

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelación de Transitorios Electromagnéticos en Transformadores Eléctricos

Autor: Osleni Antonio Alba Betancourt

Tutores: Dr.C Ángel Valcárcel Rojas

MSc. Alberto Limonte Ruiz

Ing. Rafael Díaz Ponce

Santa Clara

2016

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelación de Transitorios Electromagnéticos en Transformadores Eléctricos

Autor: Osleni Antonio Alba Betancourt

Email: oalba@uclv.cu

Tutores: Dr. C. Ángel Valcárcel Rojas

Email: valca@uclv.edu.cu

MSc. Alberto Limonte Ruiz

Email: limonte@uclv.edu.cu

Ing. Rafael Díaz Ponce

Email: rdponce@uclv.edu.cu

Santa Clara

2016



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizo a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

Cuando le apuntamos a lo alto, estamos más cerca de nuestros sueños que si nos conformamos con pequeños objetivos.

DEDICATORIA

Quisiera dedicarle este trabajo que es fruto de todo mi esfuerzo:

A mi padre que me hubiera gustado que estuviera aquí viendo este sueño hecho realidad.

A Yeya por ser alguien imprescindible en mi vida.

A mis dos hermanos que son mis ejemplos a seguir.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer de forma especial:

A Chago y a Reina que son la base de mi vida, especialmente a Yeya por estar siempre ahí en las buenas y en las malas, este también es tu resultado, es el resultado de cada pañoleta que cambiaste, de cada segundo que has estado en mi vida y de todas las cosas buenas que me has enseñado.

A mi madre por todo lo que me ha dado.

A mi hermano Osbel que sin su ayuda y apoyo no hubiera llegado a este momento de mi vida.

A mi hermano Lázaro que siempre ha estado pendiente de todo.

A Lesli, Liani, Camila y a Luis que también son parte de todo esto.

A Mayita que ha estado a mi lado cuando lo necesitaba.

A Olgui por su apoyo incondicional en todo momento.

A Mirtica que es parte indisoluble de este pedazo vida que hemos vivido juntos.

A toda mi familia.

A mis tutores Ángel Valcárcel y Alberto Limonte que me han ayudado incondicionalmente en búsqueda de este resultado.

A Mimi por haber confiado en mí desde el mismo primer año.

A Alicita que también dedicó parte de su tiempo a este trabajo.

A todos mis amigos y compañeros del aula y de beca a lo largo de mi vida que son parte de esta historia.

A la vida y a mi país por haberme brindado esta oportunidad.

TAREAS TÉCNICAS

Con el propósito de darle cumplimiento a los objetivos trazados en esta tesis, se tuvo en cuenta una serie de tareas técnicas como son:

- Evaluación del estado del arte en la modelación de transformadores eléctricos.
- Familiarización con el trabajo de modelación en el ATPDraw.
- Determinación de los modelos de transformadores a utilizar, a partir de la evaluación inicial.
- Modelación en ATPDraw y MatLab de diferentes estados transitorios en el transformador utilizando sus respectivos modelos.
- Comparación de los resultados obtenidos en el trabajo con los obtenidos por otros autores y en el laboratorio.
- Confección del informe de investigación.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Los transformadores en los Sistemas Eléctricos de Potencia son un elemento indispensable en la transmisión y distribución de los grandes bloques de potencia que llegan a los consumidores. La necesidad de conocer el comportamiento de estos dispositivos ante la presencia de condiciones propicias para la formación de fenómenos transitorios es imprescindible para lograr un correcto manejo y diseño de estos. El propósito de este trabajo es la descripción del comportamiento de los transformadores ante transitorios mediante el uso de los programas MatLab y ATP. De ahí que se realizó la modelación de diferentes transitorios electromagnéticos que ocurren en el transformador en condiciones normales de explotación para la obtención de las respuestas que ofrece el dispositivo ante estas situaciones. Se utilizaron diferentes métodos de investigación entre los que se destacan: revisión documental y consulta a especialistas. Se presentan los fundamentos teóricos y las técnicas que sustentan el procedimiento de la modelación de los transformadores a distintos niveles de frecuencia. Con el uso del MatLab y el ATP se implementan los modelos y se crean las condiciones que influyen en la formación de fenómenos transitorios en la máquina. Se obtuvieron y evaluaron respuestas que describen como se comporta el transformador ante la presencia de transitorios electromagnéticos, resultados que validan la investigación realizada mediante la comparación con los alcanzados por otros autores y pruebas reales de laboratorio.

TABLA DE CONTENIDO

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREAS TÉCNICAS.....	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y MODELACIÓN DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS	6
1.1 Los transformadores como máquinas eléctricas estáticas.....	6
1.1.1 Principio de funcionamiento del transformador ideal.....	7
1.1.2 Principio de funcionamiento del transformador real.....	10
1.2 Clasificación de los transformadores	10
1.3 El transformador monofásico	11
1.3.1 Características constructivas del transformador monofásico	12
1.3.2 Circuitos equivalentes del transformador	13
1.4 Determinación de parámetros del transformador	14
1.4.1 Ensayo o Prueba de corriente directa	14
1.4.2 Ensayo o Prueba en Vacío	15
1.4.3 Ensayo o Prueba de Cortocircuito	16
1.5 El transformador trifásico	17
1.5.1 Características constructivas del transformador trifásico	18
1.5.2 Circuitos equivalentes del transformador trifásico	19
1.5.3 Conexiones de los transformadores trifásicos.....	19

1.6	Modelación de transformadores eléctricos.....	20
1.7	Técnicas de modelación de transformadores	21
1.8	Modelado de transformadores basado en la técnica de Dualidad	22
1.8.1	Modelado del transformador monofásico basado en Dualidad.....	23
1.8.2	Modelado del transformador trifásico basado en Dualidad.....	27
1.9	Consideraciones finales del capítulo.....	30
CAPÍTULO II MODELOS DE TRANSFORMADORES EN ATP Y MATLAB		31
2.1	ATP como herramienta de análisis	31
2.2	MatLab como herramienta de análisis	32
2.3	Desarrollo del procedimiento de modelado.....	33
2.3.1	Fenómenos transitorios electromagnéticos en SEP.....	34
2.4	Análisis del comportamiento del transformador ante diferentes niveles de frecuencia.....	36
2.4.1	Comportamiento del transformador a distintos rangos de frecuencia.....	37
2.4.1.1	Comportamiento del transformador ante corriente directa	39
2.4.1.2	Comportamiento del transformador ante bajas frecuencias	40
2.4.1.3	Comportamiento del transformador ante frecuencias medias	40
2.4.1.4	Comportamiento del transformador ante altas frecuencias.....	41
2.5	Técnica de respuesta de frecuencia (FRA).....	42
2.6	Modelos de transformadores de ATP.....	43
2.6.1	Modelo Saturable de ATP	43
2.6.2	Modelo BCTRAN de ATP	46
2.6.3	Modelo Híbrido de ATP	47
2.7	Modelos implementados en ATP y MatLab.....	49

2.7.1	Modelo I.....	49
2.7.2	Modelo II.....	52
2.7.3	Modelo III.....	53
2.7.4	Modelo IV	55
2.8	Consideraciones finales del capítulo.....	56
CAPÍTULO III MODELACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS CON ATP Y MATLAB		57
3.1	Transitorio provocado por la ferro-resonancia en transformadores	57
3.1.1	Modelación del fenómeno de ferro-resonancia	59
3.2	Transitorios a causa de maniobras realizadas en el SEP	62
3.2.1	Modelación del recierre de un interruptor	63
3.3	Transitorio provocado por cortocircuito en la línea de entrada al transformador	66
3.4	Transitorio provocado por una descarga atmosférica	69
3.4.1	Efecto del pararrayo en el transitorio provocado por una descarga atmosférica	71
3.4.2	Análisis del transitorio provocado por una descarga atmosférica mediante MatLab	74
3.5	Barrido de frecuencia aplicado al modelo IV	78
3.6	Consideraciones finales del capítulo.....	81
Conclusiones.....		82
Recomendaciones		83
Referencias Bibliográficas.....		84
Anexos		87

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es una de las formas de energía que con mayor facilidad puede transportarse a grandes distancias. Se puede obtener de diversas fuentes primarias de energía y tiene disímiles usos y aplicaciones en la vida del hombre moderno. Es indispensable disponer de un sistema fuerte, fiable y capaz de generar la energía, transportarla y distribuirla a todos los usuarios en forma eficaz, segura y con calidad. La energía eléctrica, desde su generación hasta su entrega en los puntos de consumo, pasa por las etapas de adaptación, transformación y maniobra, donde para su correcta operación son necesarios equipos capaces de transformar, regular, maniobrar y proteger el mismo. El sistema eléctrico debe estar preparado para generar energía eléctrica en los lugares más idóneos para tal fin, de transformar esa electricidad a unas características idóneas para su transportación a grandes distancias, transformarla nuevamente para poder ser distribuida en los centros de consumo y finalmente adaptarla a valores aptos para los usuarios [1].

Así, dentro del Sistema Electroenergético de Potencia (SEP) resulta interesante estudiar la operación de los elementos que lo componen y su comportamiento ante la existencia de procesos transitorios que pueden aparecer de forma continua o aislada, lo que conlleva al sometimiento de condiciones diferentes a aquellas para las cuales fueron proyectados dichos elementos.

Después de las líneas de la transmisión, los transformadores son los elementos más fiables, eficientes e importantes en los sistemas de transmisión y distribución eléctricos y son, dentro del sistema, equipos costosos. Estos forman parte del equipo primario del SEP, y son elementos indispensables para transmitir los bloques de energía a través de las grandes distancias que separan los centros de generación y los consumidores.

Los transformadores se clasifican como máquinas eléctricas estáticas y son capaces de convertir o transformar la energía eléctrica de un nivel de tensión y corriente a otro nivel. Estas máquinas requieren mantener dentro del SEP, un buen funcionamiento que garantice la calidad del suministro eléctrico. De ahí que sea muy importante tomar las medidas necesarias para su operación satisfactoria.

Los transformadores pueden fabricarse para alimentación monofásica y trifásica, además pueden conectarse en grupos. Entre estos grupos los más importantes son las conexiones en paralelo de transformadores monofásicos y los bancos de transformadores monofásicos en conexiones trifásicas lo que facilita la continuidad de servicios y fácil ampliación de la carga.

En los transformadores, se presentan muchas condiciones propias de su funcionamiento y otras que se apartan de las consideradas como normales de acuerdo al diseño original del mismo; entre ellas se encuentran el cambio de frecuencia, cambio de voltaje y variaciones de la capacidad que son las relacionadas con los parámetros eléctricos aplicados a la máquina [2]. Existen otros relacionados con el intercambio con el medio que los rodea, el cual es un agente directo para la formación de transitorios, causas comunes que van desde la energización del transformador, la conexión o desconexión de cargas hasta una descarga atmosférica.

Aunque en la protección de transformadores ante descargas atmosféricas se utilizan descargadores y pararrayos, que tienen como función descargar a tierra la mayor parte de la onda de voltaje o corriente provocada por este fenómeno, siempre hay una parte que llega al transformador donde aparece así un proceso transitorio que, aunque de corta duración siempre trae consecuencias sobre la máquina. De forma parecida sucede ante la presencia de una falla, si las protecciones utilizadas no son capaces de despejar a tiempo dicha acción el transformador es sometido a condiciones para las cuales no fue diseñado y esto trae consigo procesos transitorios que alteran el funcionamiento y buen comportamiento de los parámetros deseados, además, por el propio

funcionamiento del transformador estos transitorios pueden ser transferidos a los consumidores.

Para una mejor comprensión de su funcionamiento y comportamiento como máquina eléctrica y elemento intermedio en el proceso de transmisión y distribución, es de gran utilidad disponer de un modelo fiable de la máquina, que permita conocer con la mayor exactitud posible lo que ocurre en su interior y se transmite fuera de él ante la presencia de condiciones normales o anormales de trabajo.

De esta manera, y con objeto de poner de manifiesto las alteraciones que producen sobre el equipo estas anomalías, es imprescindible el conocimiento del transformador de forma general, para analizar si es posible o no utilizar los mismos transformadores, o en otros casos, determinar las modificaciones o adaptaciones a que deben someterse. Es importante en los estudios a realizar el modelado matemático que se efectúa del propio transformador ya que se convierte en la base del trabajo e incide en los resultados que se aspiran a obtener.

Para la obtención del modelo del transformador, así como su comportamiento ante diferentes estados transitorios se utilizan varios programas dentro de los cuales están el MatLab y el ElectroMagnetic Transient Program (EMTP) este último actualmente se conoce como Alternative Transient Program (ATP) o su interface gráfica el ATPDraw.

De forma general, los estudios que involucran el uso del ATP tienen encuadrados dos categorías. Una es el diseño el cual incluye la coordinación de la aislación y dimensionamiento de los equipos, especificación de los equipos de protección, diseño de los sistemas de control, etc. La otra es el análisis de problemas de operación, tales como fallas en los sistemas y análisis de los transitorios que normalmente ocurren en la operación del sistema [3].

Con la aplicación de los conocimientos que se tienen hoy día sobre el comportamiento de los transformadores y la utilización del desarrollo científico

técnico existente en el mundo actual se pueden lograr resultados que expongan el funcionamiento de los mismos de una forma más ilustrativa lo cual conduce al **Problema Científico** siguiente: ¿Cómo realizar el análisis de comportamientos transitorios en los transformadores eléctricos a partir de modelos con el uso de los programas MatLab y ATP?

Objeto: Transformadores eléctricos monofásicos y trifásicos.

El **Campo de acción:** Modelación de transitorios en transformadores monofásicos y trifásicos en MatLab y ATP.

En correspondencia con el problema y el objeto de estudio se establece como **Objetivo general de la investigación:** Determinar el comportamiento de los transformadores eléctricos ante transitorios electromagnéticos mediante la modelación con MatLab y ATP.

Objetivos específicos:

- Evaluar la teoría que sustenta el funcionamiento y comportamiento de los transformadores eléctricos (monofásicos y trifásicos), en estado estable y transitorio.
- Verificar las potencialidades de programas como el ATP y el MatLab en la modelación de transitorios electromagnéticos en transformadores eléctricos.
- Evaluar los diferentes modelos del transformador eléctrico a utilizar en este trabajo y seleccionar los más idóneos.
- Realizar simulaciones con los modelos seleccionados de diferentes estados transitorios.
- Comparar los resultados que se obtienen en estudios similares.

Esta investigación pretende contribuir a la profundización en el análisis del comportamiento del transformador ante diferentes estados transitorios, tema que puede incidir en la mejora de sus características constructivas para soportar algunos procesos transitorios no severos y luego la ubicación del transformador para su explotación. Esta investigación ofrece la posibilidad de obtener el

comportamiento del transformador a partir de un programa computacional, solución que es más económicamente factible de alcanzar que a partir de pruebas de laboratorio para lo que se requiriere tecnologías de punta. La modelación de transitorios electromagnéticos cuenta con un amplio margen de aplicaciones sobre todo en la predicción de conductas que siguen los dispositivos que se exponen a condiciones anormales. Estos resultados poseen una aplicación práctica y teórica en la docencia tanto en pregrado como en postgrado.

Este trabajo consta de tres capítulos, además de la introducción, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes.

El Capítulo I recoge los fundamentos teóricos que sustentan el principio de funcionamiento y comportamiento de los transformadores eléctricos tanto monofásicos como trifásicos y su importancia en los SEP, además de la recopilación de información acerca de los modelos y circuitos equivalentes que más se utilizan en el análisis de transitorios electromagnéticos.

El Capítulo II expone el desarrollo del procedimiento de modelado de transitorios electromagnéticos a realizar con el uso del ATP y del MatLab. Contiene la implementación de los modelos que se toman de la revisión bibliográfica con el propósito de validar su adecuado funcionamiento para lo cual se modelan y se comprueba la validez de los resultados con los que presentan los autores. Esto se efectúa tanto para transformadores eléctricos monofásicos y trifásicos. Finalmente se seleccionan los más idóneos para la realización de esta investigación.

El Capítulo III presenta los resultados que se alcanzan en la simulación de los transitorios electromagnéticos en transformadores donde se utilizan los modelos seleccionados. Se describe el comportamiento del transformador a partir de los resultados que se obtienen en la simulación en ATP y MatLab respecto a los que se seleccionan de la revisión bibliográfica y con los resultados que obtiene el investigador mediante pruebas de laboratorio.

CAPÍTULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y MODELACIÓN DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS

La investigación del comportamiento de los transformadores es impulsada cada vez más dado los compromisos adquiridos por las empresas dedicadas a la generación, transmisión y comercialización de la energía eléctrica de brindar servicios más eficientes y con alta calidad. Se conoce que los transformadores tienen una gran aplicación y se pueden encontrar en cualquier parte del sistema, desde las áreas más congestionadas de las ciudades hasta los sectores rurales pocos poblados [4].

Debido a estas grandes aplicaciones, estas máquinas estáticas son las encargadas de transmitir grandes bloques de potencia y están expuestas a infinidad de fenómenos que inciden de una forma u otra en el funcionamiento. Para la realización de cualquier análisis de comportamiento de los transformadores es necesario partir de su principio de funcionamiento y características constructivas que determinan de un inicio cuál va a ser su conducta a seguir frente a cualquier fenómeno presente. La obtención de modelos de transformadores por varios autores lleva las investigaciones sobre el tema hacia un camino que en ocasiones se hace un poco largo y complicado [5],[6] , existen otros investigadores que ven los fenómenos de una forma más sencilla y explícita [7]. Analizar y determinar cuál es el modelo más indicado sobre el cual analizar los fenómenos propuestos es la tarea que se propone en este capítulo.

1.1 Los transformadores como máquinas eléctricas estáticas

Los transformadores son máquinas estáticas generalmente con dos devanados de corriente alterna enrollados que se acoplan sobre un núcleo magnético. El circuito magnético lo constituye una estructura magnética sin entrehierros,

compuesto de láminas de acero electrotécnico aisladas entre sí con el propósito de reducir las pérdidas magnéticas (Figura 1.1). El funcionamiento del transformador se basa en la Ley de Inducción Electromagnética de Faraday, de manera que un circuito eléctrico influye sobre el otro a través del flujo que circula en el circuito magnético. En toda bobina sometida a un flujo variable se induce una fem, que se representa por:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad V \quad (1)$$

El devanado por donde se suministra la energía eléctrica al transformador se denomina primario y el devanado por donde sale energía hacia las cargas que son alimentadas por el transformador se denomina secundario. El devanado primario tiene N_1 espiras o vueltas y el secundario tiene N_2 espiras.

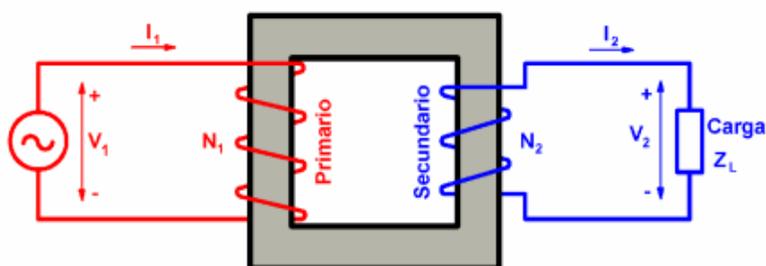


Figura 1.1. Representación esquemática del transformador.

Al conectar una tensión alterna de valor eficaz V_1 al primario, circula una corriente I_1 por él que tiene asociado un flujo alterno que cierra su circuito por el núcleo magnético. Este flujo magnético en virtud de la Ley de Faraday induce en el secundario una fuerza electromotriz (fem) E_2 que da lugar a una tensión alterna de valor eficaz V_2 de la misma frecuencia que el primario [8].

1.1.1 Principio de funcionamiento del transformador ideal

Las principales consideraciones que se realizan para el estudio y análisis del transformador ideal son:

- Un núcleo magnético de permeabilidad infinita.

- Los devanados primario y secundario poseen resistencias óhmicas despreciables, lo que significa que no hay pérdidas por efecto Joule y no existen caídas resistivas en el transformador.
- No existen flujos de dispersión, lo que quiere decir que todo flujo magnético está confinado en el núcleo y enlaza ambos devanados, primario y secundario [5].

Si la tensión de suministro responde a la función seno entonces el flujo alterno tiene la forma de onda:

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \quad \text{Wb} \quad (2),$$

La fem inducida en el devanado primario que se obtiene al realizar diversas operaciones matemáticas es:

$$e_1 = N_1 \omega \phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad \text{V} \quad (3)$$

Donde:

ω -frecuencia del sistema de suministro [rad/s]

ϕ_m -flujo máximo [Wb]

La fem se atrasa un ángulo de 90° al flujo magnético. El valor eficaz de la fem inducida es:

$$E_1 = \frac{N_1 \omega \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 2\pi f \phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \phi_m \quad \text{V} \quad (4)$$

Cuando el devanado secundario se encuentra en circuito abierto la corriente por el devanado primario es muy pequeña más aún en los transformadores de fuerza por lo que puede establecerse la igualdad siguiente:

$$E_1 \approx V_1$$

Si de la expresión de fem inducida se despeja el valor de flujo máximo, pueden fácilmente establecerse las relaciones de dependencia de este:

$$\phi = \frac{E1}{4,44fN1} = \frac{V1}{4,44fN1} \text{ Wb (5)}$$

La magnitud del flujo magnético máximo es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional al número de vueltas del devanado y a la frecuencia de la fuente de alimentación.

En el devanado secundario ocurre algo similar al devanado primario, como el flujo magnético concatena también con este, en él se inducirá una fem cuya expresión es:

$$e2 = N2\omega\phi m \sin(\omega t - 90^\circ) \text{ V (6)}$$

y su valor eficaz es:

$$E2 = 4,44fN2\phi m \text{ V (7)}$$

Como las fem e1 y e2 son inducidas por el mismo flujo están en fase y difieren en magnitud por la diferencia en el número de vueltas [9]. El cociente de las expresiones eficaces de fem se conoce como relación de transformación:

$$\frac{E1}{E2} = \frac{N1}{N2} = a \text{ (8)}$$

El circuito secundario es donde se conectan las cargas, si se cierra a través de una carga circulará una corriente por este (I2) que tiene asociado un flujo magnético ϕ_2 que se opone al flujo asociado al devanado primario, produciéndose en el primario un incremento de la corriente hasta mantener el flujo mutuo constante.

En términos de fuerza magnetomotriz puede afirmarse que el devanado primario desarrolla una fuerza igual a:

$$F1 = R + F2 \text{ A-v (9)}$$

Donde:

R- es la fuerza magnetomotriz que establece el flujo mutuo (A-v)

F2- La fuerza magnetomotriz que produce el devanado primario para contrarrestar la producida en el devanado secundario (A-v)

La expresión general de corriente por el devanado primario es [10]:

$$I_1 = \frac{R}{N_1} + \frac{N_2 I_2}{N_1} = I_{exc} + \frac{I_2}{a} = I_{exc} + I_2' \quad A \quad (10)$$

El devanado de alta tensión (A.T) es el de mayor tensión y el devanado de baja tensión (B.T) es la menor tensión. Un transformador elevador tiene el lado de baja tensión en el primario y de A.T en el secundario. Un transformador reductor tiene el lado de alta tensión en el primario y el de B.T en el secundario.

El transformador es una máquina reversible [8].

1.1.2 Principio de funcionamiento del transformador real

En los transformadores reales, las condiciones que se consideran para el ideal no son válidas y hay que tenerlas en cuenta para su análisis. De ahí que la representación circuital del transformador real se haga en un solo circuito eléctrico según el modelo de Steinmetz [9] donde los parámetros de uno de los devanados se refieren al otro.

La ventaja de desarrollar circuitos equivalentes de máquinas eléctricas es poder aplicar todo el potencial de la teoría de redes eléctricas para anticipar el comportamiento de una máquina ante determinadas condiciones de funcionamiento.

1.2 Clasificación de los transformadores

Los transformadores pueden ser clasificados de diversas maneras en dependencia del parámetro que se tome en consideración:

- Por la fuente de alimentación o suministro en: monofásicos o trifásicos
- Debido a la característica constructiva del núcleo, puede ser: acorazado, de columna o anular.

- Por su uso se clasifican en: de fuerza e instrumentación. Los de instrumentación pueden ser de corriente y de potencial.
- Si se tiene en cuenta la conexión eléctrica entre devanados puede ser: autotransformador o transformador.
- En dependencia del aislamiento utilizado: barniz, encapsulado en resina o silicona y aceite.
- Por el método de enfriamiento: en natural y forzada (soplados con aire, serpentines con circulación de agua o refrigerados por nitrógeno).
- Según los niveles de voltaje y la potencia que transfieren pueden ser: de potencia o de distribución.

Las diferencias del transformador de potencia respecto al de distribución están en los aspectos siguientes [10]:

- Los requerimientos son más complejos y necesitan más atención debido a los altos niveles de voltajes.
- Los sistemas de enfriamiento forzados son necesarios para su satisfactoria operación.
- Las reactancias de dispersión son mucho mayores, con lo cual se consigue un efecto limitador de corriente. Esto implica un empeoramiento de la regulación de voltaje.

1.3 El transformador monofásico

La característica distintiva de este transformador es su fuente de alimentación que como su nombre lo dice es monofásica. Estas máquinas son considerablemente utilizadas en los SEP debido a que la gran mayoría de las cargas a alimentar tienen como característica un suministro monofásico. Hay que partir que el principio de funcionamiento es el mismo y sus características constructivas son idénticas lo que facilitan de forma más clara la obtención de sus circuitos equivalentes como una vía factible para la comprensión de su comportamiento en estado estable que es donde se han realizado la gran mayoría de los estudios para poner en marcha su explotación.

1.3.1 Características constructivas del transformador monofásico

Un transformador consta de dos partes importantes: El núcleo magnético y los devanados, los cuales a su vez están relacionados con otros elementos cuya finalidad es refrigerar y proveer aislamiento eléctrico a la máquina.

- Núcleo Magnético

El núcleo del transformador está compuesto por las columnas, que son partes donde se montan los devanados y culatas, estas últimas se encargan de realizar la unión entre las columnas. Según la forma que tenga el núcleo y la posición de los devanados existen dos clases de transformadores [4]:

Acorazados: Los devanados están enrollados en la columna central que tiene el doble de grosor que las comunas laterales. (Figura 1.2)

Columnas: Los devanados se enrollan en dos de las columnas distribuidos ambos entre dichas columnas. Todas las columnas tienen el mismo grosor. (Figura 1.2).

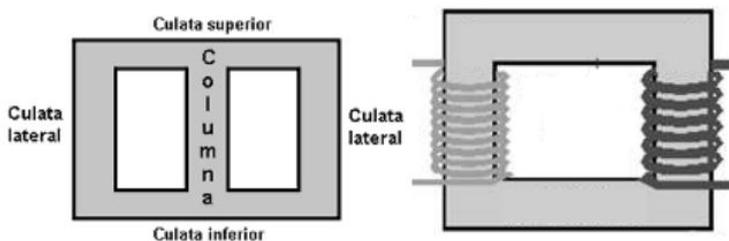


Figura 1.2. Circuitos magnéticos de transformadores monofásicos.

- Devanados

Los devanados pueden ser de sección redonda o rectangular, forman el circuito eléctrico del transformador.

Para aislar los conductores se recubren habitualmente de una capa de barniz.

Los devanados se clasifican en concéntricos o alternados, (Figura 1.3) según se la disposición relativa entre los enrollados de A.T. y B.T [4].

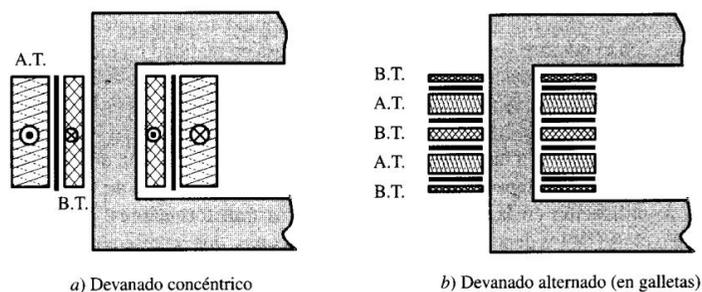


Figura 1.3. Devanados concéntricos y distribuidos.

1.3.2 Circuitos equivalentes del transformador

El circuito equivalente de un transformador representa de una manera sencilla y bastante exacta el funcionamiento de un transformador real y garantiza que el flujo común máximo ϕ_m conserve el mismo valor [8]. En la Figura 1.4 se muestra el circuito equivalente exacto del transformador (Modelo de Steinmetz) referido a primario.

