

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Título del trabajo: Modelo de transformadores para diferentes condiciones de operación.

Autor del trabajo: Roberto Solis Alonso.

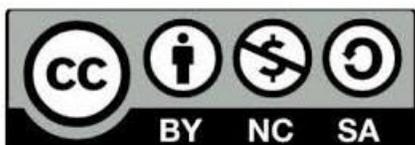
Tutores del trabajo: Alberto Limonte Muñoz.

Santa Clara, Junio de 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

RESUMEN

Los transformadores son componentes esenciales en los sistemas Eléctricos de Potencia, pues estos permiten la transmisión de energía eléctrica que se producen en las centrales generadoras, así como la distribución a diferentes tipos de consumidores, sin embargo después de las líneas de transmisión son los elementos más propensos a fenómenos transitorios. Debido a esto es de suma importancia conocer el comportamiento de estos dispositivos para lograr un correcto manejo y diseño de los mismos. El propósito de este trabajo es la descripción del comportamiento de los transformadores ante transitorios mediante el uso de los programas MatLab/Simulink. De ahí que se realizó la modelación de diferentes transitorios electromagnéticos que ocurren en el transformador en condiciones que difieren a las de estado estable de explotación para la obtención de las respuestas que ofrece el dispositivo ante estas situaciones. Se utilizaron diferentes métodos de investigación entre estos: revisión documental y consulta a especialistas. Se presentan los fundamentos teóricos y las técnicas que sustentan el procedimiento de la modelación de los transformadores ante distintas condiciones de operación. Con el uso del MatLab/Simulink 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 condiciones no estables, resultados que validan la investigación realizada mediante la comparación con los alcanzados por otros autores.

Palabras Clave: transformadores, Matlab/Simulink, modelación.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ÍNDICE	4
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Generalidades sobre transformadores y su modelación.	5
1.1 Introducción	5
1.2 Generalidades del transformador	6
1.2.1 Definición	6
1.2.2 Transformador ideal:	7
1.2.3 Transformador real.....	10
1.2.4 Clasificación de los transformadores	10
1.2.5 El transformador monofásico	11
1.2.6 Características constructivas del transformador monofásico	11
1.2.7 El transformador trifásico	13
1.2.8 Características constructivas del transformador trifásico	13
1.2.9 Circuitos equivalentes del transformador trifásico	14
1.2.10 Permeabilidad magnética de un material	17
1.2.11 Curva de saturación	17
1.2.12 Efecto de Histéresis	20
1.2.13 Efecto de las Corrientes parásitas o de Eddy o de Foucault.....	21
1.3 Modelación de transformadores eléctricos	23
1.3.1 Clasificación de técnicas empleadas en la modelización de transformadores. ...	24
1.4 Consideraciones finales del capítulo	29
CAPÍTULO 2. Simulación de transformadores trifásicos con diferentes modelos	30
2.1 Modelos utilizados para la simulación	30
2.2 Modelos implementados para las simulaciones	36

2.2.1 Modelo usando el bloque trifásico de dos del transformador devanados	38
2.2.2 Modelo usando el transformador trifásico de dos devanados con armónicos en el suministro y sin considerar la saturación.....	41
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	55
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) modernos básicamente trabajan con corriente alterna y son los encargados de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica a todos los consumidores de un país o región. Sin esa energía eléctrica es inconcebible el desarrollo alcanzado por la humanidad. Se puede afirmar sin temor a equivocación que los transformadores son elementos esenciales de esos SEP dada sus funciones dentro de los mismos. El transformador permite la generación al voltaje más económico (donde el costo del aislamiento usado en los generadores es la principal limitante económica) para esa parte de un SEP, así como la transmisión de esa energía eléctrica a grandes distancias al voltaje más económico para las líneas (en este caso siempre se plantea que mientras mayor sea el voltaje para una misma potencia a transmitir, se reducen las pérdidas de transmisión).

Sin el transformador sencillamente no sería posible usar la potencia eléctrica en muchas de las formas que se utiliza hoy en día.

En un sistema de potencia moderno, la potencia eléctrica se genera en voltajes de 12 a 25 kV. Los transformadores elevan el voltaje de 110kV a 1 000kV para trasmitirlo a largas distancias con muy bajas pérdidas. Los transformadores bajan luego el voltaje al rango de 12 a 34.5 kV para la distribución local y permitir finalmente el uso de la potencia en los hogares, oficinas y fábricas a voltajes tan bajos como, 120 V.

Los transformadores, sobre todo los de potencia trifásicos, son costosos y la experimentación real con los mismos es también costosa, tanto desde el punto de vista de los que ya están en servicio (por las posibles afectaciones a la red y los consumidores de las mismas) como desde el punto de vista de las facilidades y costo de la instrumentación. Por eso, una variante de aproximación al análisis de su comportamiento es la simulación mediante modelos más o menos precisos, específicos para cada situación que se desea analizar, así por ejemplo, estos transformadores son modelados en estado estable mediante el conocido "circuito equivalente" por fase, en cualquiera de sus versiones conocidas, esto es, el exacto, el aproximado y el simplificado. Sin embargo, cuando se presentan condiciones de operación que difieren por sus características, de las denominadas condiciones de operación estable, por ejemplo, para modelar el comportamiento de estos

equipos ante diferentes fenómenos relacionados con la calidad de la energía ya es necesario recurrir a otros modelos. Muchas publicaciones [9-20] describen dichos modelos, así como los softwares empleados, resultando los más comunes el PSpice, el ATP, y el Matlab los cuales, dado el acelerado desarrollo de los medios de computo, han permitido la implementación de modelos cada vez más “exactos”, en el sentido de la coincidencia de los resultados simulados con los experimentales.

De lo anterior es fácilmente deducible que la modelación de los transformadores para evaluar su comportamiento ante diferentes condiciones de operación es de gran importancia para los especialistas que trabajan vinculados a los mismos. Es conocido que estos equipos forman una parte esencial de los sistemas eléctricos de potencia y que su impacto en la seguridad, fiabilidad y continuidad de servicio es esencial para el buen desenvolvimiento de los mismos, que tiene un severo impacto en la economía y la sociedad moderna.

Problema científico de la investigación:

¿Cómo se comportan los principales parámetros de transformadores trifásicos ante determinadas condiciones que afectan la calidad de la energía y la saturación?

Para dar respuesta a esta interrogante se establece el objetivo general siguiente:

Objetivo General:

- Implementar modelos de transformadores que permitan la evaluación del comportamiento de este equipo; mediante la simulación, ante condiciones de operación que afecten la calidad de la energía y con la presencia de la saturación.

Objetivos específicos:

- Establecer el marco teórico-conceptual sobre la modelación de transformadores para condiciones de operación con efectos de la calidad de la energía y la saturación.
- Implementar las herramientas de software necesarias para el análisis de los resultados de las simulaciones.
- Evaluar los resultados obtenidos a la luz de la teoría conocida o mediante comparación con resultados publicados disponibles.

Para satisfacer el objetivo planteado es necesario resolver las tareas siguientes:

1. Realizar un análisis de la literatura sobre la modelación de transformadores en condiciones de operación diferentes de las de estado estable.

2. Selección de las condiciones y modelos a implementar.
3. Implementación de los modelos en Matlab/Simulink.
4. Analizar los resultados obtenidos a la luz de la teoría establecida
5. Escritura del trabajo.

Sobre la conveniencia del trabajo se puede plantear que el mismo servirá para profundizar en la modelación de la operación de transformadores en condiciones que afectan la calidad de la energía, a las cuales se ven sometidos en su trabajo como parte de los sistemas eléctricos.

Desde el punto de vista de las implicaciones prácticas, el trabajo puede contribuir a resolver tanto un problema puntual en un transformador o grupos de transformadores o subestaciones que se encuentren operando en condiciones de presencia de armónicos, por lo que se considera que tiene potencial generalizador.

En lo referente al valor teórico se puede plantear que aunque la base del conocimiento de los modelos que se emplearán en el trabajo son conocidas, y se conoce que existen ya diferentes softwares con la implementación de algunos aspectos abordados así como los medios técnicos especiales para su aplicación en el mundo, el costo de los mismos es una cuestión a considerar, por lo que; la implementación de los modelos propuestos en el trabajo puede significar un primer paso hacia la solución a un costo relativamente menor y una mayor seguridad al personal que trabaja con estos equipos.

La utilidad metodológica del trabajo consiste en la posibilidad de que los modelos empleados y los resultados del trabajo pueden ser replicados en las empresas adscriptas a la UNE o empresas que operen estos equipos. Además de su empleo en el pregrado y el posgrado para una mejor preparación de estudiantes y egresados en el empleo de la simulación de estos importantes equipos

Estructura del Trabajo

El trabajo está estructurado en introducción, dos capítulos, conclusiones y recomendaciones:

En el capítulo primero se presenta la teoría general de los transformadores, su modelación para diferentes condiciones y con diferentes softwares, con énfasis en los transformadores trifásicos.

En el capítulo segundo se seleccionan modelos disponibles en el Matlab/Simulink, y se implementan simulaciones con los mismos, considerando los efectos de la saturación y de la contaminación armónica sobre variables importantes de transformadores trifásico, como el flujo y las corrientes de magnetización.

CAPÍTULO 1. Generalidades sobre transformadores y su modelación.

1.1 Introducción

Las máquinas eléctricas, cuya acción está basada en la ley de inducción electromagnética se llaman máquinas de inducción. En este mismo fenómeno se basa el funcionamiento de los convertidores inductivos destinados a transformar la energía eléctrica con parámetros de unos valores (corriente, voltaje, frecuencia) en energía de la misma forma, pero con parámetros de otros valores. El convertidor inductivo más sencillo y difundido, por medio del cual la corriente alterna de una tensión se transforma en corriente alterna de otro voltaje es el transformador. En este sus devanados y el circuito magnético son mutuamente inmóviles y el proceso de la variación periódica del campo magnético por el cual se induce la fuerza electromagnética (f.e.m.) en los devanados, se realiza eléctricamente.

