



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**“MODELACIÓN DE TRANSFORMADORES  
TRIFÁSICOS DE TRES DEVANADOS UTILIZANDO  
ATP-EMTP Y SU ENTORNO GRÁFICO ATPDRAW”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES:** JOSUE ALEXANDER PERALTA QUITO  
CRISTIAN FERNANDO MATUTE GUILLEN

**TUTOR:** ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, PHD.

Cuenca - Ecuador

2026

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Josue Alexander Peralta Quito con documento de identificación N° 0107063117 y Cristian Fernando Matute Guillen con documento de identificación N° 0350074514 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

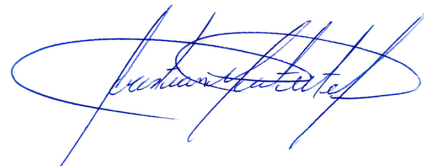
Cuenca, 26 de enero del 2026

Atentamente,



---

Josue Alexander Peralta Quito  
0107063117



---

Cristian Fernando Matute Guillen  
0350074514

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL  
TRABAJO DE TITULACIÓN A  
LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Josue Alexander Peralta Quito con documento de identificación N° 0107063117 y Cristian Fernando Matute Guillen con documento de identificación N° 0350074514, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Modelación de transformadores trifásicos de tres devanados utilizando ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDRAW”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

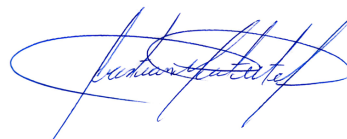
Cuenca, 26 de enero del 2026

Atentamente,



---

Josue Alexander Peralta Quito  
0107063117



---

Cristian Fernando Matute Guillen  
0350074514

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N°0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MODELACIÓN DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE TRES DEVANADOS UTILIZANDO ATP-EMTP Y SU ENTORNO GRÁFICO ATPDRAW, realizado por Josue Alexander Peralta Quito con documento de identificación N°0107063117 y por Cristian Fernando Matute Guillen con documento de identificación N° 0350074514, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 26 de enero del 2026

Atentamente,



---

Ing. José Manuel Aller Castro, PhD.  
0151561800

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la fe y la oportunidad de seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles, guiando cada paso de este proceso y permitiéndome culminar este importante objetivo académico.

De manera muy especial, agradezco a mi familia, por su amor incondicional, su apoyo constante y su comprensión a lo largo de toda mi formación. Su sacrificio, confianza y palabras de aliento han sido el motor que me impulsó a no rendirme y a perseverar hasta alcanzar esta meta.

Finalmente, expreso mi sincero agradecimiento al PhD. Ing. José Manuel Aller Castro, por su orientación, paciencia y valiosos conocimientos compartidos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de la presente investigación.

**Josue Alexander Peralta Quito**

En primer lugar, agradezco a Dios por bendecirme cada día, brindarme fortaleza espiritual y acompañarme en cada dificultad presentada a lo largo de este proceso, permitiéndome superarlas con fe, perseverancia y amor.

En segundo lugar, expreso mi profundo agradecimiento a mi madre por su dedicación, tiempo y apoyo incondicional, por cada noche y cada día de esfuerzo compartido, y por su ejemplo constante de trabajo, superación y valores, que han sido fundamentales en mi formación personal y profesional.

Finalmente, agradezco a mi familia por ser el pilar fundamental en cada paso que doy, por su respaldo constante y por acompañarme en cada meta alcanzada, motivándome siempre a seguir adelante.

**Cristian Fernando Matute Guillen**

# DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con todo mi corazón, a mi familia, y de manera muy especial a mi madre Rosa Peralta y a mi hermano Edison Peralta, por ser mi fortaleza en los momentos más difíciles y mi mayor motivación para seguir adelante. Gracias por cada sacrificio, por cada enseñanza y por el amor incondicional que me brindaron, formándome no solo como profesional, sino también como una persona de bien, guiándome siempre con su ejemplo, esfuerzo y entrega.

Dedico este logro a mi querida abuela Angelita y a mi amiga Jessica, quienes hoy me acompañan desde el cielo. Aunque hoy no estén a mi lado, fueron testigos de cada lucha, de cada desvelo y de todo el esfuerzo realizado para alcanzar esta meta. Su amor, sus consejos y su ejemplo viven para siempre en mi corazón y continúan siendo la luz que guía cada uno de mis pasos.

Finalmente, me dedico este trabajo a mí mismo, por haber perseverado cuando el camino se volvió difícil y por mantener la convicción de que las personas pueden cambiar y crecer. Este logro refleja un proceso de aprendizaje y superación personal, construido con esfuerzo constante y la voluntad de avanzar, siempre buscando ser una mejor versión de uno mismo..

**Josue Alexander Peralta Quito**

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi madre, por ser el apoyo incondicional en cada decisión tomada y en cada logro alcanzado. Su esfuerzo constante, su amor infinito y su dedicación incansable han sido el motor que me impulsó a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Sin su guía, paciencia y sacrificio, hoy no sería posible alcanzar esta nueva meta, que también es fruto de su entrega y ejemplo de vida.

En segundo lugar, dedico este trabajo a mi prima Erika G., por ser la persona que me acompañó durante todo este proceso, brindándome apoyo, ánimo y comprensión. Por ser esa sonrisa y esa alegría en cada noche y cada día de trabajo, y por ayudarme a superar cada dificultad con palabras de aliento y una presencia constante que hizo más llevadero este camino.

Finalmente, este trabajo me lo dedico a nivel personal, como reconocimiento al esfuerzo, la perseverancia y la disciplina demostrados a lo largo de mi formación académica. Al culminar mi carrera, me siento orgulloso de todo el conocimiento y la experiencia adquiridos en una de las ciencias más importantes y que representa, además, una verdadera vocación y gusto personal.

**Cristian Fernando Matute Guillen**

# RESUMEN

En este trabajo se estudia la aparición de inductancias negativas en la modelación de transformadores de múltiples devanados, una problemática de particular relevancia en la implementación de sus circuitos equivalentes en herramientas de simulación de transitorios electromagnéticos como ATP-EMTP, ATPDraw y Simulink. Este fenómeno se presenta al transformar los parámetros obtenidos de los ensayos de cortocircuito entre pares de devanados en un equivalente en estrella con un punto común, referido a una base común del transformador, lo que puede dar lugar a impedancias negativas. Dichas impedancias carecen de interpretación física y provocan inestabilidades y errores numéricos tanto en el análisis en régimen permanente como en el régimen transitorio.

Como solución, se propone una modelación alternativa del transformador de tres devanados basada en una representación tipo autotransformador, la cual permite redefinir de forma consistente las inductancias de fuga. Esta formulación garantiza que todas las impedancias resulten positivas, preservando así la validez física del modelo y asegurando su estabilidad numérica en las simulaciones circuitales.

# ABSTRACT

This work addresses the occurrence of negative inductances in the modeling of multi-winding transformers, a problem of particular relevance in the implementation of their equivalent circuits in electromagnetic transient simulation tools such as ATP-EMTP, ATPDraw, and Simulink. This phenomenon arises when the parameters obtained from short-circuit tests between pairs of windings are converted

into a star-equivalent circuit with a common neutral point referred to a common transformer base, which may lead to negative impedances. Such impedances lack physical meaning and cause numerical instabilities and convergence problems in both steady-state and transient analyses.

To overcome this limitation, an alternative three-winding transformer model based on an autotransformer representation is proposed, which allows the leakage inductances to be consistently redefined. This formulation ensures that all impedances remain positive, thereby preserving the physical validity of the model and guaranteeing numerical stability in circuit-based simulations.

## **PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS**

Transformadores de tres devanados

Modelación de transformadores

Inductancia negativa

ATP-EMTP

ATPDraw

Sistema Eléctrico de Potencia

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>6</b>
1.1	Modelo equivalente de dos devanados . . . . .	6
1.2	Ensayos normalizados de transformadores . . . . .	7
1.2.1	Prueba de Corto Circuito . . . . .	7
1.2.2	Prueba de Vacío . . . . .	9
1.3	Transformadores monofásicos y trifásicos de múltiples devanados . . . . .	10
1.4	Determinación de los parámetros del circuito equivalente . . . . .	13
1.5	Circuito equivalente con la corriente de excitación . . . . .	16
1.6	Sistema por unidad . . . . .	18
1.7	Selección de bases en transformadores . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Modelación de transformadores monofásicos en ATP-EMT</b>	<b>21</b>
2.1	Introducción . . . . .	21
2.1.1	Transformador monofásico . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Método del autotransformador para eliminar la impedancia negativa</b>	<b>30</b>
3.1	Introducción . . . . .	30
3.2	Calculo de parámetros del autotransformador . . . . .	31
3.2.1	Ejemplo de aplicación . . . . .	34
3.2.2	Determinación de los parámetros eléctricos del autotransformador . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Modelación del autotransformador en ATP-EMT</b>	<b>41</b>
4.1	Introducción . . . . .	41
4.2	Tensiones en el autotransformador . . . . .	42
4.3	Ensayo de cortocircuito y calculo de parámetros . . . . .	45
4.3.1	Ensayo de cortocircuito entre el primer y segundo devanado . . . . .	45
4.3.2	Ensayo de cortocircuito entre el tercer y primer devanado . . . . .	47
4.3.3	Ensayo de cortocircuito entre el segundo y tercer devanado . . . . .	50
4.3.4	Autotransformador trifásico . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>58</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Modelo equivalente de dos devanados. . . . .	6
1.2	Prueba de Corto Circuito. . . . .	7
1.3	Prueba de Vacío. . . . .	9
1.4	Circuito equivalente exacto. . . . .	11
1.5	a) Circuito sin las características de excitación: conexión delta. b) Equivalente en estrella. . . . .	12
1.6	Sentido y polaridad de las corrientes en un transformador de tres devanados. . . . .	13
1.7	Ensayo de cortocircuito. . . . .	14
1.8	Esquema del circuito equivalente en el ensayo de cortocircuito . . . .	15
1.9	Ensayo de vacío . . . . .	16
1.10	Circuito equivalente con la corriente de excitación. . . . .	17
2.1	Curva de magnetización. . . . .	22
2.2	Diagrama Ensayo de Vacío. . . . .	23
2.3	Tensión en Vacío. . . . .	23
2.4	Corriente en Vacío. . . . .	24
2.5	Potencia en Vacío. . . . .	24
2.6	Parámetros en el ensayo de Vacío. . . . .	25
2.7	Gráfica de Lissajous. . . . .	26
2.8	Gráfica de Histéresis. . . . .	26
2.9	Ensayo de cortocircuito. . . . .	27
2.10	Tensión y Corriente de corto circuito. . . . .	27
2.11	Potencia de corto circuito. . . . .	28
2.12	Parámetros en el ensayo de cortocircuito . . . . .	28
3.1	Trasformador de tres devanados como Autotrasformador . . . . .	31
3.2	Impedancia primario secundario . . . . .	31
3.3	Impedancia Secundario Terciario . . . . .	32
3.4	Impedancia Primario Terciario . . . . .	32
3.5	Modelo convencional de un trasformador de tres devanados . . . . .	36
3.6	Ensayo de cortocircuito en trasformador modelo convencional . . . . .	37
3.7	(a) Parámetros reales del transformador . . . . .	38
3.8	(b) Corriente de cortocircuito . . . . .	38
3.9	Modelo de un trasformador de tres devanados como autotrasformador	40
4.1	Trasformador monofasico de tres devanados como autotrasformador .	42
4.2	Trasformador de tres devanados como autotrasformador en ATP-EMT	43
4.3	Parámetros de la conexión como autotransformador . . . . .	43
4.4	Parámetros del segundo transformador . . . . .	44
4.5	Niveles de tensión en los tres devanados del autotransformador . . . .	44

4.6	Niveles de tensión eficaz en los tres devanados del autotransformador	44
4.7	Ensayo de cortocircuito para $Z_{12}$	45
4.8	Voltaje de cortocircuito para la determinación de la impedancia $Z_{12}$ del autotransformador	45
4.9	Corriente de cortocircuito para la determinación de la impedancia $Z_{12}$ del autotransformador	46
4.10	Potencia de cortocircuito para la determinación de la impedancia $Z_{12}$ del autotransformador	46
4.11	Parámetros eficaces en el ensayo de cortocircuito para la impedancia $Z_{12}$	46
4.12	Ensayo de cortocircuito para $Z_{31}$	47
4.13	Voltaje de cortocircuito para la determinación de la impedancia $Z_{31}$ del autotransformador	48
4.14	Corriente de cortocircuito para la determinación de la impedancia $Z_{31}$ del autotransformador	48
4.15	Potencia de cortocircuito para la determinación de la impedancia $Z_{31}$ del autotransformador	48
4.16	Parámetros eficaces en el ensayo de cortocircuito para la impedancia $Z_{31}$	49
4.17	Ensayo de cortocircuito para $Z_{23}$	50
4.18	Voltaje de cortocircuito para la determinación de la impedancia $Z_{23}$ del autotransformador	50
4.19	Corriente de cortocircuito para la determinación de la impedancia $Z_{23}$ del autotransformador	51
4.20	Potencia de cortocircuito para la determinación de la impedancia $Z_{23}$ del autotransformador	51
4.21	Parámetros eficaces en el ensayo de cortocircuito para la impedancia $Z_{23}$	51
4.22	Transformador Trifásico de tres devanados como autotransformador	53
4.23	Transformador trifásico representado como autotransformador	54
4.24	Voltaje primario del autotransformador trifásico	54
4.25	Voltaje secundario del autotransformador trifásico	54
4.26	Voltaje terciario del autotransformador trifásico	55
4.27	Voltajes eficaces en los devanados del autotransformador trifásico	55
4.28	Ensayo de cortocircuito en el transformador trifásico	56
4.29	Corriente de cortocircuito del autotransformador trifásico	56
4.30	Corriente eficaz de cortocircuito del autotransformador trifásico	56
4.31	Potencia de cortocircuito del autotransformador trifásico	57
4.32	Potencia eficaz de cortocircuito del autotransformador trifásico	57

# Índice de tablas

2.1	Parámetros eléctricos de un transformador monofásico . . . . .	21
2.2	Curva de magnetización . . . . .	22
2.3	Ensayo de vacío transformador monofásico . . . . .	25
2.4	Ensayo de corto transformador monofásico . . . . .	28
2.5	Comparación de parámetros: datos de placa vs. simulación . . . . .	29
4.1	Parámetros del transformador . . . . .	52
1	Áreas del Trabajo de Grado. . . . .	63

## GLOSARIO

**ATP** *Análisis Transitorio de Potencia, programa especializado en el análisis transitorio de sistemas de potencia..*

**ATPDraw** *Entorno gráfico asociado a ATP-EMTP que permite la visualización y modelado de sistemas eléctricos..*

**EMTP** *Electromagnetic Transients Program, software que permite modelar el estado estacionario y transitorio de diversas máquinas y sistemas eléctricos..*

**SATURA** *Subrutina en programas de simulación eléctrica, como ATP, que modela el comportamiento magnético de transformadores en saturación. Utiliza extrapolación lineal, lo que puede causar errores significativos durante la energización..*

**SEP** Sistema Eléctrico de Potencia.

# INTRODUCCIÓN

Los transformadores constituyen un elemento predominante en diversas aplicaciones dentro de los sistemas eléctricos de potencia, ya sea en configuraciones de dos o múltiples devanados. En el caso de los transformadores de tres devanados [1], debido a la diferencia de potencia entre sus bobinas, estos equipos son utilizados cuando se requiere alimentar sistemas que operan a distintos niveles de voltaje. Adicionalmente, el tercer devanado permite la mitigación de armónicos, contribuyendo a mejorar la calidad de la energía eléctrica.

La modelación de un transformador es esencial en el área de potencia, porque permite realizar un análisis adecuado de los transitorios electromagnéticos y del comportamiento dinámico que puede presentarse en los sistemas eléctricos de potencia [2]. Los transformadores son componentes fundamentales, puesto que mediante su utilización se hace posible la transmisión y distribución de la energía eléctrica en diferentes niveles de tensión.

Una representación precisa de los transformadores facilita la obtención de simulaciones más realistas, lo que permite analizar su comportamiento dentro de la red eléctrica [3]. Esto contribuye a la evaluación de la estabilidad del sistema eléctrico de potencia y al estudio confiable de sus condiciones de operación.

Se han documentado en distintos trabajos las dificultades para la representación de transformadores de múltiples devanados cuando se simulan en programas basados en formulaciones circuitales, tales como ATP-EMTP, ATPDraw o Simulink [4]. Estas dificultades se presentan principalmente en el momento de ingresar los parámetros del transformador, ya que al expresarlos en un sistema por unidad referido a una base común pueden aparecer valores de inductancia negativa. Dichos valores no son aceptados por los simuladores o generan problemas numéricos, al ser interpretados como parámetros no válidos, lo que limita la correcta ejecución y confiabilidad de la simulación.

Existen diferentes tipos de transformadores tales como potencia, medida, aislamiento, entre otros. Los transformadores de potencia pueden ser de dos o más devanados, tanto monofásicos como trifásicos [2]. Estos equipos pueden estar constituidos por varios devanados por cada fase.

Moore y Wilkins, en su trabajo de 1924 [5], estudian los transformadores de tres devanados y destacan que el comportamiento de las corrientes que circulan por cada uno de los devanados no es necesariamente equivalente ni se encuentra en fase con las de los otros bobinados. Esta diferencia en el comportamiento de las corrientes complica la representación de las inductancias en los modelos circuitales de este tipo de transformadores.

Clem, en 1936 [6], propone que existe una similitud en los códigos de prueba de la *A.I.E.E.* aplicados a transformadores, los cuales se encuentran originalmente centralizados en transformadores de dos devanados, pero pueden ser utilizados de manera similar en el análisis de transformadores de tres devanados.

Garin, A. N., en 1947 [7], expone que en los transformadores de tres devanados existe una diferencia significativa entre las potencias asignadas a cada bobinado. Al calcular las impedancias de los distintos devanados referidas a una base común de potencia, generalmente correspondiente al devanado de mayor capacidad, se observa que algunos bobinados pueden presentar corrientes de cortocircuito que exceden hasta 25 veces la corriente nominal. Estos límites son considerados y regulados por las normas *ASA* vigentes, específicamente las *C57, Normas Americanas para Transformadores, Reguladores y Reactores*.

William D. y Stevenson, en 1982 [3], presentan una visión comparativa entre los transformadores de dos devanados, en los cuales las potencias de ambos bobinados suelen ser iguales, y los transformadores de múltiples devanados, donde las potencias pueden diferir de manera significativa. En ambos casos, resulta fundamental realizar el análisis en valores por unidad, utilizando una base común de potencia expresada en kilovoltamperios, lo que permite facilitar la comparación y el estudio de los parámetros del transformador.

Chen, en 1997 [1], propone un modelo de transformador de tres devanados basado en una modificación de la topología convencional, transformándola en una configuración equivalente a la de un autotransformador. Este modelo adopta una solución directa para representar las inductancias de fuga y los efectos de acoplamiento del núcleo. Los parámetros del modelo se obtienen a partir de dos ensayos ampliamente conocidos: la prueba de cortocircuito y la prueba de vacío.

W. Brokering, R. Palma y L. Vargas, en 2008 [8], analizan la representación de las impedancias en transformadores de tres devanados, enfatizando que las pruebas de cortocircuito deben realizarse en todos los bobinados. Cada uno de los devanados es sometido a estos ensayos con el fin de expresar sus parámetros en valores por unidad, lo que permite una representación circuital adecuada del transformador.

Schultz, en 2009 [9], presenta una propuesta de modelación mediante la introducción de un nuevo circuito equivalente para transformadores de múltiples devanados, denominado *modelo de fuga acoplada*. Este modelo considera las inductancias de

fuga de cada devanado como elementos acoplados, lo que permite mejorar el análisis del comportamiento eléctrico de este tipo de transformadores.

León, en 2009 [10], señala que en los transformadores multidevanados es posible encontrar valores negativos de inductancia de fuga equivalente. Estos valores dificultan o impiden la simulación en estado estacionario. Como solución a este problema, se propone modificar la topología del modelo, representando el transformador como un autotransformador.

El trabajo de Dután [4] también analiza la modelación de un transformador de tres devanados en ATP, con el objetivo de estudiar el comportamiento de la saturación del núcleo. Las curvas de magnetización obtenidas a partir de ensayos de vacío, realizados a niveles de voltaje comprendidos entre 0.9 y 1.1 pu, no representan adecuadamente la saturación extrema que se genera durante la energización del transformador, fenómeno conocido como *inrush*.

Como solución, Dután propone el uso del modelo avanzado de transformador XFMR disponible en ATP, el cual supera las limitaciones de la subrutina SATURA, que realiza una extrapolación lineal y puede introducir errores significativos. Este enfoque implementa un método que permite una caracterización magnética más precisa dentro del rango experimental y considera el acoplamiento trifásico del núcleo.

Rifaat y Rasheek, en 2011 [11], analizan la modelación de transformadores multidevanados bajo condiciones desequilibradas y durante fenómenos transitorios que pueden presentarse en sistemas eléctricos industriales. En su estudio se aborda la representación de transformadores de tres devanados para el análisis de armónicos, lo que permite, mediante simulaciones en EMTP, evaluar el comportamiento transitorio de estos equipos.

