ingresados en ATPDraw para el generador C.

Figura D. 1. Parámetros del generador en Simulink

Anexo D. 2: Parámetros ingresados en el generador del simulador PSCAD.

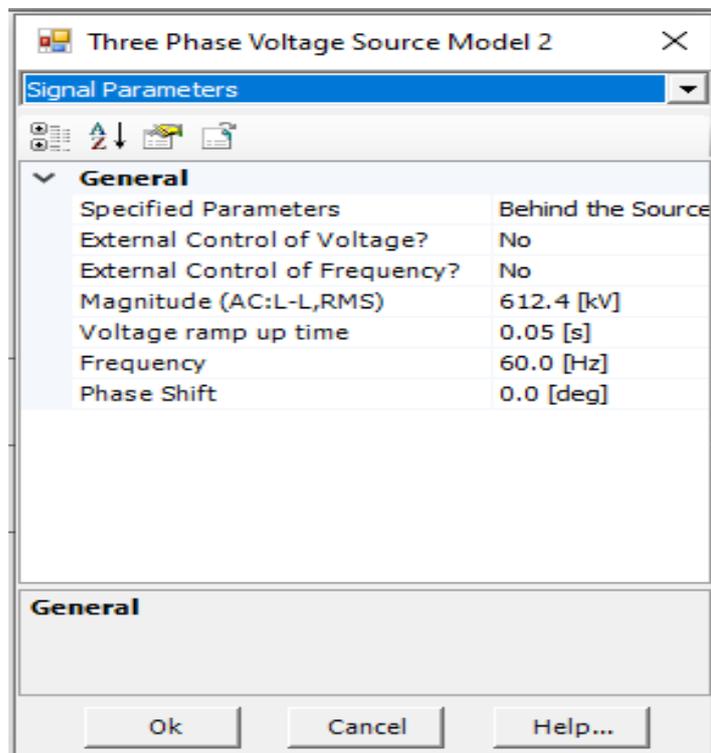
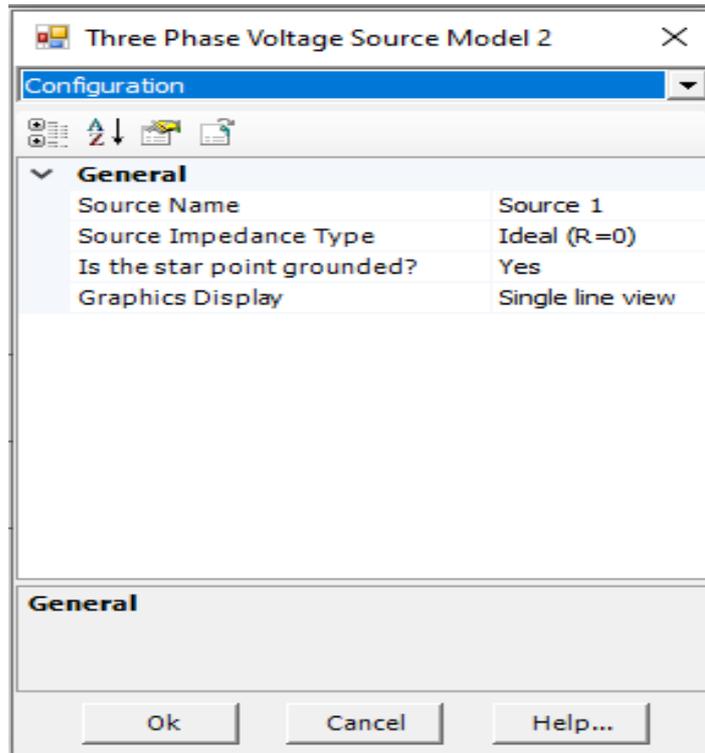
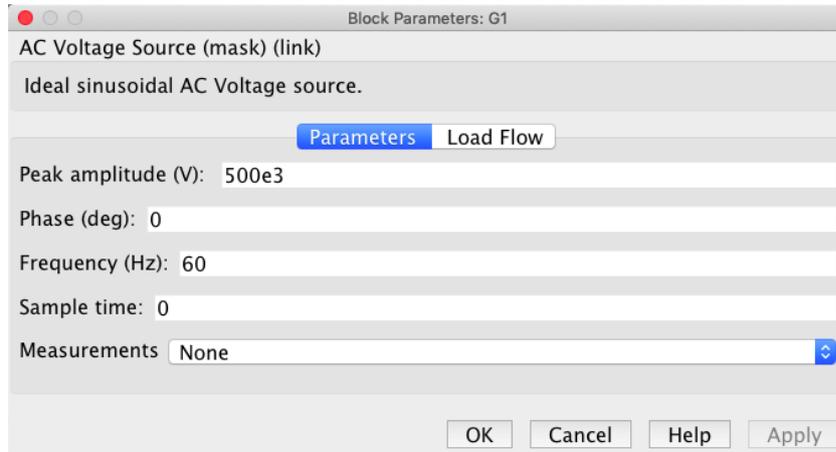
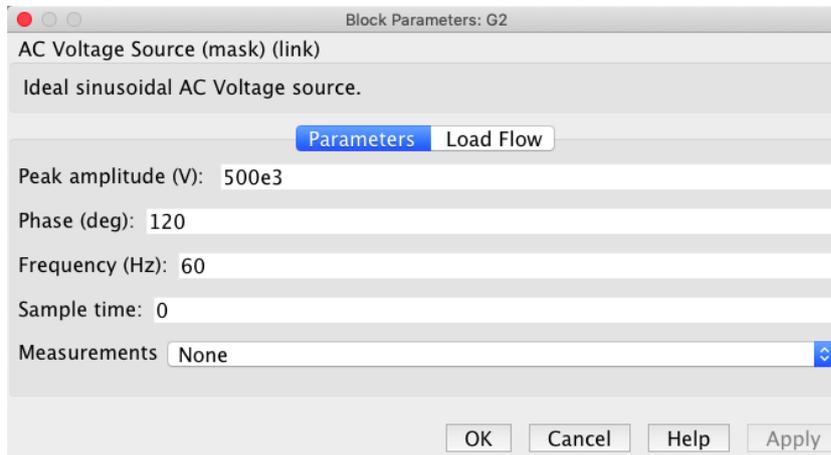


Figura D. 2. Parámetros del generador en PSCAD.

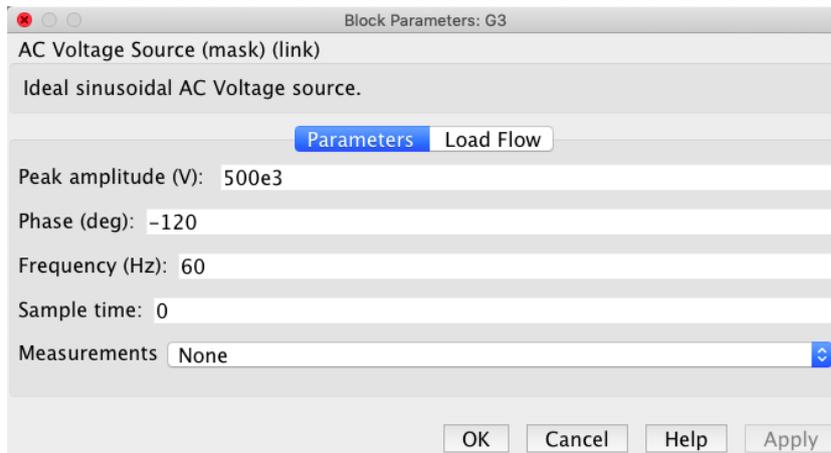
Anexo D. 3: Parámetros ingresados en los generadores del simulador Simulink.



(a) Parámetros ingresados en Simulink para el generador A.



(b) Parámetros ingresados en Simulink para el generador B.