El transformador como convertidor de energía eléctrica tiene un empleo bastante amplio. Con su ayuda se efectúa la transmisión de la energía eléctrica desde las centrales eléctricas hasta sus consumidores. En dicha transmisión el nivel de la tensión debe cambiar repetidamente. Por esta razón, la potencia total instalada de los transformadores, en los sistemas eléctricos modernos, sobrepasa en 5...7 veces la potencia instalada de los generadores.

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 su funcionamiento. Aunque la mayor parte de los SEP se encuentran operando de forma estable, es de vital importancia desarrollar un análisis detallado de su comportamiento cuando existe un cambio súbito en las condiciones del circuito y se propicia la aparición de un transitorio electromagnético, debido a que es en este período cuando sus componentes se someten al máximo nivel de esfuerzo dieléctrico. Los análisis adecuados de estos fenómenos proveen herramientas para poder calcularlos e implementar medidas para su control. 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.

En este capítulo se presenta un minucioso análisis sobre la modelación de transformadores, el cual demostrará que el tema es todavía un tema abierto a la investigación, dada la gran cantidad de modelos encontrados, cada uno de ellos presenta ventajas y limitaciones al analizar el comportamiento del transformador en situaciones de interés que se dan en la aplicación práctica de este importantísimo dispositivo de los SEP. Debido a que diferentes autores han abordado la investigación sobre el tema de forma extensa y complicada y otros que ven los fenómenos de una forma más sencilla y explícita. 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.

1.2 Generalidades del transformador.

1.2.1 Definición

El transformador es un dispositivo que convierte energía eléctrica de un cierto nivel de voltaje, en energía eléctrica de otro nivel de voltaje, por medio de la acción de un campo magnético. Está constituido por dos o más bobinas de alambre, aisladas entre sí eléctricamente por lo general y enrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. El transformador funciona según el principio de la inducción mutua entre dos (o más) bobinas o circuitos acoplados inductivamente.

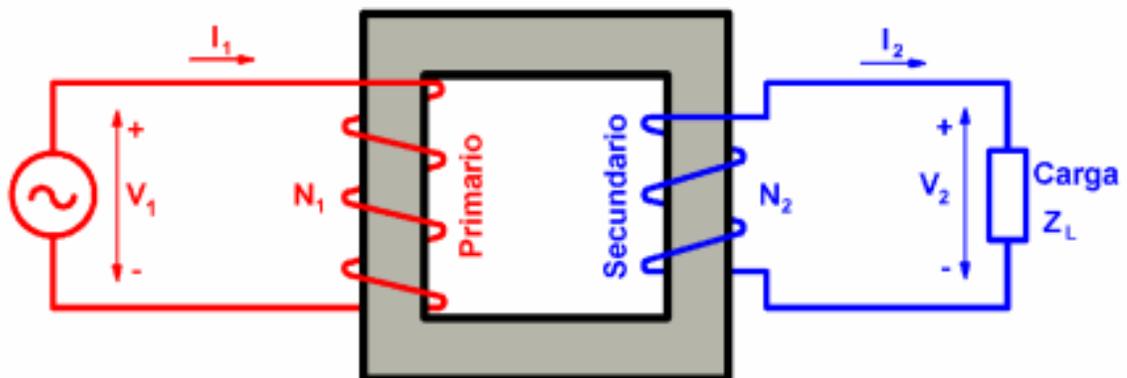


Figura 1.1 Representación esquemática del transformador.

La bobina primaria recibe un voltaje alterno que hará circular, por ella, una corriente alterna. Esta corriente, al circular por las n_1 vueltas de dicha bobina posee una fuerza magnetomotriz (fmm) que establecerá en el circuito magnético; formado por el núcleo, un flujo magnético. Como ambas bobinas de N_1 y N_2 vueltas respectivamente está enrolladas sobre el núcleo, ambas serán atravesada por este flujo alterno y en ambas, se inducirán fuerzas electromotrices E_1 y E_2 según la Ley de Faraday, ecuación 1.1. La razón de la transformación del voltaje entre el bobinado "Primario" y el "Secundario" depende del número de vueltas que tenga cada uno. Si el número de vueltas del secundario es el triple del primario, en el secundario habrá el triple de voltaje.

Un transformador puede ser "elevador o reductor" dependiendo del número de espiras de cada bobinado. Cuando el secundario tiene un mayor número de vueltas que el primario, el voltaje en aquel es mayor que en el primario y, por consiguiente, el transformador aumenta el voltaje. Cuando el secundario tiene un número menor de vueltas que el primario, el transformador reduce el voltaje. Sin importar cuál sea el caso, la relación siempre se da en términos del voltaje en el primario, el cual puede aumentarse o reducirse en el devanado secundario.

Si se supone que el transformador es ideal (la potencia que se le entrega es igual a la que se obtiene de él), o sea, se desprecian las pérdidas por calor y otras, entonces:

$$P_{ent} = P_{sal}$$

Si tenemos los datos de corriente y voltaje, se puede averiguar su potencia usando la siguiente fórmula:

$$S = V * I \quad (1.1)$$

Así, para conocer la corriente en el secundario si se tiene la corriente I_p (corriente en el primario), N_p (espiras en el primario) y N_s (espiras en el secundario) se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_s = \frac{N_p * I_p}{N_s} \quad \text{ó} \quad \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1.2)$$

1.2.2 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 [1].

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

$$\phi = \phi_m \text{sen} \omega t \quad (\text{Wb}) \quad (1.3)$$

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

$$e_1 = N_1 * \omega * \phi_m * \text{sen}(\omega t - 90^\circ) \quad (\text{V}) \quad (1.4)$$

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:

$$E_1 = \frac{N_1 * \omega * \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 * 2\pi f * \phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44f * N_1 * \phi_m \quad (\text{V}) \quad (1.5)$$

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:

$$\phi = \frac{E_1}{4,44fN_1} = \frac{V_1}{4,44fN_1} \quad (\text{Wb}) \quad (1.6)$$

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:

$$e_2 = N_2 * \omega * \phi_m * \text{sen}(\omega t - 90^\circ) (V) \quad (1.7)$$

y su valor eficaz es:

$$E_2 = 4.44 f N_2 \phi_m (V) \quad (1.8)$$

Como las fem e_1 y e_2 son inducidas por el mismo flujo están en fase y difieren en magnitud por la diferencia en el número de vueltas [2]. El cociente de las expresiones eficaces de fem se conoce como relación de transformación:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1.9)$$

El circuito secundario es donde se conectan las cargas, si se cierra a través de una carga circulará una corriente por este (I_2) 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:

$$F_1 = R + F_2 (A-v) \quad (1.10)$$

Donde:

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

F_2 -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:

$$I_1 = \frac{R}{N_1} + \frac{N_2 * I_2}{N_1} = I_{exc} + \frac{I_2}{a} = I_{exc} + I_2' (A) \quad (1.11)$$

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.

1.2.3 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 [2] 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.

1.2.4 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[3]:

- ◆ 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.

1.2.5 El transformador monofásico

La característica distintiva de este transformador es su fuente de alimentación que como su nombre lo indica 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.

1.2.6 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).

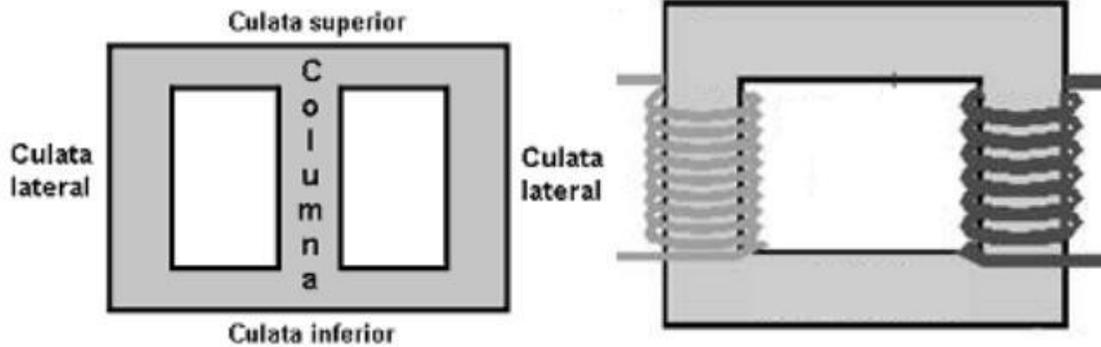


Figura 1.2. Circuitos magnéticos de transformadores monofásicos.

♦ **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 sea la disposición relativa entre los enrollados de A.T. y B.T [4].

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].

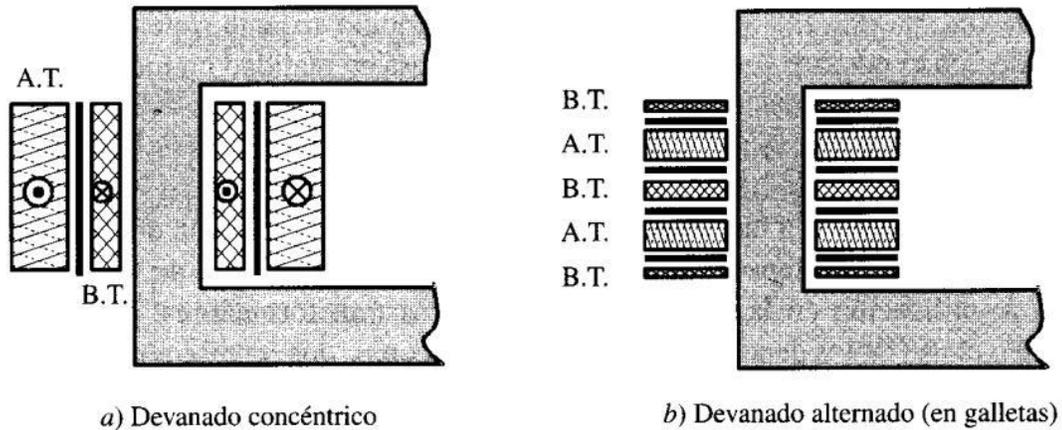


Figura 1.3. Devanados concéntricos y distribuidos.