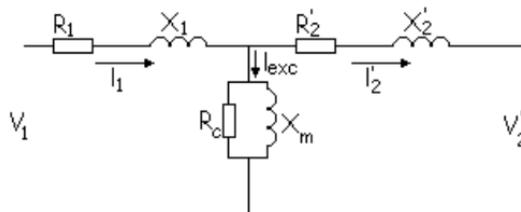


Figura 1.4. Circuito equivalente exacto del transformador.

Para el cálculo y análisis del estado de operación se utilizan mayormente las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$V_1 = I_1 Z_1 + E_1 \quad V \quad (11)$$

$$I_1 = I_{exc} + I_2' \quad A \quad (12)$$

$$V_2' = E_2' - I_2' Z_2' \quad V \quad (13)$$

Donde todos los parámetros con supraíndice son referidos al primario.

Como la corriente de excitación (I_{exc}) es muy pequeña suele utilizarse el circuito equivalente aproximado, tal como se muestra en la Figura 1.5.

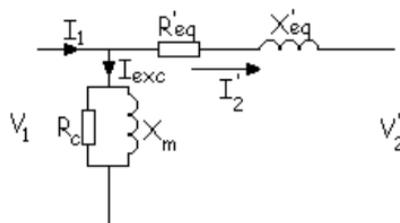


Figura 1.5. Circuito equivalente aproximado referido a primario.

Donde se obtiene una impedancia equivalente de:

$$Req' = R1 + R2' \Omega \quad (14)$$

$$Xeq' = X1 + X2' \Omega \quad (15)$$

Para cálculos más sencillos según [11] puede hacerse uso del circuito equivalente simplificado donde se desprecia la corriente de excitación (I_{exc}), tal como se presenta en la Figura 1.6.

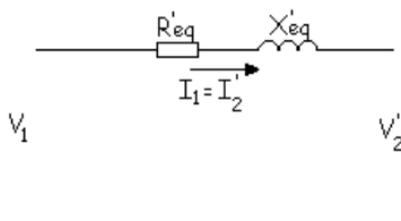


Figura 1.6. Circuito equivalente simplificado del transformador.

1.4 Determinación de parámetros del transformador

Estos circuitos equivalentes son muy útiles para el estudio y análisis de los transformadores en estado estable, pero para lograr su confección es necesario tener los parámetros que representan los elementos que componen la máquina. Para la obtención de estos parámetros se recurre a la realización de los denominados ensayos de corriente directa, en vacío y en cortocircuito según la norma citada en [12].

1.4.1 Ensayo o Prueba de corriente directa

En [13] se expresa que por medio de este ensayo se determinan los valores de las resistencias de los enrollados del transformador por la expresión:

$$R = \frac{V}{I} \Omega \quad (16)$$

Donde:

V-Voltaje de Corriente Directa que se aplica a cada enrollado del transformador.

I-Corriente que circula por el enrollado del transformador.

1.4.2 Ensayo o Prueba en Vacío

La potencia absorbida por el transformador que trabaja en vacío es aproximadamente igual a las pérdidas de núcleo (las nominales si se aplica la tensión nominal en el primario) y se desprecian las pequeñas pérdidas que puede haber en el cobre [13]. En [11] se recomienda que para efectuar el ensayo de vacío, se alimente el transformador por el lado de bajo voltaje, y se toman las lecturas del voltaje, corriente y potencia. Para disminuir el error en el cálculo de los parámetros los instrumentos se conectan como se indica en la Figura 1.7.

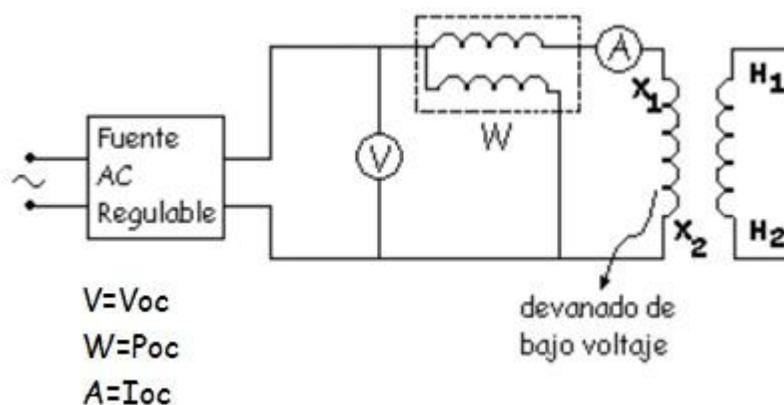


Figura 1.7. Esquema para realizar la Prueba de Vacío.

Con esta prueba pueden obtenerse las pérdidas de núcleo, la corriente de vacío y la impedancia de la rama de magnetización. Para ello se aplican las expresiones siguientes:

$$P(h + e) = P_{oc} W \quad (17)$$

$$\cos \theta_{oc} = \frac{P_{oc}}{V_{oc} * I_{oc}} \quad (18)$$

$$I(h + e) = I_{oc} * \cos \theta_{oc} \quad A \quad (19)$$

$$R_c = \frac{V_{oc}}{I(h + e)} \quad \Omega \quad (20)$$

$$I\phi = \sqrt{I_{oc}^2 - I(h + e)^2} \quad A \quad (21)$$

$$X_m = \frac{V_{oc}}{I\phi} \quad \Omega \quad (22)$$

Donde:

$P(h+e)$ - Pérdidas por histéresis y corrientes parásitas, si se aplica el voltaje nominal son las pérdidas nominales.

$I\phi$ - Corriente de magnetización

R_c - Resistencia de la rama de magnetización

X_m - Reactancia de la rama de magnetización

Estos parámetros se determinan para tensión y frecuencia nominales. Esta prueba da la posibilidad de obtener la característica de vacío del transformador al realizar un aumento progresivo de la tensión nominal hasta alcanzar varios puntos por encima de los valores nominales (0,1-1,1) V_n . Esta característica es muy útil cuando se realiza estudios de transitorios electromagnéticos ya que para estos hay que tener en cuenta la no linealidad del núcleo del transformador.

1.4.3 Ensayo o Prueba de Cortocircuito

Para realizar este ensayo, el primario ha de alimentarse a una tensión reducida por el devanado de alto voltaje de modo que al poner el secundario en cortocircuito pase por él su corriente nominal. El esquema de un ensayo de cortocircuito es el representado en la Figura 1.8, donde debe respetarse la posición de los instrumentos.

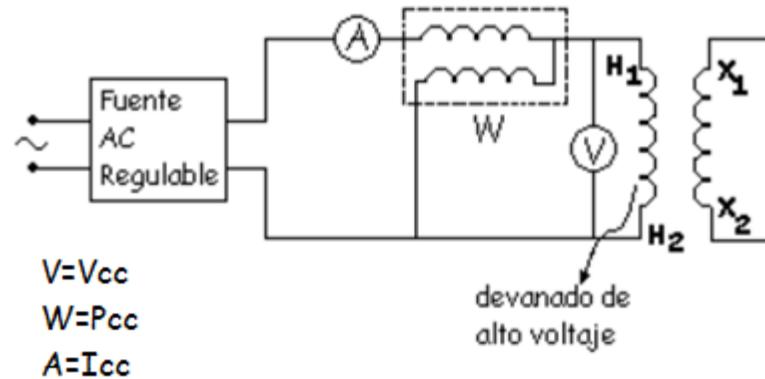


Figura 1.8. Esquema para realizar la Prueba de Cortocircuito.

Los parámetros se calculan y quedan referidos al devanado primario (AT). Las expresiones son las siguientes:

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \Omega \quad (23)$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \Omega \quad (24)$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \Omega \quad (25)$$

Si la corriente con que se realiza la prueba es la nominal las pérdidas del transformador serán las nominales [11].

1.5 El transformador trifásico

La generación, transmisión y distribución de la potencia eléctrica en muchos países del mundo se realiza a partir de circuitos configurados de forma trifásica, dada las ventajas y ahorro en las pérdidas que se obtienen con la utilización de esta vía. Las formas para la elevación de los niveles de voltaje y su posterior reducción a los valores de consumo se pueden realizar con la utilización de bancos de tres transformadores (monofásicos) o la utilización de un transformador trifásico. El transformador trifásico tiene un comportamiento similar al banco de transformadores monofásicos en su principio de funcionamiento y sus características constructivas, estas solo difieren en que los enrollados de cada fase comparten un mismo circuito magnético, forman así un único equipo dentro

de un recipiente, ventaja que sobresale frente a la utilización de estos bancos trifásicos.

1.5.1 Características constructivas del transformador trifásico

Al igual que el transformador monofásico el transformador trifásico es una máquina eléctrica estática que transfiere energía eléctrica. Está formado por tres pares de circuitos eléctricos acoplados magnéticamente mediante un flujo común, es decir por tres pares de bobinas acopladas y que se alimentan con tensiones trifásicas alternas, esto garantiza que el flujo y la corriente sean variables en el tiempo [14].

Dentro las estructuras de núcleo más utilizadas están la de columnas que no es más que decir aquellos cuyos núcleos están formados por varias columnas de material ferromagnético. En las Figuras 1.9 y 1.10 se observan los tipos de estructuras del transformador trifásico de tres columnas y el transformador trifásico de cinco columnas respectivamente.

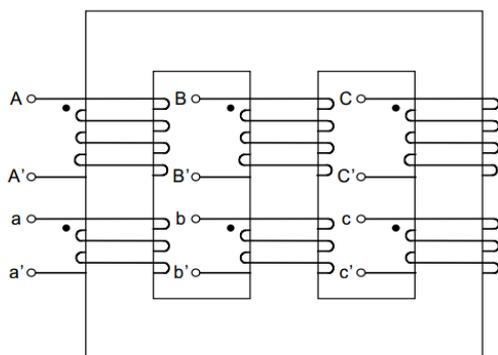


Figura 1.9. Núcleo de un transformador trifásico de tres columnas.

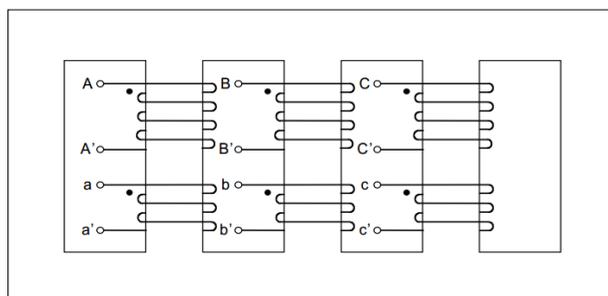


Figura 1.10. Núcleo de un transformador trifásico de cinco columnas.

1.5.2 Circuitos equivalentes del transformador trifásico

El análisis de los circuitos equivalentes en estado estable de un transformador trifásico se puede resumir al estudio realizado a un transformador monofásico, compuesto por una de las fases del circuito trifásico, esto es entre línea y neutro. De esta forma todos los circuitos que se presentan en el epígrafe 1.3.2 se utilizan para obtener el comportamiento en estado estable del transformador trifásico ante diferentes estados de carga y las características que ofrece el suministro trifásico.

1.5.3 Conexiones de los transformadores trifásicos

Los devanados del primario y del secundario de un transformador trifásico se pueden conectar de tres maneras diferentes: estrella (Y), delta (triángulo) (D) y zig-zag (Z).

De forma general, la conexión estrella (Y) presenta las propiedades siguientes:

- Permite tener el neutro accesible.
- La corriente de línea coincide con la corriente de cada devanado.
- Cada devanado soporta la tensión fase –neutro.
- No soporta los equilibrios que provoca la alimentación de cargas simétricas, puesto que deforma la onda de tensión.

De igual manera, la conexión en delta (D) se caracteriza por lo siguiente:

- No tiene neutro. La corriente por cada devanado es la de línea dividida por $\sqrt{3}$.
- Cada devanado soporta la tensión compuesta o de línea (tensión fase-fase)
- Soporta bien los desequilibrios que provoca la alimentación de cargas no simétricas.

De forma general, las características que se atribuyen a las diferentes maneras de conectar los devanados del primario y del secundario son:

- La conexión Y-Y se utiliza poco debido a los problemas de desequilibrios comentados anteriormente.

- Las conexiones Y-D y D-Y funcionan razonablemente bien frente a cargas desequilibradas, ya que el triángulo redistribuye parcialmente el desequilibrio entre las fases. Se escoge una conexión u otra en función de si desea tener el neutro accesible en el primario o en el secundario.
- La conexión D-D se comporta bien con cargas desequilibradas, aunque la ausencia de neutro resulta a veces un inconveniente si se utiliza para distribución. Si se trata de un banco trifásico tiene la ventaja de que se puede quitar un transformador para realizar operaciones de mantenimiento o reparación, mientras que los restantes pueden trabajar con menor potencia [14].

1.6 Modelación de transformadores eléctricos

Los transformadores eléctricos, están expuestos a fenómenos transitorios como descargas atmosféricas, fallas, operaciones de conexión y desconexión rutinarias. Dadas las particularidades constructivas de los transformadores de estar formado por un núcleo magnético que presenta una característica no lineal, la obtención de un modelo que represente adecuadamente el comportamiento de la máquina tanto en estado estable como en estado transitorio se hace realmente trabajoso.

Los transitorios electromagnéticos deben tomarse en cuenta para su estudio con la misma importancia del análisis en estado estacionario. Pese a que el estado transitorio se produce en muy cortos períodos de tiempo, en comparación con el estado estable, su incidencia sobre los equipos es mucho mayor debido a los altos valores de voltaje y corriente a los cuales están sometidos, lo que provoca grandes esfuerzos que en casos extremos pueden causar daños irreparables a los componentes del SEP. Por estas razones es necesario tener una idea clara de los eventos que ocurren durante los períodos transitorios para poder hacer correctivos en el manejo de los SEP tanto en estado estable como en el transitorio [15].

Los trabajos de investigación relacionados con el tema le dan una especial atención a la saturación de la máquina dado que este estado se puede convertir en un peligro de afectación para el propio elemento como para el sistema

eléctrico. De ahí la necesidad de utilización de varias técnicas para la obtención de un modelo de transformador que ofrezca información y resultados precisos del funcionamiento, comportamiento y condiciones que se presentan.

1.7 Técnicas de modelación de transformadores

Existen algunas técnicas de modelación de transformadores, entre estas están:

- Modelos basados en inductancias propias y mutuas. El primer trabajo analítico que sigue esta línea es presentado por Rabins y referenciado por [16]. Tienen el inconveniente que los valores numéricos de inductancias propias y mutuas son muy cercanos y pueden resultar ecuaciones matriciales mal condicionadas. Éste puede resolverse adecuadamente por sustracción del flujo común en el cálculo de inductancias propias y mutuas.

Este método puede no ser muy adecuado, ya que con la saturación del núcleo cambian todos los coeficientes de la matriz de acoplamiento.

- Modelos basados en inductancias de dispersión. Este procedimiento lo inicia *Blume* y mejorado por muchos otros tal como se referencia en [16]. La generalización para transformadores trifásicos de múltiples devanados la presentan *Bradjwajn* y otros [17]. Estos modelos tienen como inconveniente que la caracterización del núcleo de hierro no ha sido incluida apropiadamente.
- Modelos basados en medidas. Existe un gran número de modelos de transformadores de alta frecuencia derivados de medidas. Los ensayos son hechos para la determinación de parámetros del modelo en el dominio de la frecuencia o dominio del tiempo. Esta técnica parte de los ensayos de laboratorio, de acuerdo al diseño, tamaño, fabricación, etc.

Algunos autores [18] critican que los modelos basados en medidas tienen la desventaja que dependen de las posibilidades de realizar los ensayos a los transformadores.

- Modelos basados en campos electromagnéticos. Los diseñadores de grandes transformadores usan métodos de campos electromagnéticos para el cálculo de sus parámetros de diseño.
- Modelos basados en el Principio de Dualidad

En la revisión bibliográfica que se efectúa sobre los modelos puede constatarse que la técnica que más se recurre es la del método de la dualidad [7] ,[16] ,[19], [20].

Este procedimiento lo plantea *Cherry* y lo generaliza *Selmon* [21]. Con esta técnica el núcleo de hierro puede ser modelado con precisión. Sin embargo, se critica que los modelos basados únicamente en este procedimiento tienen el inconveniente que las inductancias de dispersión no son correctamente representadas (estos son directamente derivados del flujo de dispersión donde se desprecia el espesor de los devanados). Esta imprecisión parece que se corrige, por *Edelman*, cuando supone el campo magnético axial. Últimamente *Arturi* emplea este procedimiento en modelización de condiciones de elevada saturación [21].

Esta técnica consiste en obtener el circuito equivalente eléctrico a partir del modelo magnético. Este último, es creado a criterio de quien lo diseña, con las hipótesis y condiciones más convenientes. El objetivo final es obtener por un software que ofrezca, una réplica lo más fiel del funcionamiento del transformador en condiciones determinadas. Este objetivo depende de la calidad de la caracterización de los parámetros [16].

1.8 Modelado de transformadores basado en la técnica de Dualidad

En los análisis que desarrollan varios autores, la obtención de un modelo de transformador que tenga presente los fenómenos de no linealidad dados en el núcleo de la máquina se hace complicado, sin embargo, la técnica basada en el principio de la dualidad abre una vía que brinda resultados con una visión ampliada del comportamiento del transformador. Puesto que el análisis de procesos transitorios se suele realizar con circuitos eléctricos, el siguiente paso es

la obtención de un circuito equivalente eléctrico del transformador a partir del modelo magnético, para lo cual se aplica el principio de dualidad entre estos.

Existen tres reglas generales para aplicar el principio de dualidad:

1. Las mallas en el circuito magnético son sustituidas con nodos en el circuito eléctrico y viceversa
2. Las fuentes de fuerza magnetomotriz (FMM) se convierten en fuentes de corriente.
3. Las reluctancias se convierten en susceptancias o inductancias.

Al circuito eléctrico equivalente que se obtiene mediante este principio, se deben añadir los elementos que no se representan en el modelo magnético: resistencias de los devanados, pérdidas en el núcleo y acoplos capacitivos [7].

1.8.1 Modelado del transformador monofásico basado en Dualidad

Sea el sistema magnético de la Figura 1.11 se considera que la totalidad del flujo magnético circula únicamente por el interior del material magnético, es decir se desprecia el flujo de dispersión. El material magnético está dividido en tres secciones equivalentes en dimensiones y características físicas.

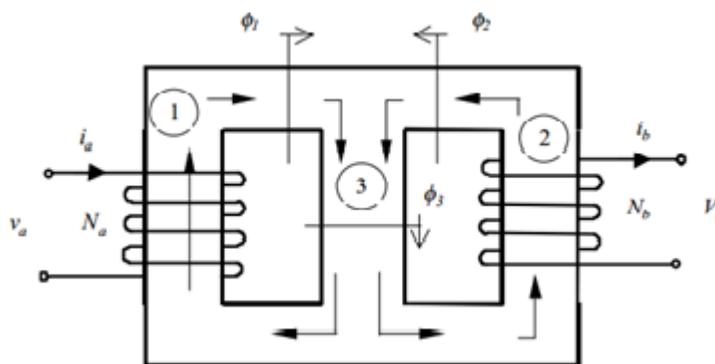


Figura 1.11. Sistema magnético de un transformador monofásico de tres columnas.

Uno de los pasos más importantes radica en cómo modelar el circuito magnético a partir del sistema físico magnético. El circuito magnético que se deduce del

sistema magnético de la Figura 1.11 y de las condiciones que se suponen anteriormente es como se muestra en la Figura 1.12.

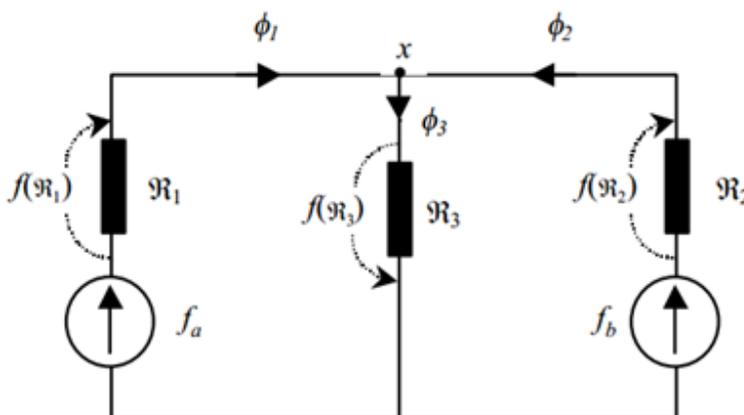


Figura 1.12. Circuito magnético del sistema magnético de la Figura 1.11.

Cada sección del núcleo se puede representar por medio de una reluctancia R_k que relacione el camino del flujo ϕ_k con la fuerza magnetomotriz $f(R_k)$ necesaria para establecer el flujo a lo largo de la longitud de la sección correspondiente (k). Los devanados se representan por fuentes de corrientes.

El siguiente paso es obtener un circuito equivalente eléctrico a partir del circuito magnético de la Figura 1.11. Según la ley de continuidad de flujo, el nodo x del circuito magnético, es el punto donde la suma de los flujos magnéticos es cero. Por tanto, en el nodo x las variables de flujo están relacionadas de la manera siguiente:

$$\phi_1 + \phi_2 - \phi_3 = \sum \phi_x = 0 \quad Wb \quad (26)$$

Las fems inducidas están relacionadas por la expresión:

$$u_1 + u_2 - u_3 = 0 \quad V \quad (27)$$

Para la malla del lado izquierdo del circuito magnético de la Figura 1.12, las fuerzas magnetomotrices se relacionan de la forma siguiente:

$$f_a = f_{R1} + f_{R3} \quad A - v \quad (28)$$

Al considerar que cada una de esas componentes es producida por un componente de corriente de una bobina de N vueltas, las componentes de corriente están entonces relacionadas por:

$$i_a = i_1 + i_3 \quad A \quad (29)$$

De manera similar para la malla del lado derecho se obtienen:

$$f_b = f_{R2} + f_{R3} \quad A - v \quad (30)$$

$$i_b = i_2 + i_3 \quad A \quad (31)$$

Cada una de las reluctancias en el circuito magnético relaciona un flujo (ϕ) y una fuerza magnetomotriz (f) variables. Las correspondientes tensiones inducidas (u) y corrientes variables (i) están relacionadas por la inductancia:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} V \quad u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} V \quad u_3 = L_3 \frac{di_3}{dt} V \quad (32)$$

El circuito eléctrico que se muestra en la Figura 1.13 se describe por las expresiones 27, 29, 31 y 32.

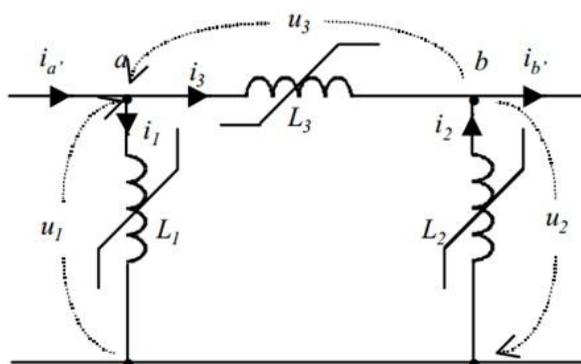


Figura 1.13. Circuito eléctrico equivalente.

Para cada una de las dos mallas independientes del circuito magnético, hay un nodo independiente en el circuito eléctrico. Las corrientes que entran a esos dos nodos (a y b), se relacionan por las expresiones 29 y 31. Para cada nodo en el circuito magnético, hay una malla correspondiente en el circuito eléctrico. La rama de tensión alrededor de la malla central está relacionada por 27.

En la Figura 1.14 se muestra el procedimiento basado en las técnicas de dualidad para obtener el circuito equivalente eléctrico derivado de un circuito magnético. Para cada rama de reluctancia en el circuito magnético, hay una rama de inductancia correspondiente en el circuito eléctrico.

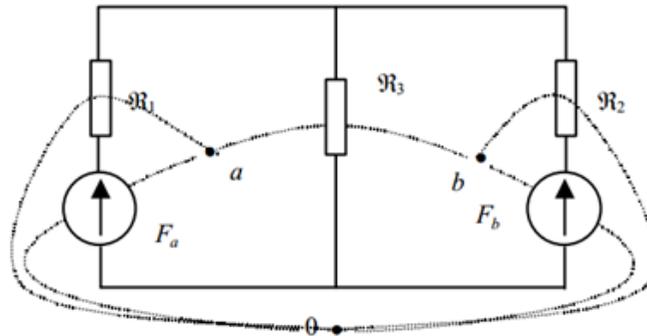


Figura 1.14. Técnica de derivación topológica.

Como se observa en la Figura 1.14 se marca un nodo en cada malla del circuito magnético, por ejemplo "a" y "b" y un nodo de referencia "0" fuera del circuito. Esos nodos son unidos por ramas, las cuales pasan a través de cada elemento del circuito magnético como se indica en la Figura 1.14, donde se observa que la estructura resultante es idéntica al circuito eléctrico de la Figura 1.13.

Para cada reluctancia en una malla del circuito magnético, existe una inductancia conectada al nodo correspondiente en el circuito eléctrico y una reluctancia común a las dos mallas en el circuito magnético, cuya inductancia correspondiente conecta los dos nodos en el circuito eléctrico.

Para cada fuente de fuerza magnetomotriz hay una derivación de corriente. Para cada flujo en el circuito magnético, hay una tensión inducida entre los nodos.

Cuando una reluctancia en el circuito magnético representa una relación no lineal entre flujo y fuerza magnetomotriz, su correspondiente inductancia en el circuito eléctrico debe representar una relación no-lineal entre el flujo concatenado en una bobina de N vueltas que encierra esa rama del sistema magnético, y la corriente en la bobina de N vueltas que produce la fuerza magnetomotriz para esa rama.

Las relaciones no-lineales del circuito magnético se mantienen en el circuito eléctrico equivalente. El circuito de la Figura 1.14 se desarrolla bajo el supuesto que todos los devanados tienen N vueltas. Debido a que el número de vueltas generalmente difiere en los diferentes devanados, es necesario añadir un transformador ideal en los terminales del circuito eléctrico para obtener las tensiones y corrientes reales en los devanados [16].

1.8.2 Modelado del transformador trifásico basado en Dualidad

De igual forma que se realiza en los transformadores monofásicos, la obtención del modelo de transformador mediante el principio de Dualidad parte de la definición de su circuito magnético, para el que se identifican fuentes de fuerza magnetomotriz (FMM), reluctancias magnéticas y flujos magnéticos. En condiciones de desequilibrio aparece un flujo homopolar que circula por el tanque del transformador.

La figura 1.15 muestra el circuito magnético de un transformador trifásico de tres columnas. Las FMMs que se originan en los devanados a partir de las corrientes primaria y secundaria y sus respectivas vueltas donde se representan con las fuentes N_{pipa} , N_{pipb} y N_{pipc} para las corrientes primarias y N_{sisa} , N_{sisb} y N_{sisc} , para las corrientes secundarias; las reluctancias lineales \mathcal{R}_{pa} , \mathcal{R}_{pb} , \mathcal{R}_{pc} , \mathcal{R}_{sa} , \mathcal{R}_{sb} y \mathcal{R}_{sc} corresponden a los caminos por donde circulan los flujos de dispersión (aire o aceite), mientras que las reluctancias no lineales \mathcal{R}_{Na} , \mathcal{R}_{Nb} y \mathcal{R}_{Nc} corresponden al núcleo ferromagnético del transformador. Por otra parte, el flujo homopolar ϕ_h encuentra un camino de circulación a través de la reluctancia lineal \mathcal{R}_h .