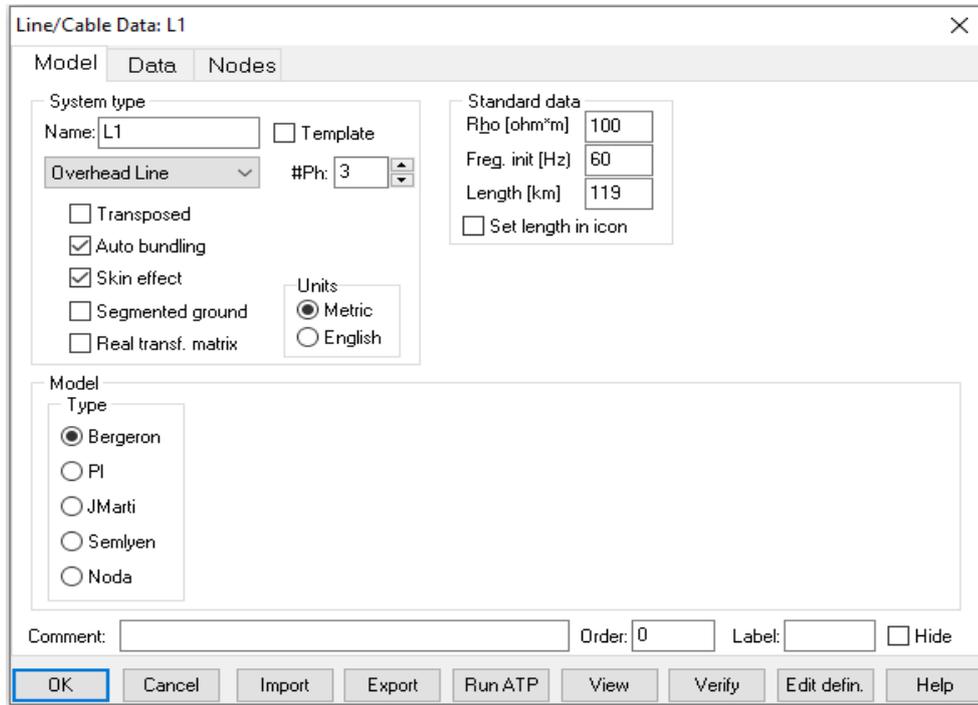


(c) Parámetros ingresados en Simulink para el generador C.

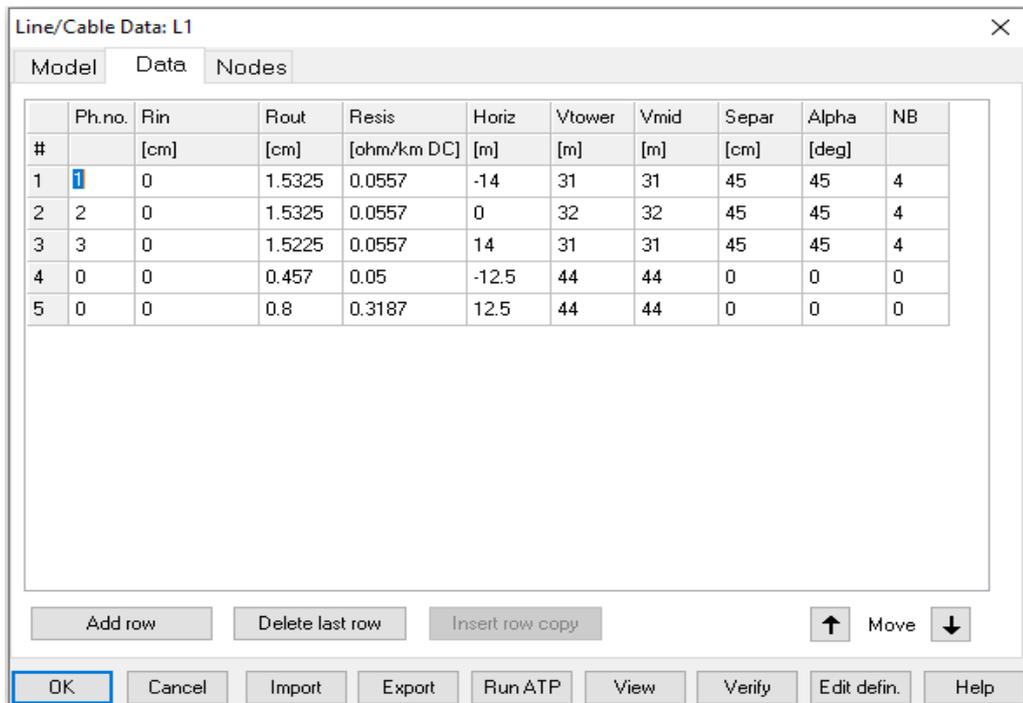
Figura D. 3. Parámetros del generador en Simulink.

Anexo E: Parámetros de las líneas de transmisión.

Anexo E. 1: Parámetros ingresados para la línea de transmisión en ATPDraw.



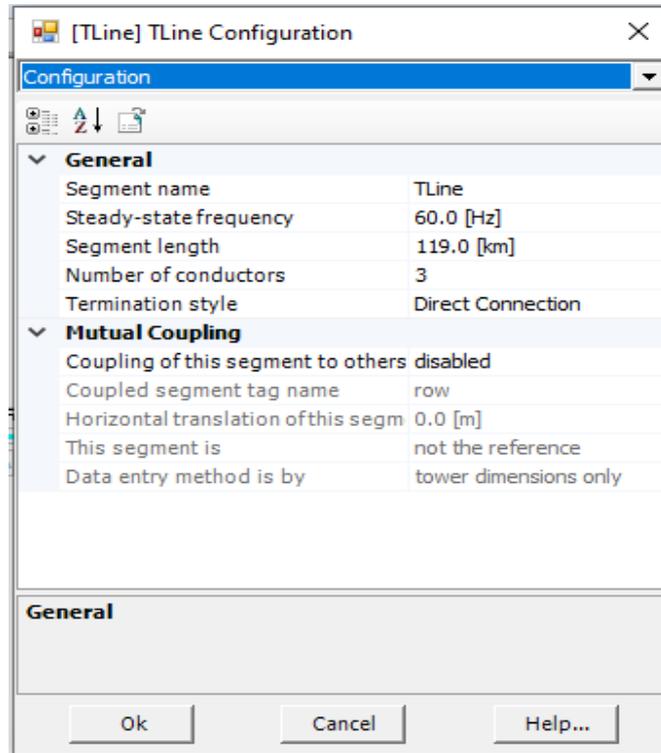
(a) Ingreso de parámetros y modelo de la línea



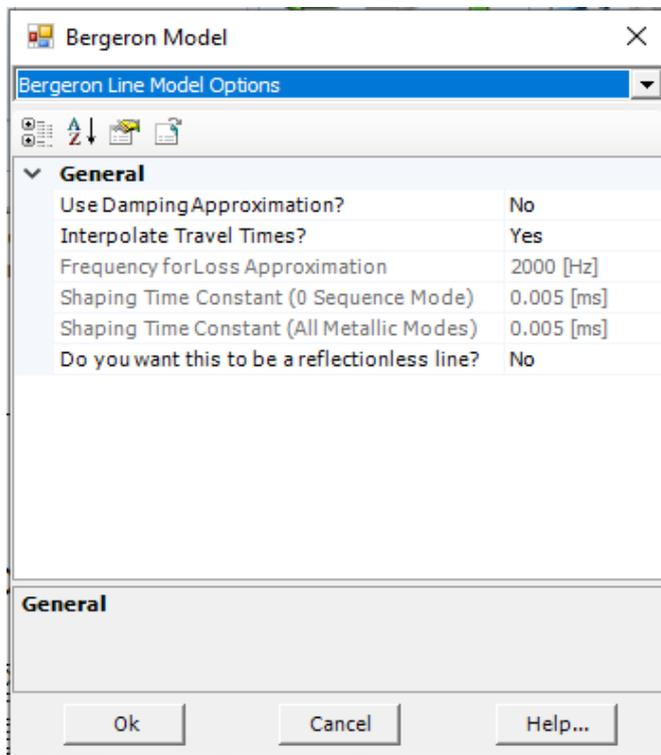
(b) Ingreso de los parámetros de conductores e hilos de guarda y configuración de la torre.