1.2.7 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.

1.2.8 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 [5].

Dentro de las estructuras de núcleo más utilizadas están las de columnas que no son más que aquellos cuyos núcleos están formados por material ferromagnético. En las Figuras 1.4 y

1.5 se observan los tipos de estructuras del transformador trifásico de tres columnas y el transformador trifásico de cinco columnas respectivamente.

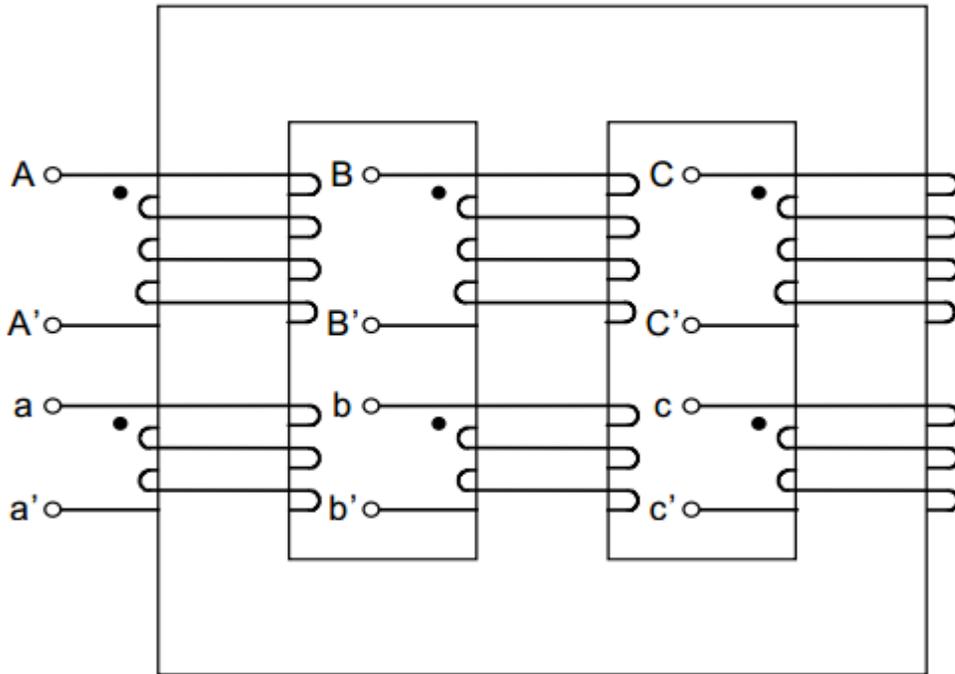


Figura 1.4 Núcleo de un transformador trifásico de tres columnas.

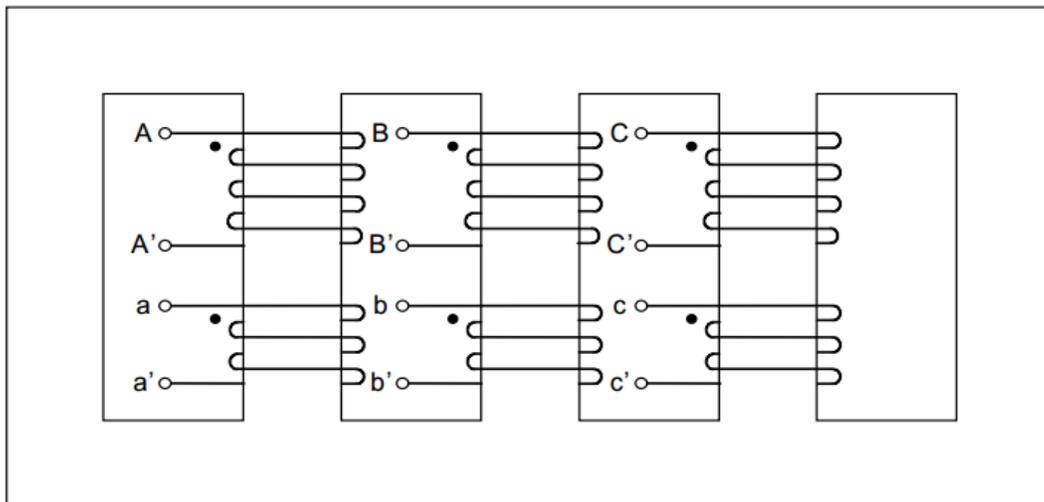


Figura 1.5 Núcleo de un transformador trifásico de cinco columnas.

1.2.9 Circuitos equivalentes del transformador trifásico

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 [6]. En la Figura 1.6 se muestra el circuito equivalente exacto del transformador (Modelo de Steinmetz) referido a primario.

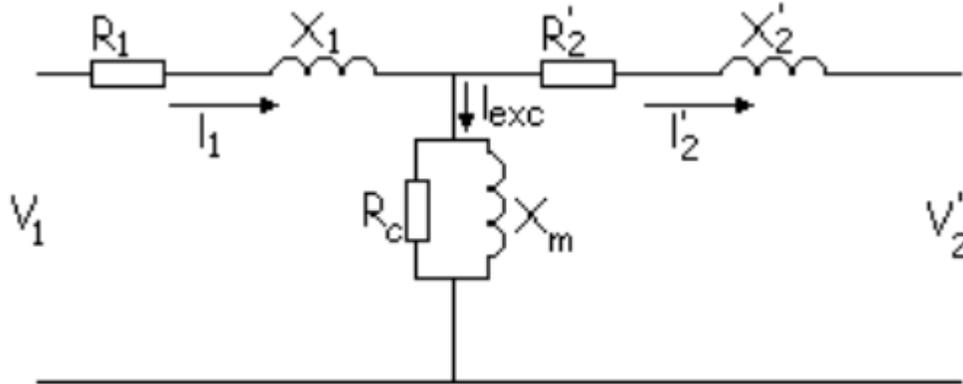


Figura 1.6 Circuito equivalente exacto del transformador.

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

$$V_1 = I_1 * Z_1 + E_1 \quad (V) \quad (1.12)$$

$$I_1 = I_{exc} + I_2' \quad (A) \quad (1.13)$$

$$V_2' = E_2' - I_2' Z_2' \quad (V) \quad (1.14)$$

Donde todos los parámetros con superíndice 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(1.7).

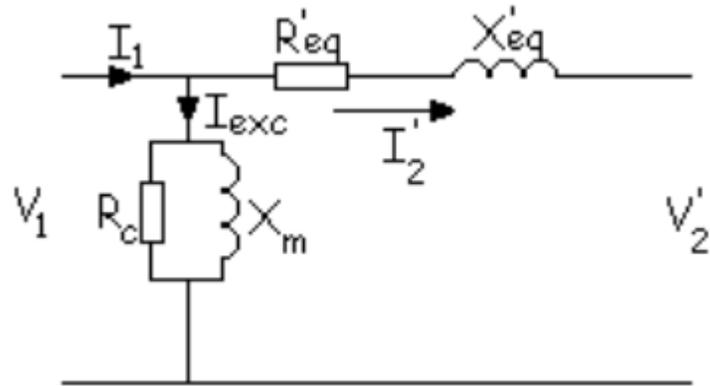


Figura 1.7 Circuito equivalente aproximado referido a primario.

Donde se obtiene una impedancia equivalente de:

$$Req' = R_1 + R_2' \Omega \quad (1.15)$$

$$Xeq' = x_1 + x_2' \Omega \quad (1.16)$$

Para cálculos más sencillos según [7] puede hacerse uso del circuito equivalente simplificado donde se desprecia la corriente de excitación I_{exc} , tal como se presenta en la Figura (1.8).

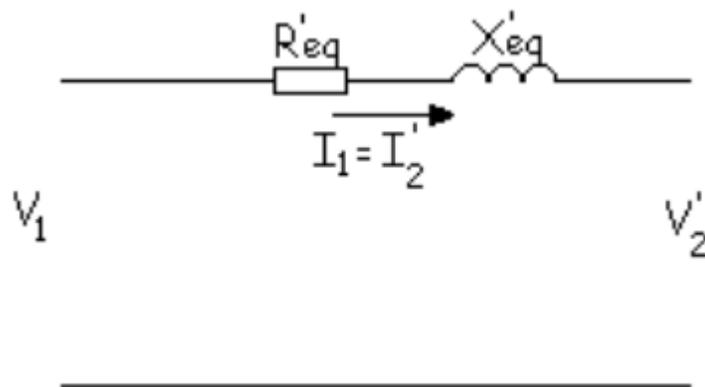


Figura 1.8 Circuito equivalente simplificado del transformador.

1.2.10 Permeabilidad magnética de un material

La permeabilidad magnética[20]. es una característica que determina los niveles de la Densidad de flujo magnético e intensidad de campo que se permiten dentro de un núcleo dado, es decir, la facilidad que el material da para que se desarrolle un campo magnético en el mismo. Claro está que esta característica va a depender del tipo de material utilizado para la construcción del núcleo.

La permeabilidad magnética de un material difiere mucho si se compara con la permeabilidad de espacio libre o vacío. Así, se define la permeabilidad relativa del material que se expresa como:

$$\mu = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.17)$$

Donde:

μ_r = permeabilidad relativa

μ_0 = permeabilidad en vacío

μ = permeabilidad magnética

La μ_0 que define la permeabilidad del vacío tiene el siguiente valor:

$$\mu_0 = 4 * 10^{-7} \frac{H}{m} \quad (1.18)$$

1.2.11 Curva de saturación

El "efecto de saturación" es un efecto sumamente importante que define significativamente el cambio de las características magnéticas del transformador. Anteriormente se expuso el tema de permeabilidad magnética como la facilidad que muestra cierto material o espacio para que, en él, se pueda establecer un campo magnético.