Ramos y Burgos, en 2017 [12], estudian los devanados estabilizadores en transformadores trifásicos de tres devanados con conexión YNynd, destacando su papel en la mitigación de deficiencias operativas asociadas con las conexiones en estrella. Aunque se ha enfatizado la necesidad de un análisis crítico para la inclusión de estos devanados, la evaluación de su conveniencia requiere un entendimiento profundo del comportamiento de secuencia cero del transformador. Este aspecto, a pesar de haber sido abordado en diversos estudios, carece aún de una síntesis integral en la literatura técnica.

Jazebi, en 2015 [13], presenta una propuesta que mejora la implementación de la inductancia de fuga en transformadores de múltiples devanados. Su enfoque permite analizar de manera simultánea el comportamiento de saturación del núcleo de hierro, considerando además el ciclo de histéresis y las pérdidas asociadas al núcleo.

Los transformadores de tres devanados presentan configuraciones en las que las capacidades de potencia entre los distintos bobinados difieren, por lo que sus impedancias se expresan en valores por unidad referidos a una base común. Para la

caracterización de estos equipos, Agila [14] documenta dos ensayos fundamentales: la prueba de vacío, que permite determinar los parámetros de la rama paralela del circuito equivalente, incluyendo las pérdidas en el núcleo y la corriente de magnetización; y la prueba de cortocircuito, mediante la cual se calculan los parámetros en serie, tales como la resistencia y la reactancia equivalentes.

Adicionalmente, se realizan pruebas dieléctricas, como la medición de la resistencia de aislamiento mediante megóhmetros y la prueba de rigidez dieléctrica de acuerdo con la norma *IEEE Std. C57.12.91* [15], con el fin de verificar la integridad del sistema de aislamiento. Estos procedimientos experimentales proporcionan los datos necesarios para desarrollar modelos precisos en herramientas de simulación como *ATP-EMTP*, donde una representación adecuada del núcleo, especialmente de su saturación, así como de los parámetros del circuito equivalente, resulta fundamental para el análisis de transitorios electromagnéticos, como los que ocurren durante la energización del transformador. Esto permite superar las limitaciones de los ensayos convencionales, los cuales operan únicamente dentro de un rango restringido de voltaje.

Es fundamental contar con un marco normativo adecuado. La norma *IEEE C57.12.90* [16] establece los procedimientos estandarizados para los ensayos de transformadores de distribución, potencia y regulación sumergidos en líquido. Esta norma constituye la base metodológica para la caracterización experimental de estos equipos, ya que especifica los protocolos para la medición de la resistencia de devanados, las pruebas de relación de transformación, los ensayos de vacío, que incluyen la determinación de las pérdidas en el núcleo y la corriente de excitación, los ensayos de cortocircuito, que abarcan la impedancia y las pérdidas de carga, así como las pruebas dieléctricas.

La norma *IEC 60076-1* [17] define los ensayos necesarios para la modelación de transformadores, estableciendo los procedimientos y las condiciones bajo las cuales deben realizarse ensayos esenciales, tales como los de cortocircuito, circuito abierto y relación de transformación. Estos ensayos permiten determinar los parámetros del circuito equivalente, incluyendo la impedancia de dispersión, las pérdidas en el núcleo y la relación de vueltas. El cumplimiento de esta norma garantiza que los modelos obtenidos sean consistentes, comparables y representen de manera fiel el comportamiento real del transformador bajo condiciones normales de operación.

*ATP-EMTP* y su entorno gráfico *ATPDraw* son programas especializados en el análisis transitorio de sistemas de potencia que permiten modelar el estado estacionario y transitorio de diversas máquinas y sistemas eléctricos, siendo ampliamente utilizados en estudios e investigaciones. Un desarrollo reciente y significativo dentro de esta plataforma es el modelo de transformador híbrido XFMR, documentado por Hans K [18], quienes presentan un modelo avanzado capaz de simular trans-

formadores trifásicos de dos o tres devanados, incluyendo autotransformadores y todas las diferentes conexiones que se utilizan en el sistema eléctrico. Este modelo incorpora una matriz de inductancia inversa para el flujo de dispersión, resistencia de devanado dependiente de la frecuencia, acoplamientos capacitivos y un núcleo topológicamente correcto con saturación y pérdidas individuales. Además, ofrece flexibilidad al poderse parametrizar con tres fuentes de datos distintas: valores típicos, reportes de prueba o información de diseño.

Nosratian en 2018 [19] explica el uso del programa [EMTP](#) para la simulación del régimen transitorio en transformadores, presentando un enfoque práctico para realizar estas simulaciones. Proporciona estudios de casos que analizan ejemplos básicos y propone configuraciones alternativas de diseño y operación, lo que facilita la comprensión de los fenómenos transitorios en los transformadores. Este enfoque no solo permite a los estudiantes y profesionales entender mejor el comportamiento de los transformadores bajo condiciones transitorias, sino que también optimiza el proceso de simulación mediante el uso de [EMTP](#).

El objetivo principal de este trabajo consiste en analizar el origen de la aparición de impedancias negativas en la modelación de transformadores de múltiples devanados y proponer una metodología que permita obtener modelos circuitales equivalentes con parámetros estrictamente positivos, adecuados para su implementación en programas de simulación circuital electromagnética.

Adicionalmente, se propone el desarrollo de una metodología que facilite la conversión de transformadores de múltiples devanados a una representación equivalente de autotransformador, con el fin de eliminar las limitaciones asociadas a la presencia de impedancias negativas y mejorar la estabilidad y confiabilidad de las simulaciones.

# CAPÍTULO 1

## Marco Teórico

### 1.1 Modelo equivalente de dos devanados

El circuito equivalente de un transformador de dos devanados tiene como objetivo representar las características físicas de un transformador real, lo que permite realizar un análisis más preciso y realista del comportamiento de sus componentes eléctricos [3, 2].

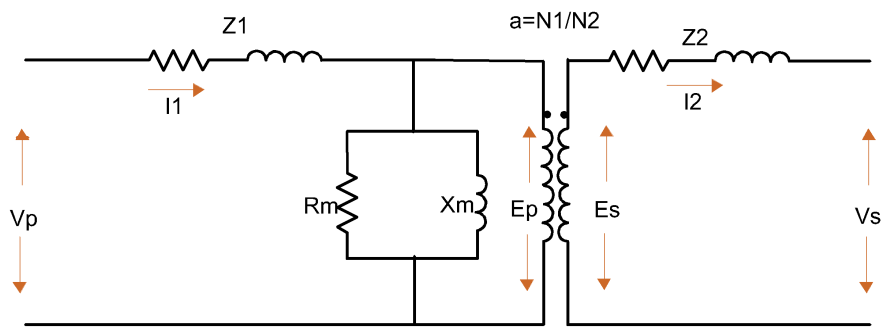


Figura 1.1: Modelo equivalente de dos devanados.

$V_p$  es el voltaje del devanado primario (V).

$V_s$  es el voltaje del devanado secundario (V).

$I_1$  es la corriente del devanado primario (A).

$I_2$  es la corriente del devanado secundario (A).

$Z_1$  es la impedancia serie del devanado primario ( $\Omega$ ).

$Z_2$  es la impedancia serie del devanado secundario ( $\Omega$ ).

$R_m$  es la resistencia de pérdidas en el núcleo ( $\Omega$ ).

$X_m$  es la reactancia de magnetización ( $\Omega$ ).

$E_p$  es la fuerza electromotriz inducida en el primario (V).

$E_s$  es la fuerza electromotriz inducida en el secundario (V).

$a = \frac{N_1}{N_2}$  es la relación de transformación.

## 1.2 Ensayos normalizados de transformadores

Los ensayos normalizados son esenciales para garantizar la integridad, el rendimiento y la confiabilidad de los transformadores eléctricos. La norma *IEEE Std. C57.12.91* establece los protocolos estandarizados para la realización de pruebas y evaluaciones del sistema de aislamiento del transformador, permitiendo verificar su estado dieléctrico y su capacidad de operación segura.

Por su parte, la norma *IEEE C57.12.90* proporciona una guía para la ejecución de los ensayos en transformadores, definiendo los procedimientos para la medición de la resistencia de los devanados, la prueba de relación de transformación y los ensayos de vacío. Estos ensayos son fundamentales para la caracterización experimental de los transformadores, ya que permiten determinar parámetros como las pérdidas en el núcleo y la corriente de excitación.

Adicionalmente, la norma *IEC 60076-1* establece las condiciones que deben considerarse para la realización de ensayos esenciales en transformadores, tales como las pruebas de cortocircuito y de vacío. Estos ensayos permiten obtener los parámetros eléctricos fundamentales necesarios para el desarrollo de modelos equivalentes precisos.

### 1.2.1 Prueba de Corto Circuito

La prueba de corto circuito es fundamental para determinar las características eléctricas de los transformadores, específicamente sus resistencias y reactancias. La característica principal de esta prueba es que el devanado del lado de alta tensión se encuentra en cortocircuito, lo que permite obtener una corriente significativa en el lado de baja tensión.

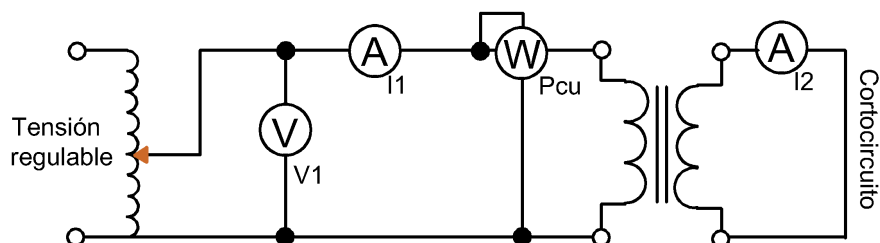


Figura 1.2: Prueba de Corto Circuito.

Para realizar esta prueba, se deben seguir los siguientes pasos:

1. **Conexión de devanados:** En este paso, se debe seleccionar uno de los devanados del transformador, ya sea el de alta tensión o el de baja tensión, dependiendo de la configuración deseada. Es común seleccionar el devanado de alta tensión para que el devanado de baja tensión quede en cortocircuito.
2. **Aplicación de voltaje:** Se debe emplear una fuente de voltaje variable para suministrar tensiones desde 0 voltios. Es vital que la tensión suministrada sea limitada y mantenga un nivel muy bajo. Además, la corriente en el devanado donde se suministra el voltaje no debe exceder los valores nominales para evitar daños al transformador.
3. **Medición de parámetros:** Durante la prueba, se deben medir diversos parámetros eléctricos, como el voltaje suministrado, la corriente generada correspondiente a ese voltaje, y la potencia en el devanado donde se aplica el voltaje. Estas mediciones son críticas para el análisis y caracterización del transformador.

Una vez recopilados los datos de corriente, voltaje y potencia, se puede proceder al cálculo de impedancias. Al utilizar las siguientes fórmulas, es posible determinar los valores de resistencia y reactancia que caracterizan el transformador:

**Resistencia de Corto Circuito:**

$$R_{CC} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2}, \quad (1.1)$$

donde:

$R_{CC}$  es la resistencia de corto circuito ( $\Omega$ ).

$P_{CC}$  es la potencia en corto circuito (W).

$I_{CC}$  es la corriente en corto circuito (A).

**Potencia Reactiva en Corto Circuito:**

$$Q_{CC} = \sqrt{(S_{CC}^2 - P_{CC}^2)}, \quad (1.2)$$

donde:

$Q_{CC}$  es la Potencia reactiva en corto circuito (VAR).

$S_{CC}$  es la potencia aparente en corto circuito (VA).

$P_{CC}$  es la potencia en corto circuito (W).

### Reactancia de Corto Circuito:

$$X_{CC} = \frac{Q_{CC}}{I_{CC}^2}, \quad (1.3)$$

donde:

$X_{CC}$ : es la reactancia de corto circuito ( $\Omega$ ).

$Q_{CC}$  es la rotencia reactiva en corto circuito (VAR).

$I_{CC}$  es corriente en corto circuito (A).

La obtención de estos datos permitirá establecer parámetros clave que faciliten la modelación del transformador en cuestión. Estos parámetros son esenciales para garantizar el correcto funcionamiento y la integración del transformador en sistemas eléctricos.

#### 1.2.2 Prueba de Vacío

La prueba de vacío es fundamental para determinar las pérdidas en el núcleo del transformador, así como para obtener las impedancias y las pérdidas en vacío correspondientes. En esta prueba, el devanado de alto voltaje se deja abierto, mientras que se aplica un voltaje al devanado de baja tensión hasta alcanzar el nivel nominal.

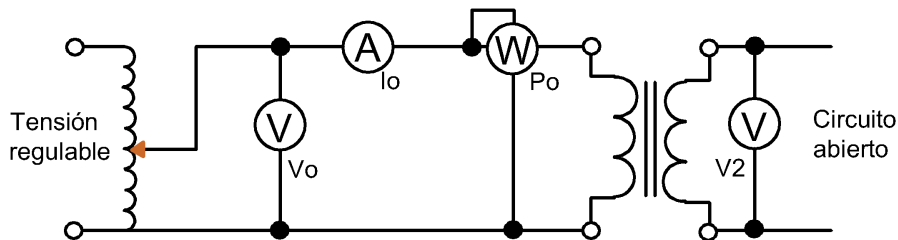


Figura 1.3: Prueba de Vacío.

Los pasos para realizar esta prueba son los siguientes:

1. **Conexión de devanados:** En este paso, uno de los devanados se conecta a la fuente de voltaje, mientras que el otro permanece desconectado o en circuito abierto. Esta configuración permite evaluar las características del transformador sin carga.
2. **Aplicación de voltaje:** Se requiere una fuente variable para elevar el voltaje hasta llegar al valor nominal del transformador. Es crucial controlar el voltaje aplicado para evitar daños al equipo durante la prueba.

3. **Medición de parámetros:** Durante la prueba, se registran parámetros eléctricos fundamentales. Los valores que deben medirse incluyen el voltaje aplicado ( $V_0$ ), la corriente que circula en el devanado ( $I_0$ ), y la potencia consumida ( $P_0$ ).

Obtenidos estos valores, se pueden calcular los demás parámetros necesarios para la modelación de transformadores.

**Resistencia equivalente:**

$$R_f = \frac{V_0^2}{P_0}, \quad (1.4)$$

donde:

$R_f$  es la resistencia equivalente del transformador en vacío ( $\Omega$ ).

$V_0$  es el voltaje aplicado (V).

$P_0$  es la potencia en vacío (W).

**Potencia reactiva:**

$$Q = \sqrt{(S_0^2 - P_0^2)} \quad (1.5)$$

donde:

$Q$  es la potencia reactiva (VAR).

$S_0$  es la potencia aparente total (VA).

$P_0$  es la potencia en vacío (W).

**Reactancia magnética:**

$$X_m = \frac{V_0^2}{Q}, \quad (1.6)$$

donde:

$X_m$  es la reactancia magnética ( $\Omega$ ).

$V_0$  es el Voltaje aplicado (V).

$Q$  es la potencia reactiva (VAR).

### 1.3 Transformadores monofásicos y trifásicos de múltiples devanados

La problemática principal en el uso de un transformador multicircuito se refiere a la regulación de tensión, las corrientes de cortocircuito, la división de carga entre circuitos y la conexión de estos transformadores en el [SEP](#). Esta problemática puede

analizarse según el libro clásico de transformadores del MIT [20] a través de dos métodos. El primero, mediante una base por fase, utiliza la teoría del transformador monofásico de  $n$  circuitos, teniendo en consideración y despreciando los efectos de la capacitancia. Así, el circuito se simplifica a  $n$  mallas y  $n$  nodos.

El segundo método se basa en un circuito equivalente que comprende un cierto número de impedancias de enlaces simples. La corriente de excitación suele ser débil, y al despreciar el circuito, se reduce a una red de  $n$  terminales, con un enlace entre cada terminal. Los valores de admitancia de entrada y de transferencia en cortocircuito, así como las admitancias de enlace, pueden calcularse a partir de ensayos en los que se excita cada devanado uno por uno a tensión reducida, manteniendo cortocircuitados todos los demás devanados.

Basado en la teoría de transformadores de  $n$  circuitos, el transformador de tres devanados puede representarse mediante un circuito equivalente de cuatro terminales con un enlace entre cada terminal, tal como se muestra en la Figura 1.4. Este circuito puede representar tanto un transformador monofásico de tres devanados como una fase de un banco trifásico de transformadores de tres devanados.

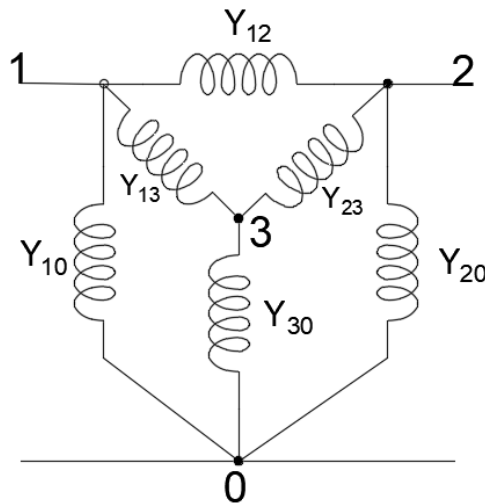


Figura 1.4: Circuito equivalente exacto.

Los enlaces del circuito equivalente que terminan en el terminal 0 representan las características de excitación del transformador. Dado que la corriente es muy pequeña, las admitancias son también pequeñas, lo que permite reducir el circuito a una conexión en delta, como se muestra en la Figura 1.5a. Por otro lado, cualquier montaje en delta puede transformarse en un equivalente en estrella, como se ilustra en la Figura 1.5b.

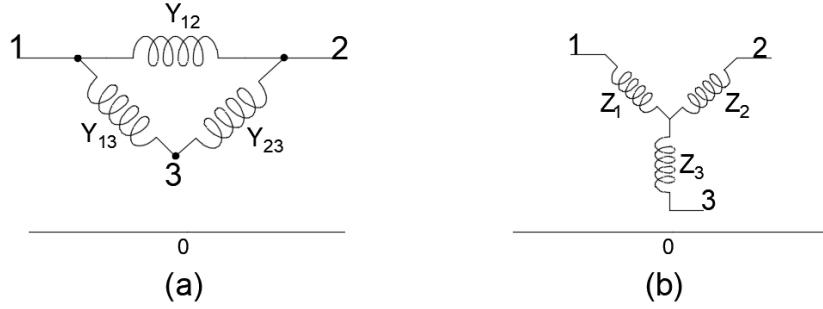


Figura 1.5: a) Circuito sin las características de excitación: conexión delta. b) Equivalente en estrella.

Las ecuaciones para obtener un equivalente de la conexión delta a estrella son:

$$Z_1 = \frac{Y_{23}}{Y_{12}Y_{23} + Y_{23}Y_{31} + Y_{31}Y_{12}} \quad (1.7)$$

$$Z_2 = \frac{Y_{31}}{Y_{12}Y_{23} + Y_{23}Y_{31} + Y_{31}Y_{12}} \quad (1.8)$$

$$Z_3 = \frac{Y_{12}}{Y_{12}Y_{23} + Y_{23}Y_{31} + Y_{31}Y_{12}} \quad (1.9)$$

Sean  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  los vectores representativos de las corrientes que ingresan por los tres terminales de polaridad correspondiente. Estas mismas corrientes son las que salen por el terminal común 0, es decir, son iguales a la suma vectorial de las corrientes. Por otro lado, dado que se desprecia la corriente de excitación, se supone que la fuerza magnetomotriz resultante de todas las corrientes es nula. Así, al considerar los sentidos positivos de las corrientes en relación con el núcleo, y al referir todas las corrientes a una base común, se observa lo indicado en la Figura 1.6.

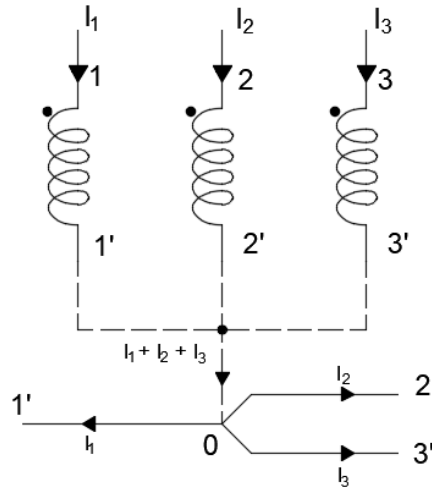


Figura 1.6: Sentido y polaridad de las corrientes en un transformador de tres devanados.

Según la ley de corrientes de Kirchhoff, se establece la siguiente ecuación en el nodo común 0:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (1.10)$$

#### 1.4 Determinación de los parámetros del circuito equivalente

Las admitancias de enlace del circuito equivalente en delta se determinan a través del ensayo de cortocircuito, en el cual se aplica una tensión reducida a los devanados uno por uno, mientras que los demás permanecen en cortocircuito. Sin embargo, para determinar las impedancias del circuito en estrella, se evalúan en función de las impedancias en cortocircuito o equivalentes de cada par de devanados, tratándolos como si se tratara de un transformador de dos devanados.

Se aplica una baja tensión al devanado 1, mientras que el devanado 2 se encuentra en cortocircuito y el devanado 3 está abierto. En estas condiciones, se toman las mediciones de tensión  $V_1$ , corriente  $I_1$  y potencia  $P_1$ , tal como se muestra en la Figura 1.7.