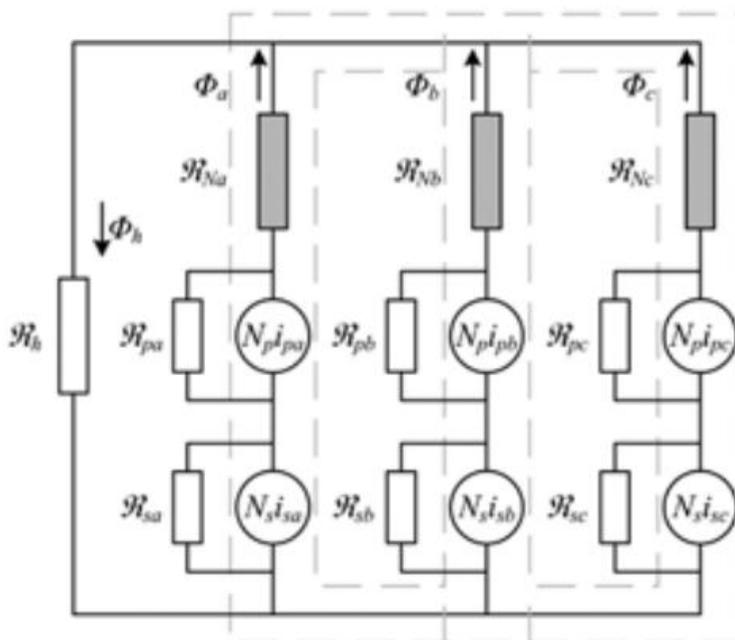


Figura 1.15. Circuito magnético del transformador trifásico de tres columnas.

En los modelos propuestos para los transformadores de tres columnas, muchos autores [16],[22] coinciden en representar el núcleo con varias reluctancias no lineales; de esta manera, se tiene una reluctancia no lineal para cada columna y otras dos que se ubican entre estas últimas para caracterizar los yugos. Sin embargo, este modelo presenta muchas dificultades a la hora de encontrar los parámetros para estos elementos, en especial cuando los devanados están interconectados, puesto que no se pueden efectuar todas las pruebas que se proponen en algunos documentos. Por lo tanto, las reluctancias \mathcal{R}_{Na} y \mathcal{R}_{Nc} que se muestran en la Figura 1.15 incluyen las reluctancias tanto de la columna como de una porción del yugo.

Al considerar el principio de dualidad del circuito magnético de la Figura 1.15 y para representar la rama de magnetización al tener en cuenta los efectos de resistencias e inductancias propias de los devanados se puede llegar al circuito eléctrico que se muestra en la Figura 1.16. Las reluctancias no lineales del circuito magnético se representan ahora mediante las inductancias no lineales L_{Na} , L_{Nb} y L_{Nc} de la rama de magnetización, a las cuales se añaden en paralelo las

resistencias R_{ma} , R_{mb} y R_{mc} que representan las pérdidas en el material magnético debido a histéresis y corrientes parásitas [7].

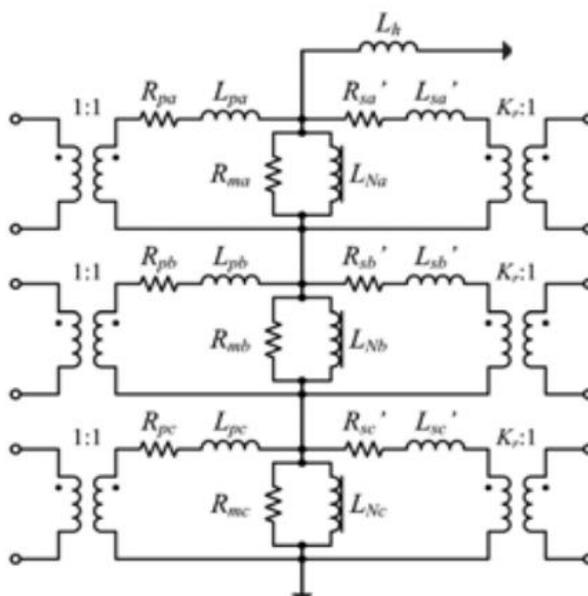


Figura 1.16. Circuito eléctrico del transformador trifásico de tres columnas.

En búsqueda de una uniformidad y respetando las características de la fuente bibliográfica [7] se tiene que los parámetros del transformador recogidos en la Tabla 2.1 se utilizan para referirse al mismo elemento del dispositivo, para de esta forma evitar cualquier confusión en los posteriores estudios a realizar. El procedimiento para la obtención de los parámetros de este modelo se encuentra en el Acápite I.1 del Anexo I.

Tabla 1.1 Parámetros del transformador con diferentes nomenclaturas

Parámetros		
R1	Rp	Resistencia del devanado primario
R2	Rs	Resistencia del devanado secundario
Rc	Rm	Resistencia de la rama de magnetización
Lm	Ln	Inductancia de la rama de magnetización
Nota: Los subíndices (a, b y c) refieren los elementos a las fases del transformador		

1.9 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se pueden ver las aplicaciones que prestan los transformadores en un SEP, su importancia en la transmisión de energía eléctrica, así como sus principales características constructivas y de funcionamiento, además del tratamiento y análisis por separado que se le realiza ante diferentes estados de estudio. El manejo de técnicas para la obtención de modelos de transformadores que ofrecen respuestas adecuadas ante la presencia de condiciones tanto inestables como estables en el sistema.

CAPÍTULO II MODELOS DE TRANSFORMADORES EN ATP Y MATLAB

Los modelos físicos y matemáticos de transformadores de fuerza que se utilizan para el estudio de condiciones de funcionamiento de estado estable, no son los recomendados a manejar en el análisis de transitorios electromagnéticos debido a los rangos de frecuencias involucradas. De esta forma se conoce que dentro del dispositivo existen estados de comportamientos propios de la composición del material utilizado en la fabricación del mismo, que influyen directamente en la respuesta ante estados de anormalidad de diferentes parámetros de operación de la máquina. A lo largo de la historia la obtención de modelos que logren expresar lo que realmente sucede en el contorno del transformador provoca la búsqueda de herramientas tanto matemáticas como computacionales con las cuales se puedan alcanzar las respuestas que brindan los componentes de estas estructuras eléctricas.

2.1 ATP como herramienta de análisis

Dentro de los programas especializados en el estudio de fenómenos transitorios electromagnéticos se encuentra el ATP que es un software de computadora destinado al análisis de circuitos eléctricos, especialmente en régimen transitorio. El programa permite modelar matemáticamente sistemas eléctricos, mecánicos y de control, monofásicos y polifásicos [4]. Este software tiene una biblioteca de componentes que incluyen propiedades modificables y necesarias para realizar los estudios deseados, ver Figura 2.1. Con la utilización de este programa se pretende realizar el análisis del comportamiento de transformadores eléctricos tanto monofásicos como trifásicos ante diferentes condiciones de operación que producen transitorios electromagnéticos en el dispositivo.

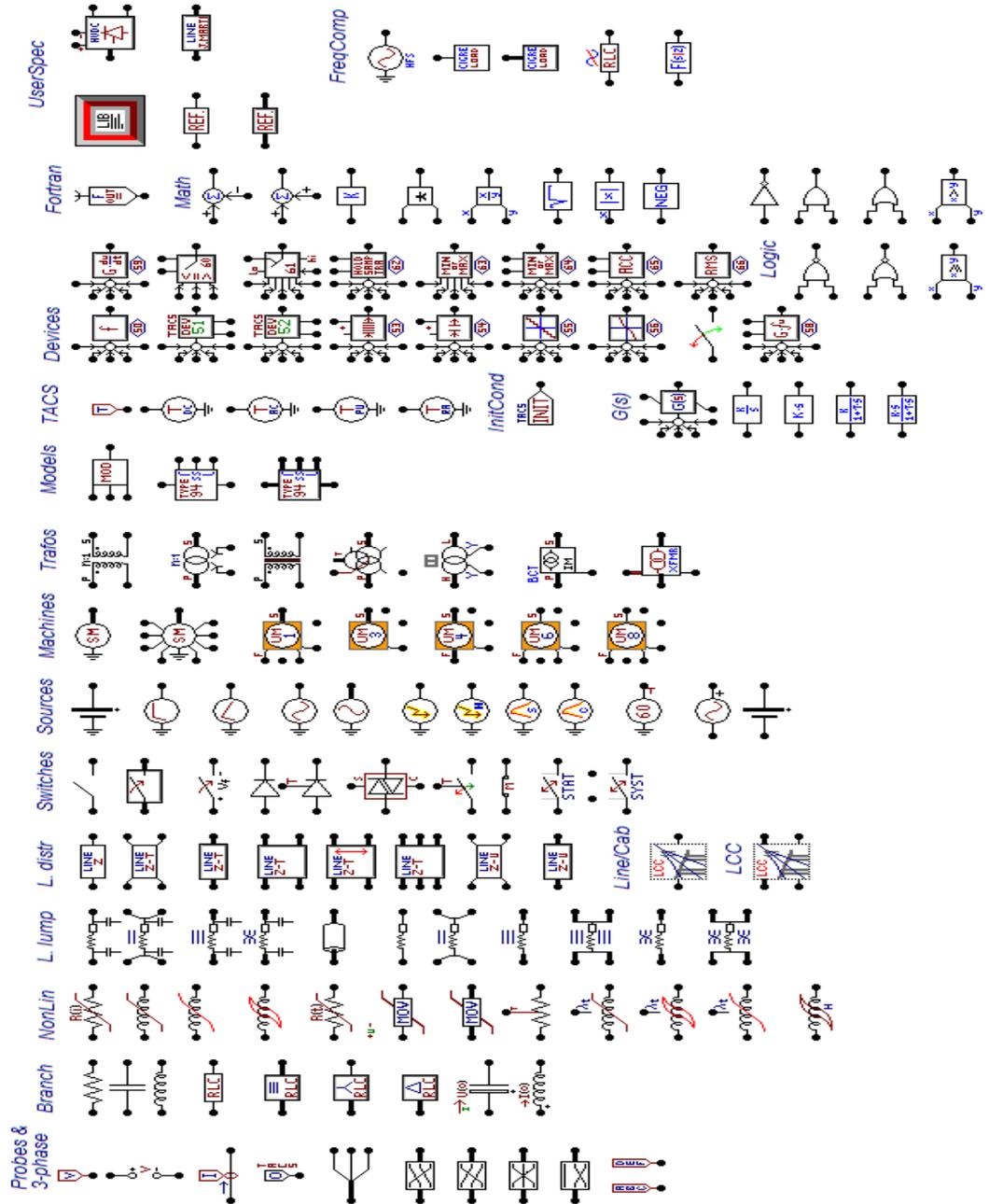


Figura 2.1. Componentes del ATP.

2.2 MatLab como herramienta de análisis

La plataforma de MATLAB está optimizada para resolver problemas de ingeniería y científicos. El lenguaje de MATLAB, basado en matrices, es la forma más natural del mundo para expresar las matemáticas computacionales. Los gráficos integrados facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a

partir de ellos. Una vasta librería de *toolboxes* preinstaladas le permiten empezar a trabajar inmediatamente con algoritmos esenciales para su dominio. El entorno de escritorio invita a experimentar, explorar y descubrir. Todas estas herramientas y prestaciones de MATLAB están probadas y diseñadas rigurosamente para trabajar juntas[23]. La utilización del Simulink de Matlab y dentro de este el *toolbox SimPowerSystems* que contiene una biblioteca (Figura 2.2) con una gran cantidad de componentes, se convierte en una herramienta a tener en cuenta cuando se pretende simular comportamientos de cualquier sistema eléctrico.

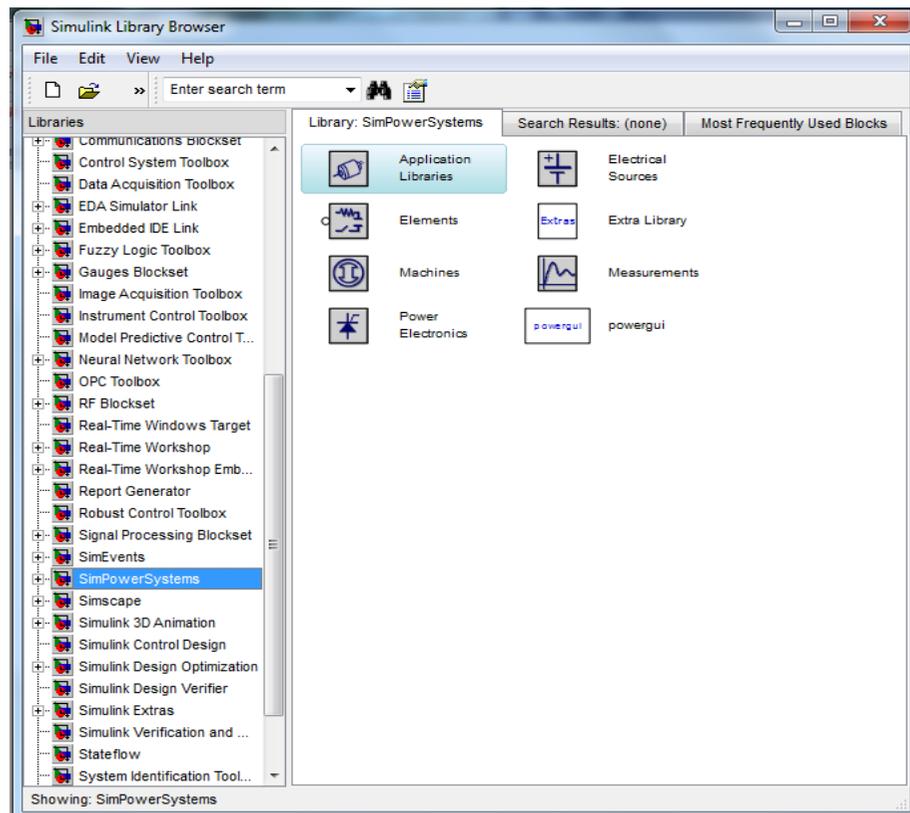


Figura 2.2. Biblioteca del SimPowerSystems.

2.3 Desarrollo del procedimiento de modelado

El desarrollo del procedimiento de modelado de transitorios electromagnéticos con el uso del ATP y del MatLab consiste en el diseño de estrategias para la obtención de modelos estructurales de transformadores eléctricos que respondan de forma correcta al transitorio a analizar en cada caso, lo que da como resultado el procedimiento basado en los puntos que se esquematizan en la Figura 2.3.

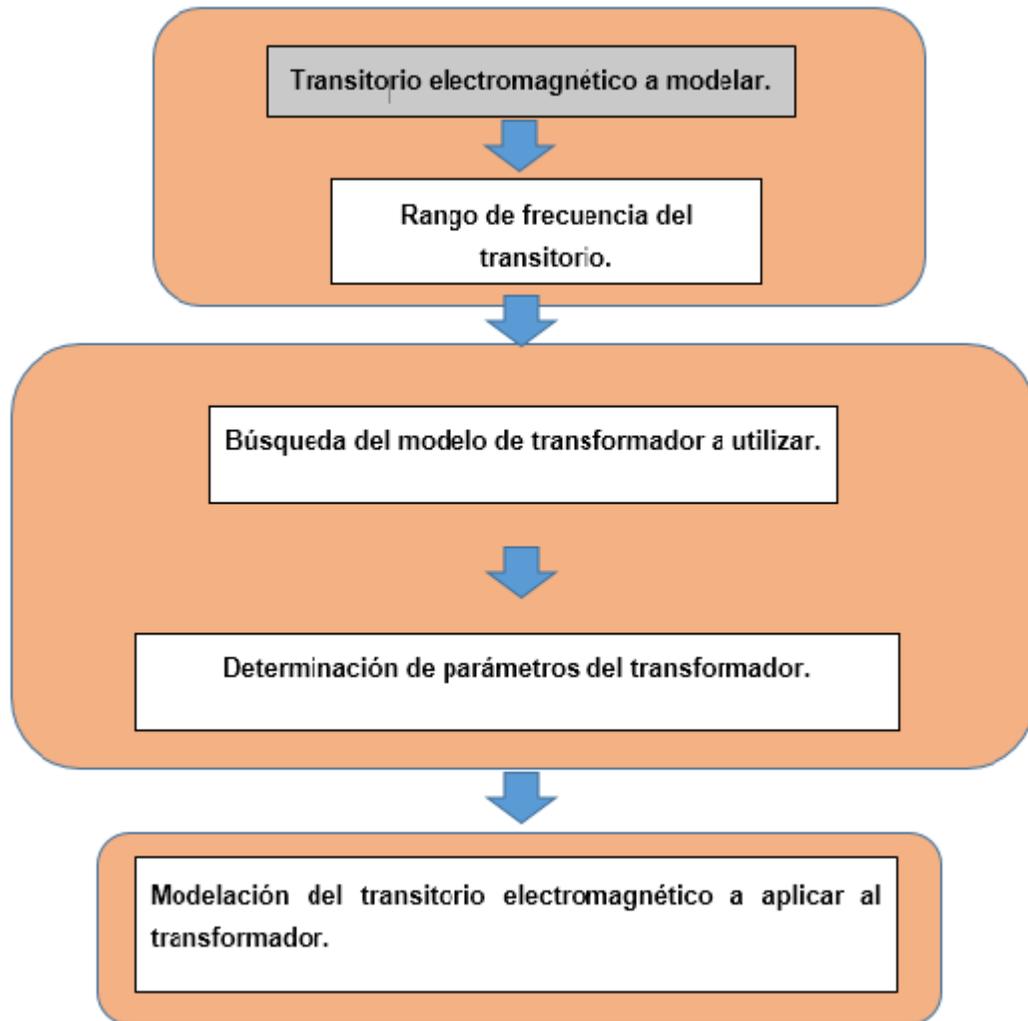


Figura 2.3. Pasos del Procedimiento de Modelado de Transitorios Electromagnéticos en Transformadores.

En la figura 2.3 se observa que existen tres etapas en el proceso de modelación que enmarcan los aspectos principales que se abordan en este capítulo.

2.3.1 Fenómenos transitorios electromagnéticos en SEP

Durante la operación normal de los sistemas de potencia, existe conexión y desconexión de carga, que conducen a la realización de acciones de control mediante diferentes sistemas que se diseñan para este propósito. La confiabilidad y despacho económico del sistema se observa mediante continuos flujos de potencia, para el análisis de estabilidad dinámica después de un disturbio hasta la estabilización, la precisión del análisis está en el orden de segundos.

Operaciones de cierre y apertura de circuitos por maniobras, apertura de circuitos por fallas permanentes, por fallas temporales, por descargas atmosféricas en líneas u otros elementos, además de las operaciones de conexión y desconexión de carga mediante interruptores se analizan en intervalos de tiempo que van desde microsegundos hasta los milisegundos, y contribuyen a la formación de transitorios electromagnéticos.

Un transitorio electromagnético se puede definir como la respuesta instantánea de un sistema o elemento eléctrico debido a un cambio repentino de su estado inicial a un estado diferente o final, que se produce por disímiles causas [15]. Los tiempos de duración de los transitorios son pequeños, pero tienen gran importancia debido a que los componentes del sistema están sometidos a altos valores pico de tensión y de corriente, que sin la protección correcta pueden provocar daños considerables. El análisis de transitorios electromagnéticos contribuye a mejorar la confiabilidad del sistema de transmisión, lo que permite una correcta y oportuna operación en caso de energización de sus elementos sin llegar a niveles de voltaje y corrientes nocivos para estos componentes[15].

Los fenómenos transitorios en SEP se pueden clasificar de acuerdo a diversos criterios:

Según su origen, un fenómeno transitorio puede ser externo, como las descargas atmosféricas, o interno por una maniobra, una falla o una variación en la demanda, etc.

Según los equipos involucrados, un fenómeno transitorio puede ser electromagnético cuando es necesario analizar la interacción entre elementos de almacenamiento de energía electromagnética (inductancias y capacitancias) o electromecánico, cuando es necesario analizar la interacción entre la energía que se almacena en los sistemas mecánicos de las máquinas rotatorias y la energía que se almacena en elementos eléctricos [15].

2.4 Análisis del comportamiento del transformador ante diferentes niveles de frecuencia

Los fenómenos transitorios a los cuales están expuestos los transformadores de fuerza en el SEP, hacen que la frecuencia oscile entre 0,1 Hz y 50 MHz, por lo tanto, para simular cada fenómeno se requieren modelos de transformadores de acuerdo a la frecuencia. La representación matemática de cada elemento es muy compleja debido a que varía substancialmente con la frecuencia. La Tabla 2.1, muestra la clasificación dada por el Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE) de los fenómenos transitorios dependientes de la frecuencia. Mientras más detallado es un modelo arroja mejores resultados, aunque este detalle no siempre se recomienda; esto se debe a que un modelo simplificado da buenos resultados para algunos estudios; por esta razón se considera impráctico tener un modelo único para todo el rango de frecuencias, que sería el modelo más complejo. En la Tabla 2.1 se somborean tres rangos de frecuencia que definen modelos propios.

Tabla 2.1 Rango de frecuencias para algunos fenómenos transitorios.

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

La Tabla 2.2, muestra una clasificación más general acorde al rango de frecuencia donde ocurre el tipo de fenómeno transitorio [22].

Tabla 2.2 Estudios transitorios según el rango de frecuencias.

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

2.4.1 Comportamiento del transformador a distintos rangos de frecuencia

Entre las diferentes espiras y bobinas de los enrollados y también entre éstos y las secciones conectadas a tierra del transformador (núcleo, tanque entre otros elementos aterrados) existen determinadas capacitancias, las cuales conectan en

paralelo (*shuntean*) los elementos de los enrollados. Estas capacitancias son tan pequeñas que las reactancias capacitivas existentes (Expresión 33) para una frecuencia de trabajo de 60Hz, son extremadamente grandes y no influye en el trabajo del transformador [24].

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \Omega \quad (33)$$

Además de la configuración de este circuito, cada devanado del transformador tiene una red de parámetros eléctricos distribuidos que se representa en la Figura 2.4:

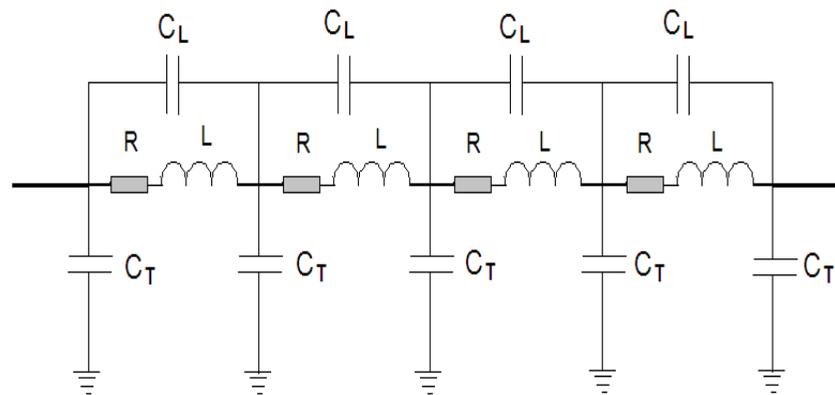


Figura 2.4. Red de capacitancias entre los diferentes elementos del transformador.

En dicha red de capacitancias distribuidas:

CL: Capacitancias longitudinales, entre espiras y capas de un mismo devanado.

CT: Capacitancias transversales, entre devanados y planos de tierra del transformador y entre los devanados de alta y baja tensión.

Las capacitancias CL, son en general, mayores en alrededor de tres veces que las capacitancias CT.

Para obtener el modelo simplificado con parámetros concentrados en el caso de los efectos capacitivo se definen.

Las capacitancias concentradas serie (C_s) y a tierra (C_g) del transformador se definen como:

$$C_s = \frac{1}{\sum \frac{1}{C_t}} \quad (34)$$

$$C_g = \sum C_t \quad (35)$$

C_s también es mayor en aproximadamente tres veces a C_g .

Por tanto el efecto capacitivo entre las espiras y capas del devanado son mayores que entre devanados y tierra.

2.4.1.1 Comportamiento del transformador ante corriente directa

La corriente directa tiene una frecuencia igual a cero por lo que de toda la red capacitiva se carga, las reactancias capacitivas, X_c , se hacen teóricamente infinitas y se convierten en circuitos abiertos, ver Figura 2.5.



Figura 2.5. Comportamiento de las capacitancias del transformador ante corriente directa.

Al igual que las capacitancias las inductancias inductivas X_l , se cargan, pero en este caso se toman valor cero, ver Figura 2.6.



Figura 2.6. Comportamiento de las inductancias del transformador ante corriente directa.

En este caso el circuito equivalente del transformador queda conformado solamente por las resistencias de los devanados Figura 2.7.

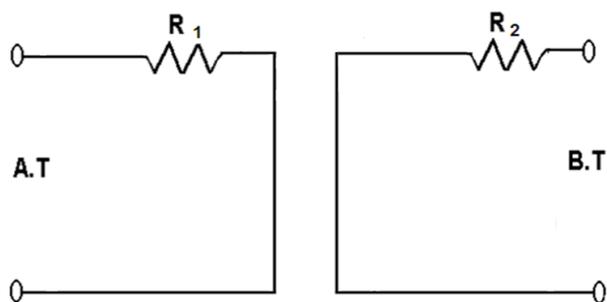


Figura 2.7. Comportamiento del transformador ante corriente directa.

2.4.1.2 Comportamiento del transformador ante bajas frecuencias

Para frecuencias mayores de cero y menores o iguales a 2 kHz, las reactancias inductivas y las resistencias de los devanados y del circuito magnético prevalecen, es despreciable el efecto de las capacitancias, por la alta reactancia que ofrecen ante los niveles bajo de frecuencia por lo que el comportamiento del circuito equivalente del transformador es el mismo de la Figura 1.4.

2.4.1.3 Comportamiento del transformador ante frecuencias medias

Para $2 < f \leq 250$ kHz, las X_c decrecen y comienzan a tener importancia en la red, y hay que considerar los efectos capacitivos propios de los devanados, C_s y C_g . Para estas frecuencias, la reactancia capacitiva entre los devanados de alta y baja tensión, aún tienen un valor suficientemente bajo, como para que se tengan en cuenta, ya que en general, la C_g de un transformador, es mayor a la C_g entre AT y BT en alrededor de dos veces. De esta manera el circuito equivalente queda como el que se muestra en la Figura 2.8 [25].

Cuando la onda de frecuencia media llega a los terminales del transformador la corriente de la onda que circula hacia la carga eléctrica, debido a la gran inductancia del enrollado, no pasa inicialmente por las espiras del enrollado, sino por su circuito capacitivo. Por esta razón en el instante de pasar la onda, el transformador, en su conjunto, actúa como un cierto capacitor llamado capacitor de entrada [24], enfrentando en su inicio el proceso transitorio.

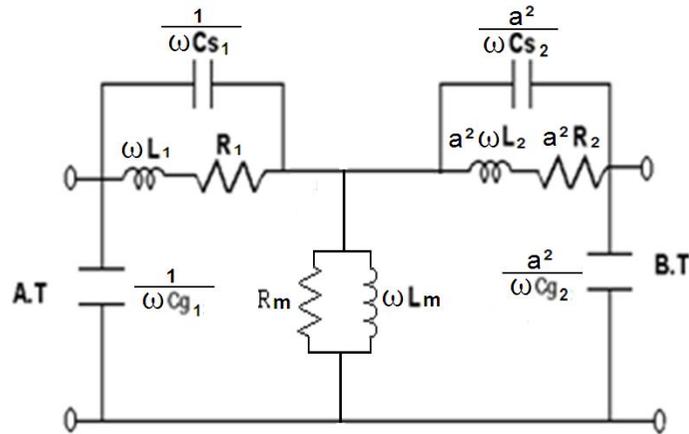


Figura 2.8. Circuito equivalente del transformador ante frecuencias medias.

2.4.1.4 Comportamiento del transformador ante altas frecuencias

Para representar el comportamiento del transformador ante altas frecuencias, se consideran ya los efectos capacitivos entre la bobina de alta y baja tensión (Figura 2.9).

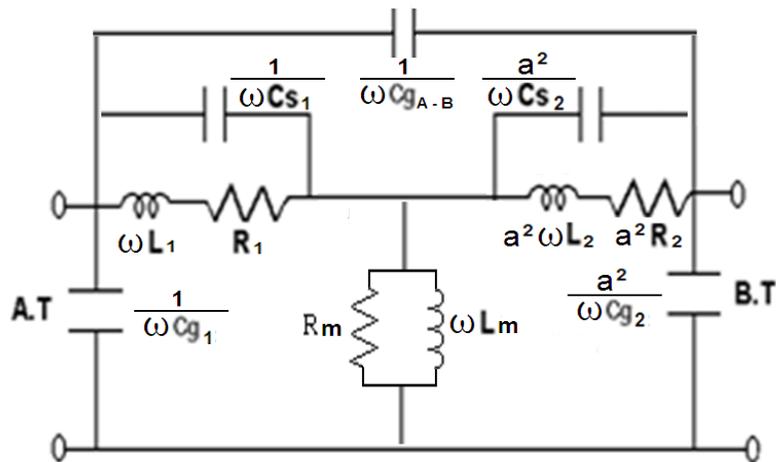


Figura 2.9. Comportamiento del transformador ante altas frecuencias.