Figura E. 1. Parámetros de la línea de transmisión en ATPDraw

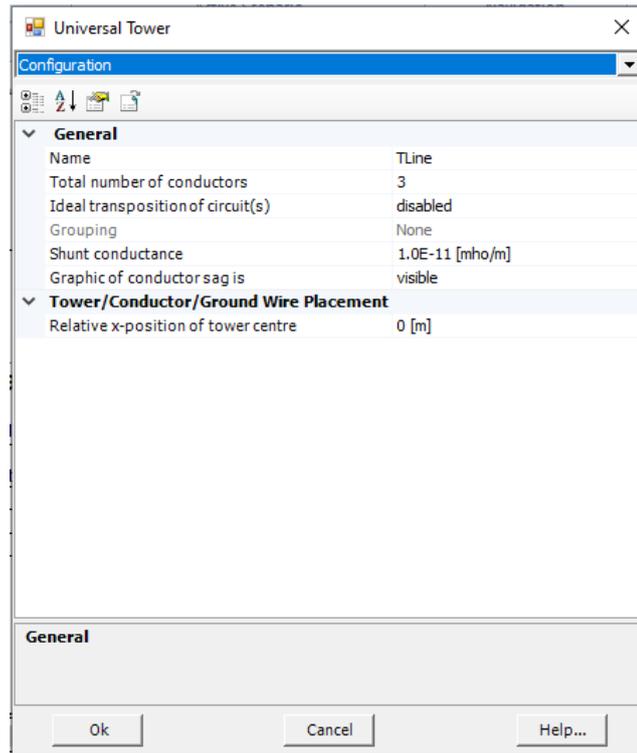
Anexo E. 2: Parámetros ingresados para línea de transmisión en PSCAD.



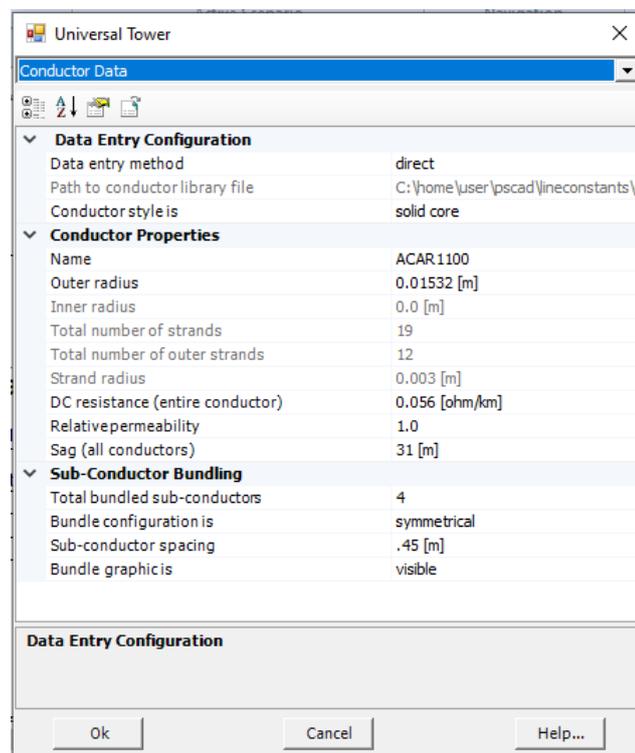
(a) Ingreso de datos generales de la línea de transmisión.



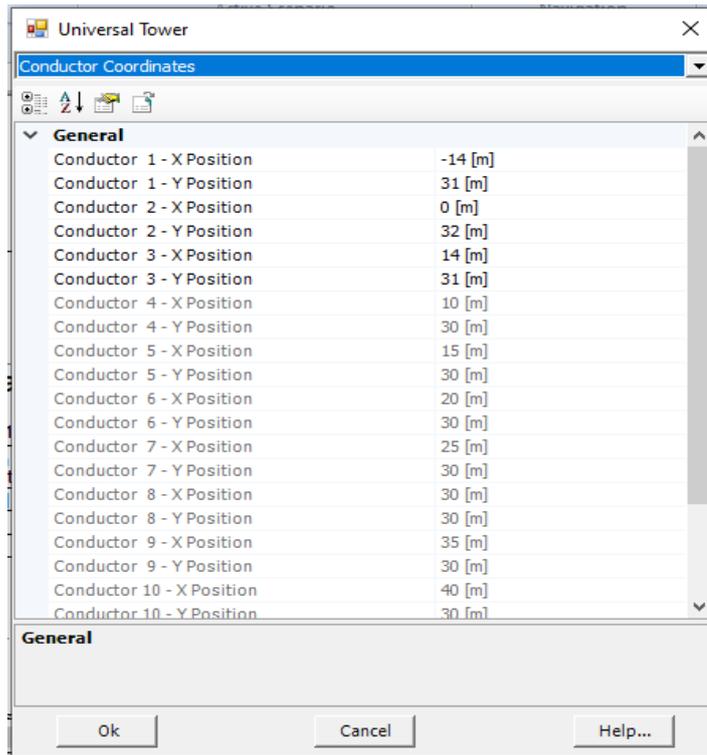
(b) Selección de tipo de modelo de la línea de transmisión.



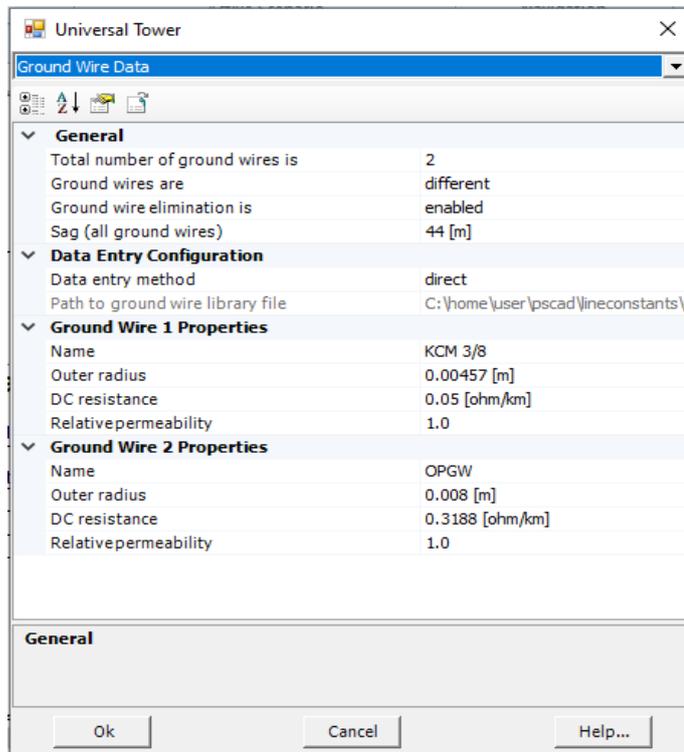
(c) Configuración universal del tipo de torre.



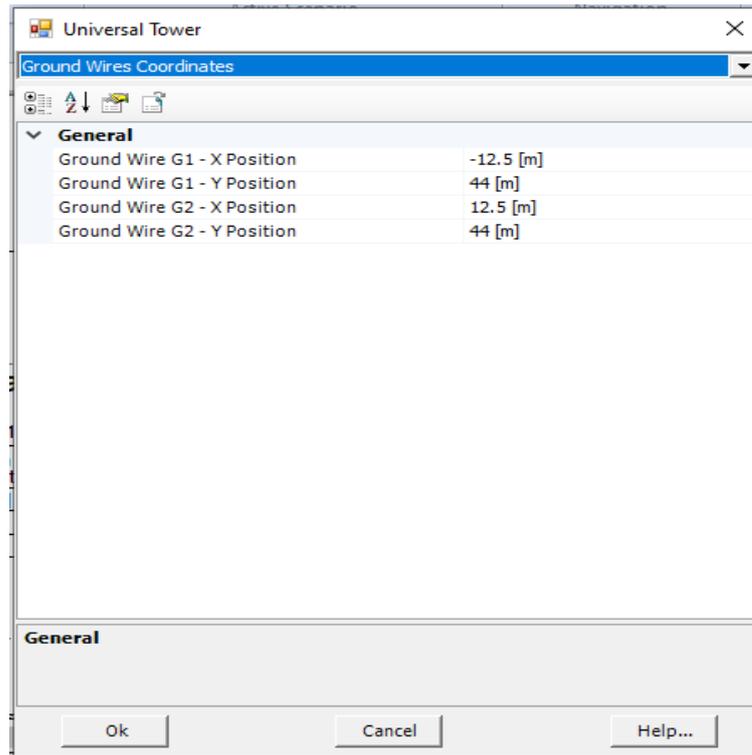
(d) Ingreso de datos del tipo de conductor de la línea de transmisión.