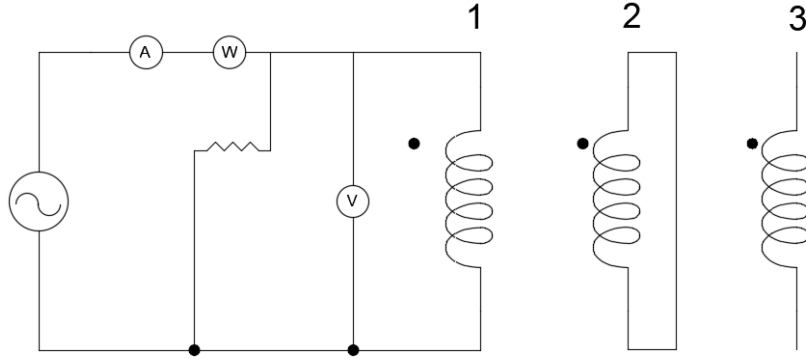


Figura 1.7: Ensayo de cortocircuito.

Entonces, el modulo de las impedancias del circuito equivalente se calcula como:

$$Z_{(12)} = \frac{V_1}{I_1} \quad (1.11)$$

De forma similar se trabaja para el resto de mediciones en los diferentes devanados:

$$Z_{(23)} = \frac{V_2}{I_2} \quad (1.12)$$

$$Z_{(31)} = \frac{V_3}{I_3} \quad (1.13)$$

Las componentes de resistencia y reactancias se obtienen como:

$$R_{(12)} = \frac{P_1}{I_1^2} \quad (1.14)$$

$$X_{(12)} = \sqrt{Z_{(12)}^2 - R_{(12)}^2} \quad (1.15)$$

$$R_{(23)} = \frac{P_2}{I_2^2} \quad (1.16)$$

$$X_{(23)} = \sqrt{Z_{(23)}^2 - R_{(23)}^2} \quad (1.17)$$

$$R_{(31)} = \frac{P_3}{I_3^2} \quad (1.18)$$

$$X_{(31)} = \sqrt{Z_{(31)}^2 - R_{(31)}^2} \quad (1.19)$$

Cuando el devanado 1 se encuentra con excitación el devanado 2 está en corto se deduce que la impedancia  $Z_{(12)}$  es la conexión en serie de las dos impedancias  $Z_1$  y  $Z_2$  del circuito en estrella tal como se muestra en la Figura 1.8 .

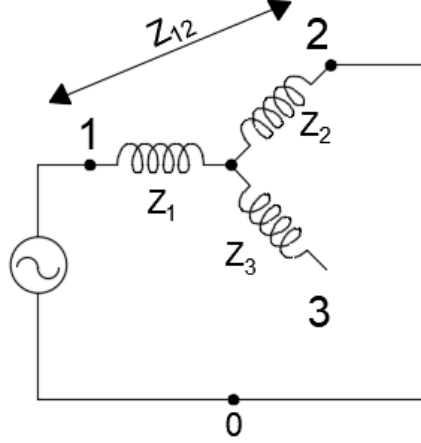


Figura 1.8: Esquema del circuito equivalente en el ensayo de cortocircuito .

Expresando esta equivalencia tenemos las siguientes ecuaciones y matrices:

$$Z_{(12)} = Z_1 + Z_2 \quad (1.20)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{(12)} \\ Z_{(23)} \\ Z_{(31)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Despejando de (1.21), se obtiene el vector de impedancias al punto común como,

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{(12)} \\ Z_{(23)} \\ Z_{(31)} \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Aunque las impedancias  $Z_{12}$ ,  $Z_{23}$  y  $Z_{31}$  son siempre positivas, es totalmente posible que algunas de las impedancias  $Z_1$ ,  $Z_2$  o  $Z_3$  sea negativa. Este fenómeno representa una de las principales dificultades en la modelación y simulación de transformadores de tres devanados en un SEP. Según [20], una reactancia negativa puede representarse a frecuencia constante por una capacidad, pero dado que la reactancia suele ser muy pequeña, la capacitancia resultante tendría un valor extremadamente alto. Por otro lado, una resistencia negativa presenta mayores complicaciones, debido a que no puede representarse mediante un elemento físico y, por lo general, se evita combinándola con algún elemento externo en serie dentro del sistema. Este

estudio busca encontrar un modelo equivalente para evitar la reactancia negativa en el transformador de tres devanados de manera mas exacta y confiable.

## 1.5 Circuito equivalente con la corriente de excitación

Cuando se desea modelar el transformador sin despreciar la rama de magnetización, es necesario utilizar un modelo equivalente completo, como se muestra en la Figura 1.4. Teóricamente, las admitancias  $Y_{10}$ ,  $Y_{20}$  y  $Y_{30}$  pueden determinarse mediante tres ensayos en vacío, tomando mediciones de la corriente de excitación del lado primario, mientras que el resto de los circuitos o devanados se encuentra en vacío.

Sin embargo, al referirse a una misma base común tanto para las tensiones como para las corrientes de excitación, los tres valores de corriente suelen ser iguales dentro de la precisión de medición. En lugar de obtener datos independientes, se obtiene un mismo valor para los tres ensayos. Esto ocurre porque las admitancias de cortocircuito son mucho mayores que las de excitación, lo que hace que todos los ensayos midan la misma admitancia. Lo más adecuado es suponer que las admitancias  $Y_{10}$ ,  $Y_{20}$  y  $Y_{30}$  son iguales y que cada una de ellas es igual a un tercio de la admitancia en circuito abierto.

Agila realiza este ensayo aplicando el voltaje nominal a uno de los devanados y dejando los otros en circuito abierto, tal como se muestra en la Figura 1.9. Durante este procedimiento, se obtienen mediciones de tensión  $V_0$ , corriente  $I_0$  y potencia  $P_0$  en vacío.

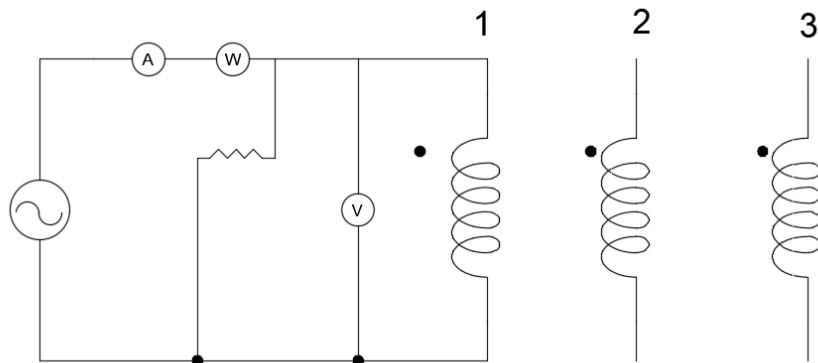


Figura 1.9: Ensayo de vacío

A partir de este ensayo, se determina la corriente de pérdida  $I_c$ , la corriente de magnetización  $I_m$ , la resistencia de pérdida  $R_c$  y la reactancia de magnetización. Con estos valores, se pueden calcular la impedancia o admitancia correspondientes. A continuación se presentan los cálculos.

$$I_c = \frac{P_0}{V_1} \quad (1.23)$$

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_c^2} \quad (1.24)$$

$$R_c = \frac{V_1}{I_c} = \frac{V_1^2}{P_0} \quad (1.25)$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} \quad (1.26)$$

$$Z_{oc} = \frac{1}{\frac{1}{R_c} + \frac{1}{jX_m}} = \frac{R_c \cdot jX_m}{R_c + jX_m} \quad (1.27)$$

$$Y_{oc} = \frac{1}{Z_{oc}} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{jX_m} = \frac{1}{R_c} - j\frac{1}{X_m} \quad (1.28)$$

$$Y_{(10)} = \frac{1}{3}Y \quad (1.29)$$

$$Y_{(20)} = \frac{1}{3}Y \quad (1.30)$$

$$Y_{(30)} = \frac{1}{3}Y \quad (1.31)$$

El circuito equivalente más sencillo consiste en conectar la admitancia de circuito abierto  $Y_{oc}$  entre el punto de unión de las impedancias 1, 2 y 3, y el terminal común 0, tal como se muestra en la Figura 1.10.

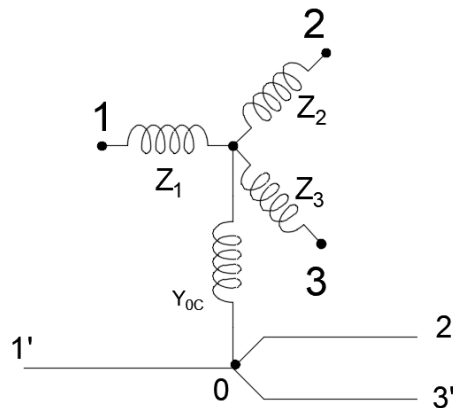


Figura 1.10: Circuito equivalente con la corriente de excitación.

## 1.6 Sistema por unidad

El valor en por unidad de cualquier cantidad se define como la relación de la cantidad a su base y se expresa como un decimal[3]. La selección de los valores base es fundamental en el sistema y se establece una base de potencia  $S_{base}$  que es común a toda la red, sin embargo los valores base de voltaje  $V_{base}$  y corriente  $I_{base}$  pueden variar según la zona del sistema especialmente en el caso de un transformador.

Para un transformador la potencia base  $S_{base}$  se mantiene constante mientras que los  $I_{base}$  son diferentes en el lado primario y en el lado secundario.

Para un sistema monofásico:

$$S_{base} = V_{base} \cdot I_{base} = S_{sistema} \quad (1.32)$$

$$V_{base} = \frac{S_{base}}{I_{base}} \quad (1.33)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \quad (1.34)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (1.35)$$

Para un sistema trifásicos:

$$S_{base} = \sqrt{3} \cdot V_{L_{base}} \cdot I_{L_{base}} = S_{sistema} \quad (1.36)$$

$$V_{L_{base}} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot I_{L_{base}}} \quad (1.37)$$

$$I_{L_{base}} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{L_{base}}} \quad (1.38)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{L_{base}}^2}{S_{base}} \quad (1.39)$$

El método para convertir a unidades por unidad es el mismo en cualquier sistema, solo que se adapta a sus bases correctas. A continuación, se presentan las relaciones para voltaje, corriente e impedancia en unidades por unidad.

Para el voltaje:

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} \quad (1.40)$$

Donde:

$V_{pu}$  es el voltaje en unidades por unidad.

$V_{real}$  es el voltaje real (V).

$V_{base}$  es el voltaje base correspondiente del sistema (V).

Para la corriente:

$$I_{pu} = \frac{I_{real}}{I_{base}} \quad (1.41)$$

Donde:

$I_{pu}$  es la corriente en unidades por unidad.

$I_{real}$  es la corriente real del sistema (A).

$I_{base}$  es la corriente base correspondiente del sistema (A).

Para la impedancia:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_{base}} \quad (1.42)$$

Donde:

$Z_{pu}$  es la impedancia en unidades por unidad.

$Z_{real}$  es la impedancia real ( $\Omega$ ).

$Z_{base}$  es la impedancia base ( $\Omega$ ).

Estas relaciones permiten convertir valores reales a unidades por unidad, lo que facilita el análisis y comparación en sistemas eléctricos.

## 1.7 Selección de bases en transformadores

El cambio de base en el sistema por unidad se realiza cuando los valores en pu deben ser referidos a una nueva base diferente a la original.

Para impedancias, reactancias y resistencias:

$$Z_{pu_{nueva}} = Z_{pu_{vieja}} \times \frac{S_{B_{nueva}}}{S_{B_{vieja}}} \times \left( \frac{V_{B_{vieja}}}{V_{B_{nueva}}} \right)^2 \quad (1.43)$$

Para admitancias:

$$Y_{pu_{nueva}} = Y_{pu_{vieja}} \times \frac{S_{B_{vieja}}}{S_{B_{nueva}}} \times \left( \frac{V_{B_{nueva}}}{V_{B_{vieja}}} \right)^2 \quad (1.44)$$

Para reactancias:

$$X_{pu_{nueva}} = X_{pu_{vieja}} \times \frac{S_{B_{nueva}}}{S_{B_{vieja}}} \times \left( \frac{V_{B_{vieja}}}{V_{B_{nueva}}} \right)^2 \quad (1.45)$$

Para corrientes:

$$I_{pu_{nueva}} = I_{pu_{vieja}} \times \frac{S_{B_{nueva}}}{S_{B_{vieja}}} \times \frac{V_{B_{vieja}}}{V_{B_{nueva}}}, \quad (1.46)$$

Donde:

$S_B$  es la potencia base (VA).

$V_B$  es el voltaje base (V).

$Z_{pu}$  es la impedancia en unidades por unidad.

$Y_{pu}$  es la admitancia en unidades por unidad.

$I_{pu}$  es la corriente en unidades por unidad.

## CAPÍTULO 2

### Modelación de transformadores monofásicos en ATP-EMT

#### 2.1 Introducción

La modelación de transformadores monofásicos es un aspecto crucial en el análisis y diseño de sistemas eléctricos de potencia. Estos dispositivos desempeñan un papel fundamental en la transmisión y distribución de energía, permitiendo la transformación eficiente de tensiones para adaptarse a las demandas de diferentes aplicaciones.

El software ATP-EMT se ha establecido como una herramienta poderosa para simular y analizar fenómenos transitorios en sistemas eléctricos. A través de su capacidad para modelar diversos componentes del sistema, incluidos los transformadores, se pueden evaluar con precisión las respuestas dinámicas y las condiciones operativas.

##### 2.1.1 Transformador monofásico

Un transformador monofásico de 67kVA posee los siguientes parámetros

Tabla 2.1: Parámetros eléctricos de un transformador monofásico

Devanados	Tensión (V)	Resistencia ( $\Omega$ )	Inductancia (mH)
Devanado 1	7957	21.16	112.24
Devanado 2	240	0.0192	0.1019

Los parámetros del transformador en vacío:

$$I_0 = 0.0205 \text{ A} \quad (\text{Corriente de vacío})$$

$$R_m = 976504.8 \Omega \quad (\text{Rama de magnetización})$$

$$\phi_0 = 29.89 \text{ Wb} \quad (\text{Flujo magnético})$$

Tabla 2.2: Curva de magnetización

$I$ (A)	$\phi$ (Wb)
0.0035	7.4766
0.0057	14.9539
0.0076	22.4306
0.0101	26.9078
0.0205	29.9078
0.0435	31.7767
0.3024	34.5809
2.3699	37.3846
9.5826	39.2540

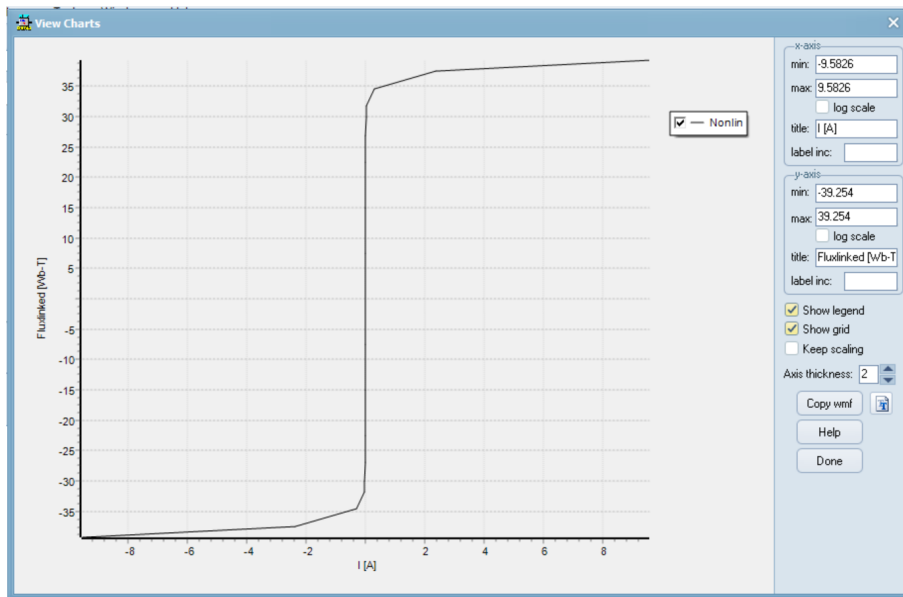


Figura 2.1: Curva de magnetización.

El transformador se modela mediante el entorno gráfico ATP-DRAW con el propósito de diseñar una simulación que permita obtener los valores de diferentes ensayos, tales como vacío y circuito abierto. Además, se busca observar las formas de onda de los diversos parámetros, así como generar gráficas, incluyendo las de Lissajous y la curva de histeresis.

Ensayo de Vacío

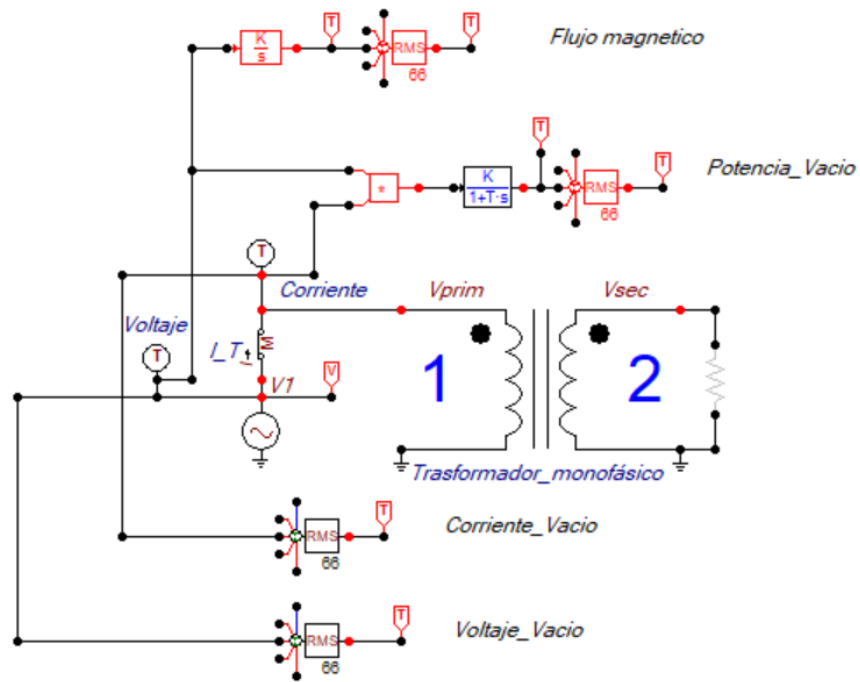


Figura 2.2: Diagrama Ensayo de Vacío.

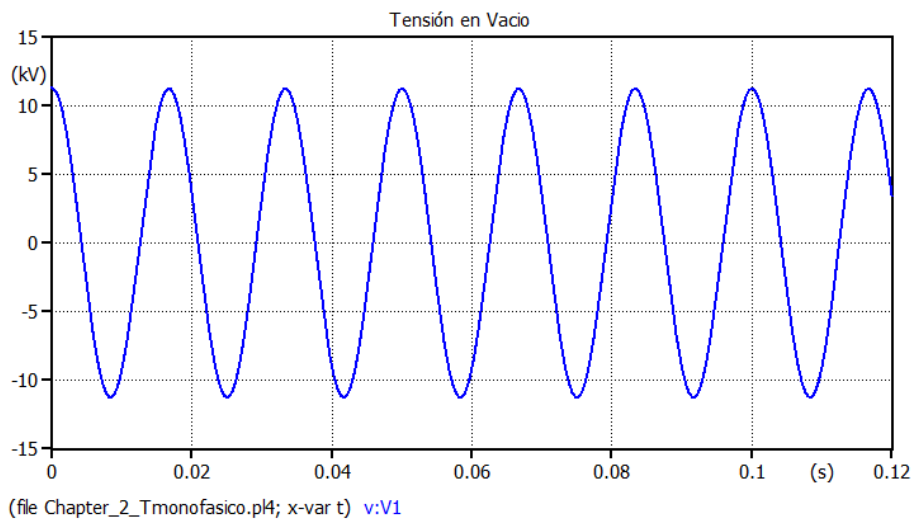


Figura 2.3: Tensión en Vacío.

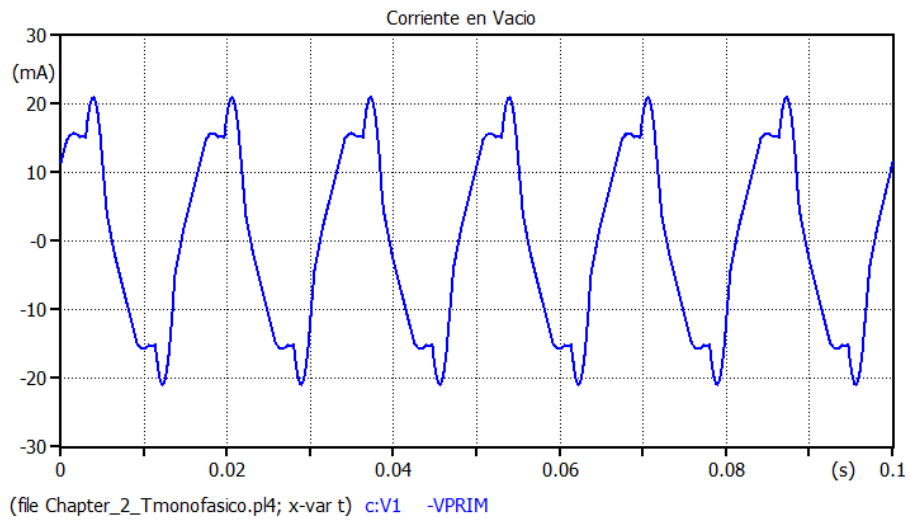


Figura 2.4: Corriente en Vacío.