Cuando la frecuencia es bien alta, las reactancias capacitivas se hacen tan pequeñas que va a existir una conducción bien definida a través de toda la red capacitiva, pudiéndose no tomar en cuenta las inductancias y resistencias.

2.5 Técnica de respuesta de frecuencia (FRA)

Mantener el transformador en buenas condiciones, es fundamental para hacer un eficiente aprovechamiento del equipo durante toda su vida útil. La respuesta de frecuencia, técnica conocida como FRA (por sus siglas en inglés, *frequency response analysis*), es una prueba, para evaluar la condición estructural (devanados, núcleo, tanque, etc.) de los transformadores, que consiste básicamente en obtener un registro en frecuencia del transformador y comparar el resultado con una referencia del mismo, que se toma con anterioridad y se considera como normal, preferiblemente antes de comenzar su explotación. Las diferencias pueden indicar algún tipo de daño en el transformador. La respuesta en frecuencia, puede obtenerse por el método de impulso o por el de barrido, este último denominado como SFRA (*sweep frequency response analysis*). En el SFRA se obtiene la impedancia o la función de transferencia del transformador, mediante la excitación con una función seno periódica en un amplio rango de frecuencias. La amplitud y fase de señales que se obtienen de los terminales que se seleccionan de los transformadores se representan directamente en función de la frecuencia [26]. El FRA es una técnica de diagnóstico que es útil para la detección de defectos en transformadores eléctricos. Sin embargo, hasta el momento no se dispone de un procedimiento de análisis de resultados que permita la toma de decisiones para el mantenimiento de forma concluyente. El uso de un modelo del transformador como herramienta de análisis constituye una de las alternativas más prometedoras para la obtención de un diagnóstico conciso y objetivo. Existe una variedad de softwares que tienen la posibilidad de realizar el barrido de frecuencia o sea lograr el aumento progresivo de los niveles de frecuencia de la señal aplicada al dispositivo en estudio, en este caso se utiliza el Multisim que no es más que un entorno de simulación de gran aplicación en la industria [27]. Este programa permite a partir de la representación de los elementos eléctricos que lo componen realizar variedad de estudios.

2.6 Modelos de transformadores de ATP

Dentro de los modelos de transformadores disponibles el ATP presenta varios tipos de los cuales los más usados son: Saturable, BCTRAN y XFMR. Los dos primeros usan, para simular su núcleo, el resultado que ofrece la subrutina SATURA [28].

Un modelo de núcleo se basa, usualmente, en la prueba de vacío del transformador de la cual se obtienen ciertos valores de corriente de excitación para tensiones ajustadas, generalmente, entre 0,9 y 1,1 pu en pasos de 0,05 pu. Valores por encima de 1,1 pu no se aplican durante la prueba por considerarse dañinos. Durante la energización de un transformador puede sobrepasarse dicho valor de tensión por lo que es necesario tener una curva de saturación con valores por encima de 1,1 pu para una adecuada representación del núcleo. En el programa ATP la determinación tradicional de las condiciones de saturación por encima del último valor de voltaje en la curva de saturación que se obtiene a partir de la prueba de vacío, se realiza mediante una extrapolación lineal de los dos últimos puntos de dicha curva. En dependencia de la pendiente de la recta formada a partir de los dos últimos puntos de la curva de saturación podrá existir un mayor error.

Los datos de la prueba de vacío son suficientes cuando la simulación no involucra fuertes saturaciones del núcleo. El ATP tiene dos maneras de tratar los datos de Tensión-Corriente en valores pico (V_{pico} vs. I_{pico}), ya sea mediante la subrutina SATURA (que es la manera tradicional que se usa y la que trabaja con la extrapolación lineal), o un método más avanzado (que usa el modelo de transformador XFMR) que puede tomar en cuenta el acoplamiento trifásico de transformadores [28].

2.6.1 Modelo Saturable de ATP

Este modelo presenta en su entrada de datos una tabla en la cual se ingresan los valores eficaces de tensión y corriente de la prueba de vacío. Al momento de ejecutar el programa ATP, esta tabla de valores es convertida a flujo y corriente

pico (λ_{pico} vs. I_{pico}) mediante la subrutina SATURA y el núcleo representado se conecta en el primario del transformador. Este modelo considera a sus elementos como desacoplados tal como de muestra en la Figura 2.10 la inductancia magnetizante lineal o no lineal, con R_c en paralelo, se conecta en la posición habitual del circuito equivalente exacto, lo cual no siempre es el punto de mejor conexión. El modelo Saturable se usa ampliamente para representación de transformadores monofásicos, mientras que para transformadores trifásicos su uso es limitado [28].

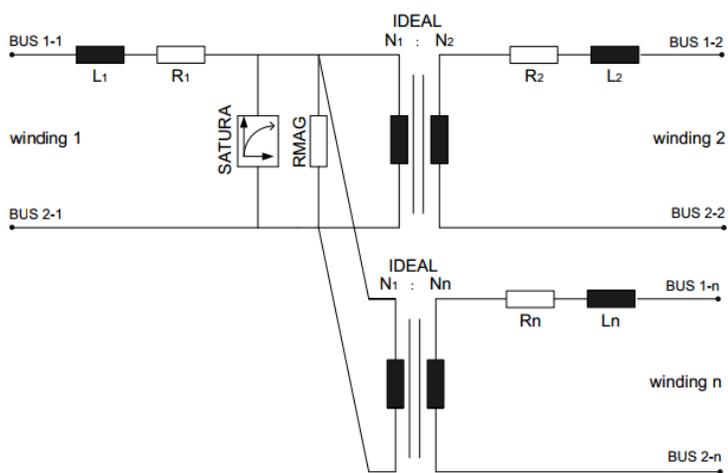


Figura 2.10. Modelo de Transformador Saturable para n devanados.

En la Figura 2.11 se muestra la ventana mediante la cual pueden introducirse y modificarse los parámetros del transformador. En cuanto los datos de la característica de saturación su entrada se hace en *characteristic* como se presenta en la Figura 2.12.

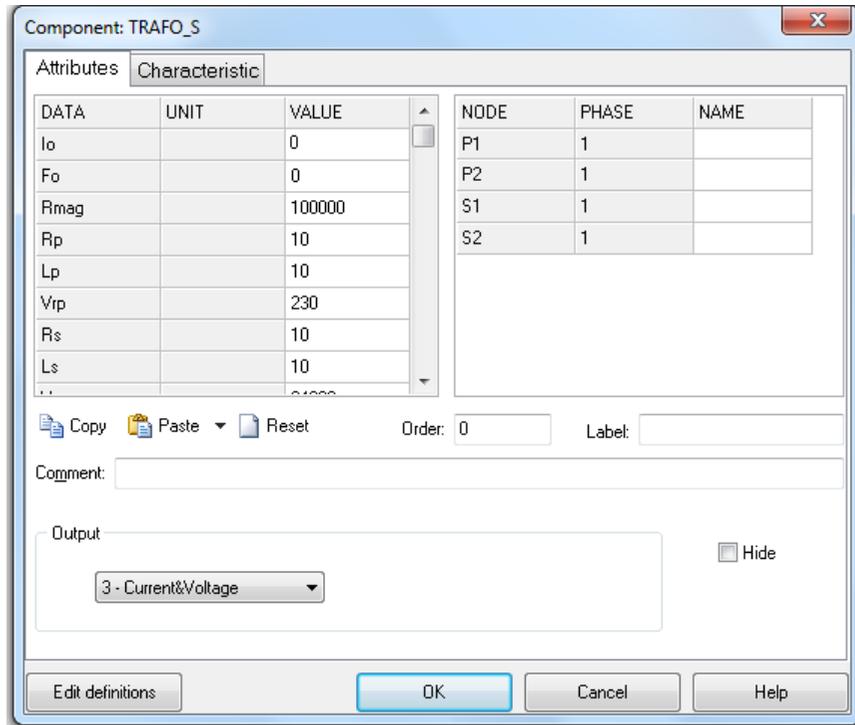


Figura 2.11. Ventana para la entrada de parámetros al modelo Saturable.

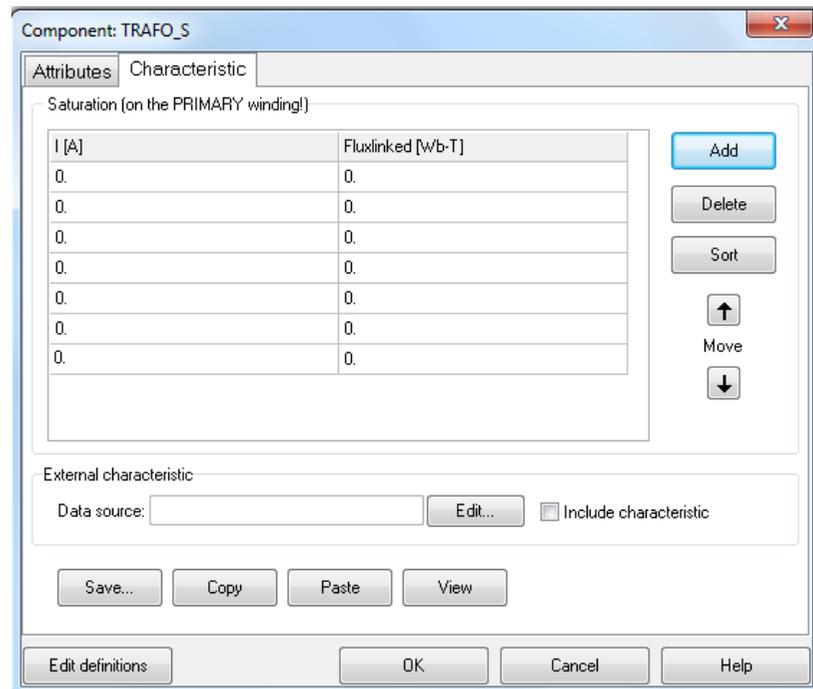


Figura 2.12. Ventana para la entrada de la característica de vacío del modelo Saturable.

2.6.2 Modelo BCTRAN de ATP

El modelo Saturable presenta grandes limitaciones al momento de modelar transformadores trifásicos, por tal motivo se desarrolla el modelo BCTRAN el cual es una representación lineal simplificada de transformadores monofásicos o trifásicos en forma de matrices de impedancias o admitancias de rama, que toma en cuenta los acoplamientos mutuos. Sin embargo, esta aproximación no puede incluir topologías multiramadas o efectos no lineales del núcleo. En estudios de ferro-resonancia, corrientes *inrush* y otros comportamientos no lineales es necesario considerar los efectos de la saturación. Para eliminar esta limitación del modelo, se usa la conexión de ramas externas formadas por elementos no lineales al modelo BCTRAN. Dichos elementos pueden ser del tipo 93 o 98 (curva de saturación), o tipo 96 (curva de saturación que toma en cuenta el lazo de histéresis), su conexión con el modelo de transformador puede ser realizada tal como se muestra en la Figura 2.13, los valores de flujo y corriente que se ingresan en los elementos no lineales se obtienen con el uso de la subrutina SATURA [28].

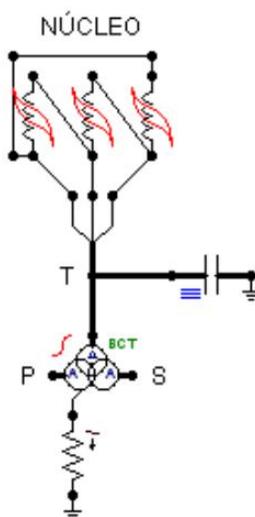


Figura 2.13. Conexión externa del núcleo del transformador al modelo BCTRAN.

La entrada de datos para los parámetros en este modelo se realiza mediante la ventana que se presenta en la Figura 2.14.

Aunque la rama de excitación puede ser agregada exteriormente al modelo delante de los elementos no lineales, tales como núcleo acoplado exteriormente no es tipológicamente correcto. Este modelo tiene limitaciones como posible inestabilidad numérica, una utilidad limitada para los equipos trifásicos y la conexión de la inductancia de magnetización no lineal hasta el punto estrella que no es tipológicamente correcto.

Los modelos detallados incorporan linealidades básicas que se pueden derivar con el uso del principio de dualidad. En este caso los modelos incluyen los efectos de saturación para cada rama individual del núcleo, efectos de pérdidas y acoplamiento magnético.

The BCTRAN dialog box contains the following sections and data:

- Structure:**
 - Number of phases: 3
 - Number of windings: 3
 - Type of core: Other
 - Test frequency [Hz]: 50
 - AR Output:
- Ratings:**

	HV	LV	TV
L-L voltage [kV]	320	145	12.5
Power [MVA]	200	200	10
Connections	Y	Y	Y
Phase shift [deg]	0	0	

Ext. neutral connections:
- Factory tests:**
 - Open circuit: Short circuit:
 - Performed at: LV Connect at: LV Zero sequence data available:
- positive sequence**

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
100	0.75	160
- Positive core magnetization:**
 - Linear internal: External Lm: External Lm || Rm:
 - View/Copy: Rm: Lm-rms: Lm-flux:
- Order: 0 Label: Hide:
- Comment:

Buttons: OK, Cancel, Import, Export, Run ATP, View +, Copy +, Edit defin., Help

Figura 2.14. Ventana para la entrada de parámetros del modelo BCTRAN.

2.6.3 Modelo Híbrido de ATP

El transformador híbrido de ATP llamado XFMR se añade a la versión 4.2 del ATPDraw en junio del 2005, este componente es una implementación de la extensión del trabajo realizado por el profesor Bruce Mork a la Michigan

Technogical University y sus compañeros Francisco González Molina y Dimitry Ishchenko [29].

Este modelo cuando se diseña pretende cubrir las carencias de los modelos anteriores en cuanto a su respuesta ante los fenómenos transitorios, que no eran capaces de dar una respuesta a estos fenómenos de forma satisfactoria.

Es por eso que se desarrolla un modelo basado en la dualidad entre los circuitos magnéticos y los circuitos eléctricos, basándose en trabajos anteriores donde ya se aplica esta técnica.

Este modelo está formado por cuatro partes:

- La inductancia que representa los efectos de las diferentes trayectorias del flujo.
- La resistencia que representa la resistencia de los devanados.
- Las capacitancias en paralelo.
- El núcleo: con magnetizaciones individuales y pérdidas en las columnas y culatas.

Este modelo es capaz de dar respuesta tanto en régimen estable como en el régimen transitorio, de esta forma representa con gran exactitud los efectos del circuito eléctrico y del circuito magnético[4].

Al igual que en los modelos anteriores el ATP permite modificar las características del transformador a modelar. En la Figura 2.15 se tiene la ventana que brinda estas opciones.

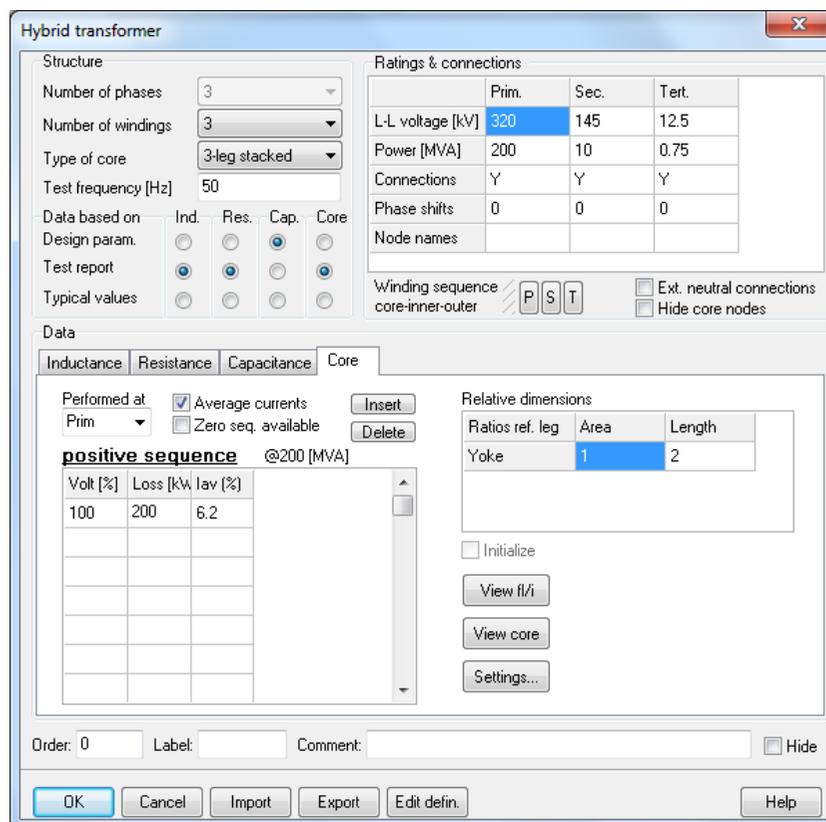


Figura 2.15. Ventana para la entrada de parámetros del modelo Híbrido.

2.7 Modelos implementados en ATP y MatLab

A partir de la necesidad de ampliar los conocimientos del comportamiento de los transformadores en este epígrafe se implementan una variedad de modelos seleccionados de la bibliografía consultada de los cuales se exponen sus características y resultados. La implementación que realiza el autor de este trabajo la efectúa con el propósito de comprobar la validez de los modelos que se presentan en diversas fuentes bibliográficas.

2.7.1 Modelo I

Este modelo se basa en la obtención de un circuito eléctrico representativo de un transformador trifásico con la aplicación del principio de Dualidad, que se aborda en el acápite 1.7.

A partir del circuito eléctrico equivalente que se obtiene se detallan dos grupos principales de parámetros: los pertenecientes a los devanados y los

correspondientes al núcleo. Dentro de los parámetros de los devanados se incluyen la resistencia de cada devanado (R_{pa} , R_{pb} y R_{pc} para el lado primario y R_{sa} , R_{sb} y R_{sc} para el lado secundario), que modela tanto la resistencia eléctrica del material que los conforma como una componente de pérdidas adicionales debidas a los flujos de dispersión que circulan por el material del tanque u otros elementos constructivos del transformador; la inductancia del devanado (L_{pa} , L_{pb} y L_{pc} para el lado primario y L_{sa} , L_{sb} y L_{sc} para el lado secundario), que modela los flujos de dispersión alrededor de los devanados, y los transformadores ideales, necesarios para acoplar los parámetros del lado primario y los parámetros del lado secundario.

Por otra parte, los parámetros del núcleo incluyen las resistencias por fase (R_{ma} , R_{mb} , R_{mc}), que representan las pérdidas activas debidas a histéresis y corrientes parásitas en cada columna; las inductancias no lineales por fase (L_{Na} , L_{Nb} , L_{Nc}), que modelan la característica de saturación de cada columna del transformador, y la inductancia de secuencia homopolar (L_h), que representa el camino de circulación del flujo homopolar o de secuencia cero.

Se debe aclarar que existe una asimetría entre los parámetros de cada fase del transformador trifásico de tres columnas debido a su forma constructiva. Aunque es posible suponer iguales los parámetros de los devanados en las tres fases, debido a que su influencia no es muy importante en el análisis de transitorios de baja frecuencia. Los parámetros del núcleo no pueden ser iguales en la columna central y en las columnas exteriores si se quiere representar de forma rigurosa la saturación del núcleo ferromagnético del transformador. Cómo se determinan los parámetros de dicho modelo y como se obtienen sus valores se pueden observar en el Acápite I.1 del Anexo I.

El Modelo I (Figura 2.16) corresponde como se explica anteriormente a un transformador trifásico, con una conexión estrella aterrada por primario y una delta por secundario, los valores de los elementos propios y componentes que se agregan se encuentran en la Tabla I.1 del Anexo I.

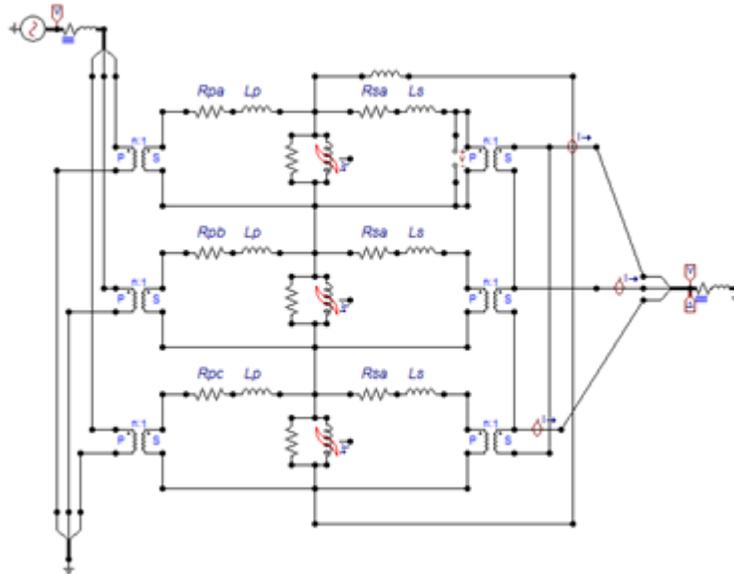


Figura 2.16. Modelación del Modelo I en ATP.

En la Figuras 2.17 y 2.18 se presentan las tensiones de entrada y de salida. Al dispositivo se le aplica la misma tensión de entrada que en [30]. Al comparar las formas de ondas de ambos modelos, tanto entrada como salida se constata un comportamiento similar.

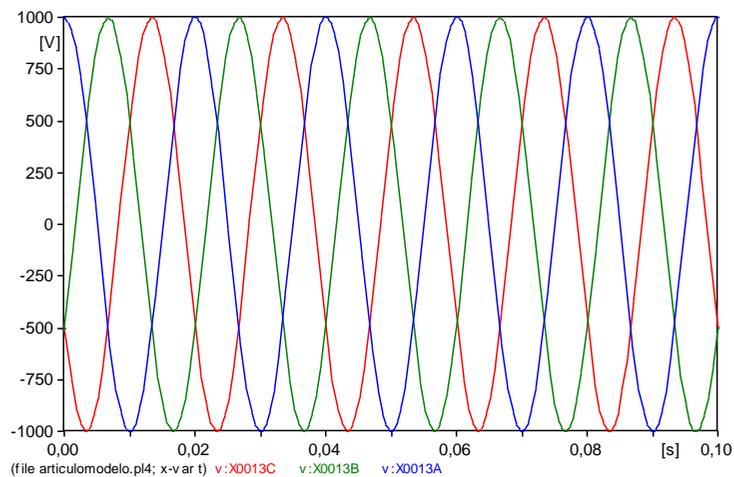


Figura 2.17. Tensión de entrada del Modelo I.

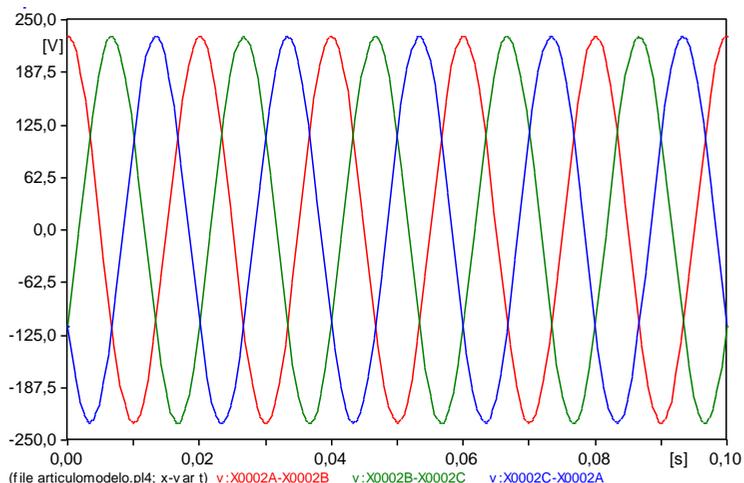


Figura 2.18. Tensión de salida del Modelo I.

En la Figura 2.19 se muestran los flujos que representan a los que circulan por el material ferromagnético del núcleo del transformador.

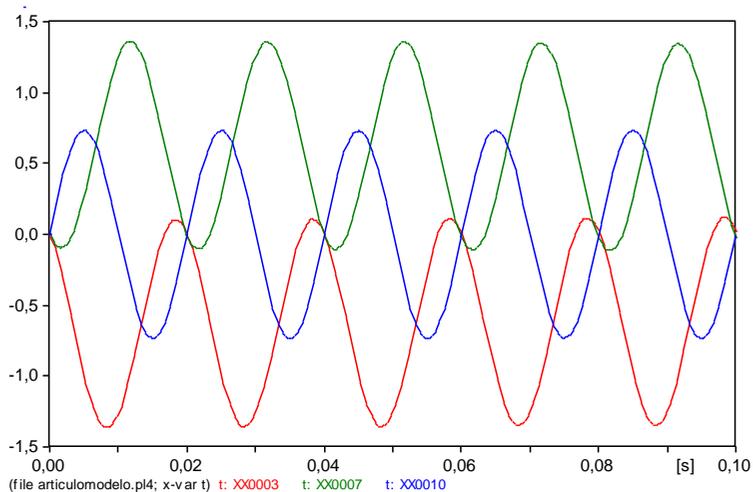


Figura 2.19 Flujos en las reactancias no lineales del Modelo I.

En la Figura 2.19, se observa que las amplitudes pico a pico del flujo de cada fase son iguales, pero sus magnitudes instantáneas son diferentes dados el desfase en el tiempo entre sus fases.

2.7.2 Modelo II

Para poder realizar el estudio de los transitorios electromagnéticos de alta frecuencia es necesario un modelo de transformador acorde a este rango de frecuencia. La mayoría de estos modelos se centran en la representación del

comportamiento de los enrollados del transformador, detalles y datos que son muy complejos en ocasiones de adquirir ya que esta información solo la disponen los fabricantes. Además, que esos modelos están especificados en el análisis del comportamiento de los enrollados a la exposición de las tensiones eléctricas que provocan los transitorios y no al estudio del efecto de las descargas atmosféricas en el voltaje que se transfiere al lado secundario, esto último es lo que interesa en este estudio. Este modelo de transformador (Figura 2.21) se valida en [31] alcanza buenos resultados de representatividad de este tipo de fenómenos, cómo se obtienen los parámetros y los valores que se utilizan en la simulación se muestran en Modelo II (Acápite I.2 y Tabla I.2) del Anexo I. Esta modelación se realiza en MatLab.

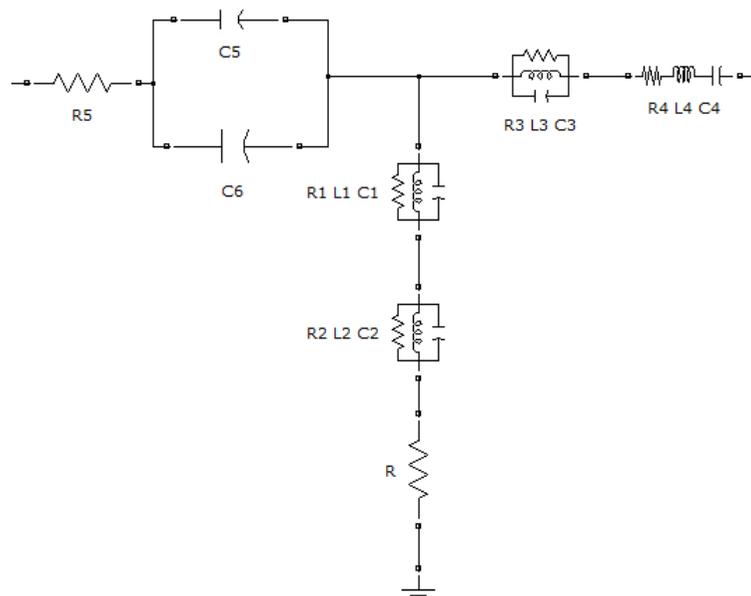


Figura 2.21. Modelo II en MatLab.

2.7.3 Modelo III

Este modelo fue tomado de [30] y mejorado posteriormente para la realización de su análisis, agregándole a la rama de magnetización la resistencia R_c que responde la pérdidas por histéresis y corrientes parásitas, de forma general se basa en el circuito equivalente del transformador que se utiliza para el análisis a bajas frecuencias. En este caso la modelación se realiza a partir de la

determinación de los parámetros de un transformador de distribución de 25 kVA con tensión primaria de 7620 V y tensiones por secundario de 120/240 V. Las características del transformador se presentan en la Tabla I.4 del Anexo I. Para este modelo el autor de este trabajo realizó los ensayos en la Empresa de Producciones Electromecánicas o Fábrica de Fusibles y Desconectivos. La metodología e instrumentos que se utilizan se presentan en el Anexo II.