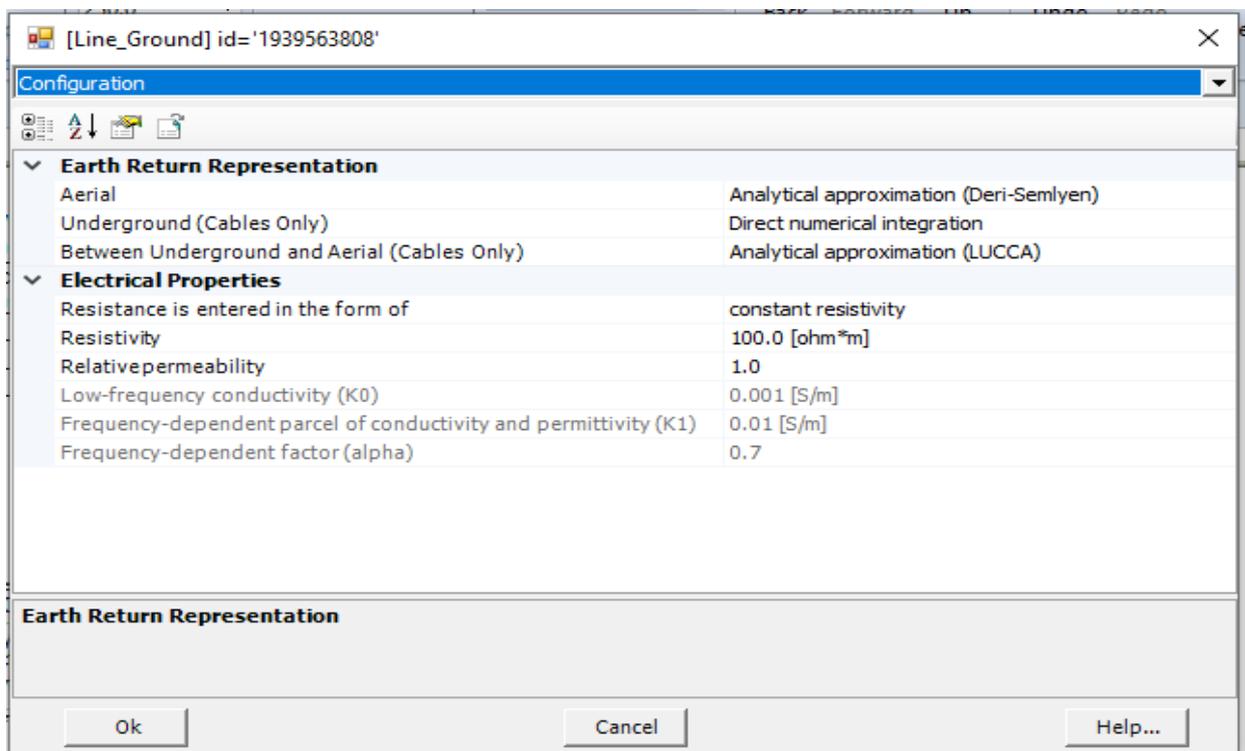
(e) Coordenadas de la posición de los conductores



(f) Ingreso de datos del tipo de hilos de guardas de la línea de transmisión.



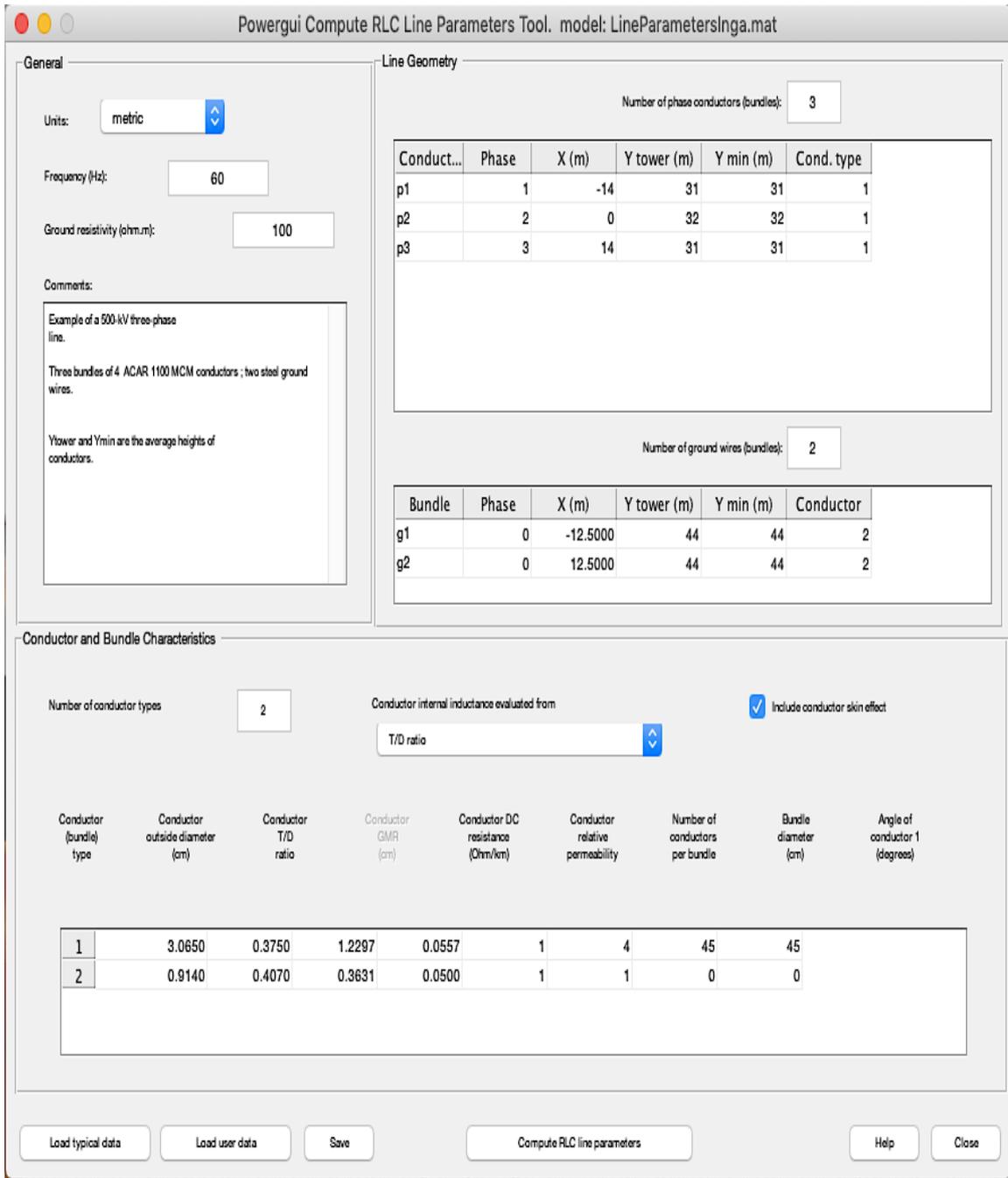
(g) Coordenadas de la posición de los hilos de guarda.



(h) configuración de la resistencia del suelo de las torres de transmisión.

Figura E. 2. Parámetros de la línea de transmisión en PSCAD.

Anexo E. 3: Calculo de los parámetros de la línea de transmisión con la herramienta RLC Line Parameters en Simulink.



(a) Ingreso de la configuración de la torre de transmisión y parámetros del conductor.