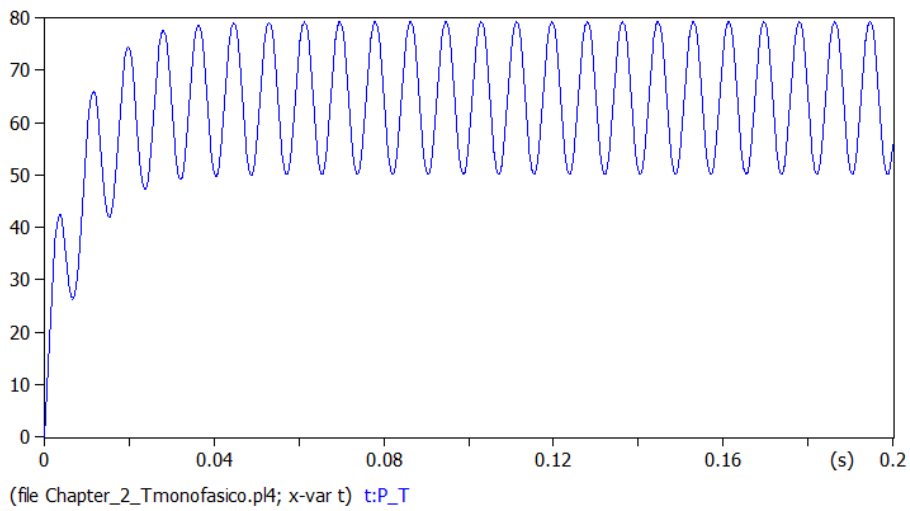


Figura 2.5: Potencia en Vacío.

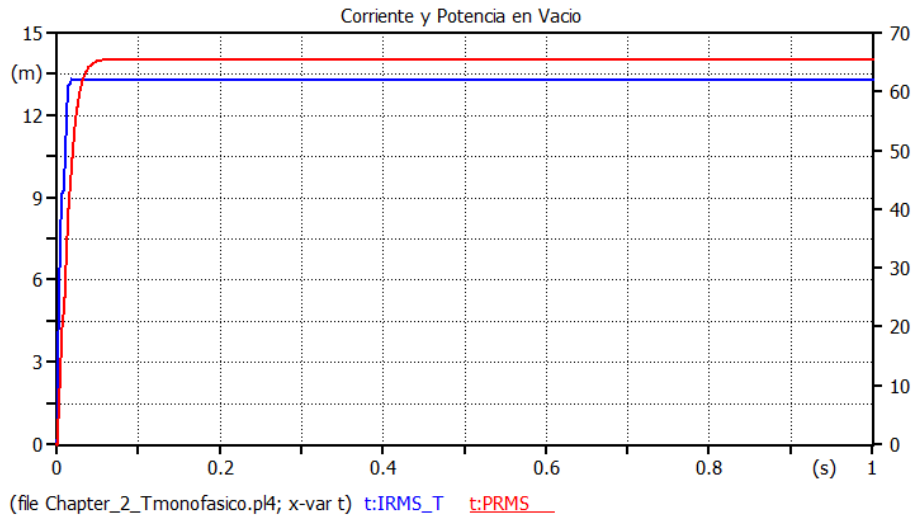


Figura 2.6: Parámetros en el ensayo de Vacío.

Del ensayo de vacío se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 2.3: Ensayo de vacío transformador monofásico

$I_0$ (A)	$V_0$ (V)	$P_0$ (W)	$F$ (Wb.T)
0.013	7957	65.66	21.106

$$Q_0 = \sqrt{(7957 \times 0.013)^2 - 65.66^2} = 79.92 \text{ VAR}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{V_n I_0} = \frac{65.66}{7957 \times 0.013} = 0.6349$$

$$\varphi_0 = 50.59^\circ$$

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 = 0.013 \times 0.6346 = 8.25 \text{ mA}$$

$$I_m = I_0 \sin \varphi_0 = 0.013 \times \sin 50.59^\circ = 10 \text{ mA}$$

$$R_{fe} = \frac{V_n^2}{P_0} = \frac{7957^2}{65.66} = 964268.18 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_n^2}{Q_0} = \frac{7957^2}{79.92} = 792215.33 \Omega$$

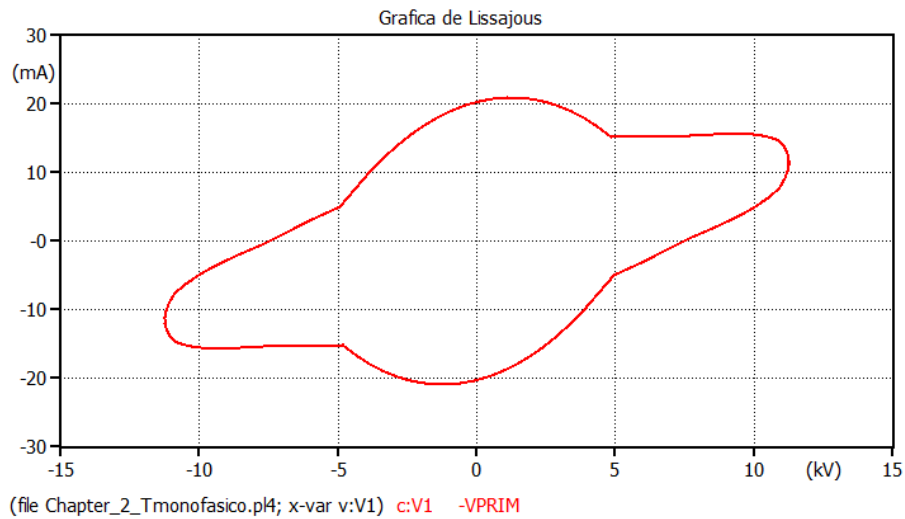


Figura 2.7: Gráfica de Lissajous.

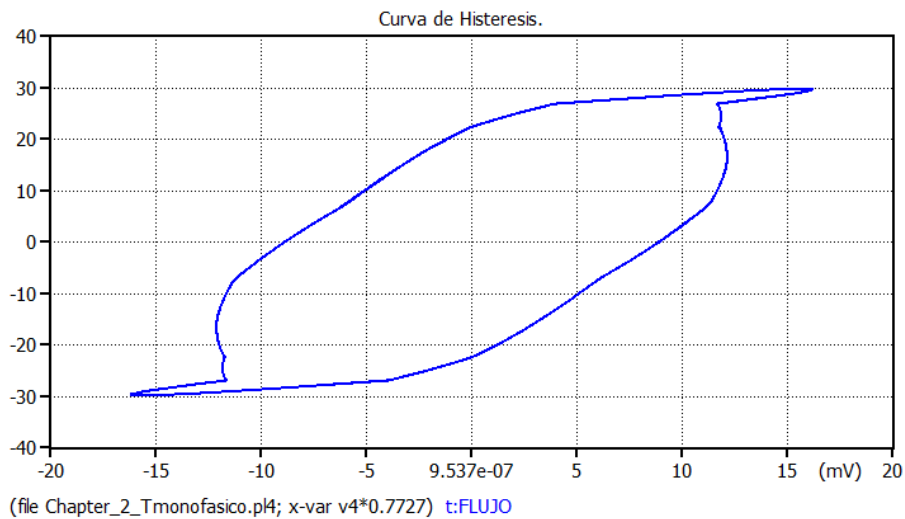


Figura 2.8: Gráfica de Histéresis.

### Ensayo de Cortocircuito

En el diagrama se reduce la tensión hasta que circule la corriente nominal aproximadamente un valor del 10% y el lado secundario se cortocircuita con una resistencia muy baja

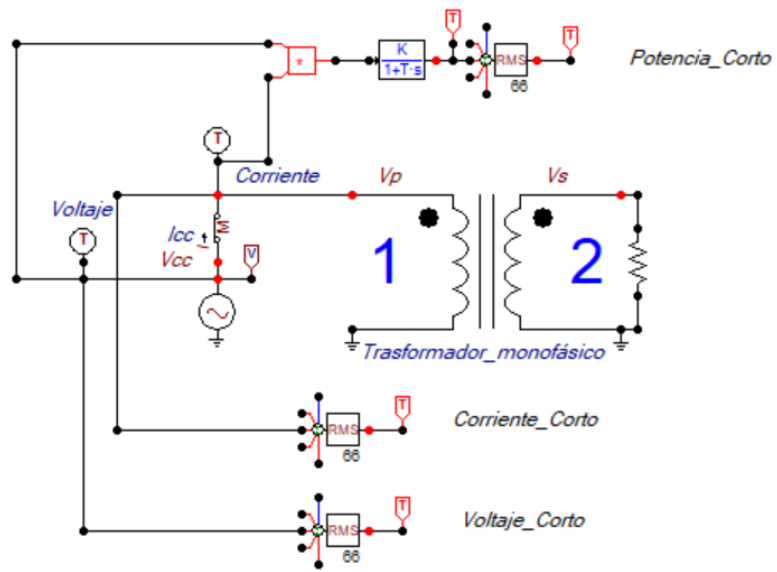


Figura 2.9: Ensayo de cortocircuito.

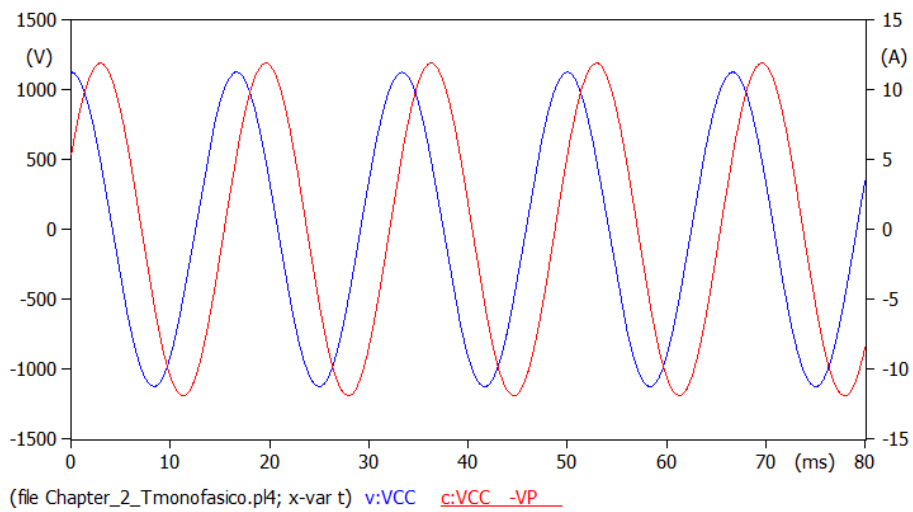


Figura 2.10: Tensión y Corriente de corto circuito.

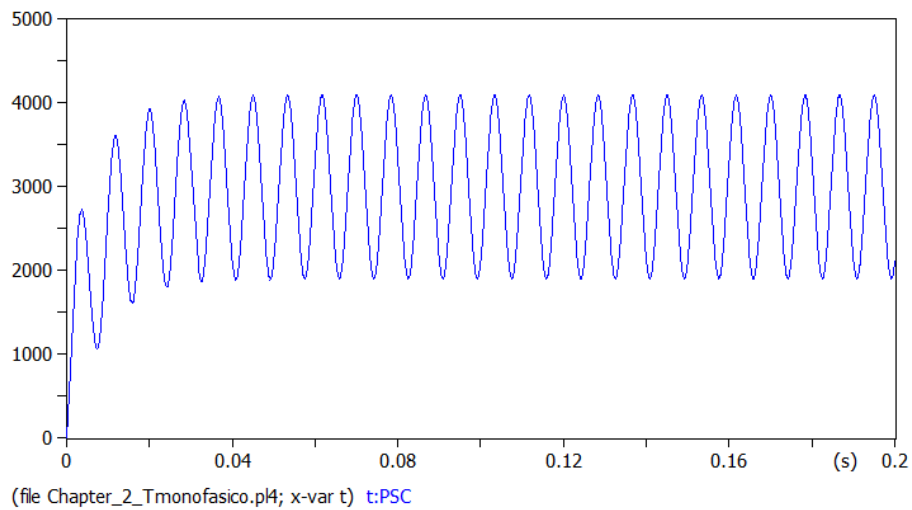


Figura 2.11: Potencia de corto circuito.

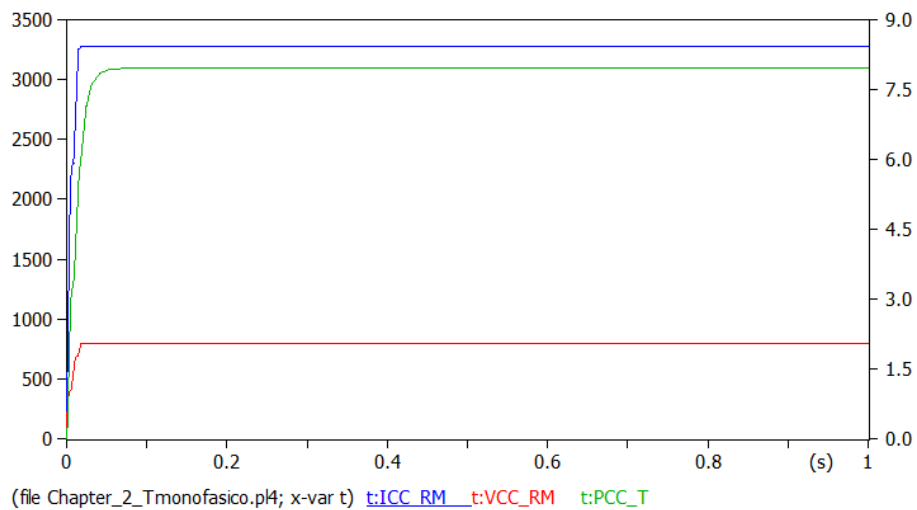


Figura 2.12: Parámetros en el ensayo de cortocircuito

Tabla 2.4: Ensayo de corto transformador monofásico

$I_{cc}$ (A)	$V_{cc}$ (V)	$P_{cc}$ (W)
8.419	795.7	3094.3

$$Q_{cc} = \sqrt{(795.7 \times 8.419)^2 - 3094.3^2} = 5141.63 \text{ VAR}$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} = \frac{3094.3}{8.419^2} = 43.655 \text{ } \Omega$$

$$X_{cc} = \frac{Q_{cc}}{I_{cc}^2} = \frac{5141.63}{8.419^2} = 83.827 \text{ } \Omega$$

$$L_{cc} = \frac{X_{cc}}{2\pi f} = \frac{83.827}{2 \times \pi \times 60} = 222.35 \text{ mH}$$

$$R_1 = \frac{R_{cc}}{2} = \frac{43.655}{2} = 21.82 \text{ } \Omega$$

$$L_1 = \frac{L_{cc}}{2} = \frac{222.35}{2} = 111.17 \text{ mH}$$

Al final se realiza una comparación entre los valores obtenidos en la simulación y los datos de ingreso del transformador

Tabla 2.5: Comparación de parámetros: datos de placa vs. simulación

<b>Parámetros</b>	<b>Datos de placa</b>	<b>Simulación</b>
$I_0$ (A)	0.013	0.013
$V_0$ (V)	7957	7957
$R_m$ ( $\Omega$ )	976504.8	964268.18
$F$ (Wb.T)	29.89	21.1
$R_1$ ( $\Omega$ )	21.16	21.82
$L_1$ (mH)	112.24	111.1

## CAPÍTULO 3

### Método del autotransformador para eliminar la impedancia negativa

#### 3.1 Introducción

En la matriz mostrada en (1.22) se observa que la parte imaginaria,  $X_1$ , de la impedancia  $Z_1$  puede tomar valores negativos cuando  $X_{23}$  es mayor que la suma  $X_{12} + X_{13}$ . Este comportamiento se debe a la propiedad de regulación negativa característica de ciertos transformadores de tres devanados, transformadores de alta eficiencia y transformadores de dos devanados con cambio de derivación. La aparición de valores negativos en las resistencias y en las inductancias de dispersión dentro de las redes de sistemas de potencia puede generar dificultades en la obtención de soluciones en régimen permanente. En particular, estas condiciones tienden a provocar inestabilidades numéricas en las simulaciones realizadas en el dominio del tiempo.

El modelo propuesto tiene como objetivo transformar estas reactancias de dispersión en valores positivos mediante el uso de un modelo basado en un autotransformador. Dicho modelo está constituido por un transformador ideal con relación  $1:n$  entre los terminales  $T_1$  y  $T_4$ , un autotransformador con relación  $n:1$  entre los terminales  $T_4$  y  $T_2$ , y un devanado terciario independiente  $T_3$  con relación unitaria respecto a los devanados  $T_1$  y  $T_2$ . En este esquema, la relación de transformación  $n$  debe ser mayor que uno.

La principal dificultad del modelo radica en la determinación de las variables  $Z_M$ ,  $Z_C$  y  $Z_X$ , mostradas en la Fig. 3.1, a partir de únicamente tres parámetros de entrada obtenidos de los ensayos de cortocircuito,  $Z_{12}$ ,  $Z_{23}$  y  $Z_{31}$ . Por esta razón, a continuación se presenta el desarrollo del procedimiento empleado para la resolución del problema.

### 3.2 Cálculo de parámetros del autotransformador

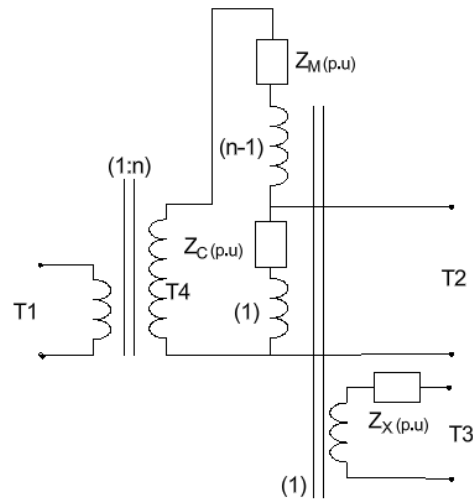


Figura 3.1: Transformador de tres devanados como Autotransformador

Considérense primero las tres impedancias de cortocircuito por unidad generadas a partir del circuito basado en un autotransformador de la Fig. 3.1, los subíndices 1, 2 y 3 se refieren a los Terminales T1, T2 y T3, respectivamente:

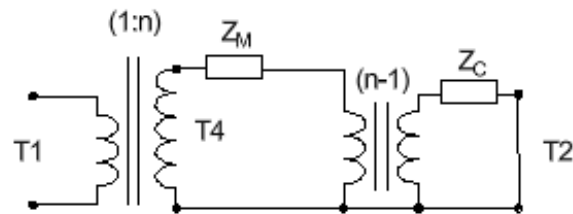


Figura 3.2: Impedancia primario secundario

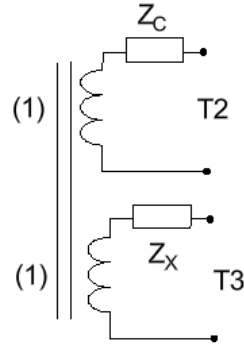


Figura 3.3: Impedancia Secundario Terciario

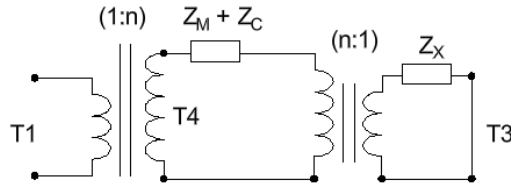


Figura 3.4: Impedancia Primario Terciario

Cálculo de  $Z_{12}$ : Con  $T_3$  abierto y  $T_2$  en cortocircuito, el circuito se convierte en el circuito de la Fig. 3.2:

$$Z_{12} = \left( \frac{1}{n^2} \right) \cdot (Z_M + (n-1)^2 Z_C) \quad (3.1)$$

Cálculo de  $Z_{23}$ : Con T1 abierto y T3 en cortocircuito, la impedancia  $Z_{23}$  es simplemente la suma de  $Z_X$  reflejada ( $= Z_X$ ) y  $Z_C$ , como se muestra en Fig 3.4:

$$Z_{23} = Z_C + Z_X \quad (3.2)$$

Cálculo de  $Z_{13}$ : Con T2 abierto y T3 en cortocircuito,  $Z_X$  se refleja al devanado T1 a través de los transformadores n:1 y luego 1:n, resultando en  $Z_X$ . La suma  $(Z_M + Z_C)$  se refleja al devanado T1 a través de la transformación 1:n, como se muestra en la Fig. 3.3:

$$Z_{13} = Z_X + \left( \frac{1}{n^2} \right) \cdot (Z_M + Z_C) \quad (3.3)$$

Las impedancias equivalentes en estrella pueden derivarse de las impedancias de

cortocircuito en la matriz 1.22

$$Z_1 = \frac{1}{n^2} (Z_M - (n-1)Z_C) \quad (3.4)$$

$$Z_2 = \frac{n-1}{n} Z_C \quad (3.5)$$

$$Z_3 = Z_X + \frac{1}{n} Z_C \quad (3.6)$$

Usando la expresión de  $Z_C$  dada en la Ec. 3.5 dentro de las Ecs. 3.4 y 3.6, se obtiene:

$$Z_1 = \frac{Z_M}{n^2} - \frac{Z_2}{n} \quad (3.7a)$$

$$Z_3 = Z_X + \frac{Z_2}{n-1} \quad (3.7b)$$

Considérese el caso en el cual la parte imaginaria de  $Z_1$ , es decir  $X_1$ , sea negativa. Reescribiendo la Ec. (3.7), se tiene:

$$X_1 = \frac{X_M}{n^2} - \frac{X_2}{n} \Rightarrow \frac{X_M}{n^2} = X_1 + \frac{X_2}{n} \quad (3.8a)$$

$$X_3 = X_X + \frac{X_2}{n-1} \Rightarrow X_X = X_3 - \frac{X_2}{n-1} \quad (3.8b)$$

Por lo tanto, a partir de la Ec. (3.8), se observa que se obtienen valores positivos para  $X_M$  y  $X_X$  si se elige un valor de  $n$  (mayor que 1) tal que se cumplan las siguientes condiciones:

$$\frac{X_2}{n} \geq |X_1| \quad (\text{a partir de la Ec. (3.8a)}) \quad (3.9a)$$

$$X_3 \geq \frac{X_2}{n-1} \quad (\text{a partir de la Ec. (3.8b)}) \quad (3.9b)$$

Reescribiendo la Ec. (3.9), se encuentra que la elección del parámetro  $n$  debe satisfacer simultáneamente las siguientes expresiones:

$$n \leq \frac{X_2}{|X_1|} \quad (\text{a partir de la Ec. (3.9a)}) \quad (3.10a)$$

$$n \geq \frac{X_2}{X_3} + 1 \quad (\text{a partir de la Ec. (3.9b)}) \quad (3.10b)$$

En conclusión, el método consiste en modelar el transformador de tres devanados mediante el procedimiento convencional para la obtención del modelo equivalente mostrado en la Fig. 1.10. En este enfoque, las impedancias  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_3$  se determinan a partir de los ensayos de cortocircuito, aplicando la matriz definida en la

ecuación 1.22.