Los valores de los parámetros de este transformador se muestran en la Tabla I.5 del Anexo I, las pruebas que se efectuaron se basan en las que se explican en el Acápite 1.4.

En la Figura 2.22 se muestra el Modelo III que se implementó en ATP.

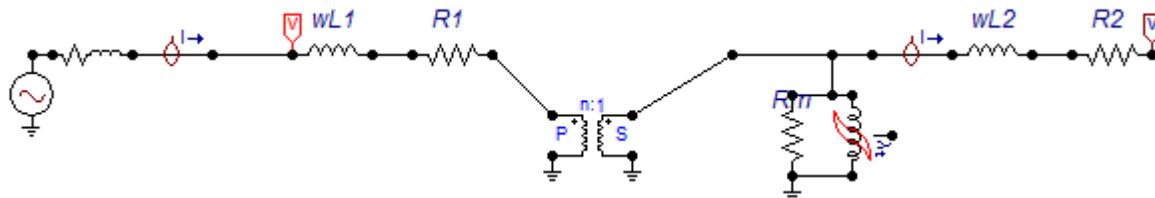


Figura 2.22. Modelo III implementado en ATP.

En la Figura 2.23 se exhibe la tensión en el primario del transformador correspondiéndose a la nominal del dispositivo.

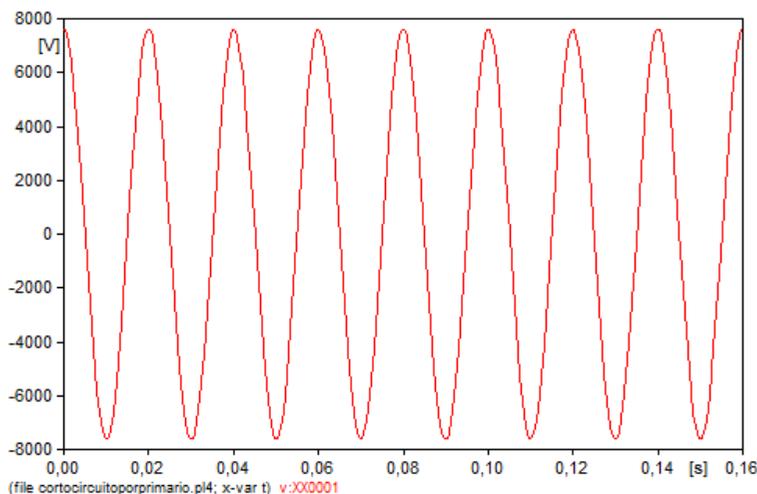


Figura 2.23. Tensión de entrada del Modelo III.

La tensión que aparece en el secundario del transformador se observa en la Figura 2.24 cumpliéndose la relación de transformación del transformador.

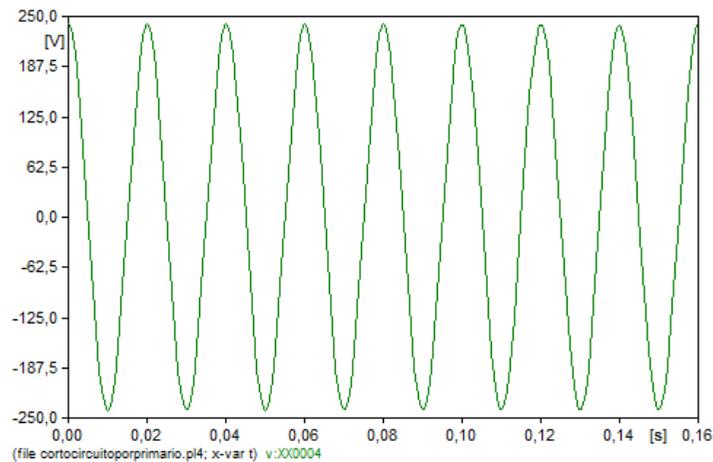


Figura 2.24. Tensión de salida del Modelo III.

2.7.4 Modelo IV

El modelo implementado en [20] y [26] se construye a partir de una respuesta en frecuencia medida en el transformador y consiste básicamente en una serie de celdas conformadas por tres parámetros eléctricos, R, L, C, que permite reproducir la curva de respuesta en frecuencia obtenida en una prueba. Estos parámetros se encuentran conectados en paralelo en cada celda, como se muestra en la Figura 2.25, para un modelo de 4 celdas. Este circuito modela la respuesta en frecuencia producida por una fase del transformador cuyas características están recogidas en la Tabla I.9 del Anexo I.

Las celdas están formadas por tres elementos pasivos básicos, la inductancia que representa el almacenamiento de campo magnético, la capacitancia que representa el almacenamiento de campo eléctrico y la resistencia que representa las pérdidas de potencia. La obtención de los parámetros eléctricos, R, L, C de cada celda se hace a partir de una respuesta en frecuencia medida, como la mostrada en [26], en la cual existen diversos picos y valles a lo largo de todo el ancho de banda de frecuencia.

Este modelo no es implementado en ninguno de los programas mencionados anteriormente, porque con él se pretende realizar un estudio de barrido de frecuencia que forma parte de la aplicación del modelaje de transformadores.

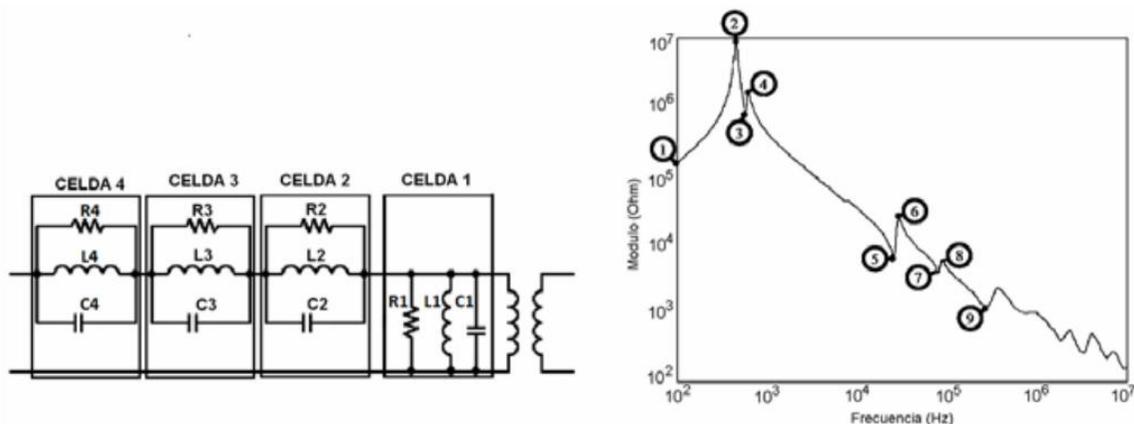


Figura 2.25. Modelo IV.

El algoritmo para obtener el modelo, inicia convirtiendo los datos de FRA a impedancia, luego se seleccionan los anchos de banda de cada celda y por último, se realiza un procedimiento iterativo para aproximar el modelo a la curva real este proceso se puede observar en [26].

2.8 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se expone el procedimiento del modelado de transitorios electromagnéticos, se enfatiza en los modelos que se pretenden utilizar para alcanzar los objetivos propuestos. Se analiza el comportamiento del transformador y su representación ante diferentes niveles de frecuencias que se presentan durante la operación del dispositivo. Las principales características del ATP y la implementación, tanto en este software como en MatLab, de un conjunto de modelos de transformadores de los cuales se exponen sus particularidades y componentes. Además, se presenta la validación de los modelos a partir de la comparación con los que obtienen otros autores citados en las referencias, lo que da lugar a la selección de los modelos a utilizar en este trabajo.

CAPÍTULO III MODELACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS CON ATP Y MATLAB

De la variedad de fenómenos transitorios que ocurren en el transformador se modela uno correspondiente a cada rango de frecuencia de las que se presentan en la Tabla 2.2. Se representan los estados siguientes:

- 1) Transitorio provocado por la ferro-resonancia
- 2) Transitorios provocados por maniobras del sistema. Recierre de un Interruptor
- 3) Transitorio provocado por un cortocircuito
- 4) Transitorio provocado por una descarga atmosférica

3.1 Transitorio provocado por la ferro-resonancia en transformadores

La ferro-resonancia es un caso especial de resonancia serie que ocurre en los circuitos eléctricos donde la resistencia se hace despreciable y las magnitudes de la reactancia inductiva y capacitiva se acercan a su valor y por tener signos opuestos, la impedancia total vista por la fuente se reduce en su valor lo que provoca corrientes y voltajes elevados que pueden ocasionar la desconexión del circuito y con esto una anomalía en el sistema [4]. Estos circuitos tienen como componentes una inductancia no lineal (ferromagnética saturable) que se representa en este caso por un transformador con su núcleo magnético, una capacitancia de valor apreciable debido a las líneas aéreas o soterradas según sea el tipo de sistema y una fuente de energía generalmente de forma sinusoidal.

La experiencia de las formas de onda presentes en las redes, los experimentos sobre modelos reducidos de redes, así como las simulaciones numéricas permiten clasificar los estados de resonancia.

Según [4] en las redes eléctricas aparecen fundamentalmente cuatro tipos de ferro-resonancia en dependencia a la respuesta del comportamiento de las formas de onda cuando aparece el fenómeno.

Los cuatro tipos de ferro-resonancia que se encuentran son:

- Régimen fundamental: Las tensiones y corrientes son periódicas de período T igual a la red y pueden incluir más o menos armónicos.
- Régimen subarmónico: Las señales son periódicas de período nT múltiplo de la red. Este régimen se llama subarmónico n o armónico $1/n$. Los de régimen ferro-resonante subarmónico son generalmente de rango impar.
- Régimen casi-periódico: Este régimen, también llamado pseudo-periódico, no es periódico.
- Régimen caótico: Las señales no son periódicas ni siguen ningún orden, de ahí su nombre.

Los detalles de cada uno de ellos se exponen en la Figura 3.1.

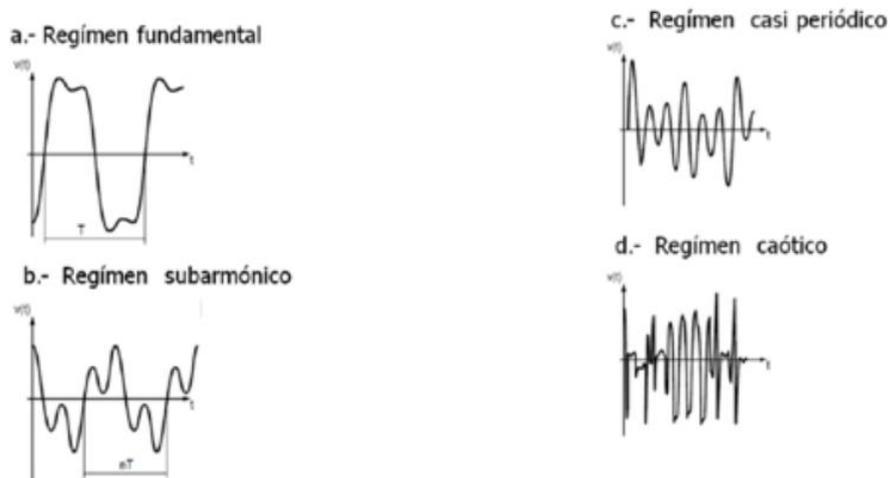


Figura 3.1. Tipos de ferro-resonancias.

De esta forma se puede concluir que este fenómeno de ferro-resonancia es muy complejo y se caracteriza por:

- Una gran sensibilidad de la aparición de este régimen dado los valores de los parámetros de la red.
- Una gran sensibilidad de la aparición de este régimen dadas las condiciones iniciales de conexión.

Una pequeña variación de alguno de los parámetros de la red en régimen transitorio puede provocar un salto brusco entre dos regímenes estables muy distintos y desencadenar uno de los cuatro tipos de regímenes permanentes de ferro-resonancia.

3.1.1 Modelación del fenómeno de ferro-resonancia

Para la modelación del fenómeno de ferro-resonancia se utiliza el Modelo I, Figura 3.2, el cual se obtuvo para el análisis de esos regímenes de comportamiento los parámetros del modelo se encuentran en la Tabla I.1 del Anexo I.

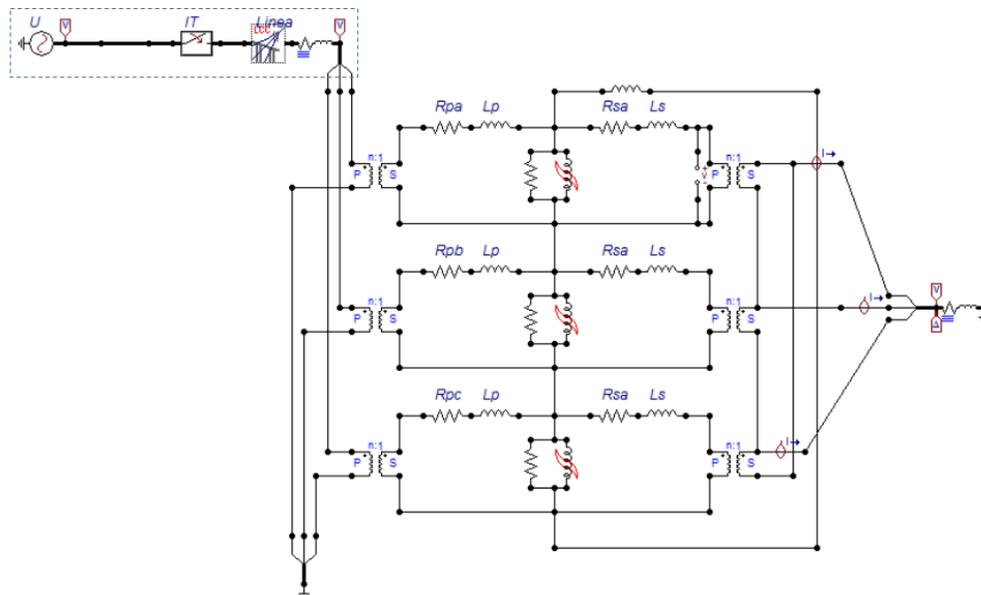


Figura 3.2. Modelación del fenómeno de ferro-resonancia con el Modelo I.

Los elementos del ATP que se utilizan se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Componentes agregados al Modelo I para obtener el fenómeno de ferro-resonancia.

Elemento	Características del elemento	
Interruptor Trifásico (IT)	Tiempos de conexión (s)	Fases
	0.101	Fase A
	0.109	Fase B
	0.15	Fase C
Tramo de Línea (Línea)	Línea tipo Pi Resistencia 0.5 [$\Omega \cdot m$] Longitud 2000 [m]	
Fuente de Voltaje (U)	1000 V 60 Hz	

Uno de los principales problemas que se presentan en la energización o recierre de líneas que tienen transformadores como puntos de encuentro es este fenómeno de ferro-resonancia que como se puede observar en las Figura 3.3 cuando se energiza el dispositivo aparece una distorsión de la forma de onda de voltaje de entrada del transformador, encontrándose en un régimen que puede clasificarse como caótico. Se puede observar la amplitud de los picos de la onda de voltaje acercándose al valor de 2000 V, el doble del voltaje nominal del transformador. Es de notar que este transitorio dura 0.005 segundos un tiempo bien pequeño, pero con altos picos de amplitud en las ondas de voltajes y corrientes.

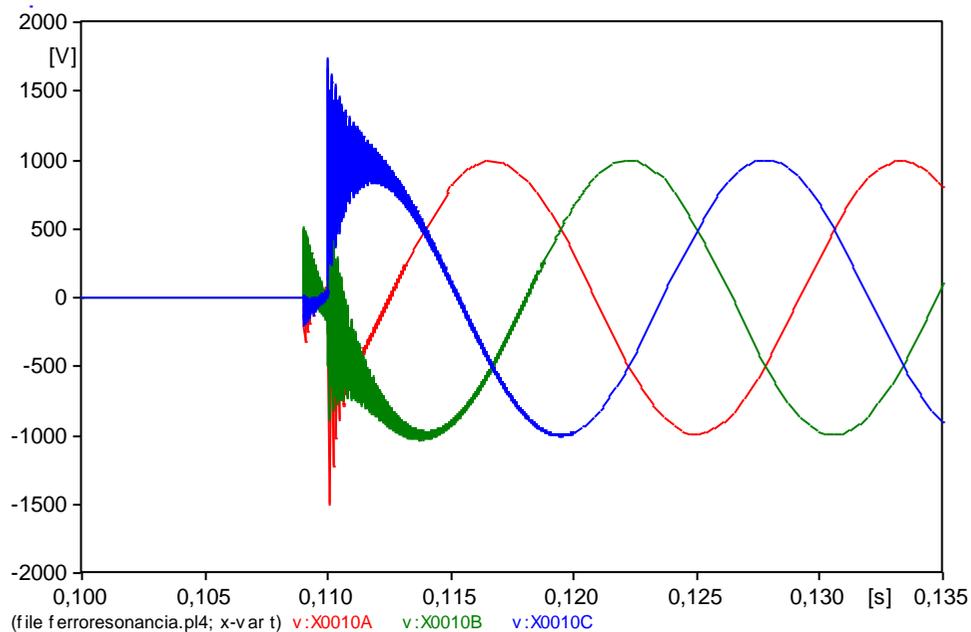


Figura 3.3. Voltajes en el primario del transformador.

Al igual que en el primario del transformador se refleja en el secundario una onda de voltaje con alta distorsión lo que provoca picos de tensión con valores por encima de los 300 V, ver Figura 3.4.

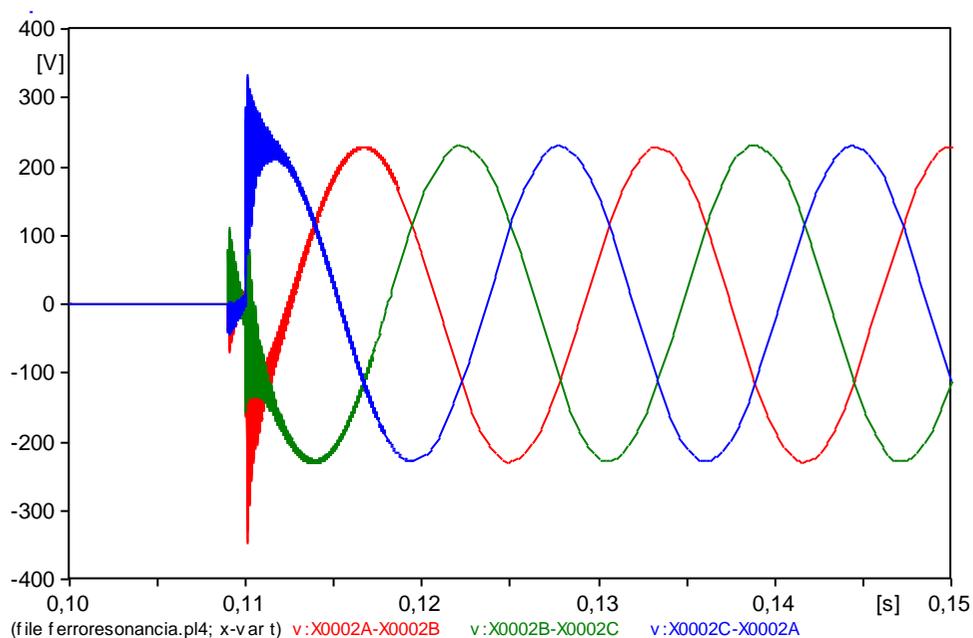


Figura 3.4. Voltajes en el secundario del transformador.

En la Figura 3.5 se puede observar que el comportamiento de la corriente en el primario del transformador presenta una conducta similar a la tensión aplicada. Inicialmente hace picos de una amplitud mayor y posteriormente se estabiliza aunque hay que decir que respecto a los valores que alcanza las tensiones tanto de primario como secundario el valor máximo del pico de corriente es menor comparativamente.

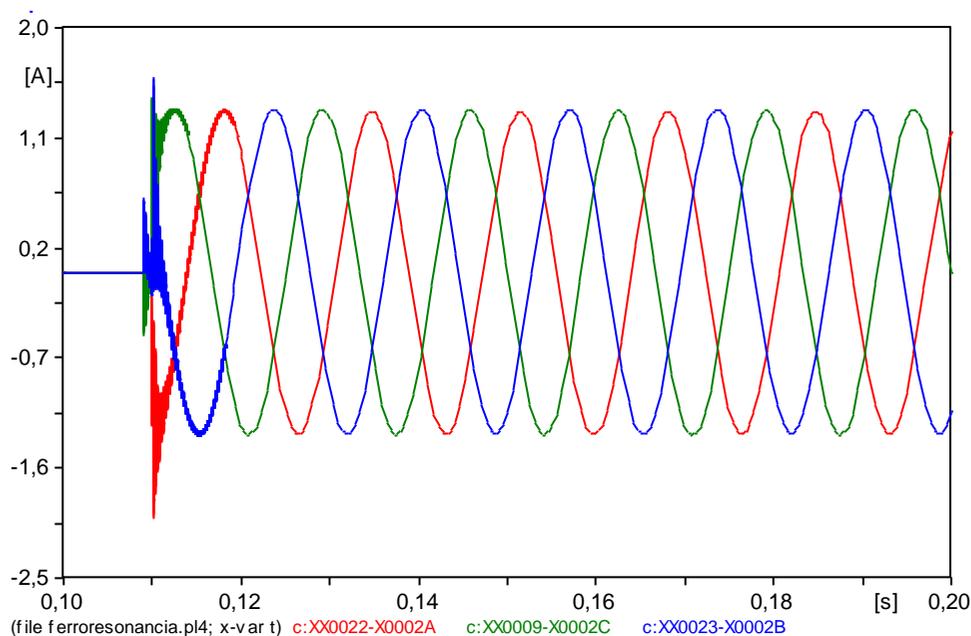


Figura 3.5. Corrientes en el secundario del transformador

De forma general se obtienen resultados que concuerdan con lo que se plantea anteriormente acerca de lo relacionado con el fenómeno de ferro-resonancia y su aparición y efectos negativos en el dispositivo. Es importante recalcar que este fenómeno crea condiciones de sometimiento del transformador de valores de mayor amplitud, tanto de tensión como de corriente, para los cuales no fue diseñado. Además de transmitir esta distorsión a las cargas conectadas al secundario del transformador lo que provoca efectos negativos en la calidad de la energía suministrada.

3.2 Transitorios a causa de maniobras realizadas en el SEP

El análisis de transitorios a causa de maniobras generalmente se realiza con el objetivo de definir las sollicitaciones dieléctricas sobre los equipos en redes de

transmisión, ya que las sobretensiones por maniobras generadas por la energización y desenergización a alta velocidad de líneas y transformadores por interruptores, introducen esfuerzos dieléctricos lo que produce envejecimientos prematuros en el aislamiento de los equipos [32]. En este acápite se analiza el recierre de un interruptor.

3.2.1 Modelación del recierre de un interruptor

Para la modelación en ATP del recierre de un interruptor se utiliza el Modelo I al cual se le añaden dos interruptores que se encargan de realizar la apertura y el recierre de los contactos, ver Figura 3.6, los valores de los tiempos que se utilizan aparecen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características de tiempos de los interruptores.

Interruptores	Fases	Tiempo de cierre (s)	Tiempo de apertura (s)
Interruptor 1 (I1)	Fase A	-1	0.045
	Fase B	-1	0.045
	Fase C	-1	0.045
Interruptor 2 (I2)	Fase A	0.073	1
	Fase B	0.073	1
	Fase C	0.073	1

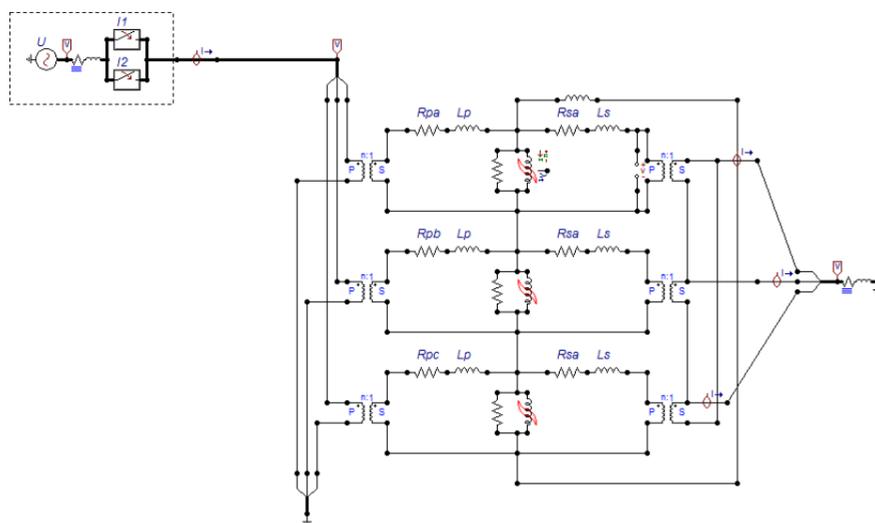


Figura 3.6. Modelación del recierre de un interruptor.

En la Figura 3.7 se pueden ver los niveles de tensión que aparecen en el primario del transformador con la apertura del interruptor 1, que se muestra en la Figura 3.16, da comienzo a un proceso transitorio donde la amplitud de la onda de tensión tiene un comportamiento que tiende al descenso y vuelve a restablecerse cuando se cierra el interruptor 2.

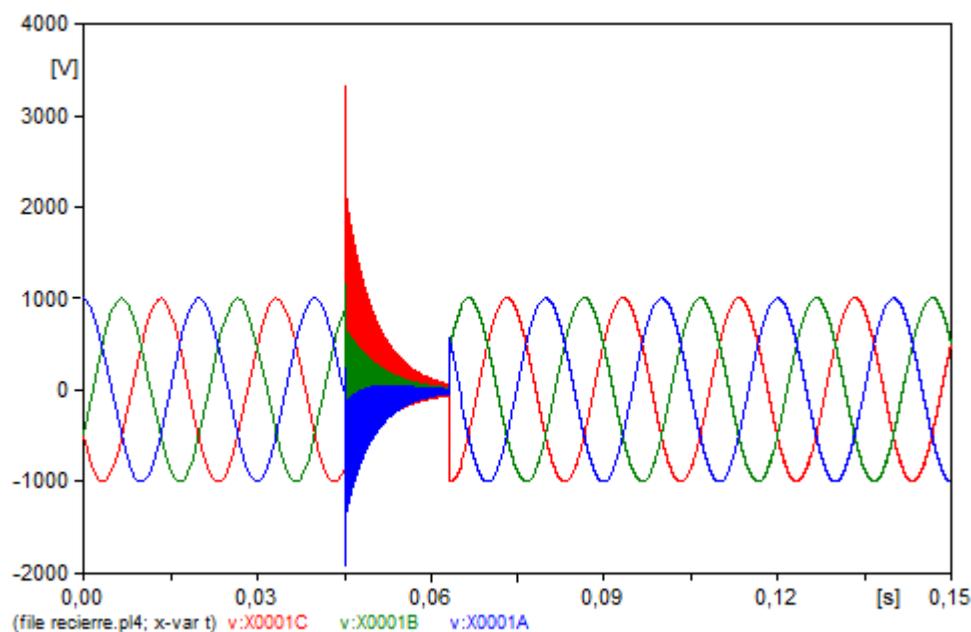


Figura 3.7. Voltajes en el primario del transformador.

A partir de los resultados obtenidos en la Figura 3.7 se observa que los mayores picos de tensión son alcanzados por las fase A y C respectivamente esto es resultado del instante en el cual se encuentra la onda de tensión cuando se realiza la desconexión.

En la Figura 3.8 se puede ver que en el secundario del transformador el transitorio luego del recierre del interruptor el voltaje secundario cae considerablemente lo que causa la aparición de los huecos de tensión. Los huecos de tensión se definen como una disminución de la tensión o la intensidad, en valor eficaz, entre 0.1 y 0.9 pu a la frecuencia de la red, para duraciones comprendidas entre 0.5 ciclos y 1 minuto [33]. Lo más importante de este transitorio son los picos elevados de tensión a los que se somete el devanado primario del transformador, además, el suministro de energía eléctrica también está sometido a estas

condiciones anormales lo que puede producir afectaciones en las cargas conectadas en el secundario.