En la figura 1.9 una curva presenta un grado de linealidad para un intervalo de valores determinado y también, muestran una reducción de su pendiente cuando se llega a un nivel de valores de coordenadas (H_0 y B_0).

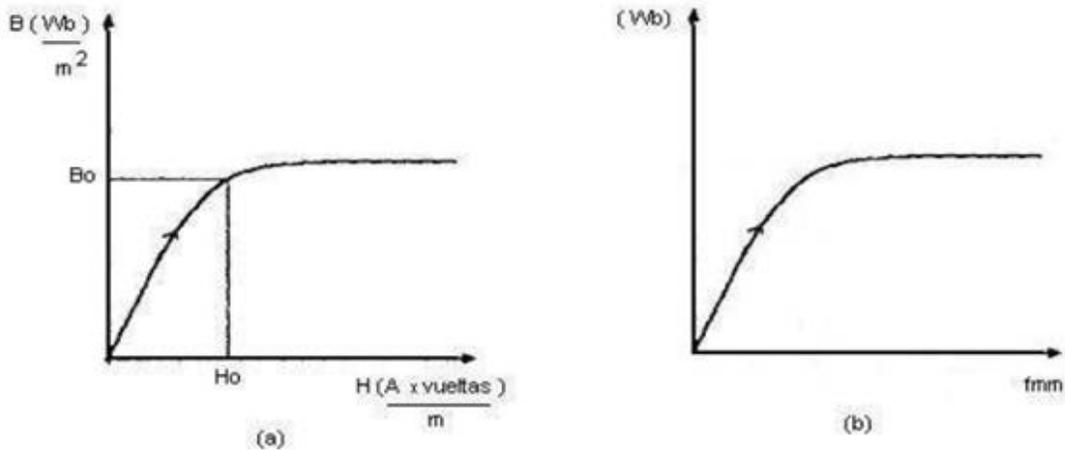
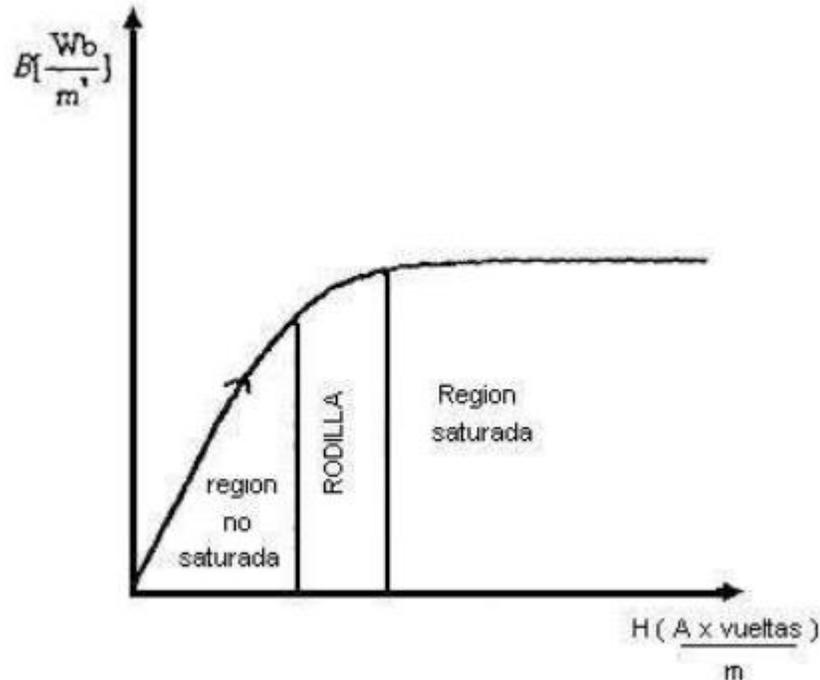


Figura 1.9. Curvas de saturación. a) Dobles extremos cuando se llega a un nivel de valores H_0 y B_0 , b) Linealidad para un intervalo determinado de valores.

Si un transformador se somete a una fuente de alimentación de corriente continua (CE) entonces se obtienen las curvas características de la figura 1.9. Como se sabe que la intensidad de campo magnético H es proporcional a la fuerza magnetomotriz f_{mm} y que la densidad de flujo magnético B es proporcional al flujo magnético ϕ_m , entonces se puede emplear:

$$B = \mu * H \quad (1.18)$$

Para establecer los esquemas de la figura 1.10, considerando la existencia de una proporcionalidad entre B y H que da por resultado una proporcionalidad entre ϕ_m y la f_{mm}



Figuras 1.10. Regiones de la curva de saturación.

Como lo muestra la figura 1.10, existen tres regiones en una curva de saturación, la primera región define una curva casi lineal en donde la constante de proporcionalidad entre B y H es la permeabilidad magnética del material μ que ya no cuenta como un valor constante debido a que se manejan condiciones reales para la magnetización del núcleo con la fuente d-e-c-d (la curva de saturación también recibe el nombre de curva de magnetización); en esta región se observa que con un incremento pequeño de intensidad de campo H , se logra un crecimiento considerable en la densidad de flujo magnético en el núcleo, o lo que es lo mismo, con una pequeña cantidad de corriente (de la figura 1.9.(b)) se obtiene una gran elevación de flujo magnético.

La segunda región es de transición generalmente llamada "Rodilla de la curva" que es el paso entre la parte no-saturada y la saturada; es una zona delicada debido a que cualquier cambio de las características del núcleo dentro de la misma puede provocar un estado de saturación inequívoco.

La última región que se ve reflejada por un trazo casi horizontal nos demuestra que se necesitarán grandes niveles de H para obtener cambios pequeños en la densidad de flujo magnético. La no-linealidad de las últimas dos zonas crea graves problemas en el núcleo del transformador originando así, la variación de las características ideales

establecidas. Por eso, es deseable operar el dispositivo antes de la región de saturación cuando se encuentra operando en la rodilla de la curva con la finalidad de obtener el mayor rendimiento del transformador.

1.2.12 Efecto de Histéresis

Si al contrario, se emplea una fuente de corriente alterna para el transformador real, obtendríamos lo siguiente.

La figura 1.11 muestra el efecto que produce una fuente de corriente alterna cuando se alimenta un núcleo de material ferromagnético; se observa que la curva ya no es la misma que la presentada en la figura 1.10 debido a que en esta existe una traslación de la curva a lo largo de los ejes.

La traslación se debe a que la fuente de alimentación usada es una fuente alterna con una corriente como la que se muestra en la figura 1.11(a) empezando por una corriente "i" igual a cero amperes y aumentándola hasta llegar a un valor límite "i (t)" que refleja una fmm máxima antes de que la curva entre en la región de saturación.

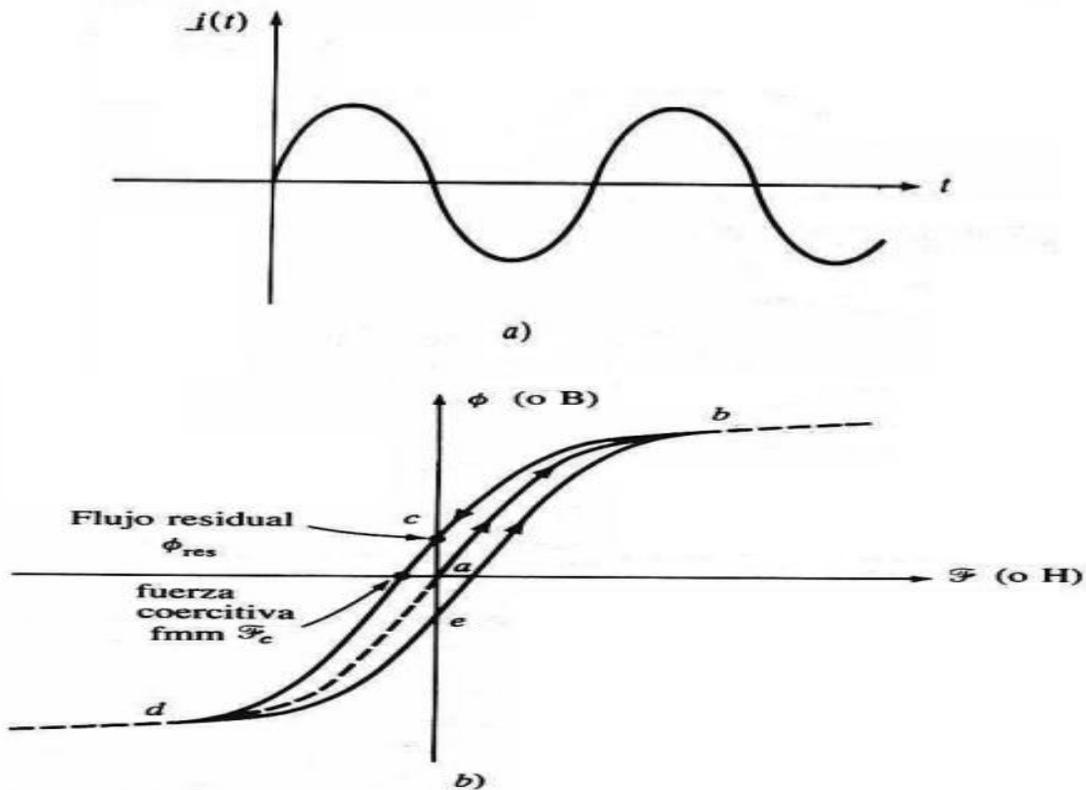


Figura 1.11. Efecto de histéresis a) Corriente alterna. b) Efecto de la corriente alterna en el material ferromagnético.

En el punto "b" en el que la fmm, es límite, el flujo magnético presenta casi su máximo nivel permisible para la corriente $i(t)$ aplicada, acto seguido, la corriente tiende a bajar hasta que cruza por cero, en este instante de tiempo la fmm debe ser nula siguiendo los argumentos previamente establecidos y el flujo también; pero, como se muestra en la figura 1.11(b) esto no sucede, permanece todavía un flujo en el núcleo ferromagnético que impide que la curva de magnetización continúe con su trayectoria inicial mostrada en la figura 1.10.