Si como resultado del cálculo se obtiene un valor negativo en alguno de los componentes equivalentes de impedancia de los devanados, se recurre entonces al modelo mejorado. Dicho modelo se implementa siguiendo un conjunto de reglas específicas, que se detallan a continuación, con el fin de realizar el mapeo adecuado de los terminales  $T1$ ,  $T2$  y  $T3$  hacia los terminales  $P$ ,  $S$  y  $T$  del transformador bajo análisis:

- Asignar el devanado con inductancia (o resistencia) negativa entre los terminales  $P$ ,  $S$  y  $T$  al terminal  $T1$ .
- Asignar el devanado con la mayor inductancia (o resistencia) entre los terminales  $P$ ,  $S$  y  $T$  al terminal  $T3$ .
- Elegir un valor de  $n$  tal que

$$n \leq \frac{X_2}{|X_1|} \quad \text{y} \quad n \geq 1 + \frac{X_2}{X_3},$$

Las ecuaciones finales para calcular las impedancias representadas en el modelo modificado, en términos de las impedancias convencionales de tres devanados se calculan como:

$$Z_C = \frac{n}{n-1} Z_2 \quad (3.11)$$

$$Z_X = Z_3 - \frac{Z_2}{n-1} \quad (3.12)$$

$$Z_M = n^2 Z_1 + n Z_2 \quad (3.13)$$

### 3.2.1 Ejemplo de aplicación

Un transformador monofásico con los siguientes datos de ensayos.

	<b>Tensión (kV)</b>	<b>Potencia (MVA)</b>
Primario (P)	230	100
Secundario (S)	115	18
Terciario (T)	23.9	18

Ensayo de cortocircuito Los valores de impedancia de cortocircuito medidos son:

$$Z_{12} = (0.145\% + j6.36\%) \quad \text{en base a 100 MVA}$$

$$Z_{13} = (0.102\% + j3.52\%) \quad \text{en base a 18 MVA}$$

$$Z_{23} = (0.106\% + j2.01\%) \quad \text{en base a 18 MVA}$$

Pérdidas en Vacío Las pérdidas medidas son:

$$P_0 = 26 \text{ kW}$$

$$P_{12} = 145 \text{ kW}$$

$$P_{13} = 18 \text{ kW}$$

$$P_{23} = 19 \text{ kW}$$

Cambio de base a 100 MVA Ec 1.43:

$$Z_{12} = 0.145\% + j6.36\%$$

$$Z_{13} = 0.567\% + j19.55\%$$

$$Z_{23} = 0.589\% + j11.15\%$$

Cálculo de impedancias base:

$$Z_{1\text{base}} = \frac{V_1^2}{S_{\text{base}}} = \frac{(230 \text{ kV})^2}{100 \text{ MVA}} = 529 \Omega$$

$$Z_{2\text{base}} = \frac{V_2^2}{S_{\text{base}}} = \frac{(115 \text{ kV})^2}{100 \text{ MVA}} = 132.2 \Omega$$

$$Z_{3\text{base}} = \frac{V_3^2}{S_{\text{base}}} = \frac{(13.8 \text{ kV})^2}{100 \text{ MVA}} = 5.713 \Omega$$

Modelo del transformador en estrella atravez de la matriz 1.22:

$$Z_1 = 0.062\% + j7.38\%$$

$$Z_2 = 0.084\% + j1.07\%$$

$$Z_3 = 0.506\% + j12.17\%$$

Parámetros en unidades reales La conversión a unidades reales se realiza mediante:

$$Z_{\text{real}} = \frac{Z_{\%} \times Z_{\text{base}}}{100}$$

Aplicando esta conversión a cada impedancia:

$$Z_1 = \frac{(0.062 + j7.38) \times 529}{100} = 0.326 + j39.04 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{(0.084 + j1.07) \times 132.2}{100} = 0.11 - j1.35 \Omega$$

$$Z_3 = \frac{(0.506 + j12.17) \times 5.713}{100} = 0.029 + j0.7 \Omega$$

$$R_o = \frac{V^2}{P_o} = \frac{\left(\frac{230 \text{ kV}}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{26}{3}} = 2.03 \text{ M}\Omega$$

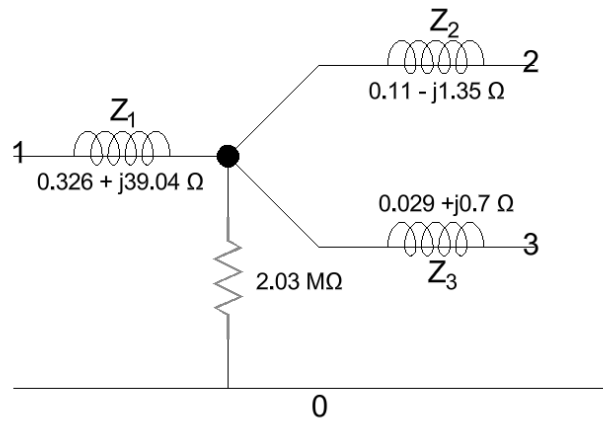


Figura 3.5: Modelo convencional de un transformador de tres devanados

### Conversión a inductancias a 60 Hz

La reactancia  $X$  se relaciona con la inductancia  $L$  mediante:

$$X = \omega L = 2\pi f L \quad \Rightarrow \quad L = \frac{X}{2\pi f}$$

donde  $f = 60$  Hz.

Para  $Z_1$ :

$$X_1 = 39.04 \Omega$$

$$L_1 = \frac{39.04}{2\pi \times 60} \text{ H} = \frac{39.04}{376.99} \text{ H} \approx 0.1036 \text{ H} = 103.6 \text{ mH}$$

Mismo proceso para  $Z_2$  y  $Z_3$ :

$$L_2 = \frac{-1.35}{376.99} \text{ H} \approx -0.00358 \text{ H} = -3.58 \text{ mH}$$

$$L_3 = \frac{0.7}{376.99} \text{ H} \approx 0.001857 \text{ H} = 1.857 \text{ mH}$$

En la modelación de un transformador de tres devanados, cuando las impedancias equivalentes resultan negativas, se presentan serias limitaciones para su representación en programas de simulación circuital. Este comportamiento no corresponde a un fenómeno físico real, sino que surge como consecuencia del método matemático empleado para obtener las impedancias a partir de los ensayos de cortocircuito entre pares de devanados. Como resultado, ningún programa de modelación circuital logra representar de manera funcional el transformador bajo estas condiciones.

Al intentar modelar el transformador en el entorno ATP-EMT utilizando inductancias negativas, se evidencian problemas significativos en su funcionamiento durante las pruebas de vacío y de cortocircuito. En estas simulaciones, la corriente alcanza valores excesivamente elevados y la forma de onda deja de ser senoidal, adoptando un comportamiento triangular. Este fenómeno se debe a que una inductancia negativa implica una respuesta no pasiva del sistema, lo que introduce inestabilidad numérica y un comportamiento energético no físico, provocando que el modelo “genere” energía en lugar de almacenarla.

Como consecuencia de estas inestabilidades, se vuelve imposible obtener correctamente los parámetros del transformador, tales como resistencias, reactancias y pérdidas, así como simular de manera confiable su comportamiento dentro de un sistema eléctrico de potencia.

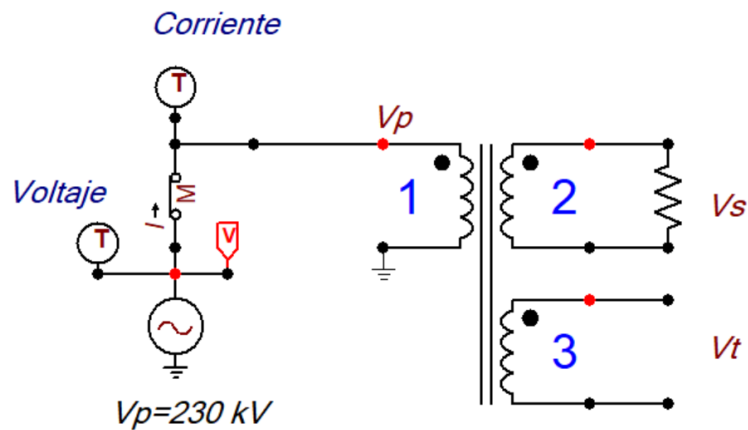


Figura 3.6: Ensayo de cortocircuito en transformador modelo convencional

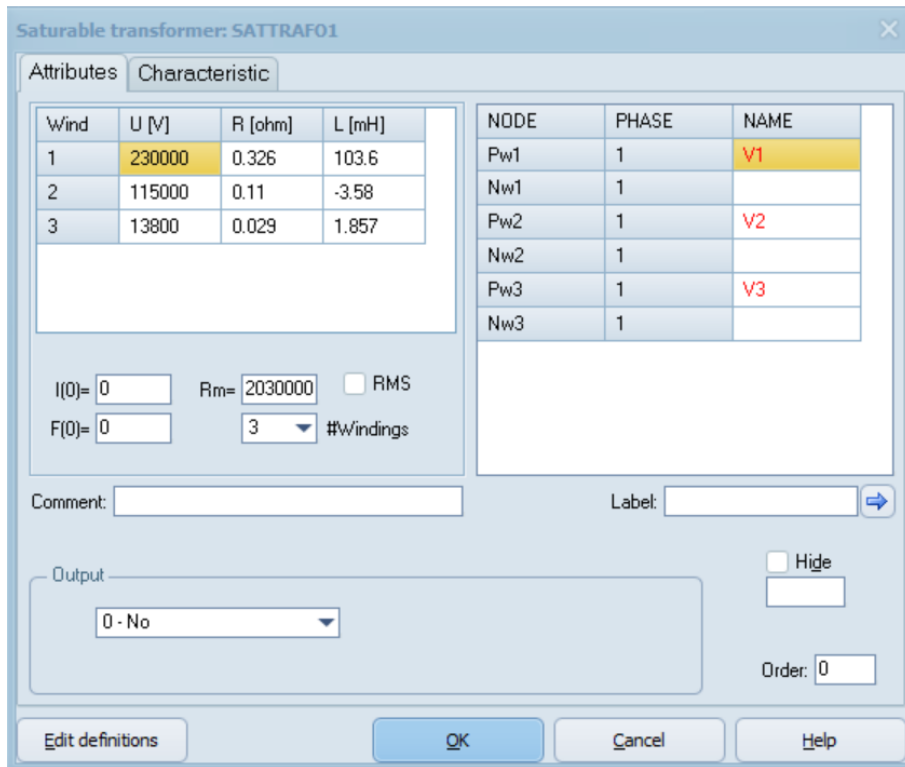


Figura 3.7: (a) Parámetros reales del transformador

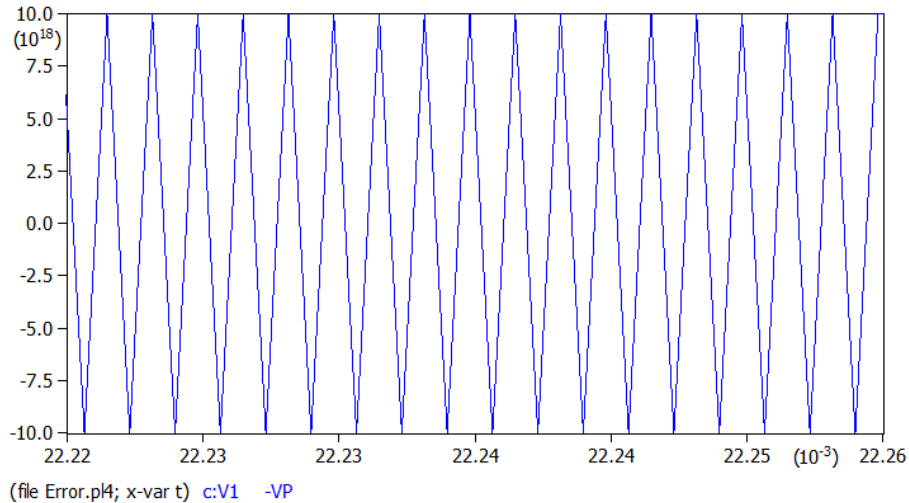


Figura 3.8: (b) Corriente de cortocircuito

### 3.2.2 Determinación de los parámetros eléctricos del autotransformador

$$n = \text{relación de transformación} = \frac{230 \text{ kV}}{115 \text{ kV}}, \quad n = 2$$

Se definen los valores de los diferentes terminales en el modelo del autotransformador:

$$\text{Terminal 1} = \text{Secundario} \Rightarrow X_1 = X_S = 1.35 \Omega = 1.07\%$$

$$\text{Terminal 2} = \text{Terciario} \Rightarrow X_2 = X_P = 39.04 \Omega = 7.38\%$$

$$\text{Terminal 3} = \text{Primario} \Rightarrow X_3 = X_T = 0.70 \Omega = 12.17\%$$

**Condiciones de cumplimiento (valores porcentuales o por unidad):**

$$n \leq \frac{X_2}{|X_1|}, \quad n \leq \frac{7.38}{1.07}, \quad n \leq 6.89$$

$$n \geq \frac{X_2}{X_3} + 1, \quad n \geq \frac{7.38}{12.17} + 1, \quad n \geq 1.60$$

**Cálculo de parámetros para el autotransformador Ecs [3.11](#), [3.12](#), [3.13](#):**

$$X_C = 2 \cdot X_P = 2 \cdot 7.38\% = 14.76\%$$

$$X_M = 4 \cdot X_S + 2 \cdot X_P = 4 \cdot 1.07\% + 2 \cdot 7.38\% = 10.68\%$$

$$X_X = X_T - X_P = 12.17\% - 7.38\% = 4.79\%$$

**Parámetros reales:**

Basado en el diagrama de la figura,  $X_C$  y  $X_M$  pertenecen a la base del primario y  $X_X$  a la base del tercer devanado.

$$X_C = 14.76\% \cdot 0.01 \cdot Z_{1\text{base}} = 78.08 \Omega$$

$$X_M = 10.68\% \cdot 0.01 \cdot Z_{1\text{base}} = 56.5 \Omega$$

$$X_X = 4.79\% \cdot 0.01 \cdot Z_{3\text{base}} = 0.27 \Omega$$

El circuito resultante se muestra en la Fig. [3.9](#)

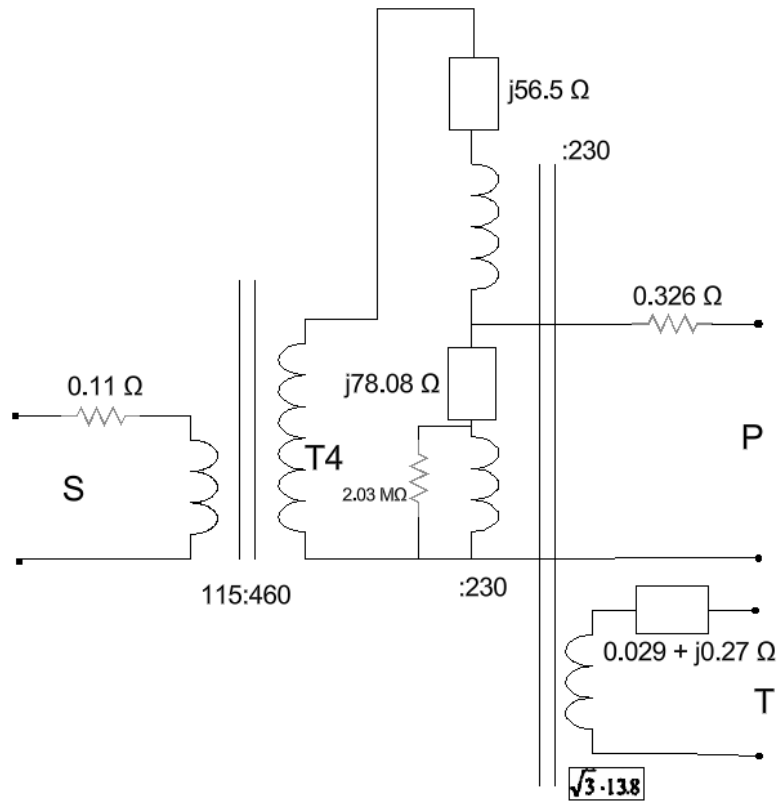


Figura 3.9: Modelo de un transformador de tres devanados como autotransformador

## CAPÍTULO 4

### Modelación del autotransformador en ATP-EMT

#### 4.1 Introducción

La modelación adecuada de transformadores en programas de simulación de transitorios electromagnéticos es un aspecto fundamental para garantizar la precisión y estabilidad de los resultados obtenidos. En particular, los transformadores de múltiples devanados pueden presentar dificultades durante su representación circuital, tales como la aparición de inductancias de fuga negativas, las cuales no tienen significado físico y pueden generar problemas de convergencia numérica en herramientas de simulación como ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDraw.

Ante esta problemática, el autotransformador surge como una alternativa de modelación eficaz, ya que permite representar de manera equivalente la interacción entre los devanados mediante una estructura circuital más simple y físicamente consistente. La modelación del autotransformador en ATP-EMTP facilita la correcta definición de las inductancias de fuga y de magnetización, eliminando valores no físicos y mejorando la estabilidad del modelo durante la simulación de regímenes transitorios y de estado estacionario.

En este capítulo se presenta el desarrollo de la modelación del autotransformador en el entorno ATP-EMTP, describiendo los fundamentos teóricos, los parámetros requeridos y el procedimiento de implementación en ATPDraw, con el fin de obtener un modelo robusto, confiable y coherente con el comportamiento real del equipo bajo estudio.

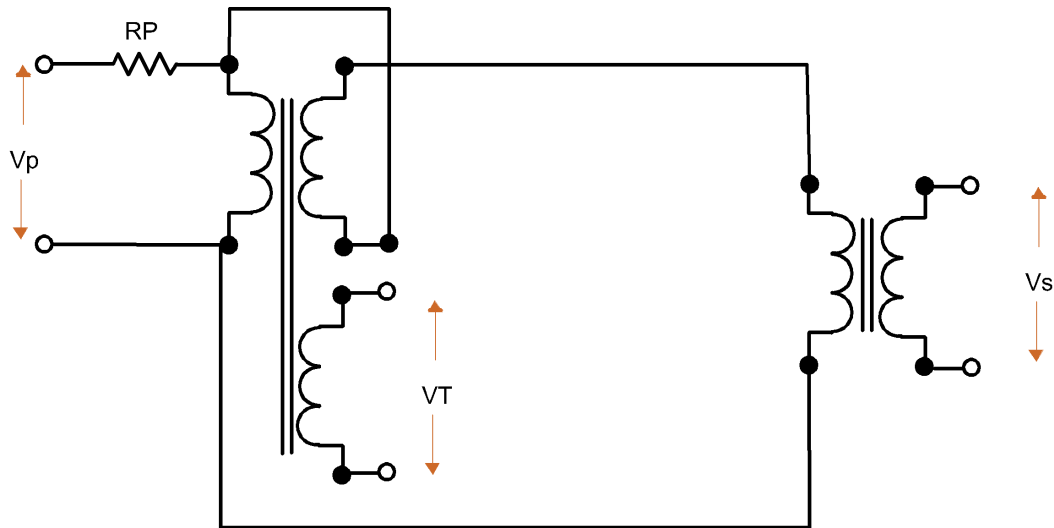


Figura 4.1: Transformador monofasico de tres devanados como autotransformador

donde:

$V_p$  es el voltaje aplicado al devanado primario del transformador (V).

$V_s$  es el voltaje de salida en el devanado secundario (V).

$V_T$  es el voltaje correspondiente a la toma intermedia del autotransformador (V).

$R_P$  es la resistancia serie asociada al devanado primario ( $\Omega$ ).