Display RLC Values

RLC line parameters:

Frequency (Hz):
60

Ground resistivity (ohm.m):
100

Resistance matrix R_matrix (ohm/km):

0.035787	0.020959	0.020985
0.020959	0.035012	0.020959
0.020985	0.020959	0.035787

Inductance matrix L_matrix (H/km):

0.001362	0.0004548	0.00033619
0.0004548	0.001345	0.0004548
0.00033619	0.0004548	0.001362

Capacitance matrix C_matrix (F/km):

1.0474e-08	-2.0377e-09	-6.7605e-10
-2.0377e-09	1.0823e-08	-2.0377e-09
-6.7605e-10	-2.0377e-09	1.0474e-08

Positive- & zero- sequence resistance.
R10 = [R1 Ro] (ohm/km):

[0.014561 0.077464]

Positive- & zero- sequence inductance.
L10 = [L1 Lo] (H/km):

[0.0009411 0.0021869]

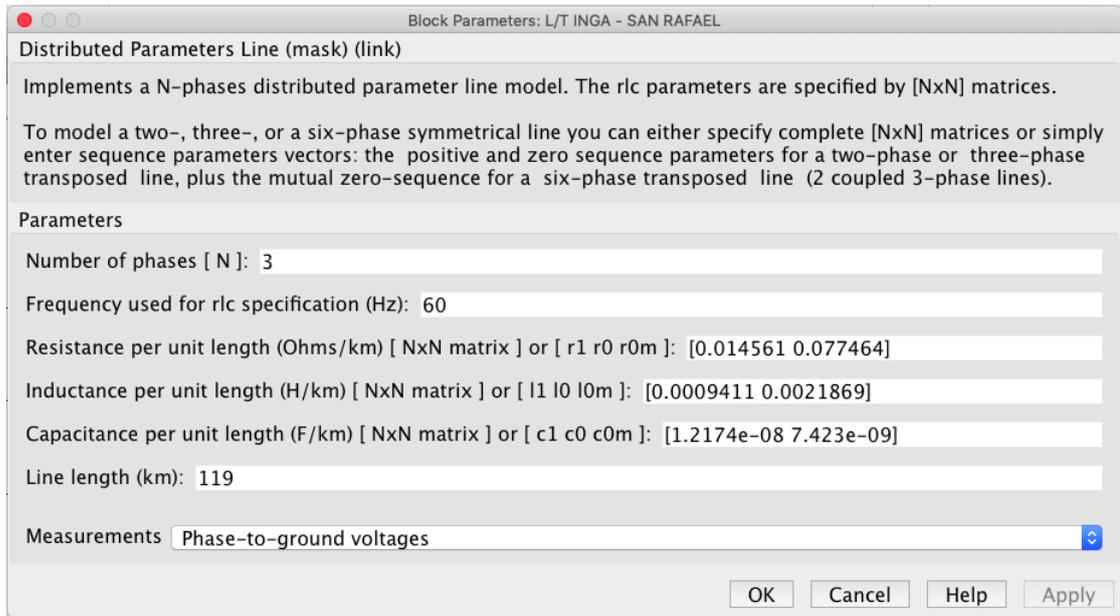
Positive- & zero- sequence capacitance.
C10 = [C1 Co] (F/km):

[1.2174e-08 7.423e-09]

Send RLC parameters to block:

Download: or

(b) Parámetros de la línea RLC

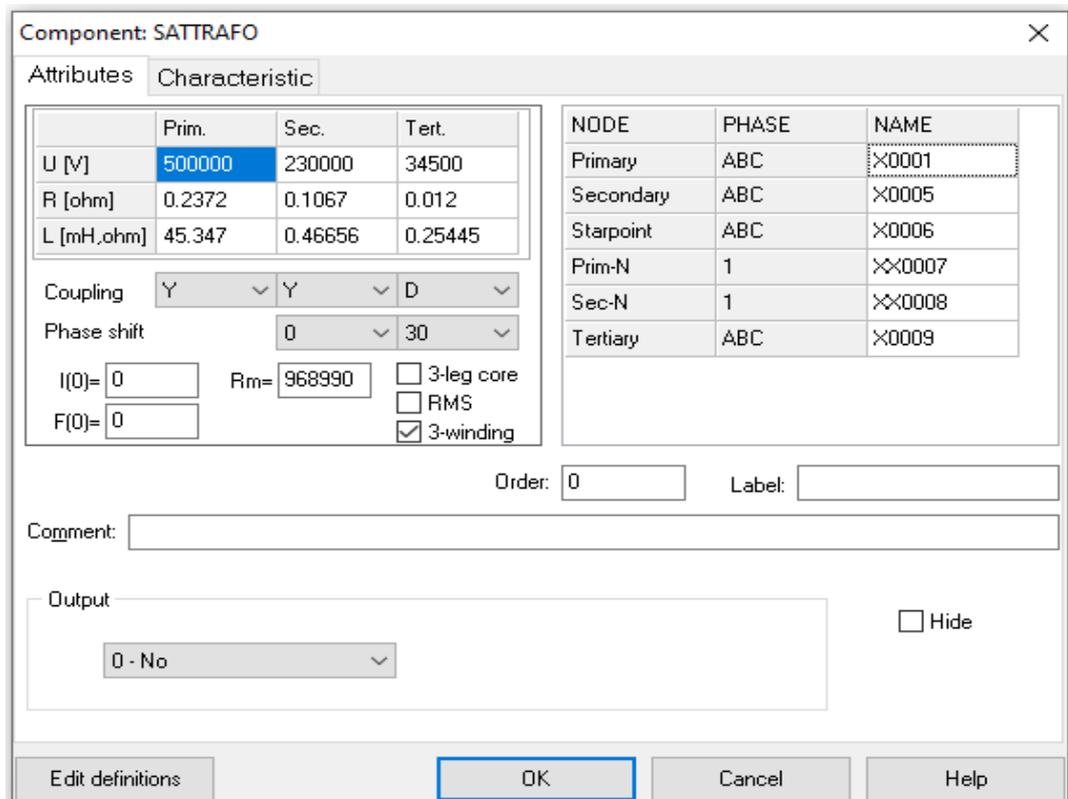


(c) Parámetros ingresados de la línea de transmisión en Simulink

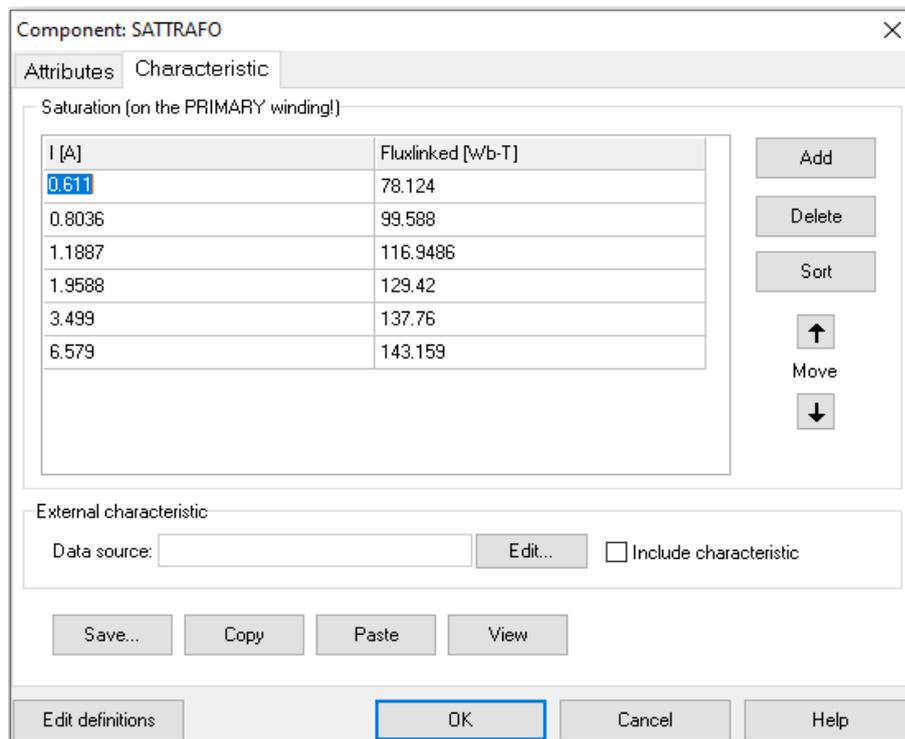
Figura E. 3. Parámetros ingresados en la L/T.

Anexo F: Parámetros ingresados en cada transformador.