El flujo magnético que permanece aun cuando la corriente es cero se le conoce como "flujo residual" y se presenta por la acción de un "magnetismo remanente" propio del material.

En el esquema de la figura 1.11(a) se observa que: el flujo en el núcleo es inicialmente cero. Mientras la corriente se aumenta por primera vez, el flujo en el núcleo traza la ruta a-b en la figura 1.11 (b). Es básicamente la curva de saturación que se muestra en la figura 1.11 (b). Sin embargo, cuando la corriente disminuye nuevamente, el flujo sigue una ruta diferente de la seguida cuando la corriente se aumentó. Cuando la corriente disminuye, el flujo en el núcleo sigue la ruta b-c-d y luego cuando la corriente aumenta nuevamente, el flujo sigue la ruta d-e-b. La cantidad de flujo presente en el núcleo depende solamente de la cantidad de corriente aplicada a su devanado, sino también de la historia previa del flujo en el núcleo. Esta dependencia de la historia precedente del flujo y la falla resultante para volver sobre el trazo de la trayectoria del flujo se llama histéresis. La trayectoria b-c-d-e-b trazada en la figura 1.11 (b) mientras la corriente aplicada cambia, se llama curva de histéresis.

Si una fuerza magnetomotriz grande se aplica primero al núcleo y luego se elimina, la trayectoria del flujo en el núcleo será a-b-c. Cuando la fuerza magnetomotriz se elimina, el flujo en el núcleo no llega a cero. En lugar de esto, un campo magnético permanece en él.

Este campo magnético se denomina flujo remanente en el núcleo. Para llevar el flujo hasta cero, una cantidad de fuerza magnetomotriz, conocida como la fuerza coercitiva \mathfrak{H}_c , se debe aplicar al núcleo en la dirección opuesta.

1.2.13 Efecto de las Corrientes parásitas o de Eddy o de Foucault

El núcleo de un transformador tiene también ciertas propiedades conductoras como las del material que se utiliza para los devanados, por tanto, a presencia de un flujo magnético en el

núcleo se originan corrientes que circulan a lo largo del mismo como se muestra en la figura 1.12.

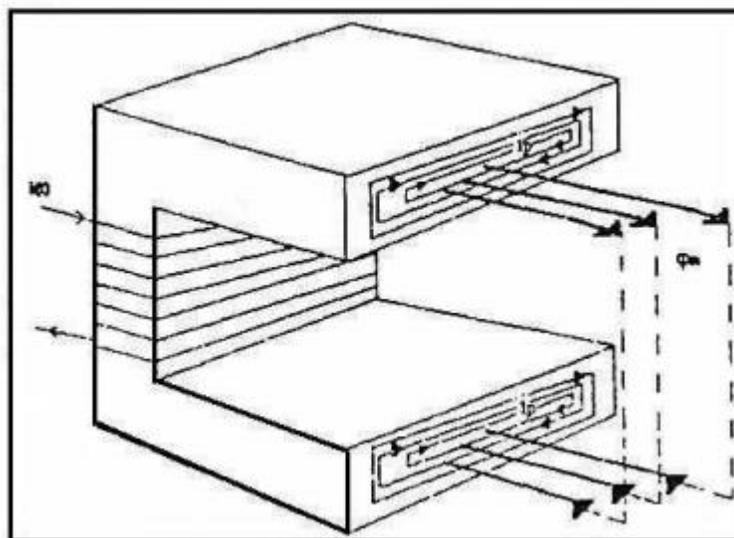


Figura 1.12. Corte de núcleo con una circulación del flujo magnético mutuo.

En la figura 1.12 se muestra un corte de núcleo con una circulación de flujo magnético mutuo perpendicular a su área transversal; también, en la superficie donde se realiza el corte se trazan una serie de curvas de corriente de trayectorias cerradas.

El flujo sabemos que se produce debido a una fmm aplicada por efecto de la circulación de una corriente total a lo largo de las “N” espiras del devanado, pero, ¿y el flujo de curvas cerradas del corte transversa? El flujo de curvas cerradas es la corriente inducida causada por la variación de las fluctuaciones magnéticas dentro del material y se le conoce con el nombre de “corrientes parásitas” o “corrientes de Foucault” o “corrientes de Eddy”.

También se sabe que todo material de características conductivas muestra un cierto nivel de resistencia que determina el paso de corriente, puesto que el material del núcleo también tiene características conductivas y por lo tanto, presenta un nivel relativo de resistencia.

La resistencia del núcleo, que es proporcional al tamaño de su sección transversal, a la resistividad del material con el que se construye y a la longitud de la trayectoria descrita por el flujo de las corrientes parásitas, limita el paso de las mismas ocasionando disipación de calor por efecto Joule y por supuesto, pérdidas de energía en el núcleo.

Uno de los métodos más utilizados para minimizar el flujo de corrientes parásitas ha sido el laminado con el objeto de reducir la longitud de su trayectoria, dividiendo su sección

transversal en pequeñas áreas y mejorando la resistencia de cada laminación con una cubierta de barniz aislante como se muestra en la figura 1.13.

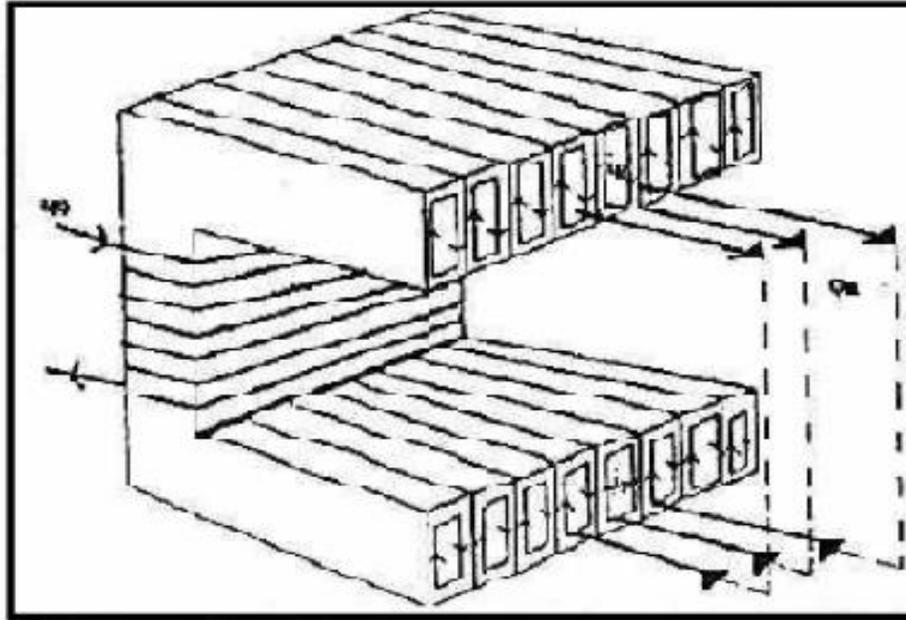


Figura 1.13. División de la sección transversal de un núcleo para minimizar el flujo de corrientes parásitas.

1.3 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 formados 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 [8].

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.

1.3.1 Clasificación de técnicas empleadas en la modelización de transformadores.

♦ Modelos basados en inductancias propias y mutuas.

El primer trabajo analítico que sigue esta línea es presentado por Rabins [9]. 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 refiere en [9]. La generalización para transformadores trifásicos de múltiples devanados la presentan Bradjwajn y otros [10]. 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 [11] critican que los modelos basados en medidas tienen la desventaja de depender de las posibilidades de realizar los ensayos a los transformadores. Pero muchos más coinciden en que es la mejor

manera de asegurar el funcionamiento correcto del modelo. Aunque la generalización de esta técnica parte de los ensayos de laboratorio, de acuerdo al diseño, tamaño, fabricación etc., las predicciones precisas de transformadores sin ensayos previos, no puede ser asegurada.

◆ **Modelos basados en campos electromagnéticos.**

Los diseñadores de grandes transformadores usan métodos de campos electromagnéticos para el cálculo de sus parámetros de diseño. Las técnicas de elementos finitos son las más aceptadas para la solución numérica de problemas de campo magnético. Sin embargo, hay otras técnicas disponibles. Este método no es práctico en simulación tridimensional debido al tiempo que tardan las simulaciones.

◆ **Modelo de transformador MULTI-LEGGED trifásico en ATP utilizando la matriz de inductancia inversa formada directamente.**

Esta técnica presenta un modelo de transformador de tres fases y dos devanados multidisco. Se basa en el análisis de circuitos magnéticos del núcleo y representa el transformador como un conjunto de inductancias acopladas [12]. En este se deriva la matriz de inductancia para un transformador trifásico, de dos devanados y cinco patas con inductancias de fuga constantes. Los enlaces de flujo se eligen como variables de estado, siendo necesario invertir la matriz de inductancia para encontrar las corrientes. Se deriva la matriz r para un transformador trifásico, de dos devanados y múltiples patas bajo las condiciones más generales de la saturación de inductividad de fuga y núcleo. Dado que la matriz r se forma directamente en cada paso de tiempo, el cálculo de las corrientes de los enlaces de flujo se convierte simplemente en una multiplicación de matrices. Aunque podría no ser el primer modelo de transformador trifásico construido alrededor de la matriz r basada en topología, se distingue por su simplicidad y robustez debido al uso de enlaces de flujo como variables de estado. Dado que el transformador se define en su tecnología natural, la relación causa-efecto se puede investigar de cerca, y se minimiza el esfuerzo del usuario.

◆ **Modelos basados en el Principio de Dualidad.**

Este procedimiento lo plantea Cherry y lo generaliza Selmon [13]. 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 [13].

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 [9].

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 acoples capacitivos [14].

♦ **Modelo para transformadores de tres devanados tipo núcleo para estudios transitorios de baja frecuencia**[15].