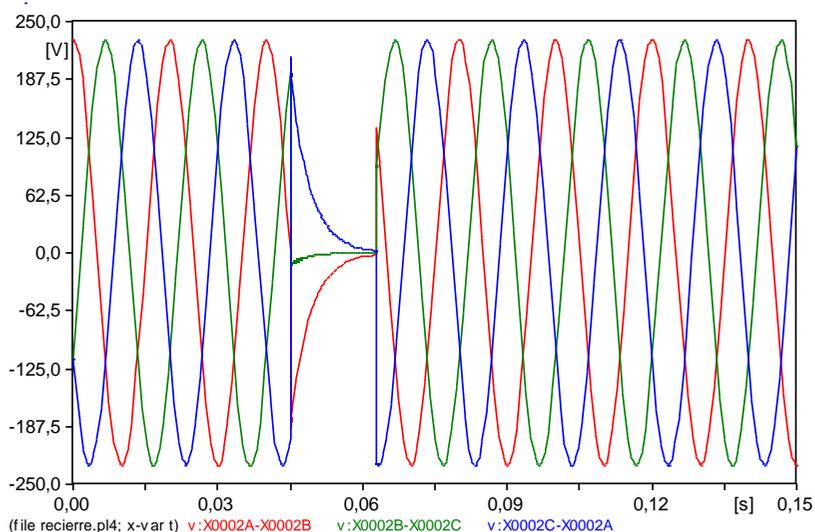


Figura 3.8. Voltajes en el Secundario del Transformador.

En la Figura 3.9 se puede observar cómo se comporta el flujo del transformador ante el recierre del interruptor obsérvese el salto que realiza cada forma de onda, de las tres fases, cuando se reestablece la alimentación.

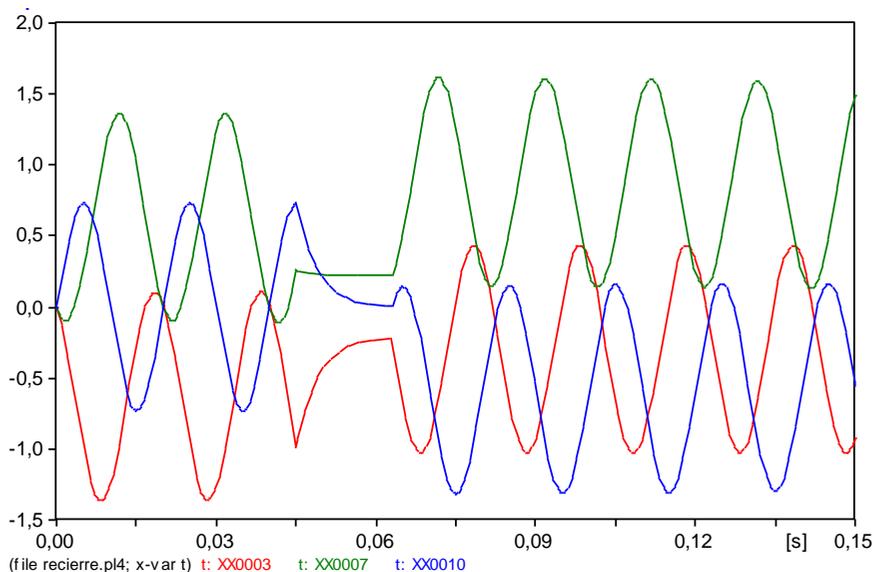


Figura 3.9. Comportamiento de los flujos en el transformador.

A partir de los resultados de la modelación se puede concluir que generalmente cualquier operación de conmutación, falla, interrupción, entre otras, en una

instalación eléctrica es seguida por un fenómeno momentáneo en el cual ocurre una sobretensión por primario, en este caso el recierre de un interruptor (Figura 3.7). El cambio repentino en el sistema inicia oscilaciones amortiguadas de relativa mediana frecuencia. Las magnitudes de las sobretensiones por conmutación dependen de los parámetros del circuito dado y en este caso el transformador se considera una carga altamente inductiva con gran capacidad de almacenamiento de energía. Hay que agregar que tanto los tiempos de desconexión como conexión tienen un efecto directo en la respuesta que ofrecen las formas de ondas de los parámetros en estudio especialmente el flujo, principalmente a causa de la presencia de flujo remanente en el núcleo del transformador responsable de la mayoría de los fenómenos que se dan en el dispositivo en condiciones de cambio.

3.3 Transitorio provocado por cortocircuito en la línea de entrada al transformador

Para esta modelación se utiliza el Modelo III que representa a un transformador de distribución de 25 kVA al cual se le determinaron sus parámetros mediante las pruebas en el laboratorio de la Empresa de Producciones Electromecánicas.

En la implementación de este Modelo III (Figura 3.10) se le agregan varios componentes para la simulación de un cortocircuito por primario del transformador los que se presentan en la Tabla I.6 del Anexo I.

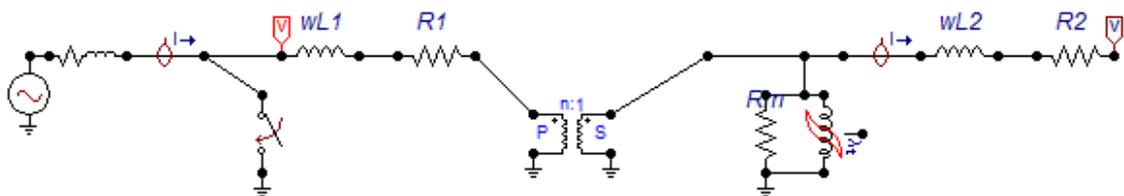


Figura 3.10. Modelado de un cortocircuito monofásico en un transformador.

En la Figura 3.11 se observa el voltaje en el primario del transformador, donde en el período cuando se presenta la falla toma valor cero.

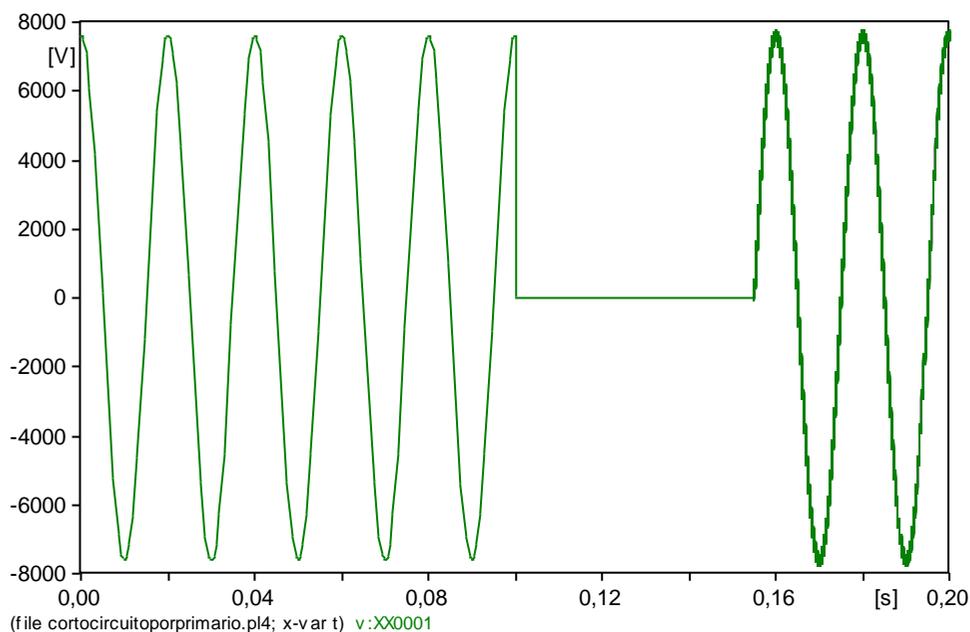


Figura 3.11. Voltaje en el primario del transformador.

En la Figura 3.12 se puede ver cómo se transmite una falta de tensión provocada por la falla en el alimentador del primario hacia el secundario del transformador transfiriéndose a su vez hacia los consumidores.

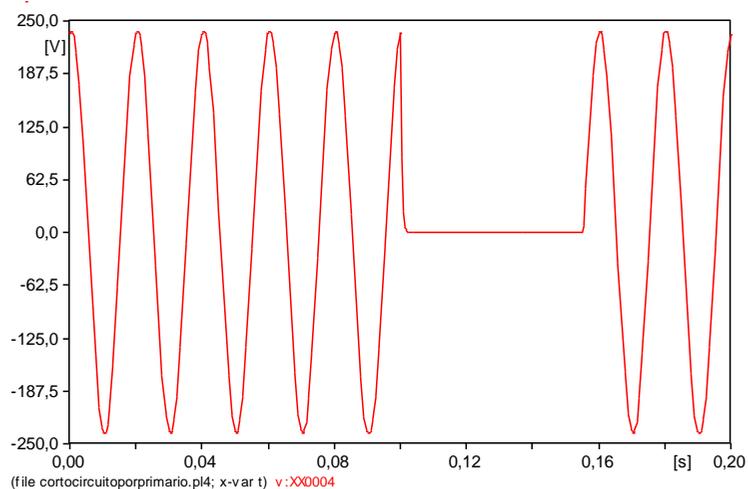


Figura 3.12. Voltaje en el secundario del transformador.

En la Figura 3.13 se puede observar el valor que toma la corriente de falla al cerrar el interruptor que simula el cortocircuito de fase a tierra.

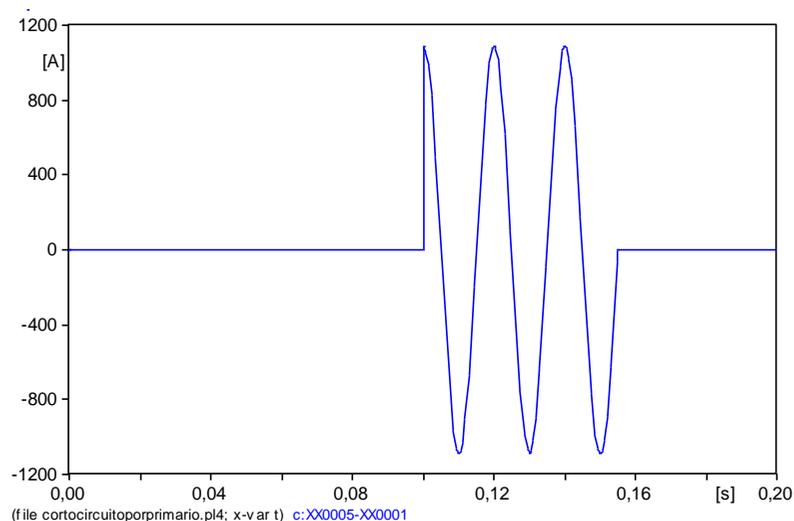


Figura 3.13. Corriente de falla monofásica.

El comportamiento del flujo en el transformador se muestra en la Figura 3.14 donde se ve el salto que provoca el cortocircuito monofásico por primario del transformador. Este salto está dado por la presencia del flujo remanente existente en el dispositivo luego de su desenergización, al realizar la reconexión el tiempo en que se realiza ésta, también tiene influencia en el resultado de la forma de onda porque depende de dónde se corta la onda de voltaje de la fuente de alimentación dado que la respuesta no sería la misma que se muestran en la Figuras 3.9 y 3.14. En diferentes corridas realizadas se obtuvo que los mayores picos de corriente de cortocircuito se obtienen cuando la onda de tensión pasa por cero y aparece el cortocircuito. Al igual que la corriente da falla el flujo del transformador se ve afectado también por este fenómeno y realiza saltos y luego aparecen ondas de diferentes amplitudes o movidas de eje de las abscisas.

En la modelación de un cortocircuito monofásico en este transformador de distribución se puede comprender los efectos que trae sobre la máquina y los consumidores conectados a esta, la presencia de fenómenos transitorios que tan comunes son en los SEP. De forma similar que el caso anterior del recierre de un interruptor a los consumidores llega la forma de onda de voltaje con afectaciones en su amplitud y frecuencia.

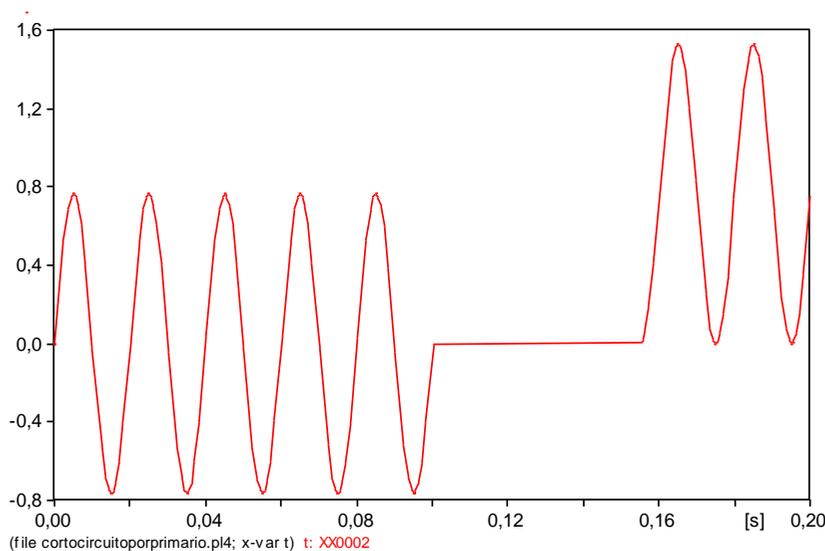


Figura 3.14. Comportamiento del flujo en el transformador.

En la modelación de un cortocircuito monofásico en este transformador de distribución se puede comprender los efectos que trae sobre la máquina y los consumidores conectados a esta, la presencia de fenómenos transitorios que tan comunes son en los SEP. De forma similar que el caso anterior del recierre de un interruptor a los consumidores llega la forma de onda de voltaje con afectaciones en su amplitud y frecuencia.

Además, si el transformador se somete en muy poco tiempo a condiciones de desconexión y conexión aparece el fenómeno *inrush* que, aunque no es de interés para esta investigación trae sobre el dispositivo esfuerzos electromagnéticos bien fuertes.

3.4 Transitorio provocado por una descarga atmosférica

Dentro de los fenómenos transitorios a modelar está la sobretensión provocada por las descargas atmosféricas que suelen ser las más peligrosas bien por la caída directa de un rayo sobre una línea, o bien por las tensiones inducidas por los rayos sobre las líneas.

Cuando un rayo cae sobre una línea aparecen dos ondas de sobretensión que circulan hacia ambos lados del punto de caída con una velocidad cercana a la de

la luz. La forma de estas ondas viajeras presenta un frente escarpado, con una rápida subida hasta el valor máximo (V_{mo}) de sobretensión, seguida de una bajada mucho más lenta de la tensión hasta a los valores normales de servicio [34].

Para proteger a las instalaciones del efecto de estas sobretensiones se utilizan descargadores y pararrayos. En la Figura 3.15 se muestra cómo un pararrayo limita el efecto de una onda de sobretensión sobre un transformador. Se coloca un pararrayo entre cada una de las fases de línea a tierra. A la tensión normal de servicio el pararrayo se comporta como un circuito abierto y no pasa corriente por él. Cuando la tensión supera un valor prefijado el pararrayo se vuelve conductor con lo que se descarga a tierra la mayor parte de la energía de la onda de sobretensión. Dicho de otra manera, al volverse conductor el pararrayo se desceba y pasado el transitorio se vuelve a convertir en aislante. Debido a fenómenos de reflexión de las ondas de sobretensión, los pararrayos se deben situar cerca del elemento a proteger para que sean eficaces.

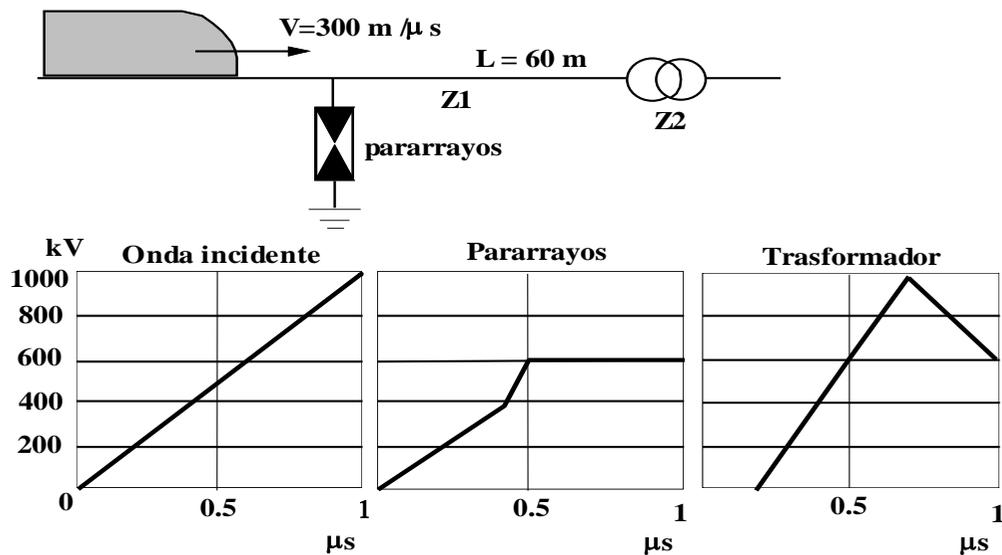


Figura 3.15. Efecto de un pararrayo sobre una onda de sobretensión.

Por lo tanto, una vez que la onda de sobretensión queda limitada por el pararrayo, el movimiento de esta onda hacia el transformador hace que el devanado que está conectado a la línea vea variar su tensión de una forma similar a como se representa en la Figura 3.15. Inicialmente la onda de tensión de frente debida a la

descarga atmosférica llega a los terminales del transformador provocando picos elevados se sobretensión, a la amplitud de la onda llegar a la tensión de operación del pararrayo este opera comenzando un fenómeno de transmisión reflexión que atenúa la onda de tensión que llega al transformador. Hay que agregar que la distancia a la cual se coloca el pararrayo es fundamental para la protección que se brinda dado que entre más lejos esté mayor pico de tensión llega al transformador pudiendo sacarlo de servicio.

Evidentemente, la transición entre la distribución de tensiones iniciales y la distribución final se produce a través de un proceso transitorio. Puesto que el circuito equivalente del devanado incluye un comportamiento completamente diferente al de estado estable ya que forma un circuito oscilante, este transitorio incluirá oscilaciones que serán tanto más importantes cuanto más diferentes sean las distribuciones de tensión inicial y final [34]. Por lo tanto, se hace necesario el estudio de los efectos peligrosos de estas oscilaciones para reducirlas al menor valor posible lo que contribuye a la construcción de un devanado que sea capaz de enfrentarse a estos fenómenos transitorios que podrían dañar el transformador hasta el punto de sacarlo de servicio.

3.4.1 Efecto del pararrayo en el transitorio provocado por una descarga atmosférica

Al Modelo III que se implementa en ATP se le incorporan varios componentes (Tabla I.8 del Anexo I) para lograr simular el fenómeno que aparece cuando un rayo impacta la línea que alimenta a un transformador monofásico de distribución de 25 kVA cuyas características se exponen en la Tabla I.5 del Anexo I que tiene un pararrayo conectado con la finalidad de atenuar la onda de tensión. Para la modelación de este fenómeno transitorio y la obtención de resultados donde se aprecie lo anteriormente descrito se realiza una comparación ante el impacto directo del rayo y la acción realizada por el pararrayo. La implementación del Modelo III y su utilización en la modelación de la descarga atmosférica en ATP se muestra en la Figura 3.16.

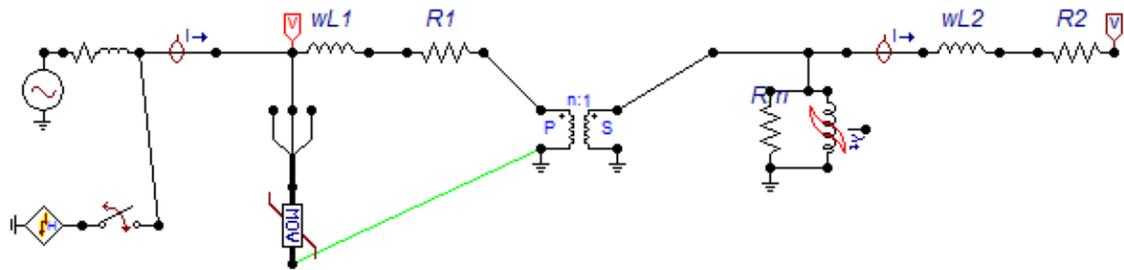


Figura 3.16. Modelación del transitorio provocado por una descarga atmosférica en un transformador de 25 kVA.

En la Figura 3.17 se puede observar el comportamiento de la forma de onda de tensión del secundario del transformador cuando no está presente el pararrayo en el primario del transformador, se puede observar un pico de tensión que está en el orden de los 3500 V.

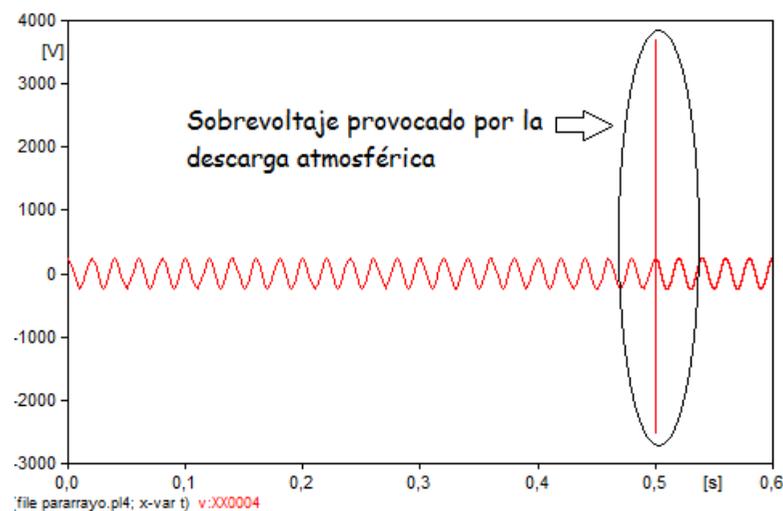


Figura 3.17. Sobrevoltaje en el secundario del transformador provocado por una descarga atmosférica.

El transitorio que se provoca puede observarse de mejor forma en la Figura 3.18 que es donde aparecen los mayores picos de tensión.

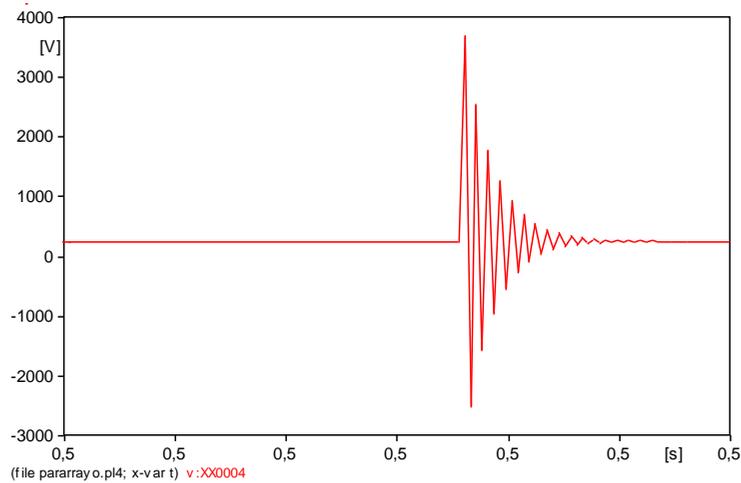


Figura 3.18. Transitorio en la onda de voltaje del secundario del transformador de 25 kVA.

Cuando se protege el transformador contra una descarga atmosférica a partir de la conexión de un pararrayo en el primario del dispositivo este es capaz de enviar a tierra una parte importante de la onda de sobretensión, aunque siempre llega a la máquina un sobrevoltaje importante capaz de comenzar un proceso de reflexión transmisión que se atenúa con el paso del tiempo donde el dispositivo está sometido a niveles de tensión menores que los que aparecen cuando no está la protección.

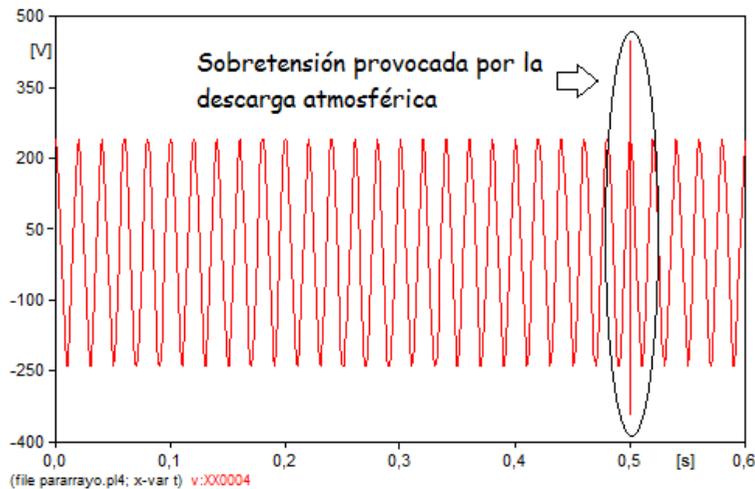


Figura 3.19. Sobrevoltaje en el secundario del transformador provocado por atenuado por el pararrayo.

Esto se puede observar de mejor forma en la Figura 3.19 donde se representa la onda de voltaje en el secundario del transformador de 25 kVA luego de conectarle un pararrayo en el primario.

En la Figura 3.20 se observa cómo la acción del pararrayo está presente en la onda de tensión del secundario del transformador atenuándola a valores cercanos a los 400 V.

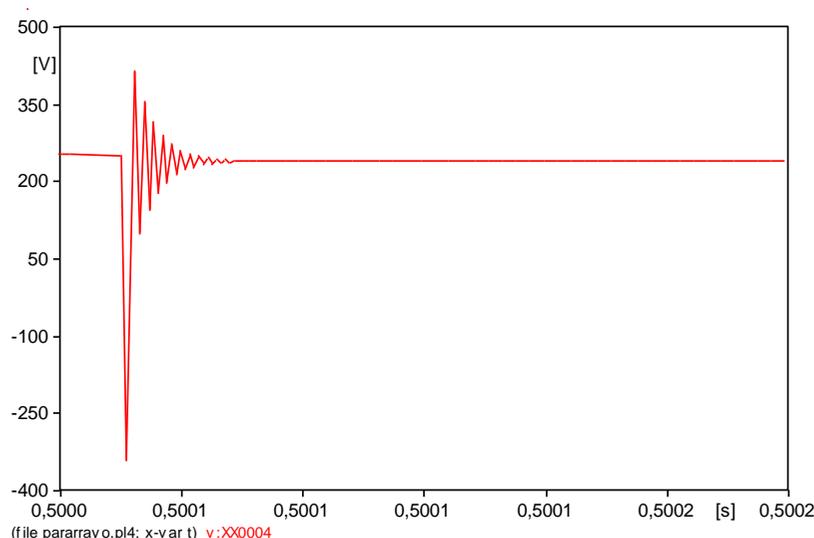


Figura 3.20. Transitorio en la onda de voltaje del secundario del transformador de 25 kVA.

Una comparación entre las Figuras 3.18 y 3.20 permite comprobar que hay una reducción aproximadamente de nueve veces en la amplitud de la onda de sobrevoltaje que aparece en el secundario del transformador cuando existe pararrayo.

3.4.2 Análisis del transitorio provocado por una descarga atmosférica mediante MatLab

En la búsqueda de validar y obtener respuestas correctas que expongan de forma concreta el comportamiento del transformador ante estos fenómenos transitorios se recurre a la herramienta Simulink/MatLab para lograr una comparación con diferentes softwares y resultados alcanzados en el laboratorio.

Lo que se desarrolla en el acápite 3.4.1 se implementa en MatLab con el Modelo II [31], particularmente lo que corresponde a la respuesta ante una descarga atmosférica sin pararrayo. Esto se realiza con el fin de validar los resultados que se obtienen para este tipo de fenómeno, ver Figura 3.21, en específico lo que ocurre con la tensión del secundario del transformador.

En la Tabla I.4 del Anexo I se realiza la descripción de los elementos que se agregan al Modelo II para la obtención del transitorio en estudio.

Los resultados en la modelación en Simulink/MatLab se comparan con los que obtienen en el Laboratorio de la UEB de la Empresa de Producciones Electromecánicas (Fábrica de Fusibles y Desconectivos) que se realizaron al transformador de distribución de 25 kVA.