## 4.2 Tensiones en el autotransformador

Para la modelación del autotransformador es necesaria la interconexión de dos transformadores. El primero corresponde a un transformador de tres devanados, en el cual el devanado primario y el secundario se encuentran eléctricamente conectados entre sí, formando un único devanado común. El segundo transformador es de dos devanados y representa el devanado secundario del autotransformador modelado.

Dentro del modelo es indispensable incluir la resistancia del devanado primario en serie con la entrada del autotransformador, con el fin de representar adecuadamente las pérdidas óhmicas del sistema. Esta configuración de conexión se muestra en la Fig. 4.5.

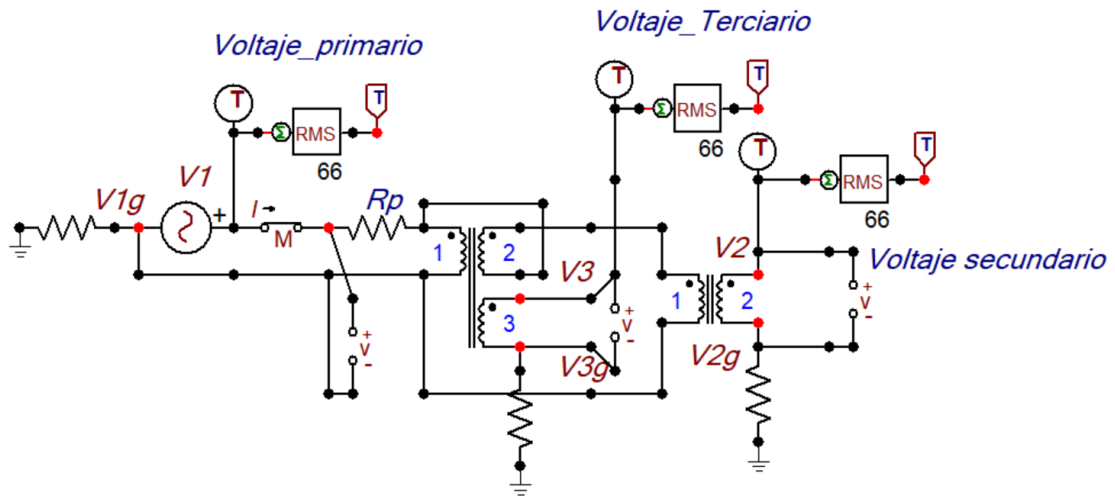


Figura 4.2: Transformador de tres devanados como autotransformador en ATP-EMT

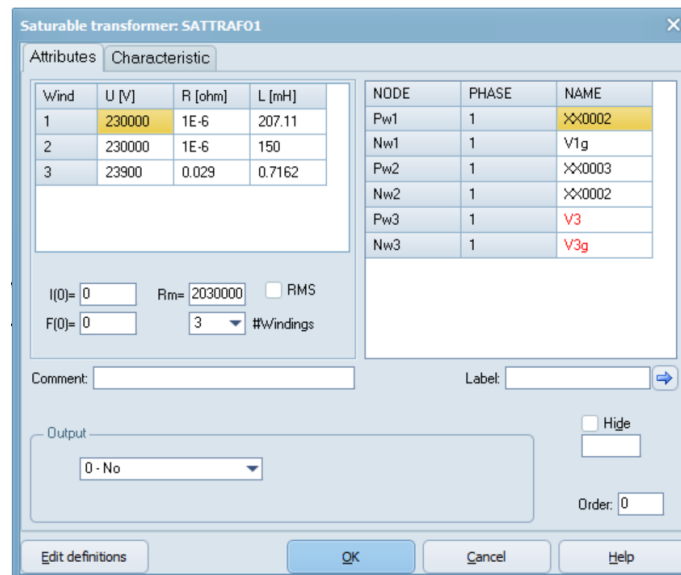


Figura 4.3: Parámetros de la conexión como autotransformador

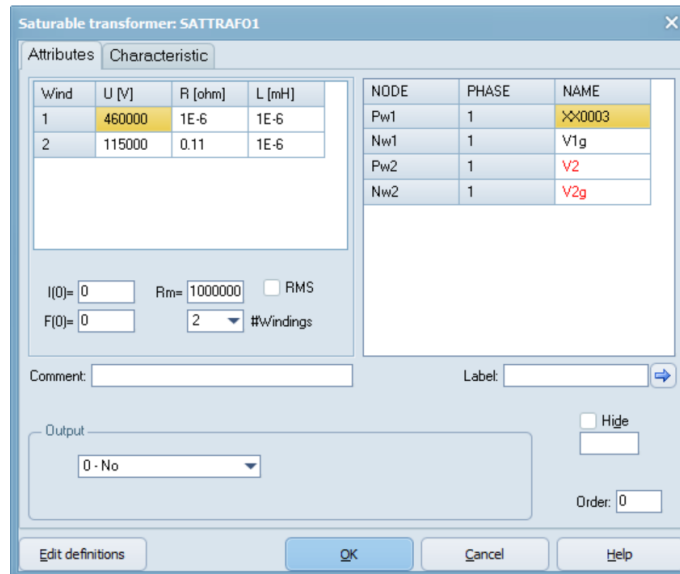


Figura 4.4: Parámetros del segundo transformador

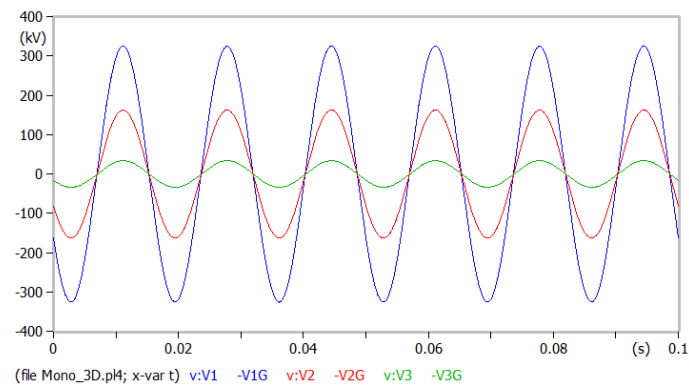


Figura 4.5: Niveles de tensión en los tres devanados del autotransformador

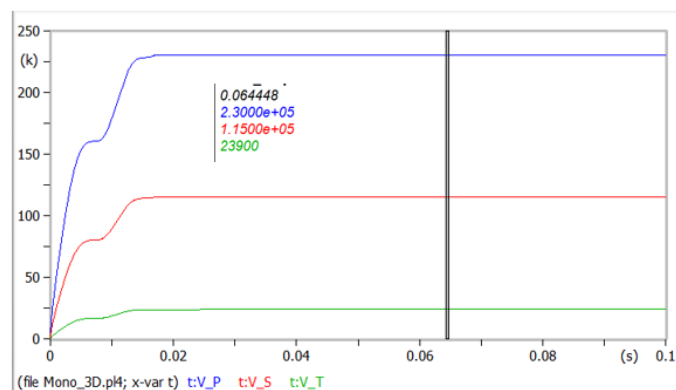


Figura 4.6: Niveles de tensión eficaz en los tres devanados del autotransformador

## 4.3 Ensayo de cortocircuito y calculo de parámetros

### 4.3.1 Ensayo de cortocircuito entre el primer y segundo devanado

Para Obtener las impedancias del autotransformador se realiza el ensayo de corcoci-ruido mencionado en el capitulo1. Del ensayo se obtiene voltaje corriente y potencia de cortocircuito atraves de las siguientes figuras y se calcula la impedancia en por unidad para comparar con los datos de placa.

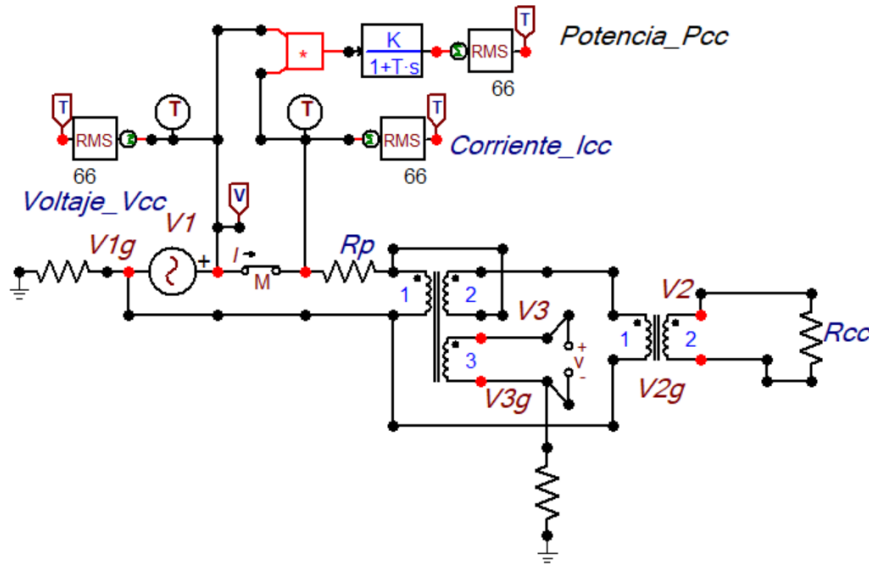


Figura 4.7: Ensayo de cortocircuito para  $Z_{12}$

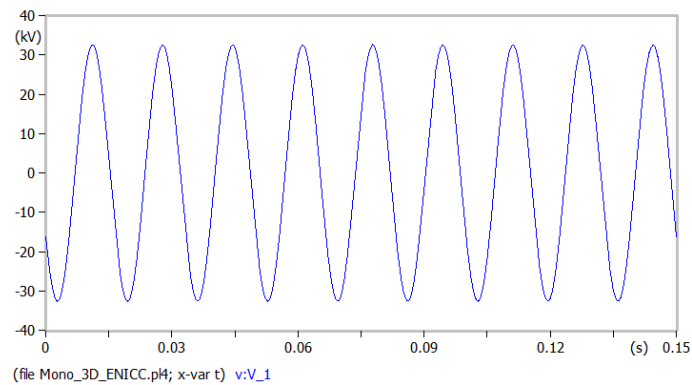


Figura 4.8: Voltaje de cortocircuito para la determinación de la impedancia  $Z_{12}$  del autotransformador

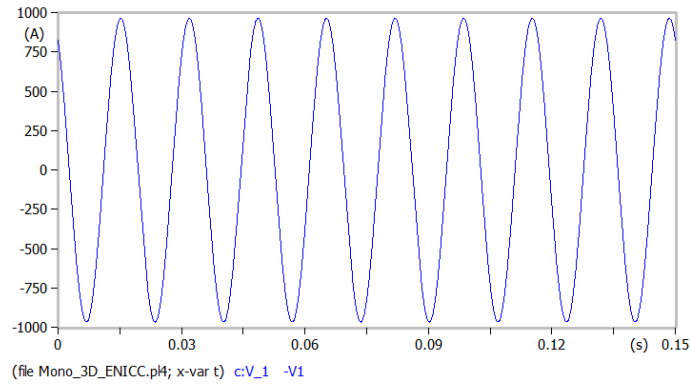


Figura 4.9: Corriente de cortocircuito para la determinación de la impedancia  $Z_{12}$  del autotransformador

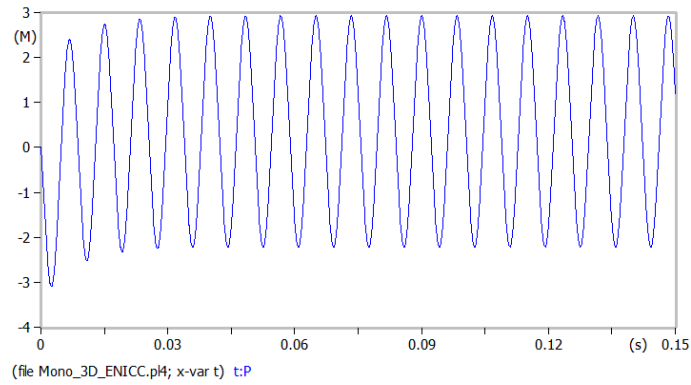


Figura 4.10: Potencia de cortocircuito para la determinación de la impedancia  $Z_{12}$  del autotransformador

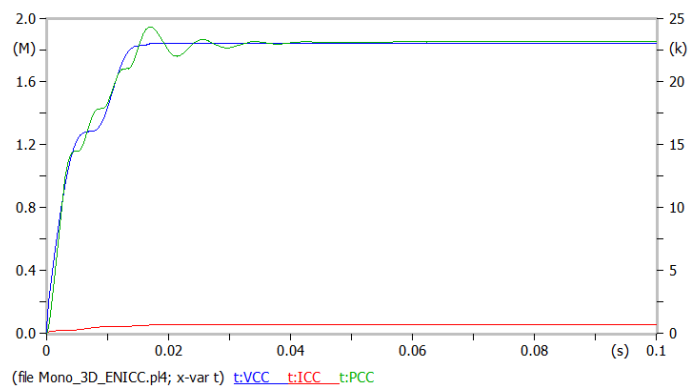


Figura 4.11: Parámetros eficaces en el ensayo de cortocircuito para la impedancia  $Z_{12}$

En los parámetros obtenidos:

$$V_{cc} = 23\,000 \text{ V}$$

$$I_{cc} = 683.2 \text{ A}$$

$$P_{cc} = 1.8521 \text{ MW}$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} = \frac{23\,000}{683.2} = 33.66 \text{ } \Omega$$

$$Z_{\text{base}} = 529 \text{ } \Omega$$

$$Z_{12,\text{pu}} = \frac{Z_{cc}}{Z_{\text{base}}} = \frac{33.66}{529} = 0.0636 \text{ (6.36\%)}$$

#### 4.3.2 Ensayo de cortocircuito entre el tercer y primer devanado

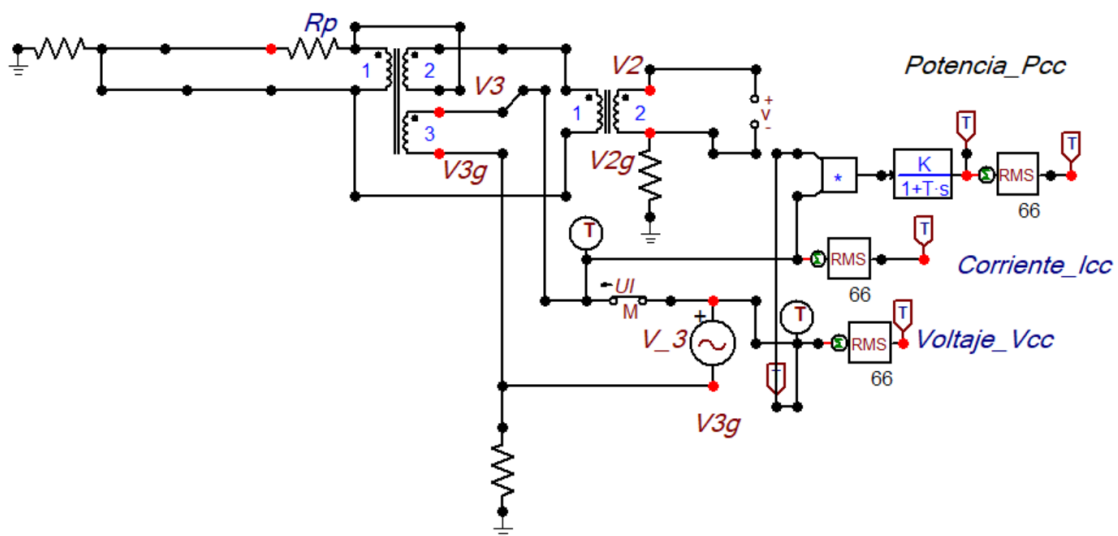


Figura 4.12: Ensayo de cortocircuito para  $Z_{31}$

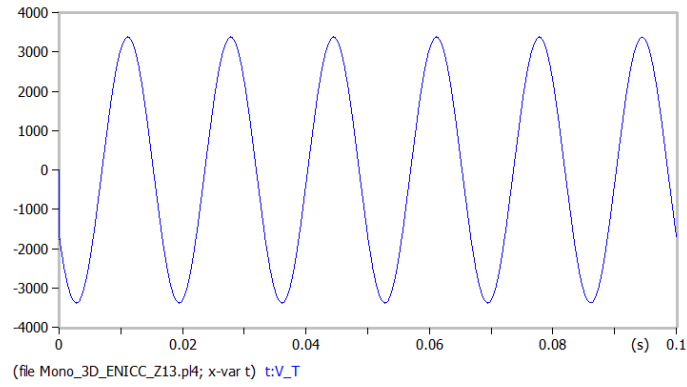


Figura 4.13: Voltaje de cortocircuito para la determinación de la impedancia  $Z_{31}$  del autotransformador

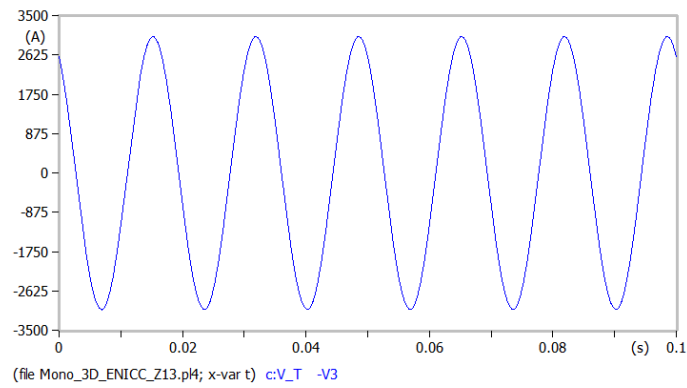


Figura 4.14: Corriente de cortocircuito para la determinación de la impedancia  $Z_{31}$  del autotransformador

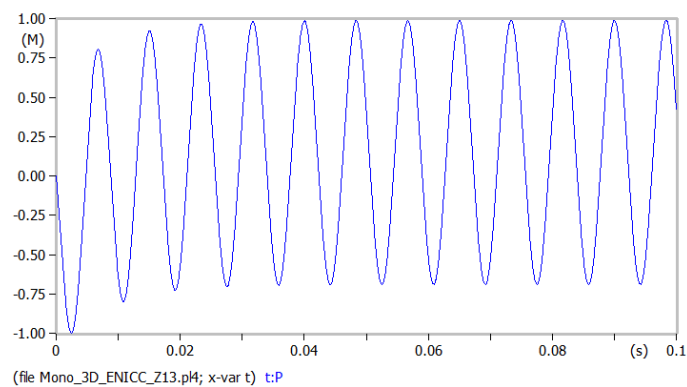


Figura 4.15: Potencia de cortocircuito para la determinación de la impedancia  $Z_{31}$  del autotransformador

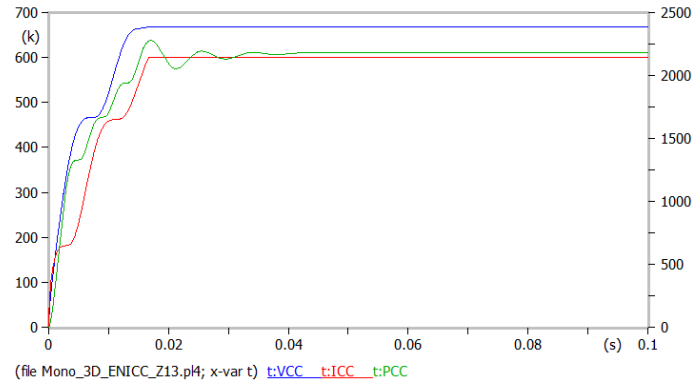


Figura 4.16: Parámetros eficaces en el ensayo de cortocircuito para la impedancia  $Z_{31}$

En los parámetros obtenidos:

$$V_{cc} = 2\,390 \text{ V}$$

$$I_{cc} = 2\,146.3 \text{ A}$$

$$P_{cc} = 0.611 \text{ MW}$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} = \frac{2\,390}{2\,146.3} = 1.1135 \text{ } \Omega$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{(23.9 \text{ kV})^2}{18 \text{ MVA}} = 31.73 \text{ } \Omega$$

$$Z_{31,\text{pu}} = \frac{Z_{cc}}{Z_{\text{base}}} = \frac{1.1135}{31.73} = 0.035 \text{ (3.5\%)}$$