Este modelo es derivado del Principio de la Dualidad. Es un modelo de transformador basado en topología, trifásico, en espiral. Los datos de la placa de datos del transformador, la curva B-H y las dimensiones físicas relativas del núcleo es todo lo que se necesita para su implementación. Aunque las dimensiones del núcleo del transformador y la curva B-H son consideradas como información propietaria por parte de los fabricantes, pueden obtenerse a través de las compañías eléctricas. Si estos datos no están disponibles, los valores genéricos se pueden usar sin tener en cuenta de forma significativa la precisión del modelo. El modelo es sencillo y adecuado para los transitorios de baja frecuencia del sistema de potencia, como las corrientes de irrupción y la ferorresonancia, los cortocircuitos y las anomalías, incluidas las fallas en los devanados del transformador. Como el modelo de

transformador derivado de la dualidad consta solo de elementos de RLC, no se necesita ningún código específico de dispositivo para el código de paso de tiempo EMTP. El modelo permite la incorporación de la histéresis del núcleo y la dependencia de la frecuencia debido a las corrientes parásitas en todos los elementos, incluidas las resistencias del devanado. Se presentan formulaciones más precisas y para determinar los parámetros del modelo, las inductancias de fuga y la curva A-i para cada segmento del núcleo. A diferencia de otros modelos de transformadores derivados de la dualidad este modelo trata las inductancias de fuga y los efectos de acoplamiento del núcleo de una manera integrada. Aunque el modelo de transformador reportado está desarrollado para ATP, se puede mezclar fácilmente para trabajar con todas las versiones de EMTP.

♦ **Modelado Dinámico de Transformadores de Potencia Asimétricos Trifásicos con Histéresis Magnética: Sin Carga y Condiciones de Ingreso [16].**

Este modelo propone e implementa un modelo de dominio de tiempo del núcleo de un transformador trifásico. El modelo tiene en cuenta los efectos dinámicos de histéresis magnética con formaciones de asas mayores y menores, estructuras centrales asimétricas y acoplamiento magnético. El modelo se demuestra y valida con medidas para el estado estable y la operación transitoria (Condiciones sin carga y de arranque) y es capaz de calcular flujos de transformadores, corrientes y formas de onda de voltaje. El modelo de núcleo de tres patas muestra una precisión razonable para las excitaciones dinámicas por las comparaciones de formas de onda de corrientes de entrada simuladas y medidas para diferentes condiciones de arranque. La implementación del modelo es implementado en Pspice.

♦ **Modelo dinámico de un transformador de potencia trifásico.**

Una descripción detallada del modelo y un gran número de aplicaciones está disponible en referencia [17]. Este modelo es relativamente simple y permite un análisis de calidad de estados constantes y transitorios. Una deficiencia importante de este modelo es la considerable discrepancia entre los componentes directos y armónicos de las corrientes calculadas y medidas. La razón principal de esto es la precisión insuficiente al considerar el efecto no lineal del núcleo de acero. El modelo se implementa para un transformador de núcleo de tres columnas fue desarrollado. El objetivo principal es una representación precisa de las corrientes de entrada y las corrientes a diversos niveles de carga, desde la no carga hasta varios cortocircuitos. En el modelo es necesario una reproducción armónica confiable

de las corrientes lo que condiciona que se consideren los efectos no lineales de saturación e histéresis, no así los flujos de fuga dentro del tanque del transformador los cuales se descuidan y solo se consideran aquellos en el aire. Debido a lo anterior, la inductancia de enlace se vuelve constante. La fuga y los flujos mutuos se tratan por separado y todos los efectos no lineales debidos al núcleo de acero se consideran en la determinación de los flujos mutuos. Se tiene en cuenta la relación de saturación de histéresis no lineal, no simétrica, dependiente de la historia entre las fuerzas magnetomotrices (fmm) y los flujos. El uso del modelo solo es incorporado en un programa de simulación de red que trata voltajes y corrientes como cantidades instantáneas con formas de onda arbitrarias, facilitando los estudios de corrientes de entrada, ferorresonancia, generación de armónicos, corte, cargas rectificadoras y otros. La contribución significativa de este modelo es una incorporación simple y eficiente de los efectos no lineales del núcleo de acero en el modelo de transformador trifásico.

♦ **Modelo para parámetros de transformadores de transitorios rápidos .**

Este modelo es utilizado para simular con precisión los procesos transitorios rápidos de sobretensión (VFTO) o descargas parciales que viajan [18] en los devanados del transformador. El modelo de línea (MTL) se considera el mejor enfoque debido a que es válido en un amplio rango de frecuencia (varios MHz) capaz de describir discontinuidad del acoplamiento capacitivo entre las vueltas de un devanado no uniforme. Se basa en los cálculos de parámetros del transformador en lugar de la medición de datos de los mismos ya construidos [19] con el objetivo de que el modelo pueda ser utilizado durante la etapa de diseño del transformador.

• **Modelo del transformador de distribución trifásico para análisis de transitorios de baja frecuencia[14].**

El modelo está basado en un modelo magnético que tiene en cuenta la característica de saturación del núcleo e incluye pérdidas por corrientes parásitas y por histéresis, así como un nuevo procedimiento de estimación de parámetros basado en los resultados que se obtienen en ensayos de laboratorio convencionales e implementados en EMTP. Se ajusta para el análisis de transitorios de baja frecuencia y radica en representar individualmente cada columna del núcleo mediante su propia curva de saturación y su propia componente de pérdidas activas, de manera que se logra caracterizar adecuadamente la asimetría magnética propia del núcleo para un transformador de tres columnas. El modelo permite una

fácil extensión a otros tipos constructivos de transformadores; por ejemplo, el transformador de tres columnas.

1.4 Consideraciones finales del capítulo

La modelación de los transformadores y sobre todo de los trifásicos es de gran importancia, dada la complejidad y costo de la instrumentación para la experimentación real de los mismos. Estos por lo general son de gran potencia nominal y voltajes elevados, lo que encarece la instrumentación. Además, este tipo de transformador ocupa posiciones estratégicas dentro de los sistemas eléctricos de potencia, por lo que es necesario poder analizar su comportamiento ante diferentes fenómenos a los que está sometido, lo que también plantea restricciones a la experimentación, por las implicaciones que la misma pudiera tener sobre los consumidores conectados al transformador, por lo que la simulación mediante modelos adecuados es un paliativo de menor costo e implicaciones económicas y sociales. Para esto se requieren modelos que sean los más apropiados.

Dada la diversidad de fenómenos cuyos efectos se desea simular, aparecen en la literatura científica consultada múltiples modelos, algunos más generales y otros más específicos, sin embargo, solo por las datas de las publicaciones queda claro que esto de la modelación todavía es un campo abierto a la investigación. También es importante la cantidad de herramientas de softwares que se emplean, que van desde el Pspice, el ATP, de implementación del método de elementos finitos, el Matlab/ Simulink, etc.

CAPÍTULO 2. Simulación de transformadores trifásicos con diferentes modelos

2.1 Modelos utilizados para la simulación

Luego de un estudio de las posibilidades que brinda el Matlab/Simulink y su herramienta SimPowerSystem que brinda diversos modelos de transformadores, se decidió implementar la simulación empleando varios de ellos. En este capítulo se describen los basamentos de dichos modelos, la utilización de los mismos en la implementación de modelos con igual carga trifásica y el análisis de los resultados con ambos modelos, fundamentalmente para transformadores trifásicos con núcleos de 3 columnas y con núcleos de 5 columnas, con conexiones (Yg-Yg).

2.1.1 Modelo de transformador trifásico con núcleo de tres o cinco columnas

Este modelo implementa un transformador trifásico a partir de tres transformadores monofásicos. A su vez esos transformadores monofásicos responden al modelo de un transformador monofásico lineal como el que se muestra en la figura 2.1 para el caso de la variante de dos devanados.

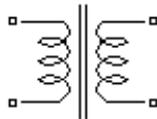


Figura 2.1

Es necesario aclarar que este modelo disponible en el SimPowerSystem del Matlab/Simulink permite seleccionar en el mismo una configuración de dos o tres devanados, esta última se muestra en la figura 2.2

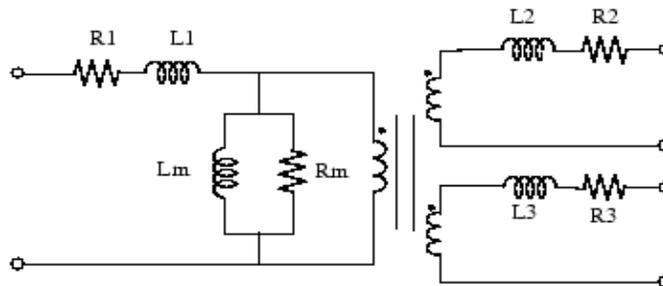


Figura 2.2

El modelo toma en consideración las resistencias de los devanados (R_1, R_2, R_3) y las autoinductancia (L_1, L_2, L_3) de dispersión, así como las características de magnetización del núcleo, la cual es modelada mediante una rama línea con (L_m y R_m). El bloque que representa al transformador trifásico de dos devanados en el SimPowerSystem se muestra en la figura 2.3

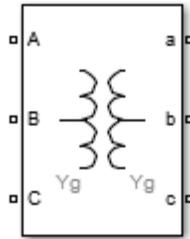


Figura 2.3

2.1.2 Modelo de matriz de inductancias de un transformador trifásico con núcleo de tres columnas

En este se modela el transformador trifásico con un núcleo de tres columnas y dos enrollados por cada fase. A diferencia del modelo anterior del transformador trifásico de que se modela mediante tres transformadores monofásicos separados, este modelo toma en cuenta los acoplamientos entre devanados de diferentes fases. El núcleo y los devanados son mostrados en la figura 2.4