La Figura 3.21 muestra el modelo que se utiliza para la simulación en MatLab.

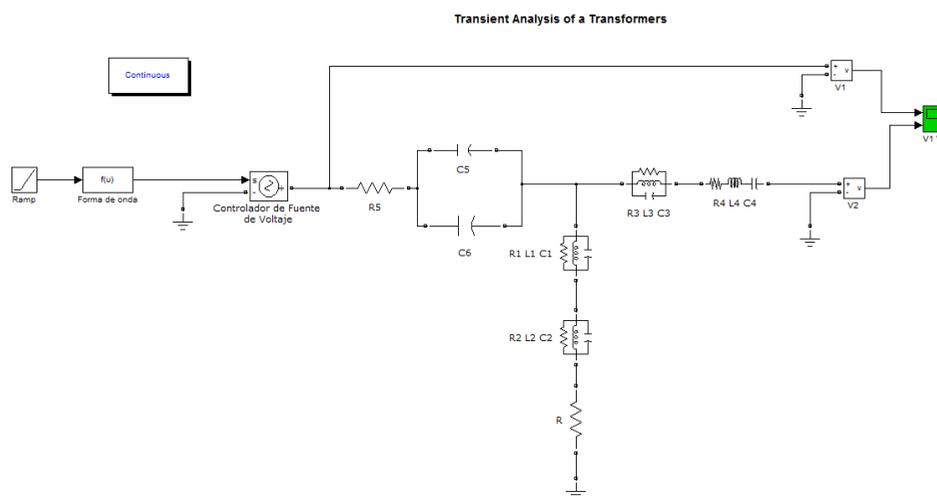


Figura 3.21. Modelación del transitorio provocado por una descarga atmosférica en un transformador de 25 kVA en MatLab.

En un tiempo de análisis de 120 μ s se obtiene en MatLab una forma de onda con una amplitud inicial de 43 kV, un tiempo de frente de onda de 1,9408 μ s y de cola de 53,2216 μ s, que representa la inducción de una sobretensión provocada por

una descarga atmosférica en una línea aérea y llega hasta los terminales primarios del transformador de 25 kVA, ver Figura 3.22.

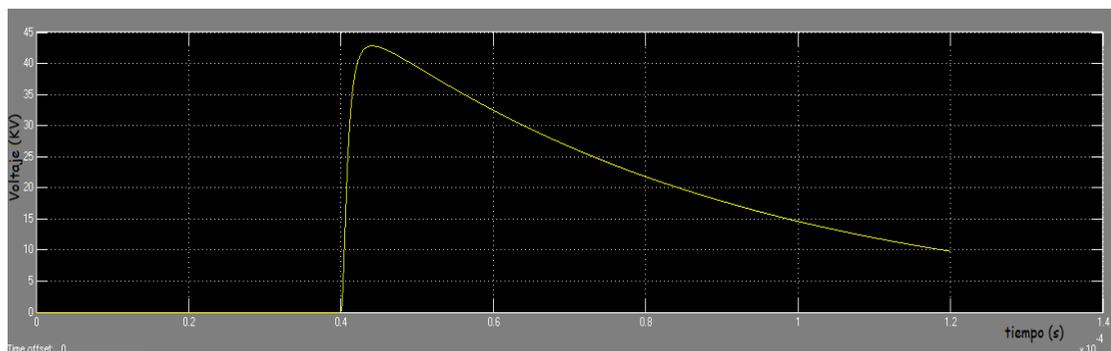


Figura 3.22. Forma de onda de la sobretensión en el primario del transformador modelada en MatLab.

En la Figura 3.23 se expone la forma de onda del voltaje en el primario del transformador que se obtiene en la prueba de laboratorio.

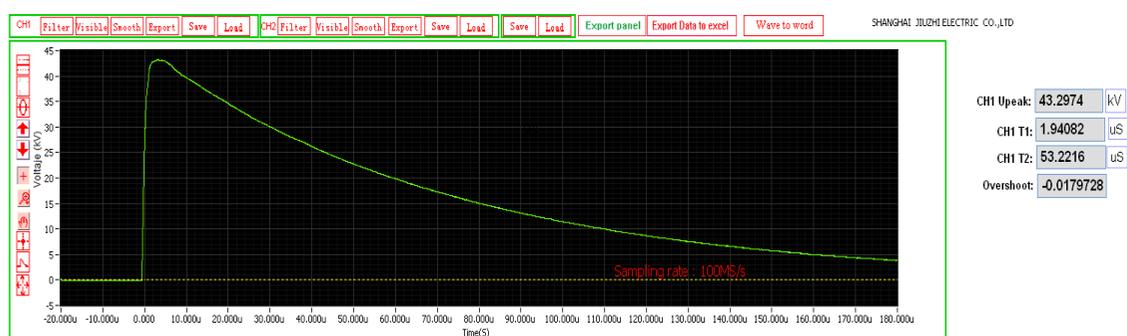


Figura 3.23. Forma de onda de la sobretensión en el primario del transformador que se obtiene en el laboratorio.

En la Figuras 3.24 y 3.25 se presentan la forma de onda en el secundario del transformador, la primera se obtiene en la modelación y la segunda es la respuesta en el laboratorio.

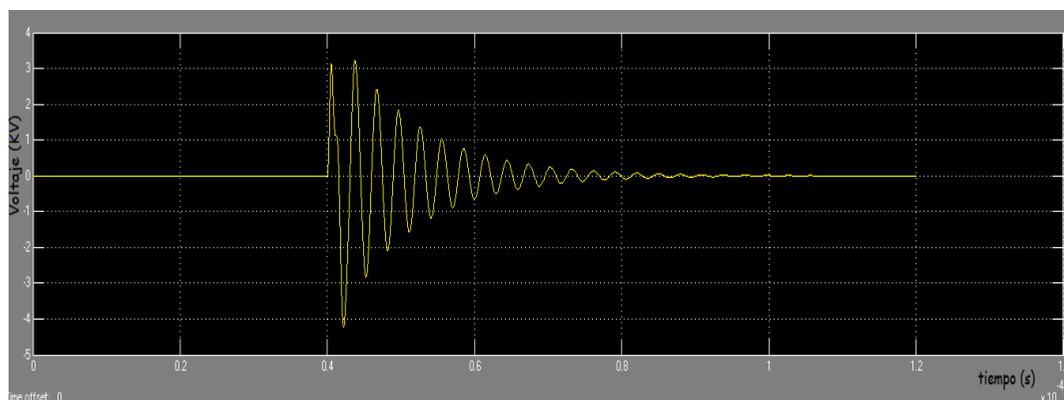


Figura 3.24. Forma de onda de la sobretensión en el secundario del transformador modelada en MatLab.

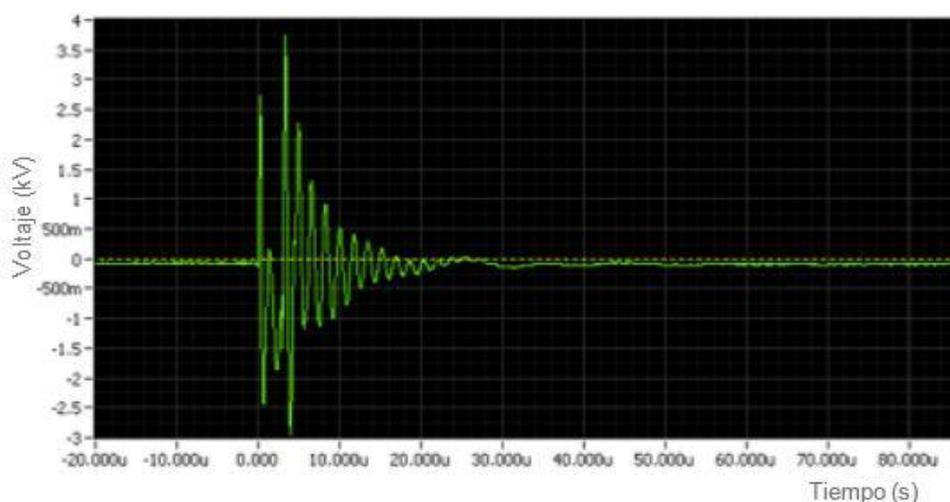


Figura 3.25. Forma de onda de la sobretensión en el secundario del transformador obtenida en el laboratorio.

En las respuestas del transformador ante la presencia de una onda de sobrevoltaje de alto valor en su primario se observa el fenómeno de reflexión transmisión que ocurre en el interior del dispositivo, obteniéndose una onda con varios picos de voltaje de alta frecuencia con un comportamiento amortiguado atenuándose con el aumento del tiempo. Si este transformador de distribución tiene como voltaje nominal por secundario 120/240 V puede verse que los picos más grandes de la onda de respuesta están cerca de los 4kV o sea 16 veces mayor que el valor nominal por lo que la máquina está sometida a esfuerzos

extremos que pueden causar daños irreparables al transformador y no solo a este sino también a las cargas conectadas en los terminales del dispositivo.

Mediante la comparación de los resultados que se obtienen tanto en MatLab como en el laboratorio se observan respuestas de gran similitud por lo que se puede validar el modelo como correcto para el análisis de transitorios electromagnéticos de altas frecuencias, en este caso una descarga atmosférica. Las diferencias existentes en los resultados que se alcanzaron se deben a errores que introduce la fuente de impulso que produce una inyección inicial de una amplitud pequeña de tensión que tiene como resultado las crestas que hace la diferencia con la modelación.

3.5 Barrido de frecuencia aplicado al modelo IV

Este último acápite es un paso para sentar las bases de próximas investigaciones que relacionen la modelación de transformadores eléctricos, tema que brinda aspectos importantes a tener en cuenta en el tratamiento a estos dispositivos. La Empresa de Producciones Electromecánicas donde se realizaron las pruebas a los transformadores tiene en su laboratorio un dispositivo capaz de obtener la respuesta del transformador al realizarle el barrido de frecuencia.

El análisis de la técnica de barrido de frecuencia a transformadores eléctricos en este trabajo parte de la posibilidad que brindan los resultados que se obtienen en este tipo de estudio. El Modelo IV parte de la realización a un transformador real de este tipo de prueba donde al modelo se le ajustan sus parámetros hasta obtener una curva con similares características [26].

El estudio se realiza con la utilización del programa Multisim donde se ejecutan dos barridos de frecuencia uno que supone un estado donde el transformador no ha sufrido ninguna anomalía en su estructura, estado sano (Figura 3.26), y otro donde se le afectan varios de sus parámetros. Estas condiciones se presentan de forma real cuando aparecen condiciones extremas de explotación o agentes externos como fallas o descargas atmosféricas. En la Figura 3.26 se obtiene la respuesta de magnitud y fase de la función de transferencia que se utiliza donde

se relaciona el voltaje y la corriente por primario para condiciones sanas del dispositivo.

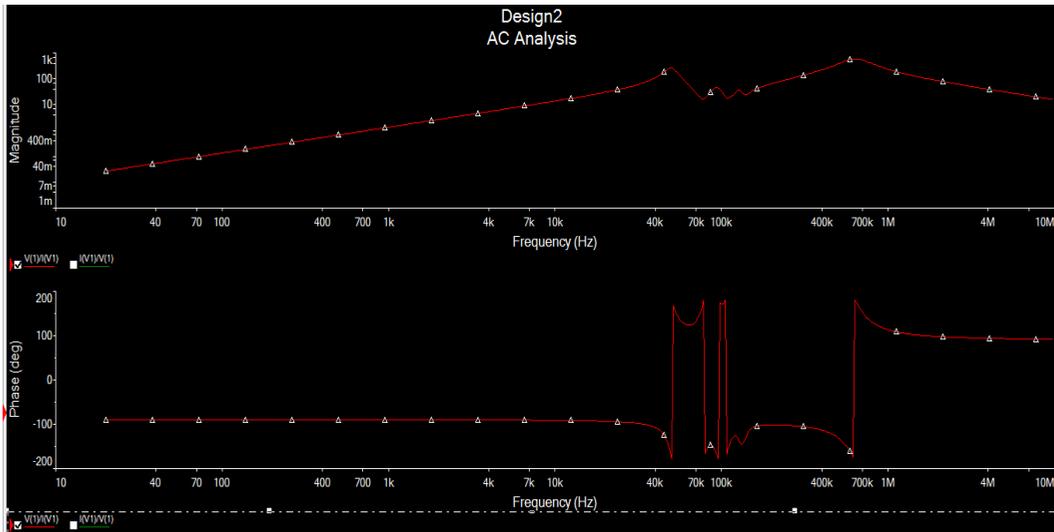


Figura 3.26. Respuesta de magnitud y fase del FRA realizado al Modelo IV en estado sano.

En [26] se ofrece un grupo de datos que indican el estado de las deformaciones existentes en el dispositivo producidas por acciones internas o externas. Estos valores se sustituyen en el Modelo IV, implementado en Multisim, y se obtiene la Figura 3.27 que son las respuestas de magnitud y fase para estas condiciones.

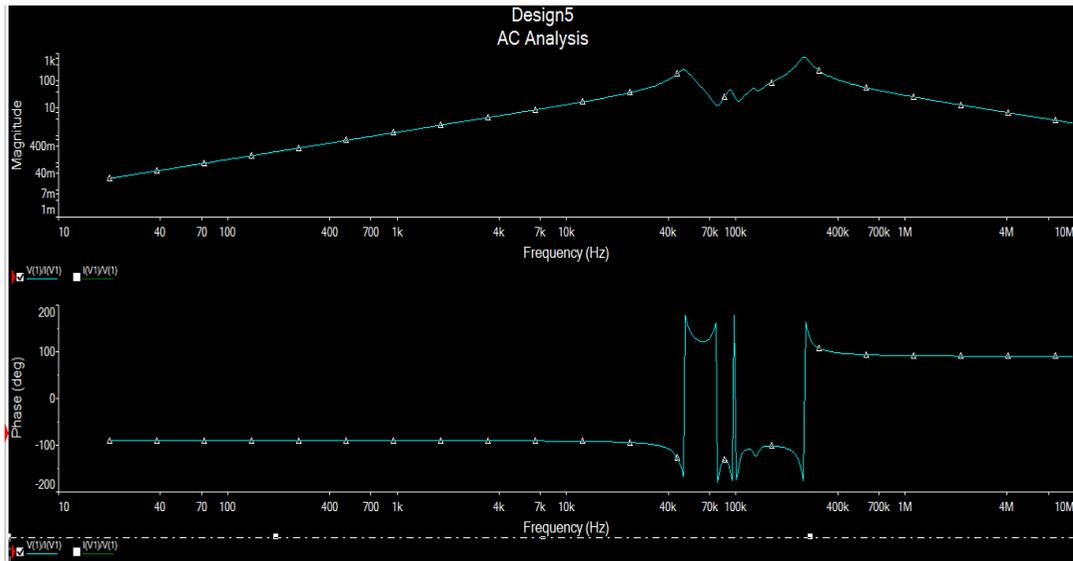


Figura 3.27. Respuesta de Magnitud y Fase del FRA realizado al Modelo IV en estado de falla.

Cuando se realiza una comparación entre los dos estados bajo análisis se puede observar las variaciones existentes en las respuestas que se obtienen, ver Figura 3.28.

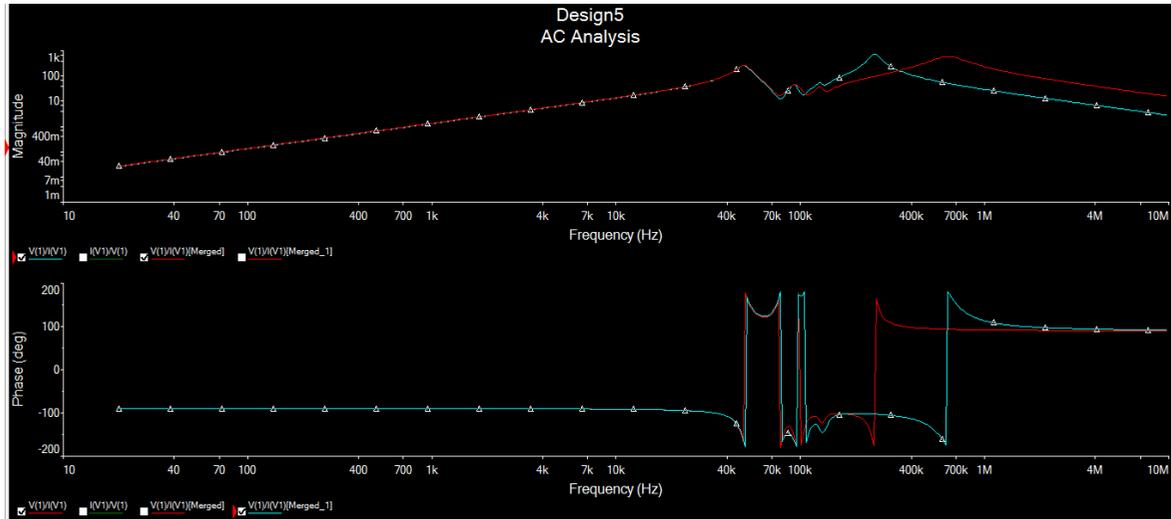


Figura 3.28. Comparación de las respuestas de magnitudes y fases del FRA realizado al Modelo IV en estado sano y de falla.

En la Figura 3.28 se pueden observar los principales cambios que aparecen en los comportamientos de las características de magnitud y fase de los casos de barridos de frecuencia, a partir de estas variaciones y en los rangos de frecuencias que aparecen al aplicar los criterios de diagnóstico que ofrecen [25] y [26] se obtiene que la estructura del transformador tiene problemas o se ha dañado. A partir de esto se puede afirmar que las celdas 1 y 2 no muestran una variación considerable, lo que indica que el sistema magnético del transformador se encuentra en buen estado, además no se presentan deformaciones mayores en el devanado; sin embargo, se observan grandes variaciones en las celdas 3, 4 y 5, que indica una deformación menor en una de las fases.

Por otro lado, el modelo de celdas muestra ser sensible a los cambios en la curva de SFRA, por lo que puede ser útil al evaluar el alcance de una falla; sin embargo, se requiere de más investigación, para obtener reglas que asocien las variaciones en los parámetros de las celdas con los cambios físicos en el transformador.

3.6 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se realiza el modelado de transitorios electromagnéticos a diferentes niveles de frecuencia con la utilización de los modelos de transformadores que se implementaron en ATP y MatLab en el capítulo anterior. Se obtuvieron respuestas que fundamentan la teoría que se consultó en las referencias bibliográficas. Además, pudo constatarse que en la modelación se obtienen resultados con suficiente precisión en relación con lo que ocurre en la realidad donde se hace mayor hincapié en el comportamiento del transformador y las condiciones a las cuales se someten los consumidores durante estos períodos críticos.

CONCLUSIONES

1. En la descripción del comportamiento del transformador ante la presencia de eventos anormales, las condiciones de contorno influyen tanto en la conducta como características del transitorio en el dispositivo.
2. Dentro de la variedad de programas especializados en el análisis de transitorios electromagnéticos el ATP y MatLab, cada uno con sus características, ofrecen respuestas adecuadas al estudio que se realiza además de ser una vía muy útil en el arte de predecir el comportamiento del dispositivo ante distintos fenómenos.
3. Para realizar la modelación de transitorios electromagnéticos en transformadores es necesario primeramente definir el modelo del dispositivo acorde al rango de frecuencia en que se encuentre el transitorio a analizar.
4. Los resultados en las modelaciones de los transitorios que aparecen a diferentes niveles de frecuencia que se alcanzan en varios casos concuerdan con los conseguidos por otros autores. Los inéditos están respaldados por la teoría que se plantea, además de lograr correspondencia en los resultados alcanzados en el laboratorio.

RECOMENDACIONES

- Resulta de gran interés continuar con el estudio realizado hasta llegar a obtener una mayor cantidad de simulaciones de fenómenos transitorios que se presentan en el transformador a partir de sus modelos correspondientes.
- Continuar el estudio del barrido de frecuencia en transformadores a partir de la utilización de modelos como una vía útil en el diagnóstico del dispositivo.
- Utilizar los modelos que se presentan en la docencia de pregrado y postgrado.
- Implementar otros modelos en ATP incluyendo los propios presentados por este software para ampliar las utilidades de la modelación de transformadores con otros fines de estudio.
- Poner en práctica los resultados alcanzados en esta investigación en la Fábrica de Transformadores “Latino” como herramienta de predicción del comportamiento del transformador que se construye y comercializa por esta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. A. García, "Seminario de Transformadores."
- [2] A. H. Maldonado, "Condiciones Anormales de Operación del Transformador," p. 1, 2007.
- [3] R. B. Lastra, "ATP para Inexpertos," Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Plata.
- [4] C. Q. Sánchez, "Estudio del Fenómeno de Ferroresonancia en Transformadores," Ingeniero, Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2012.
- [5] C. G. López, "Modelos de Transformadores a Altas Frecuencias," Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas.
- [6] O. M. Zamora, "Modelado de elementos en Sistemas Eléctricos de Potencia para Estudios sobre Energización," Universidad Autónoma de Nuevo León, 2001.
- [7] J. E. C. Montero, F. C. Aranda, and J. A. M. Velasco, "Modelo práctico del transformador de distribución trifásico para análisis de transitorios de baja frecuencia: Identificación de Parámetros," *Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 20, pp. 293-303, 2012.
- [8] M. Á. R. Pozueta, "Transformadores," Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2012.
- [9] G. McPherson and R. Laramore. An Introduction to Electrical Machines and Transformers. 156-237.
- [10] G. d. Profesores, "Generalidades y Explotación de Transformadores de Fuerza," Departamento de Electroenergética, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2005.
- [11] A. H. Maldonado, "Acerca de los Transformadores," Departamento de Electroenergética, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2004.
- [12] IEEE, "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers," vol. C57.12.90, ed, 2006.
- [13] "Estudio del Transformador," Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián, Universidad de Navarra, 2010.
- [14] J. S. Navarro, "Aplicación informática con Matlab para la modelización del transformador trifásico en régimen permanente y condiciones desequilibradas," Universidad Politécnica de Cataluña, 2007.
- [15] L. F. M. Saá, "Análisis de Transitorios Electromagnéticos en la Energización de Elementos de Transmisión utilizando el Programa

- DIGSILENT POWER FACTORY," Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, 2010, Quito.
- [16] R. L. García, "Desarrollo y Validación de Modelos de Transformadores Monofásicos y Trifásicos con saturación para el análisis de Armónicos en Sistemas de Potencia," Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Cataluña, 2000.
- [17] V. Bradwajn, O. Hydro, H. W. Donnel, and I. I. Dommel, "Matrix Representation of Three-Phase N-Winding Transformers for Steady-State and Transient Studies," *IEEE* vol. PAS-101, pp. 1369-1378, 2007.
- [18] E. P. Dick, O. H. R. Division, and W. Watson, "Transformer Models for Transient Studies Based on Field Measurements " *IEEE*, vol. PAS-100, pp. 409-419, 2007.
- [19] J. A. M. Velasco, *Power Systems Transients Parameter Determination*, English ed., 2010.
- [20] C. G. García, "Procedimiento de Modelado basado en el Análisis de la Respuesta en Frecuencia y aplicación en Transformadores Trifásicos de Potencia para su Caracterización y Diagnóstico. ," Departamento de Tecnología Electrónica Universidad Carlos III de Madrid 2012.
- [21] C. M. Arturi, "Transient simulation and analysis of a three-phase five-limb step-up transformer following an out-of-phase synchronization," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, pp. 196-207, 2002.
- [22] V. A. Galván, "Modelado del Transformador para eventos de alta frecuencia," *Revista Energética*, vol. 33, 2012.
- [23] MathWorks. (2016). *El lenguaje del cálculo técnico*. Available: www.mathworks.com/products/matlab/
- [24] A. I. Voldek, *Máquinas Eléctricas*, Español ed. vol. 1. Moscú, 1983.
- [25] O. H. Abreu, "Método de SFRA como herramienta de diagnóstico," Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas, Ciudad Universitaria José Antonio Echeverría, 2016.
- [26] G. Aponte, W. Herrera, C. González, and J. Pleite, "Implementación de un Modelo de un Transformador Eléctrico para el Análisis de su Respuesta en Frecuencia," vol. 22, 2011.
- [27] N. I. Corporation. (2016). *¿Qué es NI Multisim?* Available: <http://www.ni.com/multisim/whatis/esa/>
- [28] L. Dután, "Modelación de Transformadores para Estudios sobre Energización," Quito.
- [29] H. K. Høidalen, B. A. Mork, F. Gonzalez-Molina, D. Ishchenko, and N. Chiesa, "Implementation of the Hybrid Transformer Model in ATPDraw," Electrical and Computer Engineering, Estados Unidos.

- [30] F. J. Á. Toscano, "Modelado de núcleo ferromagnético según la teoría de Jiles- Atherton y su implementación en ATP-EMTP," Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Sevilla, 2014.
- [31] N. A. Sabiha and M. Lehtonen, "Lightning-Induced Overvoltages Transmitted Over Distribution Transformer With MV Spark-Gap Operation— Part I: High-Frequency Transformer Model," *IEEE* vol. 25, pp. 2472-2480, 2010.
- [32] E. E. C. Ramírez, "Análisis de Sobretensiones debido a Transitorios por Maniobras en Sistemas Eléctricos de Potencia Mayores de 300 kV," Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008.
- [33] M. M. Morero, "Calidad de suministro eléctrico: Huecos de tensión.Mitigación de sus efectos en las plantas industriales.," Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
- [34] M. Á. R. Posueta, "Sobretensiones en los Transformadores," Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria.
- [35] J. A. M. Velazco and F. d. León. (2011) Circuito equivalente de un transformador con regulación. *Revista Chilena*. 93-109.
- [36] J. A. M. Velazco, "Transformer modeling for low- and mid-frequency transients - a review," *IEEE*, vol. 20, pp. 1625-1632, 2005.

ANEXOS

Anexo I

Se presentan los datos que se utilizan para las simulaciones y que coinciden con los que presentan las referencias bajo análisis [7], [31].

Modelo I

I.1 Cálculo de los parámetros del Modelo I

- Parámetros de los devanados

Las resistencias y las inductancias de dispersión de los devanados se pueden estimar a partir de resultados que se obtienen en ensayos normalizados. Básicamente, se necesitan cuatro parámetros de los ensayos: las pérdidas bajo carga (P_{cc}), la impedancia porcentual de cortocircuito (Z_{cc}), la resistencia del devanado primario (R_p) y la resistencia del devanado secundario (R_s), todos ellos referidos a una misma temperatura.

Es necesario recordar que debido a que los transformadores de distribución tienen generalmente los devanados interconectados, las mediciones de resistencia corresponden a medidas entre terminales. Por consiguiente, se requiere estimar el valor de resistencia por fase para cada tipo de conexión. Los valores de resistencia y reactancia total vistas desde el lado primario se pueden obtener mediante [35]:

$$R_{cc} = \frac{V1Nom^2}{SNom^2} \Omega \quad (1)$$

$$X_{cc} = \left(\frac{V1Nom}{SNom}\right)^2 * \sqrt{\left(\frac{Z_{cc} * SNom}{100}\right)^2 - P_{cc}^2} \Omega \quad (2)$$

Donde:

SNom- potencia nominal aparente del transformador.

V1Nom- tensión nominal del lado primario.

La resistencia total R_{cc} en (1) agrupa las resistencias de los devanados más una resistencia que representa la componente de pérdidas activas adicionales. Puesto que no se conoce con exactitud cómo se distribuyen las pérdidas adicionales debidas a los fenómenos que aparecen en los conductores que conforman los devanados (efecto pelicular y flujo disperso), se asume que las mismas son del 50% en el lado primario y de 50% en el lado secundario. Se debe recordar que los parámetros de cortocircuito corresponden a parámetros por fase (equivalente en estrella de los devanados), por lo que los parámetros de una conexión en delta deben llevarse a un equivalente en estrella. Así pues, la resistencia total por fase para cualquier conexión se puede obtener a partir:

$$R_{cc} = \frac{R_p + R_{s'}}{2} + R_{adic} \Omega \quad (3)$$

La resistencia adicional se divide entre dos:

$$\frac{R_{adic}}{2} = \frac{R_{cc}}{2} - \frac{R_p + R_{s'}}{4} \Omega \quad (4)$$

Al añadir esta última expresión a la resistencia medida del devanado por fase y llevada a un equivalente en estrella, se pueden estimar las resistencias de las ramas primaria y secundaria para el modelo que se muestra en la Figura 1.17:

$$R_p = \frac{Kd}{4} * (2R_{cc} + R_p - R_s * K r n^2) \Omega \quad (5)$$

$$R_{s'} = \frac{Kd}{4} * (2R_{cc} - R_p + R_s * K r n^2) \Omega \quad (6)$$

Donde Kd es una constante que depende de la conexión del devanado primario, y que es igual a 3 si el devanado está en triángulo y 1 si está en estrella y Krn es la

relación entre la tensión nominal primaria y la tensión nominal secundaria del transformador o relación de transformación.