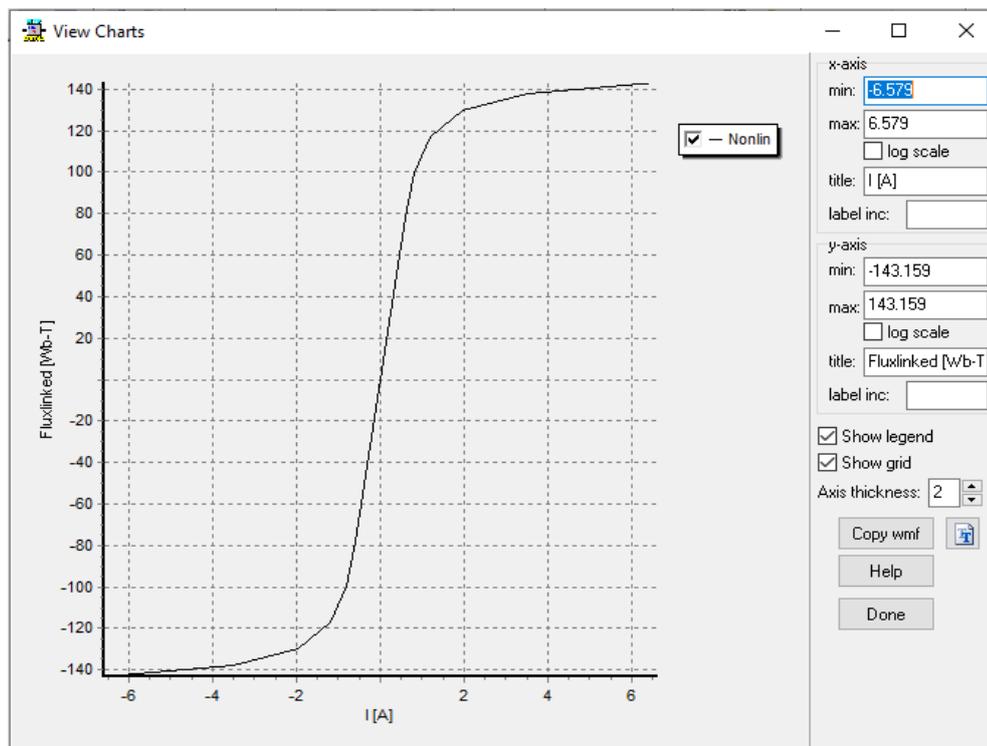
Anexo F. 1: Parámetros ingresados para el transformador en ATPDraw.



(a) Ingreso de datos característicos del transformador.



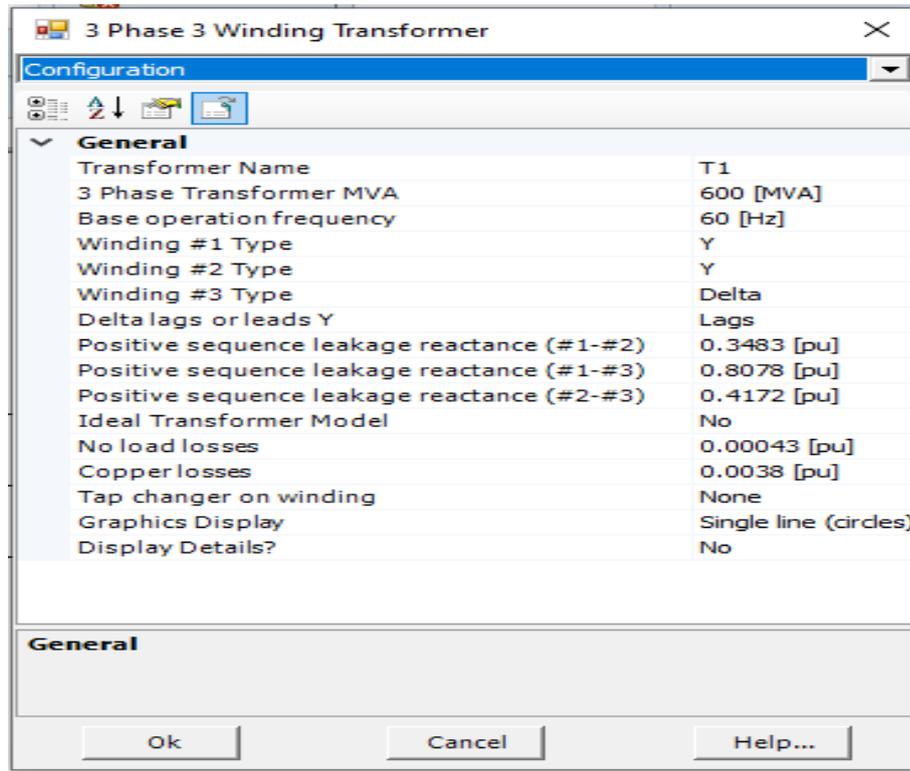
(b) Características de saturación del transformador



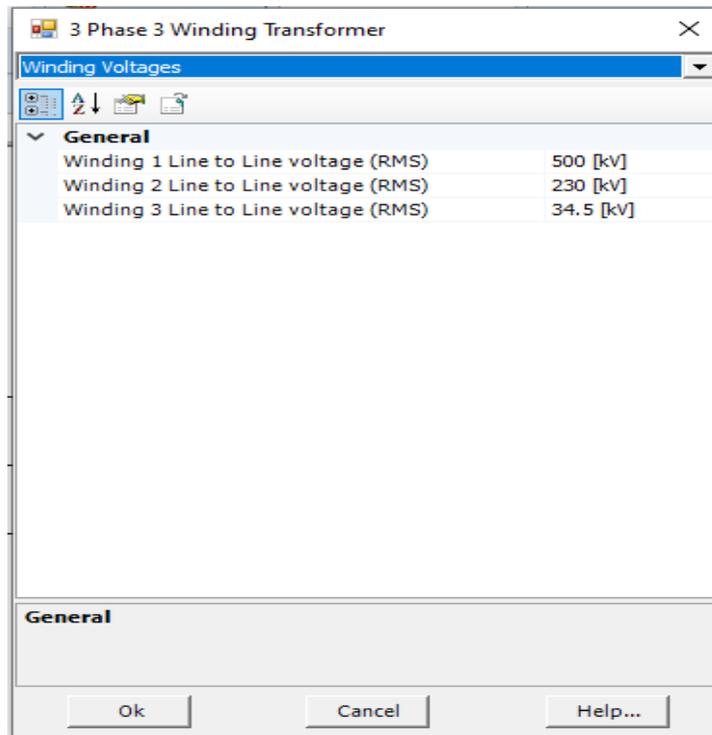
(c) Curva de saturación graficada por datos de características de saturación.

Figura F. 1. Parámetros del transformador en ATPDraw.

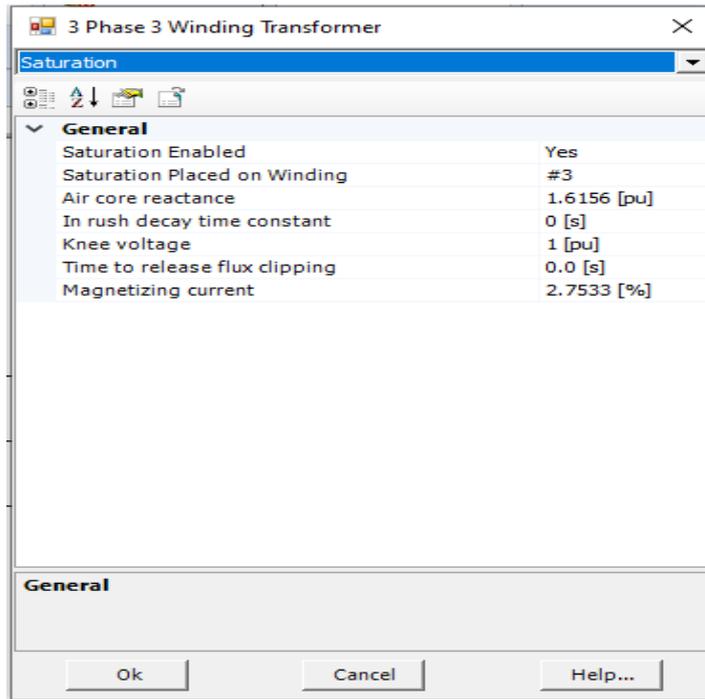
Anexo F. 2: Parámetros ingresados para el transformador en PSCAD.