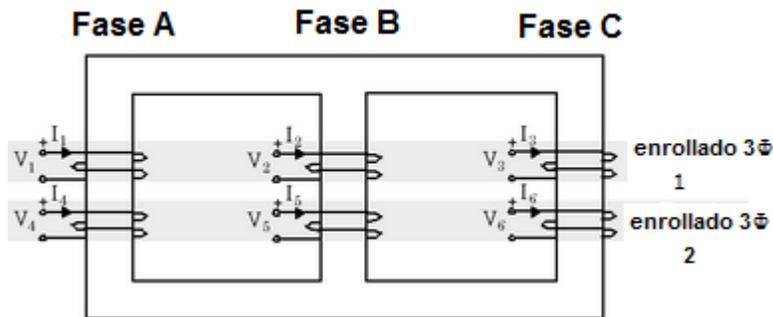


Figura 2.4

Los devanados se numeran como sigue:

1 y 4 Fase A

2 y 5 Fase B

3 y 6 Fase C

Esta geometría del núcleo implica que el devanado 1 esté acoplado a todos los otros devanados de fase (2 a 6). No se debe confundir el número de devanados con el número de fases, este es el modelo de un transformador trifásico (fases A, B y C) de dos devanados (1 y 2)

El modelo está basado en la implementación de la siguiente relación matricial:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{16} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{61} & L_{62} & \dots & L_{66} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_6 \end{bmatrix}$$

Figura 2.5

Donde de R1 a R6 representan las resistencias de los devanados. Los términos de las autoinductancias L_{ii} y los de las inductancias mutuas L_{ij} con $i \neq j$ son calculadas de las relaciones de voltaje, la componente inductiva de la corriente de excitación en vacío y las reactancias de cortocircuito a frecuencia nominal. Dos conjuntos de valores en secuencia positiva y secuencia cero permiten el cálculo de los 6 elementos de la diagonal y los 15 elementos no diagonales de la matriz simétrica de inductancias. Los términos de autoinductancias e inductancias mutuas de la matriz L (6x6) son obtenidos de la corriente de excitación (uno de los devanados trifásicos es alimentado y el otro es dejado abierto) y de las reactancias de cortocircuito de secuencia positiva y de secuencia cero X_{112} y X_{012} medidas con el devanado 1 alimentado y el devanado 2 en corto circuito.

Si se asumen los parámetros de secuencia positiva siguientes:

Q1₁: potencia reactiva trifásica absorbida por el devanado 1 cuando el devanado 1 es alimentado con su voltaje nominal de línea y el devanado 2 está abierto.

Q1₂: potencia reactiva trifásica absorbida por el devanado 2 cuando el devanado 2 es alimentado con su voltaje nominal de línea y el devanado 1 está abierto.

X1₁₂=Reactancia de cortocircuito de secuencia positiva vista desde el devanado 1 cuando el devanado 2 esta cortocircuitado.

La autorreactancia y la reactancia mutua de secuencia positivas están dadas por:

$$X_1(1,1) = \frac{V_{nom1}^2}{Q_{1_1}} \quad (1.18)$$

$$X_1(2,2) = \frac{V_{nom2}^2}{Q_{1_2}} \quad (1.18)$$

$$X_1(1,2) = X_1(2,1) = \sqrt{X_1(2,2) \cdot (X_1(1,1) - X_{1_{12}})} \quad (1.18)$$

Las autorreactancia de secuencia cero $X_0(1,1)$, $X_0(2,2)$ y las reactancias mutuas $X_0(1,2)=X_0(2,1)$ son también calculadas usando ecuaciones similares, con la potencia reactiva medida durante la prueba con voltajes de secuencia cero.

La matriz de (2x2) de las reactancias de secuencia positiva están dadas por:

$$\begin{bmatrix} X_1(1,1) & X_1(1,2) \\ X_1(2,1) & X_1(2,2) \end{bmatrix}$$

Y las de secuencia cero por:

$$\begin{bmatrix} X_0(1,1) & X_0(1,2) \\ X_0(2,1) & X_0(2,2) \end{bmatrix}$$

Lo que se puede extender a una matriz de (6x6) lo cual es realizado remplazando cada uno de los 4 pares $[X_1, X_0]$ por una submatriz de la forma:

$$\begin{bmatrix} X_s & X_m & X_m \\ X_m & X_s & X_m \\ X_m & X_m & X_s \end{bmatrix}$$

Donde los términos de autoinductancia e inductancia mutua están dados por la ecuación siguiente:

$$X_s = (X_0 + 2X_1)/3 \quad (1.18)$$

$$X_m = (X_0 - X_1)/3 \quad (1.18)$$

Para modelar las pérdidas de núcleo (Potencia activa P_1 y P_0 en secuencia positiva y cero), resistencias shunt adicionales son también conectadas en paralelo a los terminales de uno de los dos devanados trifásicos. Si se selecciona el devanado1, las resistencias son calculadas según las ecuaciones siguientes:

$$R_{1_1} = \frac{V_{nom1}^2}{P_{1_1}} \quad (2.1) \quad \text{y} \quad R_{0_1} = \frac{V_{nom1}^2}{P_{0_1}} \quad (2.2)$$

Sobre la corriente de excitación en secuencia cero es importante señalar que la misma no es dada por el fabricante para un transformador con núcleo de 3 columnas. En tales casos un valor razonable puede ser estimado según se explica a continuación:

De acuerdo con la figura 2.6 se energiza solo la fase b y se mide el voltaje en los devanados de la fase A y C.

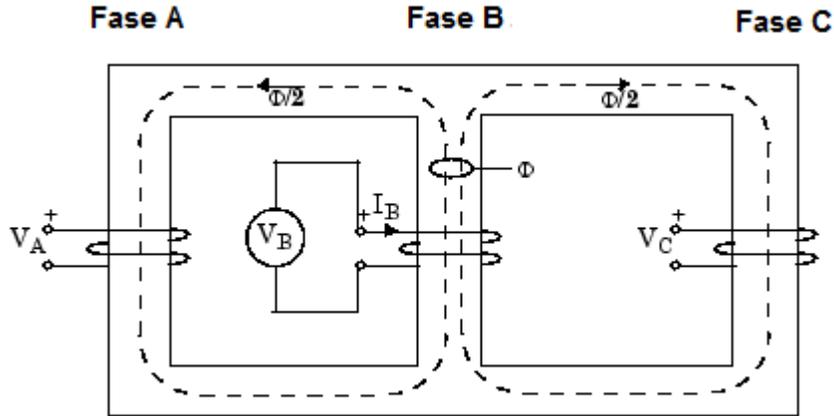


Figura 2.6

El flujo Φ producido por la fmm de la fase B, de acuerdo con la teoría de los circuitos magnéticos, se divide igualmente entre las columnas donde se encuentran los devanados de las fases A y C en cuyos terminales se mide el voltaje antes mencionado; esto es, por las columnas exteriores circulará aproximadamente $\frac{1}{2} \Phi$ por tanto, en este caso particular, si la inductancia de dispersión del devanado B fuese cero, el voltaje inducido en las fases A y B debería ser $k \cdot V_B = V_b/2$. de hecho, debido a la inductancia de dispersión de los tres devanados, el valor promedio de la razón de voltaje inducido k cuando los devanados A y C son sucesivamente energizados debe ser ligeramente menor que 0.5.

A partir de asumir que:

Z_s : valor promedio de las tres autoimpedancias

Z_m : valor promedio de las impedancias mutuas entre las fases.

Z_1 : impedancia de secuencia positiva del devanado trifásico

Z_0 : Impedancia de secuencia cero del devanado trifásico

I_1 : corriente de excitación de secuencia positiva.

I_0 : corriente de excitación de secuencia cero

Entonces el voltaje de la fase B

$$V_B = Z_s \cdot I_B \quad (2.3)$$

Y dada la consideración de distribución a la mitad del flujo Φ , los voltajes de las fases A y C de los enrollados en las columnas exteriores serán:

$$V_A = Z_m \cdot I_B = -V_B/2 \quad (2.4)$$

$$V_C = Z_m \cdot I_B = -V_B/2 \quad (2.5)$$

Las autoimpedancias e impedancias mutuas estarán dadas por:

$$Z_s = \frac{2Z_1 + Z_0}{3} \quad (2.6)$$

$$Z_m = \frac{Z_0 - Z_1}{3} \quad (2.7)$$

Y trabajando con estas ecuaciones:

$$V_A = V_C = \frac{Z_m}{Z_s} V_B = -\frac{\frac{Z_0 - Z_1}{3}}{\frac{2Z_1 + Z_0}{3}} V_B = -\frac{\frac{I_0 - I_1}{2I_1 + 1}}{\frac{I_1 - 1}{2Z_0 + 1}} V_B = -kV_B \quad (2.8)$$

Donde k es la razón de voltaje inducido (con k ligeramente inferior a 0.5) de donde la razón I_0/I_1 se puede deducir de la expresión de k como sigue:

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{1+k}{1-2k} \quad (2.9)$$

Obviamente k no puede dar exactamente 0.5, pues eso conduciría a una corriente de secuencia cero infinita. Además, cuando los tres devanados son excitados con voltajes de secuencia cero, el camino del flujo debe retornar a través del aire y el tanque que rodea al núcleo. La alta reluctancia del paso al flujo de secuencia cero resulta en una alta componente de la corriente de secuencia cero. Si, por ejemplo; se asume que I_1 es 0.5%, un valor razonable para I_0 puede ser 100%. Por lo tanto, si $I_0/I_1=200$, de acuerdo con la ecuación 2.xx se puede deducir que el valor de $k=0.496$.

El bloque que implementa este modelo en el SimPowerSystem del Matlab/Simulink se muestra en la figura 2.7

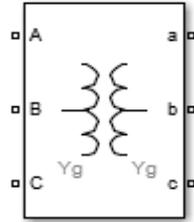


Figura 2.7

2.2 Modelos implementados para las simulaciones

Antes de seguir con el tema de los modelos es necesario especificar los datos escogidos tanto para los bloques de los transformadores que se emplearán, como para la carga que se alimentará con los mismos. Como no se dispone de datos de transformadores trifásicos reales, se asumieron los que por defecto se dan en los bloques de los mismos en el SimPowerSystem, ya que estos tienen también por defecto los valores de los parámetros resistencias, inductancias, voltajes nominales de ambos devanados como se muestra en la figura 2.8 para el bloque del transformador trifásico modelado según se describe en el epígrafe 2.1.1.