Debido a que se desconoce la distribución de la reactancia de cortocircuito entre los devanados del transformador, y a que no es recomendable asignarla completamente a uno de ellos (ya que en condiciones de carga nula no circula corriente por el secundario y no se producen flujos de dispersión en el mismo), se procede a asumir que la misma se divide en un 50% entre ambos devanados [36]. Para un análisis similar al caso de la resistencia se obtiene:

$$Lp = \frac{Kd}{2} * \frac{Xcc}{\omega} = Ls' H \quad (7)$$

El último parámetro a considerar es la relación de transformación Kr del transformador de acople. Esta se calcula de acuerdo al tipo de conexión:

$$Kr = \sqrt{3} * Krn : \text{para grupo } \Delta Y \quad (8)$$

$$Kr = \frac{1}{\sqrt{3}} * Krn : \text{para grupo } Y \Delta \quad (9)$$

- Parámetros del núcleo

Los ensayos que permiten obtener los datos necesarios para estimar los parámetros del núcleo son: el ensayo de magnetización o curva de vacío, el ensayo de pérdidas en vacío y el ensayo a secuencia cero. Para determinar la característica de magnetización, que se representa por las inductancias no lineales (LNa , LNb , LNC) del esquema de la Figura 1.17, se debe proceder a realizar el ensayo en vacío a varios niveles de tensión, se comienza desde cero hasta un porcentaje superior al 110% de la tensión nominal. Los datos que se obtienen (es decir, los valores eficaces de tensión y corriente) se llevan a valores por unidad posteriormente se convierten a valores pico de la corriente de magnetización y del flujo concatenado, con el empleo de la rutina SATURA. Para un transformador trifásico se debe destacar la posibilidad de realizar la prueba de vacío por dos métodos: las tres fases simultáneas con una fuente trifásica

(magnetización trifásica) o cada fase individual con una fuente monofásica (magnetización monofásica).

El valor de las pérdidas en vacío P_{oc} se obtiene del ensayo correspondiente. Éstas son dependientes de la densidad de flujo magnético y la tensión. Con el fin de reducir la complejidad del modelo en este trabajo se asume que permanecen constantes en todo el rango de tensión. De esta forma, la resistencia de magnetización R_m , que es la misma que R_c en la Figura 1.4 del capítulo I y las pérdidas en vacío P_{oc} se relacionan con:

$$R_m = K_{rn} * \frac{V1Nom^2}{P_{oc}} \Omega \quad (10)$$

La resistencia R_m que se obtiene es un equivalente total del transformador trifásico; sin embargo, se debe discriminar la misma para cada fase debido a la asimetría constructiva del transformador ya que las pérdidas de vacío de cada fase difieren en su composición estructural para los cuales a partir de su estudio y desarrollo se determinan las expresiones:

$$R_{ma} = R_{mc} = \frac{Kd}{3} * \frac{V1Nom^2}{0.375 * P_{oc}} \Omega \quad (11)$$

$$R_{mb} = \frac{Kd}{3} * \frac{V1Nom^2}{0.25 * P_0} \Omega \quad (12)$$

Esta forma de obtención de valores garantiza un comportamiento más cercano al transformador real.

El último parámetro a determinar es la inductancia de secuencia homopolar o cero (L_h), la cual se puede estimar mediante el ensayo a secuencia cero que se propone para un transformador con devanados interconectados. En dicho ensayo se debe medir la tensión de entrada (V_h), la corriente de entrada (I_h) y las pérdidas activas totales (P_h) por el lado en conexión estrella.

El análisis del circuito, que se considera conexión ΔY , cuando funciona en régimen permanente permite estimar un valor aproximado de la inductancia a secuencia homopolar. Desde el punto de vista fasorial, se cumple que:

$$Kr * Vh = Vz_s + Vx_h \quad (13)$$

Para respetar las denominaciones de la referencia [7] se indica devanado primario por la letra p y el secundario por la letra s. Las caídas de tensión en los devanados primario y secundario debido a las corrientes que por ellos circulan, se calculan de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$Vz_s = I_l + Z_s \quad \text{donde } Z_s = R_s' + j\omega L_s' \quad (14)$$

$$Vx_h = I_h + Z_p \quad \text{donde } Z_p = R_p + j\omega L_p \quad (15)$$

Adicionalmente, la corriente en el devanado secundario se obtiene al expresar en forma fasorial la corriente medida durante el ensayo:

$$I_L = \frac{1}{3 * Kr} * I_h \quad (16)$$

Donde:

$$I_h = |I_h| \angle \phi_h \text{ A}; \quad \phi_h = \cos^{-1} \left(\frac{P_h}{V_h * I_h} \right) \quad (17)$$

Por lo que respecta a la corriente en el devanado primario, esta se determina por:

$$I_h = \frac{Kr * Vh - I_l * Z_s}{Z_p} \text{ A} \quad (18)$$

La impedancia de secuencia cero se halla mediante:

$$Z_h = \frac{3 * Z_p}{\frac{I_l}{I_h} - 1} \Omega \quad (19)$$

Aunque la impedancia a secuencia homopolar o cero tiene una componente resistiva y otra inductiva. La componente resistiva es muy pequeña por lo que en este trabajo el valor de la impedancia se toma como el de la reactancia ($X_h = Z_h$).

Posteriormente, se obtiene el valor de la inductancia a secuencia homopolar al dividir la reactancia X_h por la frecuencia de operación del transformador [7] según la norma citada en [12].

Tabla I.1 Elementos del Modelo I

Elementos del Modelo I a implementar	
Rpa	0,1706 Ω
Rpb	0,1706 Ω
Rpc	0,1706 Ω
Lp	1,1758e-4 H
LS'	1,1758e-4 H
Lh	2,2281e-004 H
Inductancia no lineal	Tipo 96 (ATP)
Transformador Ideal	1000/230 V
Rma	927,3537 Ω
Rmb	1391 Ω
Rmc	927,3537 Ω

Tabla I.2 Componentes agregados al Modelo I

Componentes agregados al Modelo I para su implementación en ATP	
Fuente de Trifásica de Voltaje Alterno	1000 V,50Hz

Modelo II

I.2 Cálculo de parámetros del Modelo II

Este modelo fue tomado de [31] y se basa en la teoría de los dos puertos. Las redes de tipo de puerto se clasifican en parámetros de impedancia, parámetros de admitancia, los parámetros híbridos, y las redes de los parámetros de transmisión. La más simple es la de parámetros de impedancia ya que se necesitan solo la

prueba de circuito abierto para calcular los parámetros de la red. Por lo tanto, los parámetros de impedancia de una red de dos puertos del tipo de circuito T equivalente se consideran en este estudio. El modelo que se utiliza se muestra en la Figura 1.

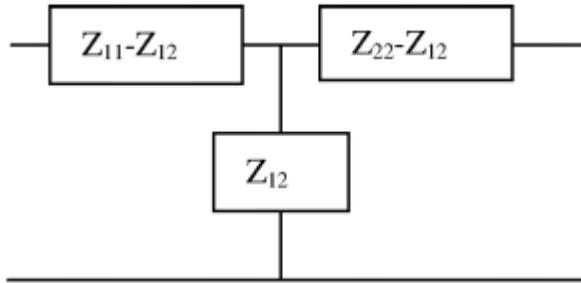


Figura 1. Modelo de transformador tipo T.

Donde:

$$Z_{11} = \frac{V_1}{I_1} \text{ con } I_2 = 0 \Omega \quad (20)$$

$$Z_{12} = \frac{V_1}{I_2} \text{ con } I_1 = 0 \Omega \quad (21)$$

$$Z_{22} = \frac{V_2}{I_2} \text{ con } I_1 = 0 \Omega \quad (22)$$

$$Z_{21} = \frac{V_2}{I_1} \text{ con } I_2 = 0 \Omega \quad (20)$$

En [31] se describe la metodología que sigue para la determinación de cada uno de los parámetros del modelo de transformador. En la Tabla I.3 se exponen los valores que se lograron obtener en el laboratorio de la Empresa de Producciones Electromecánicas de un transformador de distribución cuyas características están recogidas en la Tabla I.5 de este propio anexo, a partir de los instrumentos que se disponen para la determinación de los parámetros. Otros valores fueron aproximados a partir de los valores obtenidos en la referencia antes citada.

Tabla I.3 Parámetros del Modelo II implementado en MatLab

Parámetros del Modelo II	
R1	500 Ω
L1	0,00856 mH
C1	0,021063 μ F
R2	558,54 Ω
L2	0,0046 mH
C2	0,00302967 μ F
R3	1000 Ω
L3	0,03689 mH
C3	0,00512 μ F
R4	1500 Ω
L4	0,048296 mH
C4	0,00022167 μ F
C5	0,004221 μ F
C6	0,00019152 μ F
R	1000 n Ω
R5	30 Ω

Tabla I.4 Componentes agregados al Modelo II

Componentes	Características de los componentes
Fuente de impulso	Tipo rampa
Bloque que contiene la forma de onda	<p>Función de la forma de onda</p> $f(u) = (40.2974 / (\exp(-((0.87e-6)/(5e-5)) * (2 * (5e-5)/(0.87e-6))^{0.5}))) * ((u/0.87e-6)^2) / (1 + ((u/0.87e-6)^2) * \exp(-u/5e-5))$
Bloque controlador de fuente de voltaje	Es el encargado de convertir la señal de entrada en una equivalente de voltaje.
2 Voltímetros	Para realizar las mediciones de los Voltajes Primario y Secundarios.
1 Scope	Para obtener la formas de ondas de los voltajes.

Modelo III**Tabla I.5 Características Constructivas del Transformador de 25 kVA**

Características del Transformador de 25 kVA	
Transformador monofásico de distribución	
Marca	Latino
Modelo	SH6
Potencia	25 kVA
Características del devanado	
Tensión primaria	7620 V
Tensión secundaria	120/240 V
Espiras por primario	1334 vueltas
Capas del devanado primario	17 capas
Calibre del devanado primario	No. 15 AWG
Espiras por secundario	40 vueltas
Capas del devanado secundario	10 capas
Calibre del devanando secundario	Folio 1,5x12 mm

Tabla I.6 Parámetros del Modelo III implementado en ATP

Parámetros del Transformador de 25 kVA	
R1	11,08 Ω
R2	0,0125 Ω
Rm	772,2342 Ω
Xm	2,0078 H
L1	0,1056 H
L2	1,0472e-4 H

Tabla I.7 Componentes agregados al Modelo III para modelar el cortocircuito.

Elemento		Características	
Fuente de voltaje monofásica		7620 V ,60 Hz	
Carga monofásica		100 Ω ,0,12 mH	
2 Amperímetros			
2 Voltímetros			
Interruptor	Tiempo de apertura (s)	Tiempo de cierre (s)	
	0,1	0,155	

Tabla I.8 Componentes agregados al Modelo III para modelar la descarga atmosférica.

Elemento		Características	
Fuente de Voltaje		7620 V,50 Hz	
Rama RL		7 Ω , 0,2mH	
Elemento MOV		12000 V (Vref)	
Fuente HEIDLER	Amplitud	300 A	
	Tiempo de frente	1,2 μ s	
	Tiempo de cola	0,5 μ s	
	T start	0,5 s	
	T stop	0,50005 s	

Tabla I.9 Parámetros del Modelo IV implementado en Multisim.

Transformador de 880kVA 13,86 /0,5 kV		
Parámetros	Estado sano	Estado de Falla
L1	0,01185 H	0,01189 H
R1	900,255 Ω	900,255 Ω
C1	2,918E-08 F	2,984E-08 F
L2	0,0001383 H	0,0001366 H
R2	252,275 Ω	247,001 Ω
C2	7,321E-08 F	7,529E-08
L3	1,090E-05 H	6,721E-06 H
R3	38,859 Ω	22,483 Ω
C3	2,633E-07 F	4,287E-07 F
L4	2,8582E-06 H	2,11E-06 H
R4	19,8965 Ω	13,369 Ω
C4	5,266E-07 F	7,105E-07 F
L5	5,922E-05 H	6,119E-05 H
R5	586,728 Ω	735,3937 Ω
C5	1,067E-09 F	1,067E-09 F

Anexo II

Para la determinación de los parámetros del transformador se realizaron las pruebas que se mencionan en el acápite 1.4 del presente trabajo donde se utiliza la norma citada en [12]. En la tabla se recogen las características metrológicas de los instrumentos de medición que se disponen para la realización de los ensayos.

Tabla II.1 Características metrológicas de los instrumentos a utilizar.

Instrumentos	Parámetros de medición	Clase de exactitud	Resolución
Multímetro de potencia	Tensión Intensidad Potencia activa	0,5 o mejor 0,5 o mejor 0,5 o mejor	0,1 V o mejor 0,1 A o mejor 100 W o mejor
Ohmímetro para transformadores	Resistencia	1,0 o mejor	1,0 mΩ

II.1 Esquema de conexión y procedimiento para realizar el ensayo de cortocircuito

Las mediciones se realizan indistintamente sobre el enrollado de alta o baja tensión del transformador, en la toma (TAP) principal del mismo.

El esquema de conexión, y el procedimiento que se describe a continuación es, para este caso, en que las mediciones se realicen por el enrollado de alta tensión.

NOTA: En el caso que las mediciones se realicen por el enrollado de baja tensión, se cortocircuita el enrollado de alta tensión y se realiza el mismo procedimiento acorde con la nueva conexión realizada.

Esquemas de conexión

En la Figura II a) se muestra el esquema de conexión monofásico para realizar el ensayo de cortocircuito.

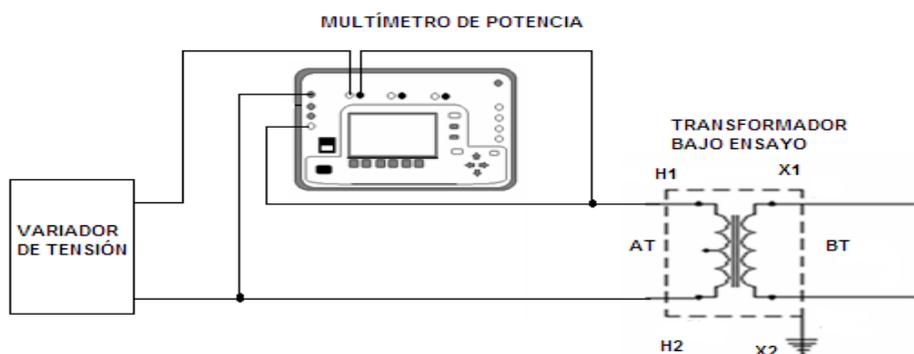


Figura II a) Esquema de conexión monofásico

Mediante un SCADA, que permite recopilar los datos de las mediciones, se accede a los datos de tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva y ángulo de potencia. Esto posibilita trazar la característica de cortocircuito, ver Figura II b)

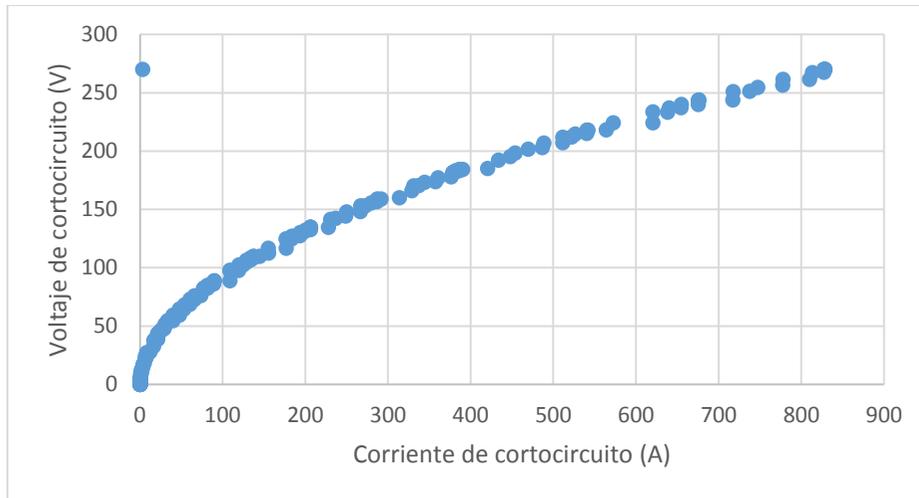


Figura II b) Característica de cortocircuito del Transformador de 25 kVA

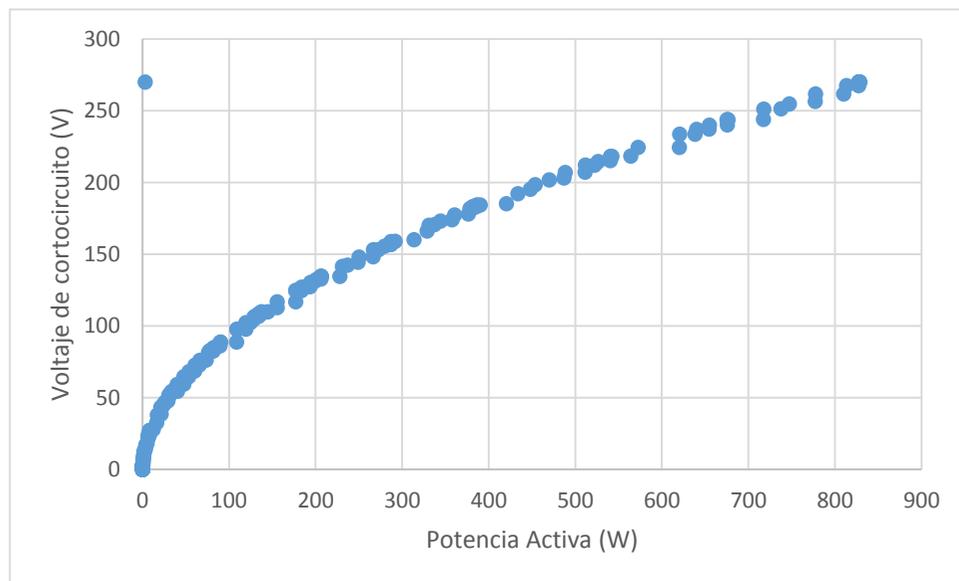


Figura II c) Característica de tensión contra potencia activa del transformador de 25 kVA.

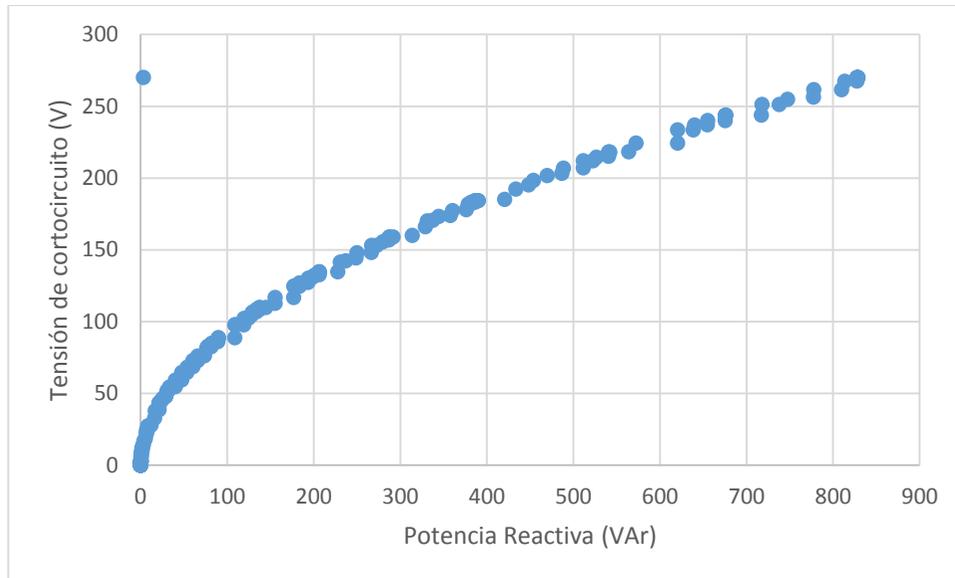


Figura II d) Característica de tensión contra potencia reactiva del transformador de 25 kVA.

II.2 Esquema de conexión y procedimiento para realizar el ensayo de vacío

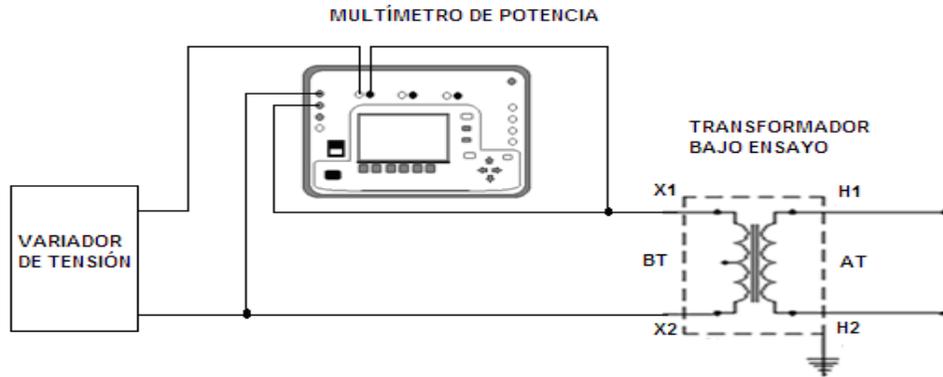
Las mediciones se pueden realizar indistintamente sobre el enrollado de baja o alta tensión del transformador, en la toma (TAP) principal del mismo o sobre otra toma si esta no es inferior al 25 % del arrollamiento completo.

El esquema de conexión, y el procedimiento que se describe a continuación es aplicable en el caso que las mediciones se realicen por el enrollado de baja tensión.

NOTA: En el caso que las mediciones se realicen por el enrollado de alta tensión, el enrollado de baja tensión se deja en circuito abierto y se realiza el mismo procedimiento acorde con la nueva conexión realizada.

Esquema de conexión

En la Figura II e) se muestra el esquema de conexión monofásico para realizar el ensayo de vacío.



II e) Esquema de conexión monofásico

De igual forma que en la prueba anterior mediante un SCADA, que permite recopilar los datos de las mediciones, se accede a los datos de tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva y ángulo de potencia. Esto posibilita trazar la característica de vacío, ver Figura II f).

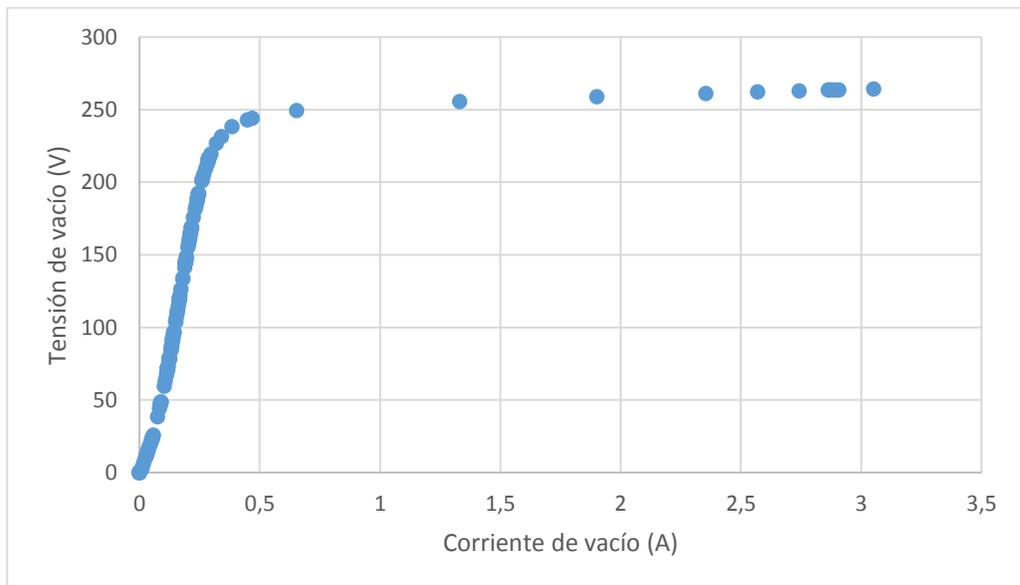


Figura II f) Característica de vacío del Transformador de 25 kVA

Otras características que se trazan son las de tensión contra potencia activa, tensión contra potencia reactiva, que se representan en las Figuras II d) y II e) respectivamente.

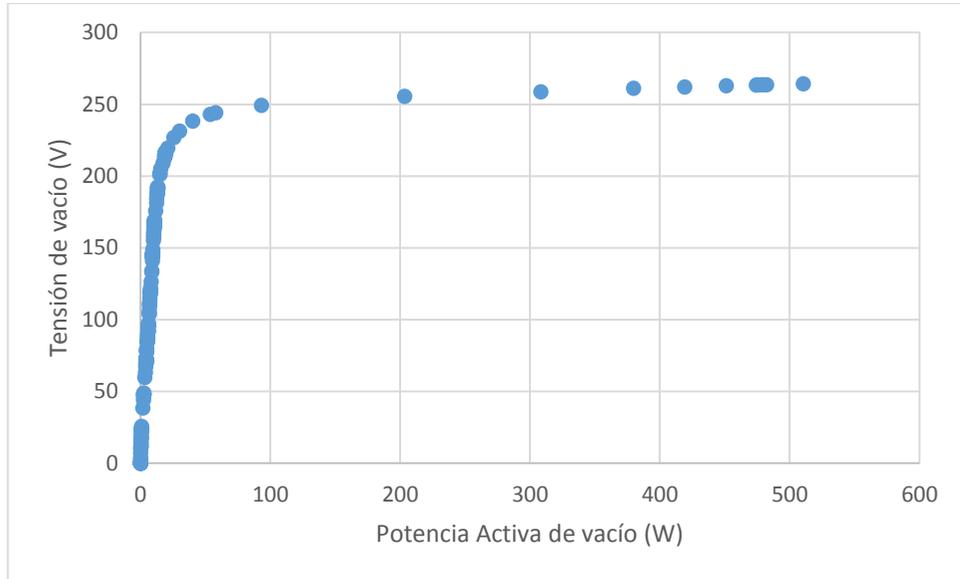


Figura II g) Característica de tensión contra potencia activa del transformador de 25 kVA.

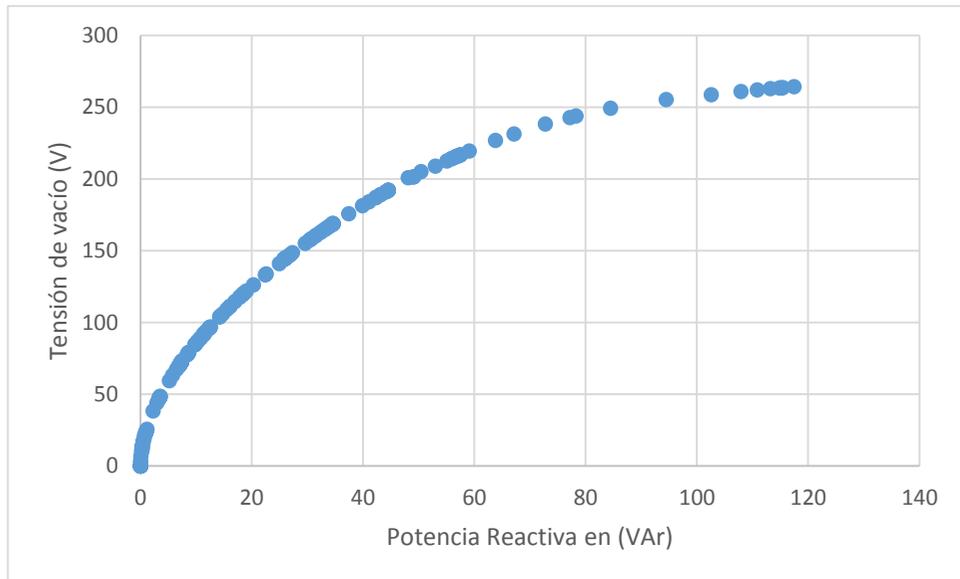


Figura II h) Característica de tensión contra potencia reactiva del transformador de 25 kVA.