(a) Configuración de datos característicos del transformador.



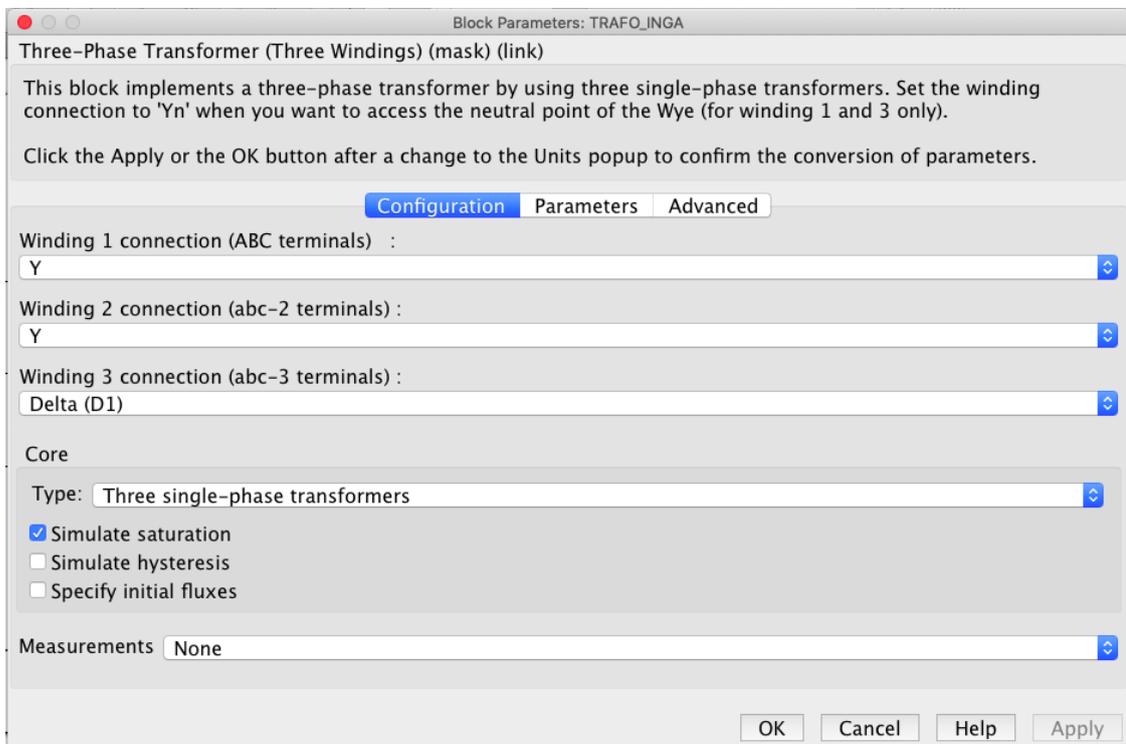
(b) Voltajes de los devanados del transformador.



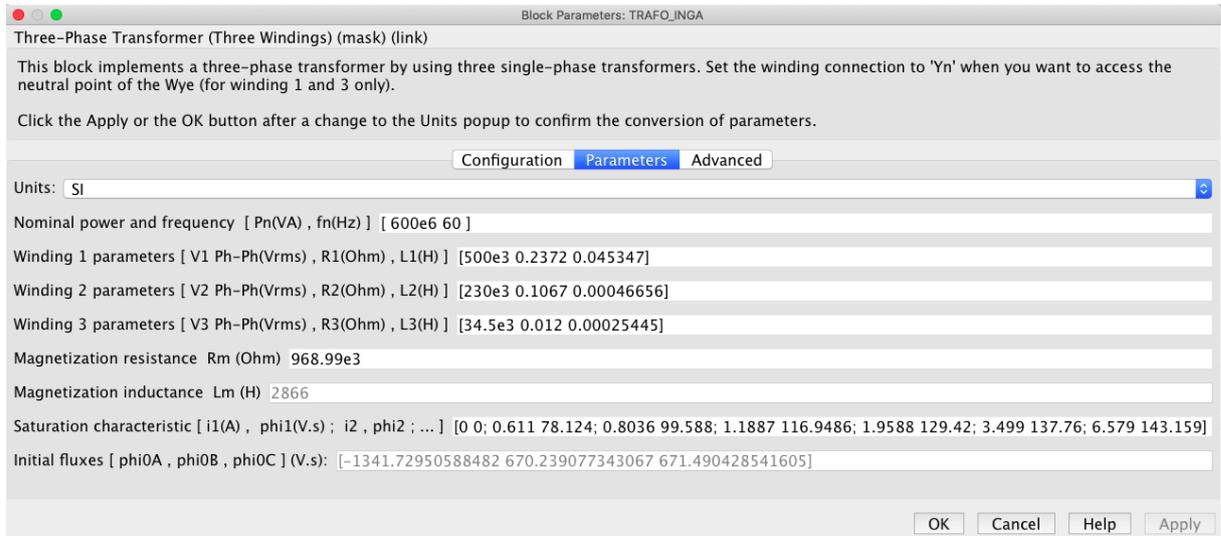
(c) Datos de saturación del transformador

Figura F. 2. Parámetros de la línea de transmisión en PSCAD.

Anexo F. 3: Parámetros ingresados para el transformador en Simulink.



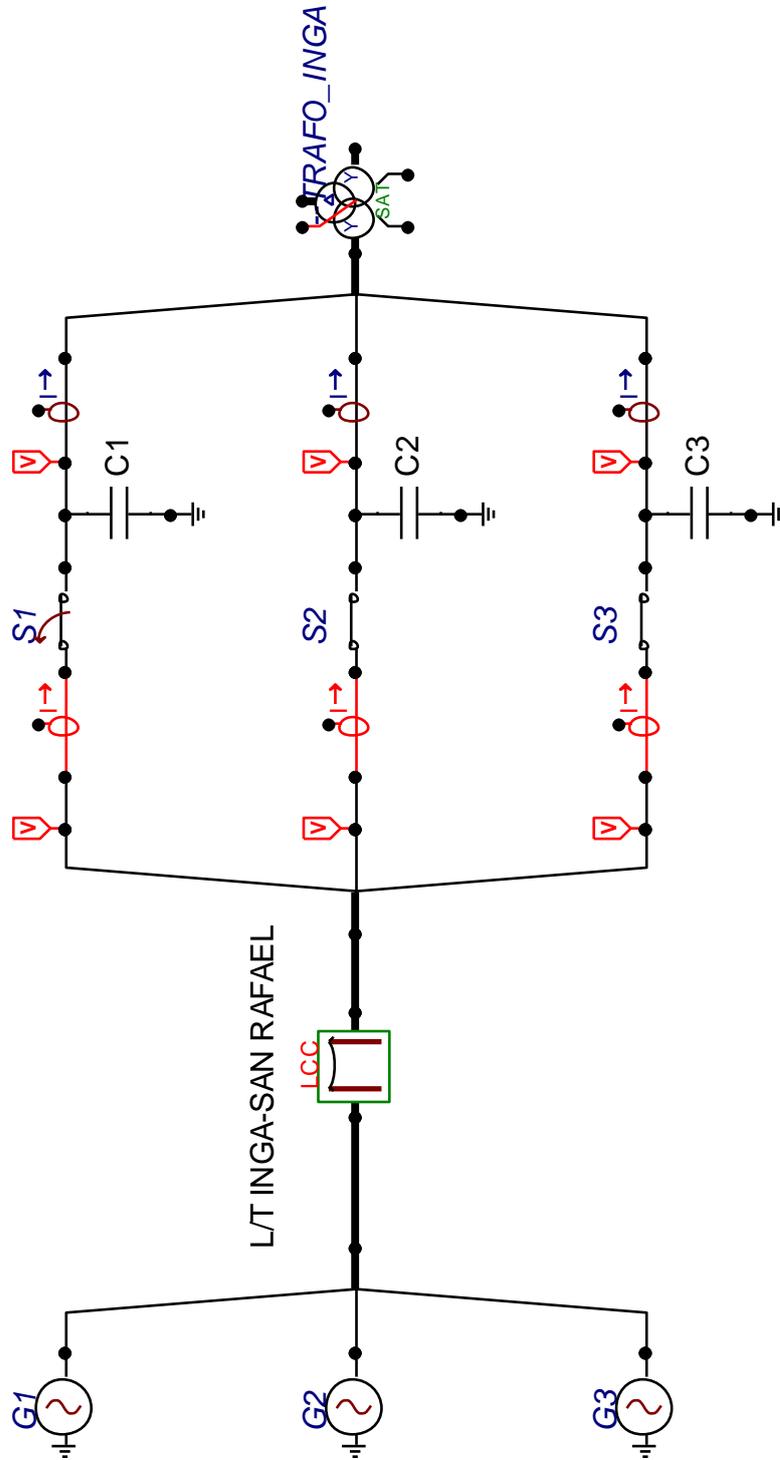
(a) Configuración del transformador - Simulink.