### 4.3.3 Ensayo de cortocircuito entre el segundo y tercer devanado

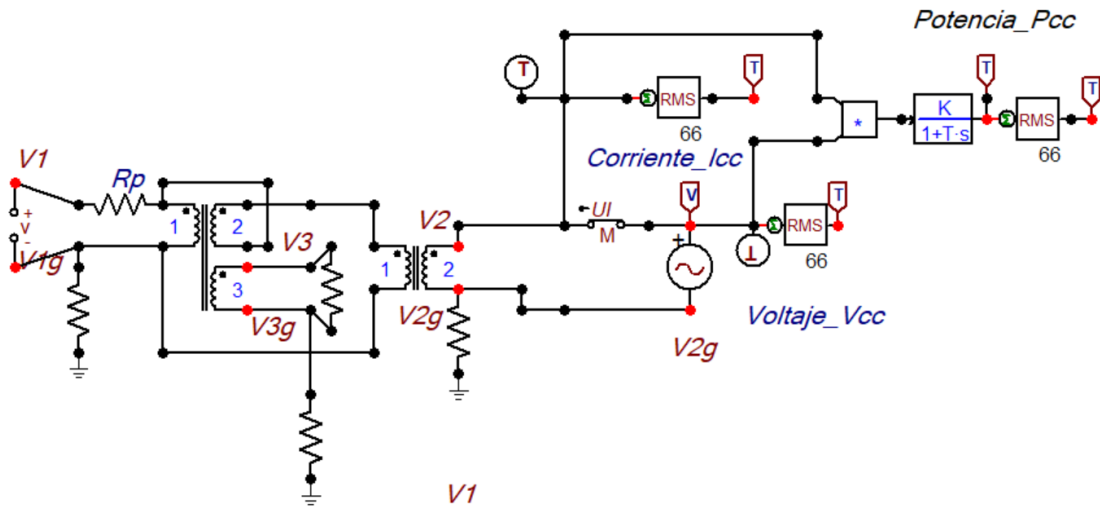


Figura 4.17: Ensayo de cortocircuito para  $Z_{23}$

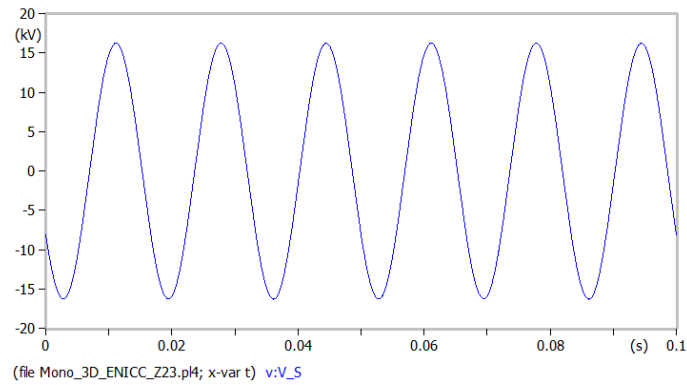


Figura 4.18: Voltaje de cortocircuito para la determinación de la impedancia  $Z_{23}$  del autotransformador

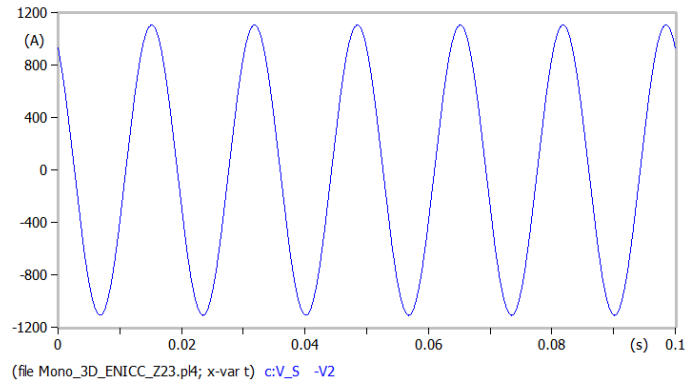


Figura 4.19: Corriente de cortocircuito para la determinación de la impedancia  $Z_{23}$  del autotransformador

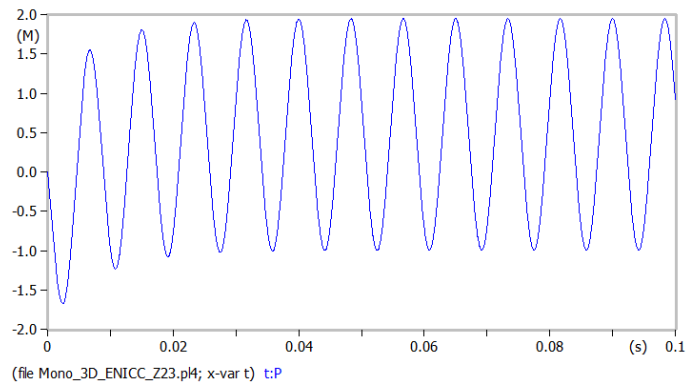


Figura 4.20: Potencia de cortocircuito para la determinación de la impedancia  $Z_{23}$  del autotransformador

Ensayo de cortocircuito para la determinación de la impedancia  $Z_{23}$  del autotransformador

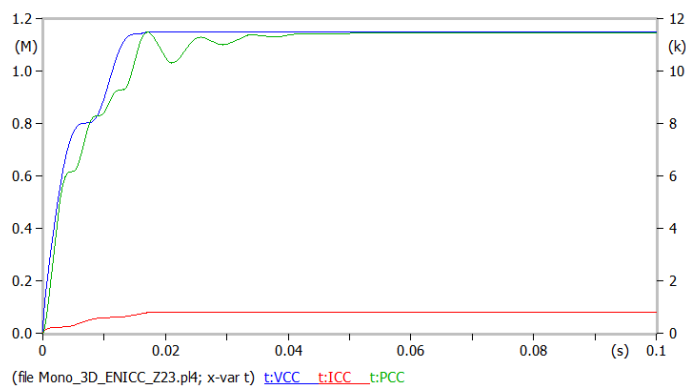


Figura 4.21: Parámetros eficaces en el ensayo de cortocircuito para la impedancia  $Z_{23}$

En los parámetros obtenidos:

$$V_{cc} = 11\,500 \text{ V}$$

$$I_{cc} = 783.05 \text{ A}$$

$$P_{cc} = 1.146 \text{ MW}$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} = \frac{11\,500}{783.05} = 14.686 \, \Omega$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{(115 \text{ kV})^2}{18 \text{ MVA}} = 734.72 \, \Omega$$

$$Z_{31,\text{pu}} = \frac{Z_{cc}}{Z_{\text{base}}} = \frac{14.686}{734.72} = 0.02 \text{ (2\%)}$$

Al resumir los resultados obtenidos, se observa en la Tabla 4.1 que los valores de impedancia del transformador convencional y del autotransformador son prácticamente iguales. Este comportamiento demuestra que la modelación realizada es eficiente y confiable, ya que reproduce adecuadamente los parámetros eléctricos del sistema. Además, se eliminan los posibles errores de cálculo asociados al modelo circuital, dado que el autotransformador opera con todas sus reactancias de carácter positivo, garantizando así un comportamiento físicamente realizable y numéricamente estable.

Tabla 4.1: Parámetros del transformador

<b>Impedancia</b>	<b>Transformador convencional</b>	<b>Autotransformador</b>
$Z_{12}$	6.358%	6.36%
$Z_{31}$	3.519%	3.5%
$Z_{23}$	2.007%	2%

#### 4.3.4 Autotransformador trifásico

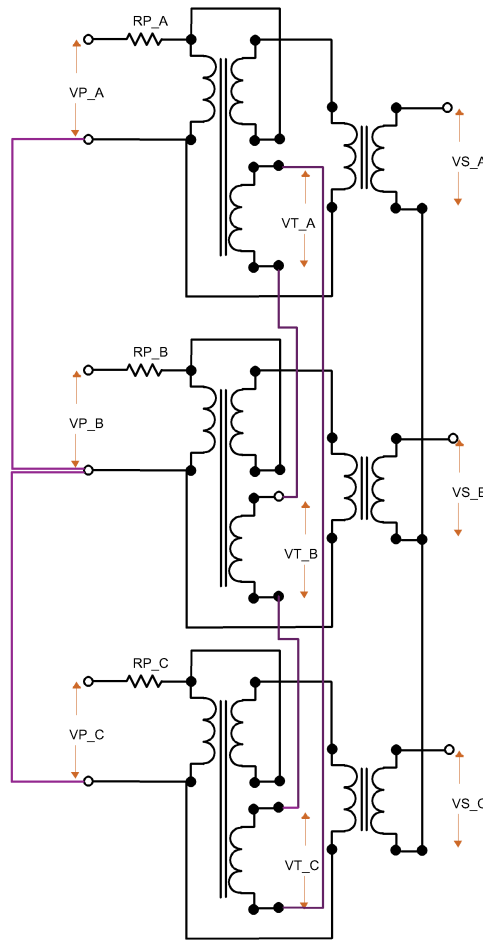


Figura 4.22: Transformador Trifásico de tres devanados como autotransformador

En un modelo trifásico, la configuración del sistema dentro del entorno de simulación es más compleja debido a la interconexión de las tres fases. Por este motivo, se debe prestar especial atención a la conexión de cada devanado, a fin de evitar cortocircuitos o configuraciones incorrectas que afecten la estabilidad del modelo. En la Fig. 4.23 se muestra un transformador trifásico con conexión estrella-estrella-delta, el cual emplea los mismos parámetros de impedancia utilizados en el caso monofásico.

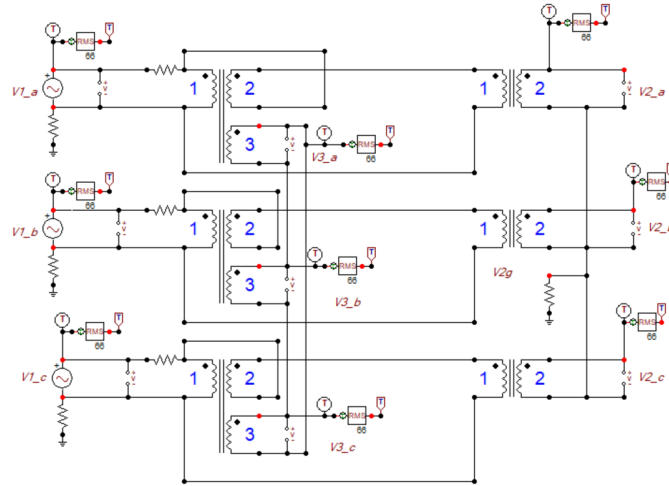


Figura 4.23: Transformador trifasico representado como autotransformador

Una vez conectado el transformador trifásico en configuración de autotransformador, se procede a medir los voltajes en cada uno de los devanados con respecto a tierra, con el objetivo de verificar y obtener los valores nominales indicados en la placa del equipo.

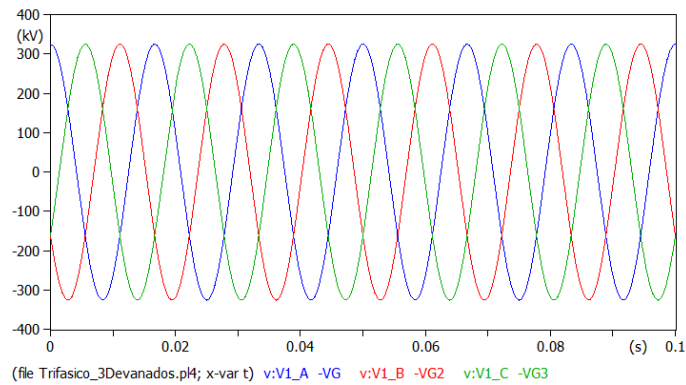


Figura 4.24: Voltaje primario del autotransformador trifásico

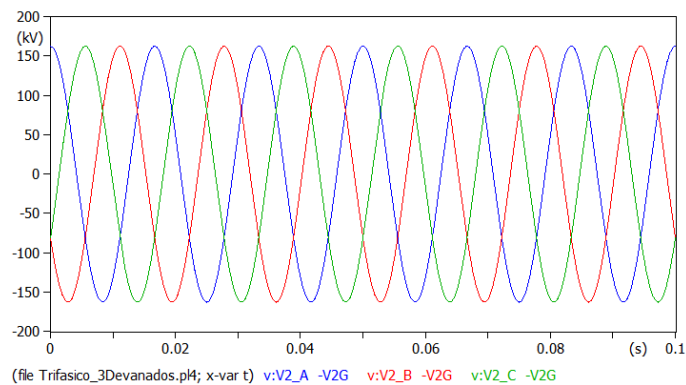


Figura 4.25: Voltaje secundario del autotransformador trifásico

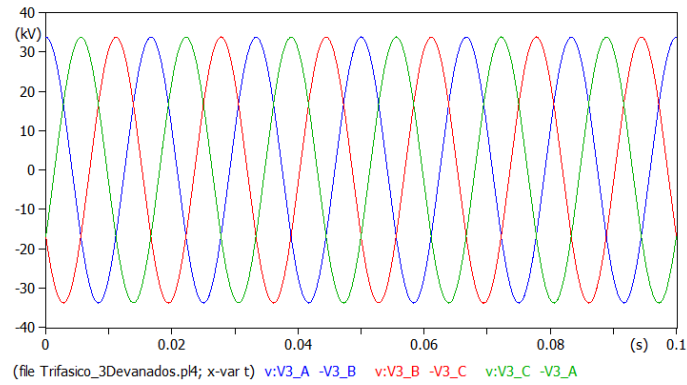


Figura 4.26: Voltaje terciario del autotransformador trifásico

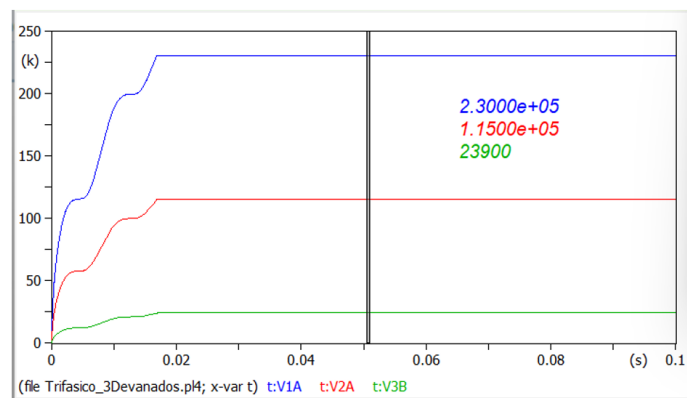


Figura 4.27: Voltajes eficaces en los devanados del autotransformador trifásico

Para la prueba de cortocircuito en un transformador multinivel, se cortocircuita el devanado secundario, mientras que el devanado terciario se mantiene abierto, con el fin de determinar la impedancia del devanado primario con respecto al secundario. El ensayo se realiza aplicando un voltaje reducido, correspondiente aproximadamente al 10 % del voltaje nominal. Durante la prueba, la potencia absorbida se mide mediante el método de los dos vatímetros, conectados en dos de las fases del transformador, lo que permite determinar la potencia total del sistema trifásico o medir la potencia de cada una de las fases referidas a tierra dando un total de la potencia monofásico por tres. A partir de las mediciones de voltaje, corriente y potencia, se calculan las pérdidas en el cobre y la impedancia equivalente del transformador, despreciando las pérdidas en el núcleo debido al bajo nivel de tensión aplicada.

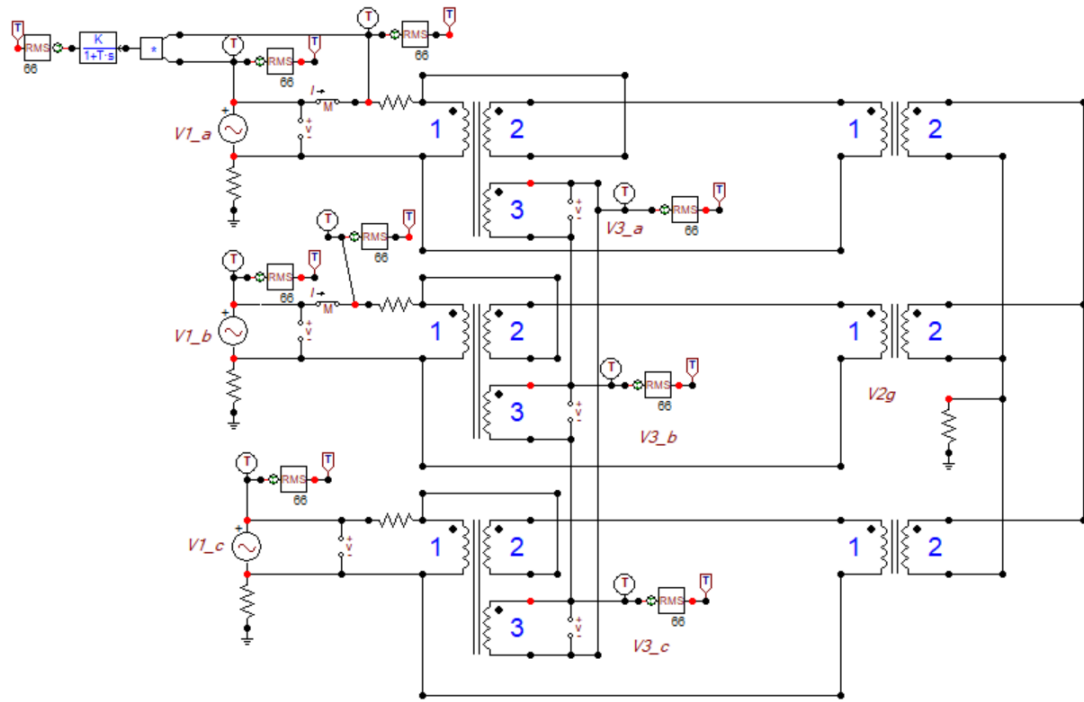


Figura 4.28: Ensayo de cortocircuito en el transformador trifásico

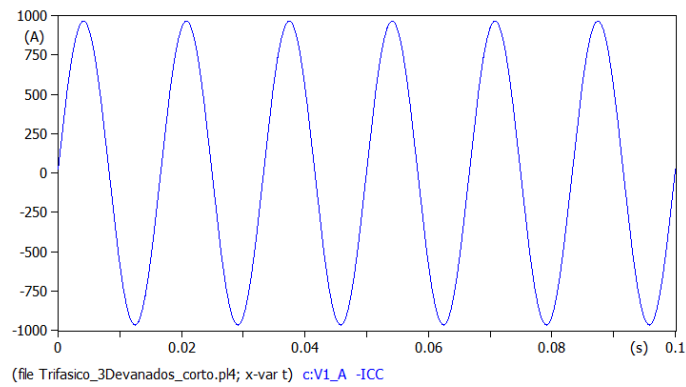


Figura 4.29: Corriente de cortocircuito del autotransformador trifásico

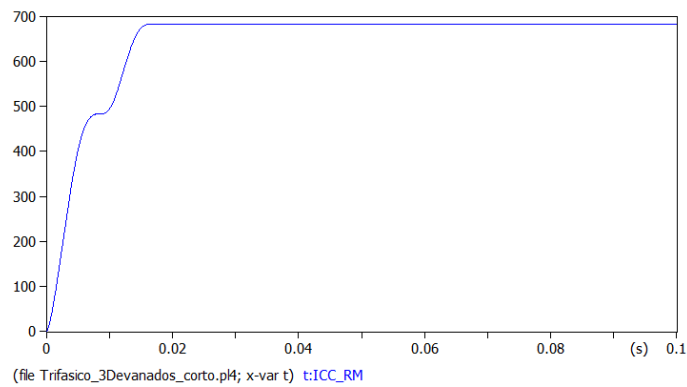


Figura 4.30: Corriente eficaz de cortocircuito del autotransformador trifásico

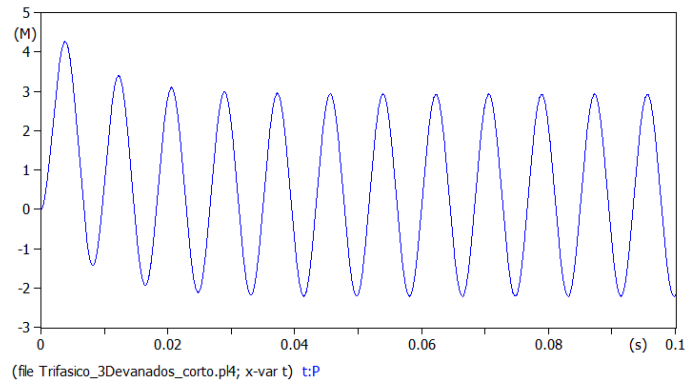


Figura 4.31: Potencia de cortocircuito del autotransformador trifásico

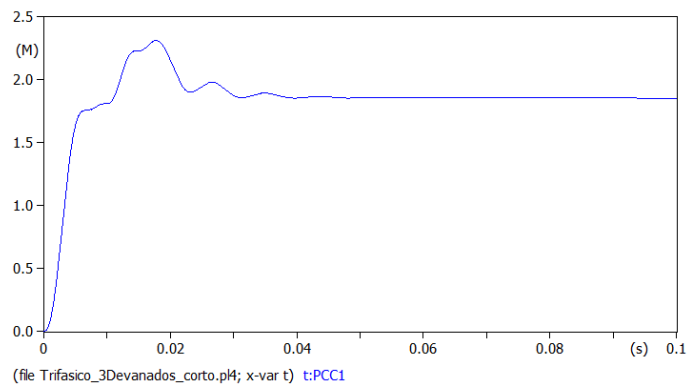


Figura 4.32: Potencia eficaz de cortocircuito del autotransformador trifásico

Como se observa en la Fig. 4.28, se obtienen valores por fase equivalentes a los del transformador monofásico mostrado en la Fig. 4.7. Esto confirma la confiabilidad del modelo, ya que mediante los ensayos realizados se logran determinar las mismas impedancias que en un transformador convencional, tanto en modelos monofásicos como trifásicos, sustituyendo adecuadamente las impedancias negativas.

## CAPÍTULO 5

### Conclusiones

El análisis del transformador de tres devanados confirma que los ensayos realizados permiten determinar de manera precisa los parámetros eléctricos fundamentales necesarios para su modelado y evaluación. Los resultados obtenidos en la etapa de simulación evidencian la alta sensibilidad del comportamiento del modelo ante la correcta representación de las impedancias, lo que ratifica la importancia de una formulación adecuada del circuito equivalente para reproducir el comportamiento físico del transformador.

Durante la simulación inicial se identifican corrientes no representativas, lo cual demuestra la necesidad de ajustar el modelo. La reformulación del sistema mediante un esquema equivalente tipo autotransformador permite una redistribución coherente de las impedancias, garantizando valores de corriente consistentes con el funcionamiento real del transformador y eliminando comportamientos no físicos observados.