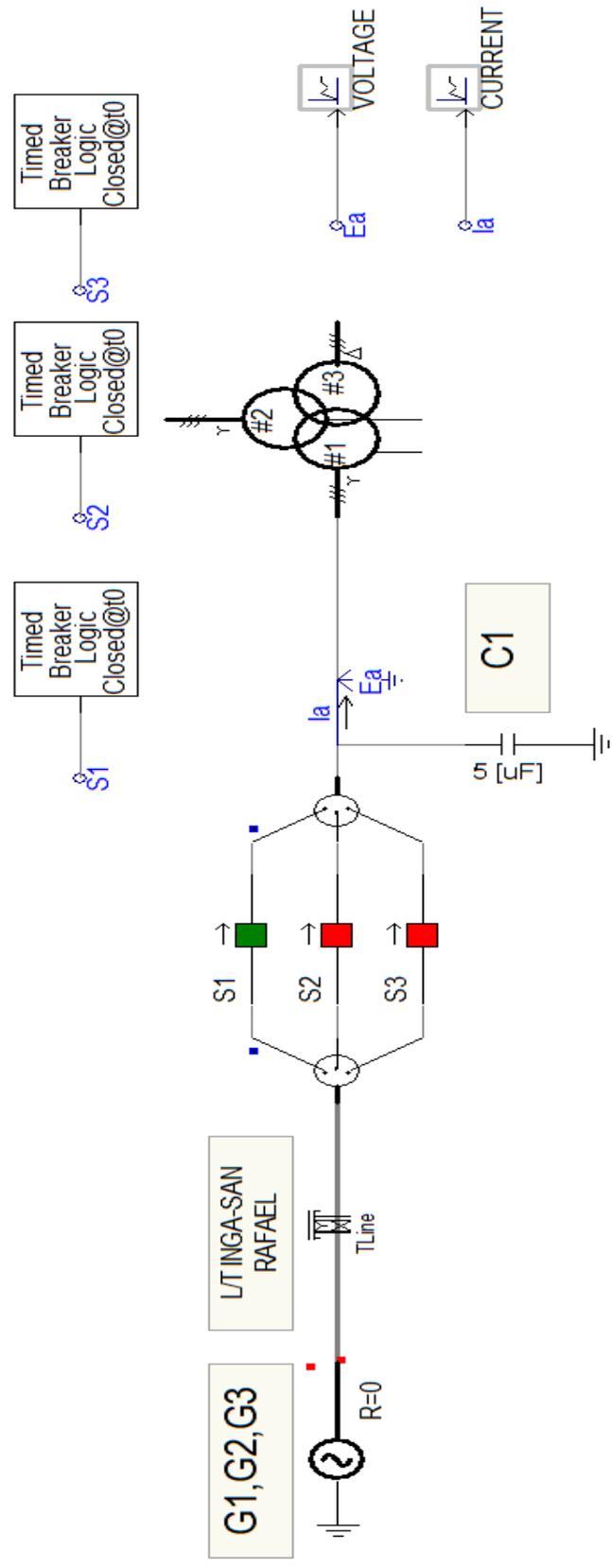
(b) Parámetros ingresados en el transformador

Figura F. 3. Configuración y parámetros ingresados en el transformador - Simulink.

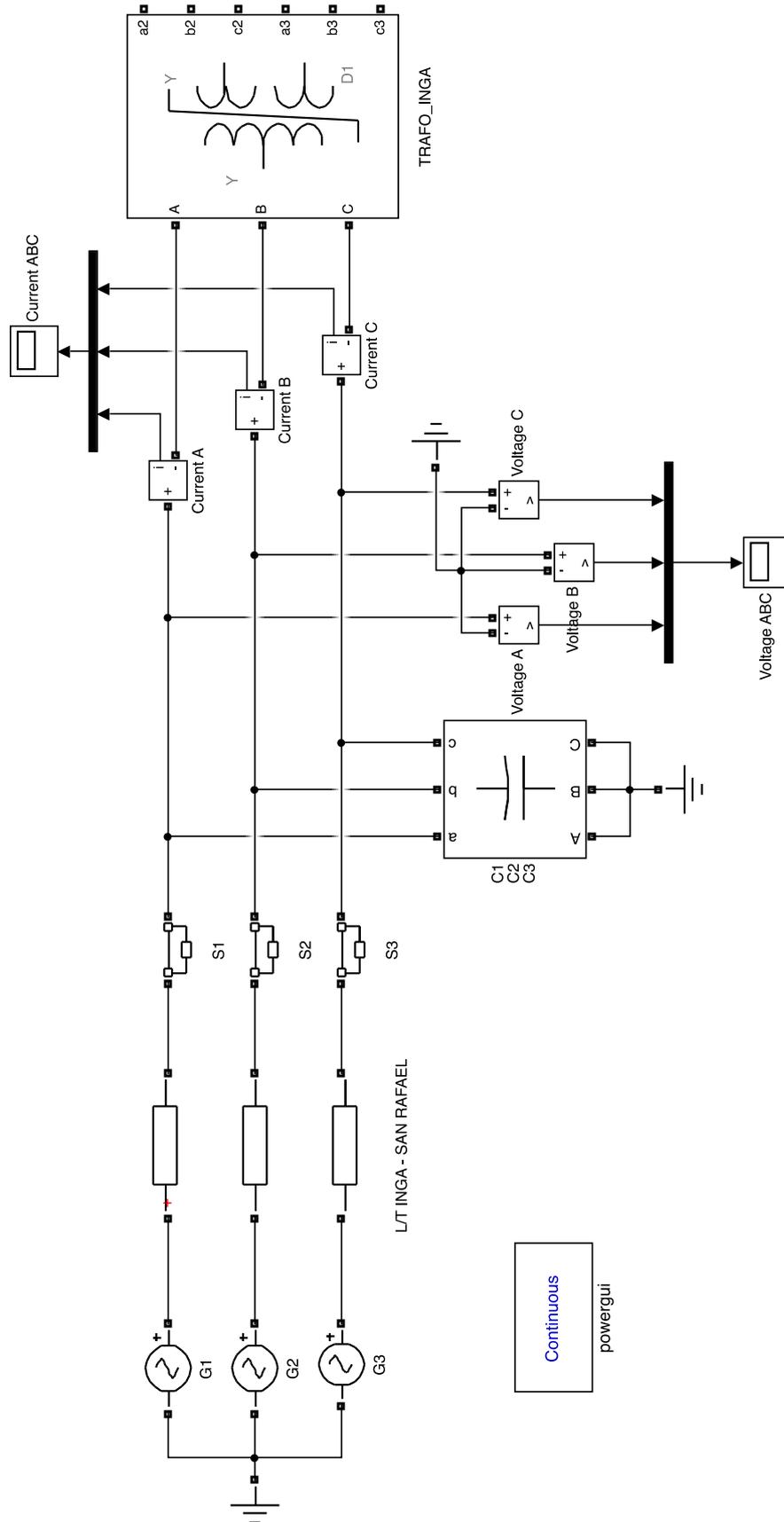
Anexo G: Circuito implementado en ATPDraw.



Anexo H: Circuito implementado en PSCAD.



Anexo I: Circuito implementado en Simulink.



Anexo J: Operación del transformador con carga - Simulink.