La implementación de este ajuste mejora significativamente la estabilidad del modelo y aumenta la confiabilidad de los resultados obtenidos, lo que facilita su aplicación en análisis posteriores y estudios de desempeño. En este contexto, la simulación se consolida como una herramienta eficaz para la validación y optimización del modelo del transformador, fortaleciendo la comprensión de su comportamiento eléctrico en sistemas de potencia.

A partir del análisis desarrollado y de los resultados de simulación, se verifica que la modelación del transformador de tres devanados mediante un esquema equivalente de autotransformador constituye una alternativa válida y confiable. Tal como se observa en la Fig. 4.28, los valores de impedancia obtenidos por fase coinciden con los correspondientes al transformador monofásico mostrado en la Fig. 4.7, lo que demuestra la coherencia y consistencia del modelo propuesto.

La validación del modelo mediante un caso práctico confirma que las tensiones obtenidas en la simulación corresponden a valores físicamente esperados. Este resultado ratifica que la sustitución de impedancias negativas por impedancias positivas, a través de la reformulación del transformador como autotransformador, permite reproducir de manera adecuada su comportamiento eléctrico bajo condiciones nor-

males de operación.

En contraste, los modelos que incorporan impedancias negativas generan tensiones excesivamente elevadas y no realistas durante la simulación, lo que compromete la estabilidad numérica y conduce a resultados erróneos en el entorno ATP-EMTP. El modelo propuesto elimina estas inconsistencias y garantiza simulaciones estables y confiables, tanto en régimen permanente como en condiciones transitorias.

En consecuencia, la modelación del transformador de tres devanados como autotransformador se establece como una solución técnica efectiva para evitar problemas asociados a inductancias o impedancias negativas, asegurando resultados físicamente coherentes y un comportamiento adecuado del sistema en estudios de simulación electromagnética.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] X. Chen and S. Venkata, “A three-phase three-winding core-type transformer model for low-frequency transient studies,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 2, p. 775 – 782, 1997. Cited by: 72.
- [2] D. P. K. y J. S. Dhillon, *Power System Optimization*. Prentice-Hall, 2007.
- [3] W. D. Stevenson, *Elements of power system analysis*. McGraw-Hill series in electrical engineering, New York [u.a.]: McGraw-Hill, 4. ed. ed., 1982.
- [4] L. M. Dután Amay, “Modelación de transformadores para estudios de energización usando ATP-EMTP,” Master’s thesis, Quito, Ecuador, nov 2010. Número de jornadas: XXIII.
- [5] Mini, Moore, and Wilkins, “Performance of auto transformers with tertiary under short-circuit conditions,” *Journal of the A.I.E.E.*, vol. 43, pp. 450–452, May 1924.
- [6] J. E. Clem, “An exact formula for transformer regulation,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 55, pp. 466–471, May 1936.
- [7] A. N. Garin, “Short-circuit standards for transformers,” *Electrical Engineering*, vol. 66, pp. 771–773, Aug 1947.
- [8] R. P. y L. V. W. Brokering, *Los Sistemas Eléctricos de Potencia*. PEARSON, 2008.
- [9] C. P. Schultz, “A contribution to the theory of multiple winding transformers,” in *Proceedings of the IEEE SoutheastCon*, pp. 175–177, 2009.
- [10] F. De Leon and J. Martinez, “Dual three-winding transformer equivalent circuit matching leakage measurements,” in *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES)*, 2009.
- [11] R. Rifaat, “Modeling and applications of three winding transformers in industrial and commercial facilities part 2: Unbalanced and transient analysis,” in *2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1–6, Oct 2011.

- [12] A. Ramos and J. C. Burgos, “Influence of tertiary stabilizing windings on zero-sequence performance of three-phase three-legged ynynd transformers. part i: Equivalent circuit models,” *Electric Power Systems Research*, vol. 144, p. 32 – 40, 2017. Cited by: 4.
- [13] S. Jazebi and F. De León, “Experimentally validated reversible single-phase multiwinding transformer model for the accurate calculation of low-frequency transients,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, p. 193 – 201, 2015. Cited by: 27.
- [14] J. G. A. Paladines, “Diseño y construcción de un autotransformador trifásico de tres devanados para el laboratorio de sistemas eléctricos de potencia,” Master’s thesis, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador, 2018. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.
- [15] “Ieee standard test code for dry-type distribution and power transformers,” *IEEE Std C57.12.91-2020 (Revision of IEEE Std C57.12.91-2011)*, pp. 1–102, 2021.
- [16] IEEE Power and Energy Society, “IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.” *IEEE Std C57.12.90-2021 (Revision of IEEE Std C57.12.90-2015)*, 2022.
- [17] International Electrotechnical Commission, “Iec 60076-1: Power transformers - part 1: General,” apr 2000. Edition 2:1993 consolidated with amendment 1:1999.
- [18] H. K. Høidalen, B. A. Mork, F. Gonzalez, D. Ishchenko, and N. Chiesa, “Implementation and verification of the hybrid transformer model in atpdraw,” *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 3, p. 454 – 459, 2009. Cited by: 32.
- [19] J. Nosratian Ahour, S. Seyedtabaii, and G. B. Gharehpetian, “Test system for detailed model of transformers for transient analysis using the electromagnetic transient program (emtp),” *Electric Power Components and Systems*, vol. 46, no. 5, p. 511 – 520, 2018. Cited by: 1.
- [20] E. E. S. del M. I. T., *Circuitos magnéticos y transformadores*. Barcelona, España: Editorial Reverté, S. A., 1965. Versión en español del original *Magnetic Circuits and Transformers*, John Wiley & Sons, Inc., New York. Traducción de Julián Fernández Ferrer.

## Áreas del Trabajo de Grado (ABET)

Tabla 1: Áreas del Trabajo de Grado.

Título del Trabajo:				
Restricciones múltiples (dos o más)	Accesibilidad			Estética
	Códigos			Construtibilidad
	Costos			Ergonomía
	Extensibilidad			Funcionalidad
	Interoperabilidad			Consideraciones Legales
	Mantenibilidad			Manufacturabilidad
	Mercadeo			Política
	Regulaciones			Cronogramas
	Normativas		p.7	Sostenibilidad
	Impacto Ambiental			Impacto Social
	Usabilidad			Otros:
Normas relevantes (dos o más)	IEC 60076-1			IEEE Std C57.12.90-2021
	IEEE Std C57.12.91-2020			IEEE Std C57.152-2013
Elementos del proceso	Identificación de oportunidades	Cap.1		Generación de soluciones múltiples
	Desarrollo de requerimientos	Cap.4		Evaluación de soluciones
	Procesos iterativos			Consideración de riesgos
	Realizar compromisos o tratos			
	Protecciones			Iluminación
Basado en trabajos anteriores	Optimización de sistemas	Cap.3		Alta Tensión
	Energías alternativas			Distribución
	Máquinas eléctricas	Cap.2		Otros temas

## SO2

### **Aspectos relacionados con Salud Pública y Medio Ambiente:**

El presente trabajo de titulación, enfocado en el análisis de la inductancia negativa que aparece en transformadores de tres devanados y su corrección mediante el método del autotransformador, tiene un impacto indirecto sobre la salud pública y el medio ambiente. Si bien el estudio es de carácter fundamentalmente teórico y de modelación eléctrica, sus aportes contribuyen a mejorar la confiabilidad y el desempeño de los sistemas eléctricos de potencia, lo cual repercute positivamente en la operación segura y eficiente de la infraestructura energética.

Una correcta representación y corrección de los parámetros eléctricos de los transformadores permite reducir errores de simulación, sobrecorrientes no deseadas y condiciones anómalas durante la energización y operación del equipo. Esto contribuye a minimizar el riesgo de fallas catastróficas, incendios o eventos eléctricos que podrían afectar tanto a las personas como a instalaciones cercanas, reforzando así la seguridad operativa de subestaciones y redes eléctricas. Desde esta perspectiva, el trabajo apoya indirectamente la protección de la salud de técnicos, operadores y de la población en general.

En términos ambientales, una modelación más precisa de transformadores trifásicos y de tres devanados favorece la optimización del diseño y operación de los sistemas eléctricos, reduciendo pérdidas eléctricas y mejorando la eficiencia energética. La disminución de pérdidas implica un menor requerimiento de generación eléctrica para satisfacer la demanda, lo que contribuye indirectamente a la reducción de emisiones asociadas a la producción de energía, especialmente en sistemas donde aún existen fuentes de generación basadas en combustibles fósiles.

En consecuencia, el aporte del proyecto a la salud pública y al medio ambiente se manifiesta de forma indirecta, mediante la mejora en la confiabilidad, seguridad y eficiencia de los sistemas eléctricos, aspectos que son fundamentales para garantizar un suministro energético seguro, estable y sostenible.

### **Aspectos relacionados con Seguridad de Personas y Bienes:**

El presente proyecto prioriza la seguridad de las personas y la protección de los bienes asociados a la operación de transformadores de tres devanados dentro de sistemas eléctricos de potencia. La correcta modelación de parámetros eléctricos, en particular la identificación y tratamiento de inductancias negativas, permite mejorar la confiabilidad de los estudios de energización, cortocircuito y transitorios electromagnéticos, reduciendo la posibilidad de interpretaciones erróneas que puedan derivar en decisiones técnicas inadecuadas para la operación y protección del sistema.

La corrección de la inductancia negativa mediante el método del autotransformador contribuye a obtener modelos equivalentes físicamente coherentes, lo que favorece una representación más realista del comportamiento del transformador durante condiciones de maniobra y fallas. Esto se traduce en una mejor coordinación de protecciones, disminuyendo el riesgo de esfuerzos eléctricos y térmicos excesivos que podrían provocar daños en el aislamiento, degradación acelerada del equipo o incluso fallas catastróficas. En consecuencia, se fortalece la seguridad operativa en subestaciones y redes de distribución o transmisión, protegiendo tanto al personal técnico como a la infraestructura asociada.

Además, al mejorar la precisión del modelo, se facilita la evaluación de corrientes de magnetización, sobretensiones transitorias y posibles condiciones de saturación, aspectos críticos para prevenir fenómenos como disparos intempestivos de protecciones, sobrecalentamientos o eventos que puedan generar incendios y pérdidas materiales significativas.

Es importante considerar que los resultados del estudio deben ser aplicados con criterio técnico y validación adecuada, ya que una implementación incorrecta del modelo o una interpretación errónea de los parámetros corregidos podría llevar a configuraciones de protección inadecuadas o a subestimar riesgos eléctricos reales. Por ello, se recomienda que los procedimientos de modelación y simulación se complementen con normas técnicas aplicables, buenas prácticas de ingeniería y, cuando sea posible, contrastación con ensayos o datos medidos en campo, garantizando así un enfoque integral para la seguridad de personas y bienes.

### **Aspectos relacionados con el bienestar de la población:**

El presente proyecto reconoce que el análisis y corrección de la inductancia negativa en transformadores de tres devanados contribuye indirectamente al bienestar de la población, al fortalecer la confiabilidad y estabilidad del sistema eléctrico. Un suministro de energía seguro y continuo es un factor esencial para el desarrollo social y económico, ya que permite el correcto funcionamiento de servicios básicos como hospitales, centros educativos, comunicaciones, transporte y sistemas de seguridad, los cuales dependen de la disponibilidad de energía eléctrica de manera permanente.

### **Factores Globales:**

El presente proyecto se enmarca dentro de un contexto global orientado al fortalecimiento de la confiabilidad y estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia, considerando que la energía eléctrica constituye un recurso estratégico para el desarrollo económico, industrial y social a nivel mundial. En la actualidad, el crecimiento de la demanda energética, la expansión de redes interconectadas y la integración

de nuevas tecnologías, como la generación renovable y la electrificación de sectores productivos, exigen una infraestructura eléctrica cada vez más robusta y eficiente.

En este escenario, los transformadores de potencia representan componentes críticos en redes de transmisión y distribución, por lo que su correcta modelación resulta fundamental para garantizar un desempeño adecuado en condiciones de operación normal y ante eventos transitorios. El fenómeno de inductancia negativa, particularmente en transformadores de tres devanados, constituye una problemática relevante en estudios de simulación y análisis electromagnético, ya que puede afectar la coherencia física del modelo equivalente y comprometer la confiabilidad de los resultados en herramientas de simulación empleadas internacionalmente.

La corrección de este fenómeno mediante el método del autotransformador contribuye al desarrollo de modelos equivalentes más representativos y consistentes, fortaleciendo la precisión en estudios de energización, coordinación de protecciones, transitorios electromagnéticos y planificación de maniobras. Esto se alinea con tendencias globales en ingeniería eléctrica que promueven la estandarización de procedimientos de modelación, el uso de buenas prácticas técnicas y la aplicación de normativas internacionales para asegurar la interoperabilidad y seguridad del sistema eléctrico.

### **Factores Culturales:**

Aunque el presente proyecto tiene un enfoque principalmente técnico, se reconoce que los factores culturales también influyen en la adopción y aplicación de metodologías de modelación dentro del sector eléctrico. En este contexto, la cultura técnica y organizacional de las empresas eléctricas, la formación profesional de los ingenieros, los hábitos de trabajo en estudios de simulación y el grado de confianza en herramientas computacionales son elementos que pueden facilitar o limitar la implementación de modelos avanzados para transformadores de potencia, especialmente en transformadores de tres devanados.

Un aspecto cultural relevante corresponde a la tendencia a emplear modelos convencionales o parametrizaciones simplificadas por costumbre o por limitaciones de tiempo, aun cuando estos puedan generar inconsistencias como la aparición de inductancias negativas. En algunos entornos, la resistencia al cambio metodológico puede dificultar la adopción de estrategias de corrección, debido a que se prioriza la experiencia previa o procedimientos tradicionales por encima de enfoques de modelación más rigurosos. Por ello, este proyecto reconoce que la mejora en la representación de transformadores no depende únicamente del desarrollo teórico, sino también del fortalecimiento de una cultura técnica orientada a la validación, trazabilidad de resultados y buenas prácticas de ingeniería.

En este sentido, la difusión de metodologías como la corrección mediante el

método del autotransformador requiere procesos de capacitación y transferencia de conocimiento, de manera que los operadores de sistemas, analistas de estudios y estudiantes comprendan la importancia de contar con parámetros físicamente coherentes para lograr simulaciones confiables. Asimismo, la adopción efectiva de estas técnicas depende de la disponibilidad de documentación técnica adecuada, procedimientos institucionales claros y estándares internos que promuevan el uso consistente de modelos equivalentes en estudios de energización y transitorios.

No obstante, también se reconoce que existen obstáculos culturales y formativos que pueden limitar la aplicación práctica de estos aportes, tales como la falta de acceso a información detallada de fabricantes, la limitada experiencia en análisis avanzado de transformadores, y la desconfianza en resultados de simulación cuando estos difieren de prácticas históricas. En consecuen

### **Factores Sociales:**

El presente proyecto reconoce que, aunque su enfoque es principalmente técnico, el análisis y corrección de la inductancia negativa en transformadores de tres devanados posee una dimensión social relevante, debido a que los transformadores de potencia son equipos fundamentales para garantizar la continuidad y calidad del suministro eléctrico. La energía eléctrica constituye un servicio esencial para la sociedad, ya que sostiene actividades domésticas, industriales, comerciales y el funcionamiento de servicios críticos como hospitales, sistemas de agua potable, telecomunicaciones y seguridad pública. Por ello, cualquier mejora orientada a incrementar la confiabilidad de la infraestructura eléctrica impacta indirectamente en el bienestar colectivo.

La obtención de modelos equivalentes físicamente coherentes mediante el método del autotransformador contribuye a reducir incertidumbres en estudios de simulación relacionados con la energización, transitorios electromagnéticos y coordinación de protecciones. Esto favorece una planificación más adecuada de maniobras y mantenimientos, disminuyendo la probabilidad de interrupciones no programadas o fallas que puedan afectar a comunidades enteras. En este sentido, el proyecto aporta al fortalecimiento de la resiliencia del sistema eléctrico, aspecto clave para minimizar afectaciones sociales asociadas a cortes de energía, pérdidas económicas y reducción de productividad.

Asimismo, se reconoce que la capacidad técnica para realizar estudios de modelación avanzada no siempre se encuentra distribuida de manera equitativa entre instituciones. Algunas empresas eléctricas o zonas del país pueden contar con mayor acceso a herramientas de simulación, capacitación y asesoría técnica, mientras que otras enfrentan limitaciones económicas o tecnológicas. Esto puede generar diferencias en la calidad de la planificación y operación de las redes eléctricas, particularmente en regiones rurales o periféricas donde la infraestructura suele ser más

vulnerable.

Por lo tanto, aunque el proyecto no desarrolla una intervención directa sobre comunidades, se incorpora una reflexión social orientada a destacar la importancia de la capacitación técnica, la estandarización de procedimientos de modelación y el fortalecimiento institucional como estrategias que permitan mejorar la confiabilidad del suministro eléctrico de forma más homogénea. En consecuencia, el trabajo contribuye de manera indirecta a la reducción de brechas de calidad del servicio eléctrico y al acceso más seguro y continuo a un recurso indispensable para el desarrollo social.

No obstante, también se reconoce que la aplicación práctica de los resultados depende de su transferencia efectiva al entorno profesional y académico. Si los métodos de corrección no son difundidos adecuadamente o no se integran en procedimientos técnicos institucionales, los beneficios po

### **Factores ambientales:**

El presente proyecto, centrado en el análisis y corrección de la inductancia negativa en transformadores de tres devanados mediante el método del autotransformador, tiene un impacto ambiental de carácter indirecto. Si bien el trabajo no contempla la instalación de nueva infraestructura eléctrica ni la modificación física de equipos existentes, sus aportes contribuyen a mejorar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia, lo cual se traduce en beneficios ambientales a largo plazo.

Una modelación más precisa de los transformadores permite reducir errores en estudios de energización, transitorios electromagnéticos y coordinación de protecciones, disminuyendo la probabilidad de fallas, sobrecargas y pérdidas innecesarias de energía. La reducción de pérdidas eléctricas y de eventos de operación anómala contribuye indirectamente a un menor requerimiento de generación eléctrica para satisfacer la demanda, lo que puede traducirse en una disminución de emisiones contaminantes, especialmente en sistemas donde aún se emplean fuentes de generación basadas en combustibles fósiles.

Asimismo, una representación adecuada del comportamiento del transformador favorece la extensión de la vida útil de los equipos, al evitar esfuerzos eléctricos y térmicos excesivos que aceleran el deterioro del aislamiento. Esto reduce la necesidad de reemplazos prematuros, la generación de residuos industriales y el consumo de recursos asociados a la fabricación de nuevos transformadores, alineándose con principios de eficiencia energética y uso responsable de materiales.

No obstante, es importante señalar que los beneficios ambientales derivados de este proyecto dependen de la correcta aplicación de los modelos propuestos en estudios reales de planificación y operación del sistema eléctrico. Dado que el trabajo

se desarrolla a nivel teórico y de simulación, no se identifican impactos ambientales directos ni negativos durante su ejecución. En consecuencia, el aporte ambiental del proyecto se manifiesta principalmente en el ámbito de la optimización técnica y la sostenibilidad del sistema eléctrico, contribuyendo de manera indirecta a la reducción del impacto ambiental asociado a la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

### **Factores Económicos:**

El proyecto contempla una evaluación preliminar de los factores económicos asociados al diseño e implementación de cargadores para vehículos eléctricos alimentados por sistemas fotovoltaicos. Si bien la inversión inicial en tecnologías renovables y electromovilidad puede resultar superior en comparación con sistemas convencionales basados en combustibles fósiles, esta se ve compensada por los ahorros económicos generados a mediano y largo plazo, principalmente debido a la reducción en el consumo de energía convencional, menores costos de operación y mantenimiento, y una mayor estabilidad frente a la variabilidad de los precios de los combustibles.

La implementación de este tipo de infraestructura promueve además la generación de empleo local, especialmente en actividades relacionadas con el diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos y estaciones de carga. Este dinamismo contribuye al fortalecimiento del sector energético y tecnológico, fomentando la creación de nuevos emprendimientos y oportunidades económicas vinculadas a la movilidad eléctrica y a las energías renovables.

Desde una perspectiva macroeconómica, el proyecto aporta a la diversificación de la matriz energética y al fortalecimiento de una economía más sostenible y resiliente, alineada con las políticas nacionales que impulsan la transición energética, la innovación tecnológica y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles importados. Asimismo, la escalabilidad del diseño permite su adaptación a diferentes contextos y niveles de demanda, facilitando su implementación tanto en zonas urbanas como rurales.

No obstante, deben considerarse ciertas limitaciones económicas que pueden afectar la viabilidad del proyecto en su etapa inicial. El elevado costo de adquisición de los sistemas fotovoltaicos y de los vehículos eléctricos representa una barrera para su adopción masiva, especialmente en economías en desarrollo. En ausencia de incentivos fiscales, subsidios o mecanismos de financiamiento adecuados, el acceso a estas tecnologías puede resultar restringido. Adicionalmente, la rápida evolución tecnológica del sector puede generar riesgos de obsolescencia temprana de algunos equipos, lo que podría incidir negativamente en la rentabilidad del proyecto y en la percepción de confianza por parte de los usuarios.

En conjunto, el proyecto presenta un balance económico favorable, siempre que se complementen las inversiones iniciales con políticas de apoyo, planificación financiera adecuada y estrategias que permitan maximizar los beneficios económicos a largo plazo.