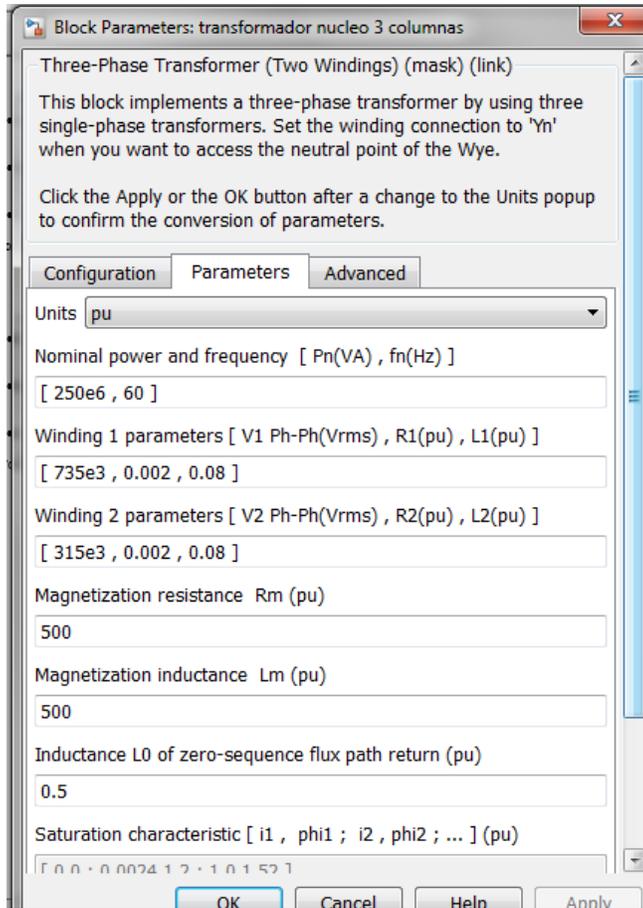


Figura 2.8

Tomando en consideración la potencia nominal se asumió una carga nominal donde el transformador entregue 200MW y 150kVAr, para un factor de potencia de 0.8. Esto se muestra en la figura 2.9 de parámetros de la carga.

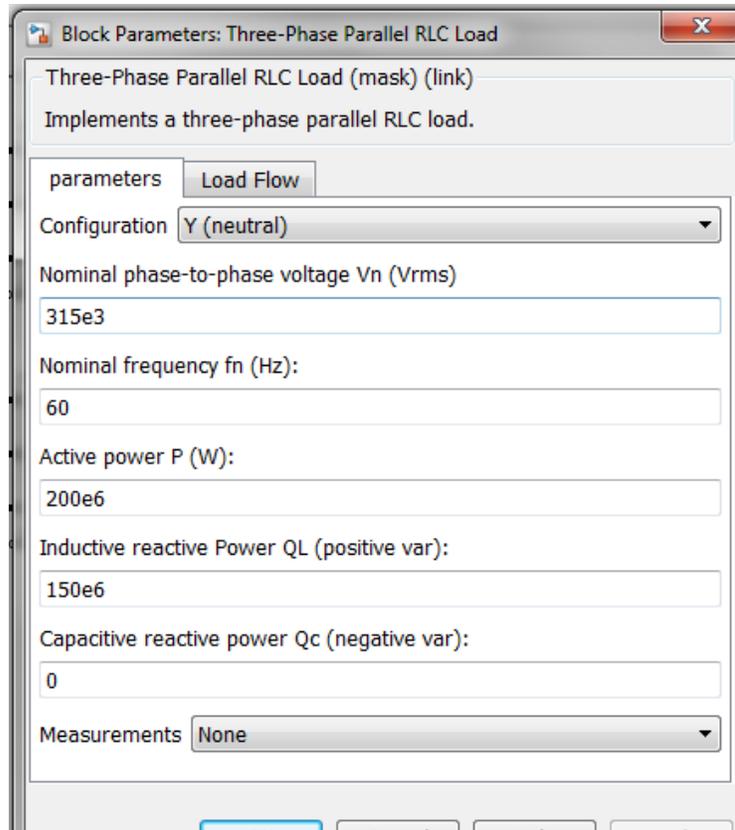


Figura 2.9

Además la fuente seleccionada permite además introducir armónicos y variaciones en la amplitud, la fase e incluso la frecuencia, lo que ayudara en la simulación de fenómenos que afectan la calidad de la energía como la presencia de armónicos y los huecos de tensión.

2.2.1 Modelo usando el bloque del transformador trifásico devanados

Este modelo emplea el modelo del transformador explicado en el epígrafe 2.1.1 y se muestra en la figura 2.10. En el mismo se persigue valorar el cambio en el comportamiento de diferentes variables del transformador cuando es del tipo de núcleo de 5 columnas con otro del tipo de 3 columnas.

Los resultados; en condiciones de voltajes balanceados, sin armónicos y sin considerar la saturación, de la simulación para diferentes parámetros se muestran en las figuras 2.11, 2.12 y 2.13. Estas se tomarán como referencias para analizar las implicaciones que pueden tener el utilizar una representación (modelación) u otra sobre el comportamiento de esas variables ante la presencia de armónicos y ante un hueco de tensión generados por la fuente y una falla monofásica en el secundario.

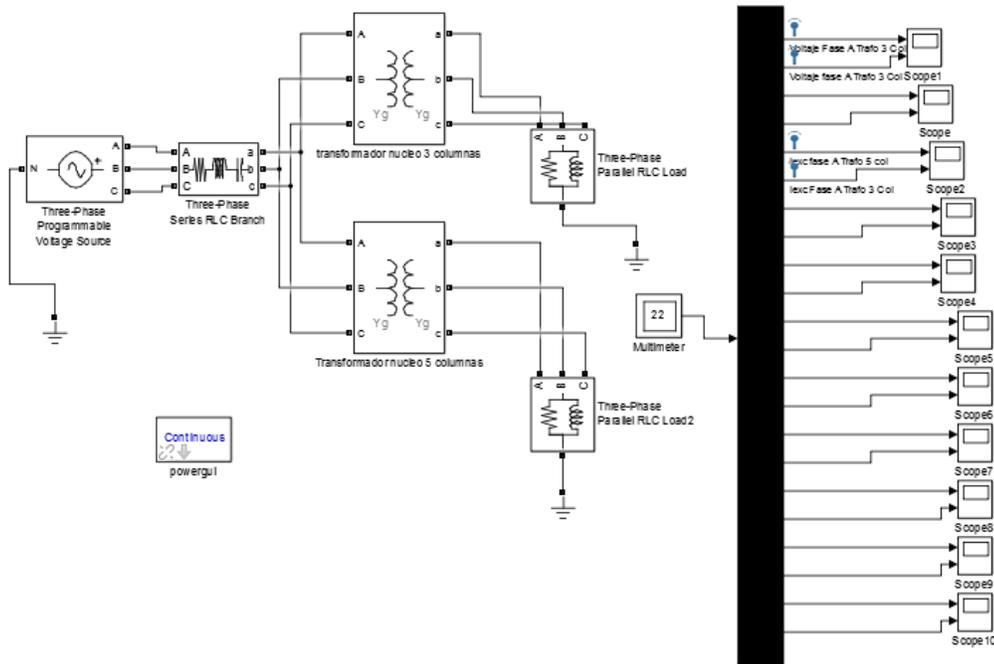


Figura 2.10 Modelo implementado para la comparación de transformadores con iguales modelos y tipos de núcleos diferentes (3 y 5 columnas).

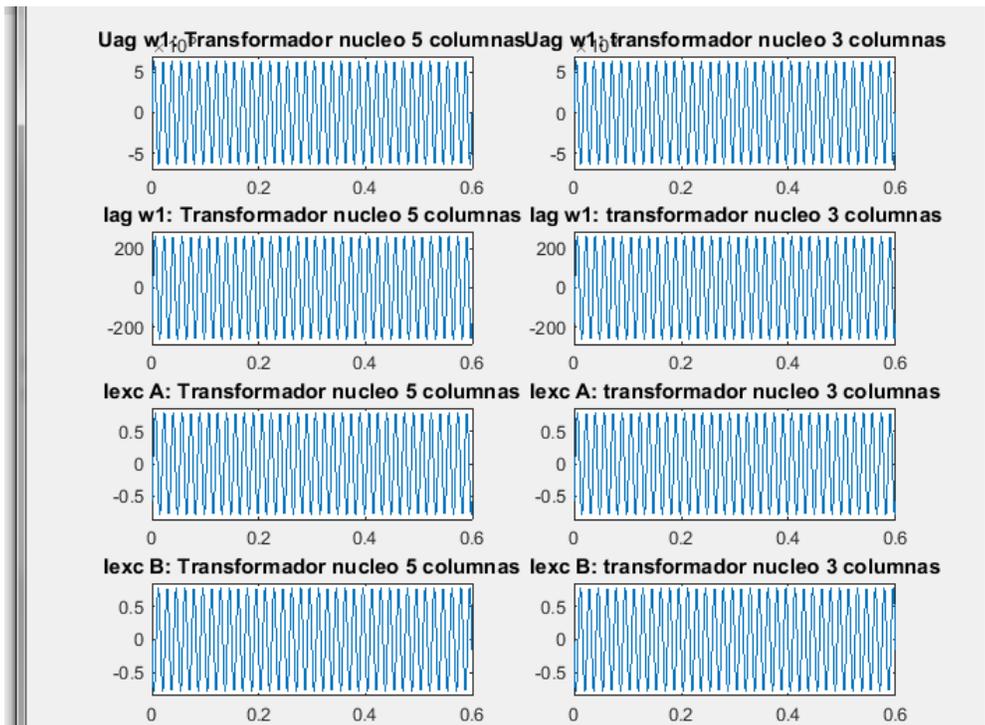


Figura 2.11

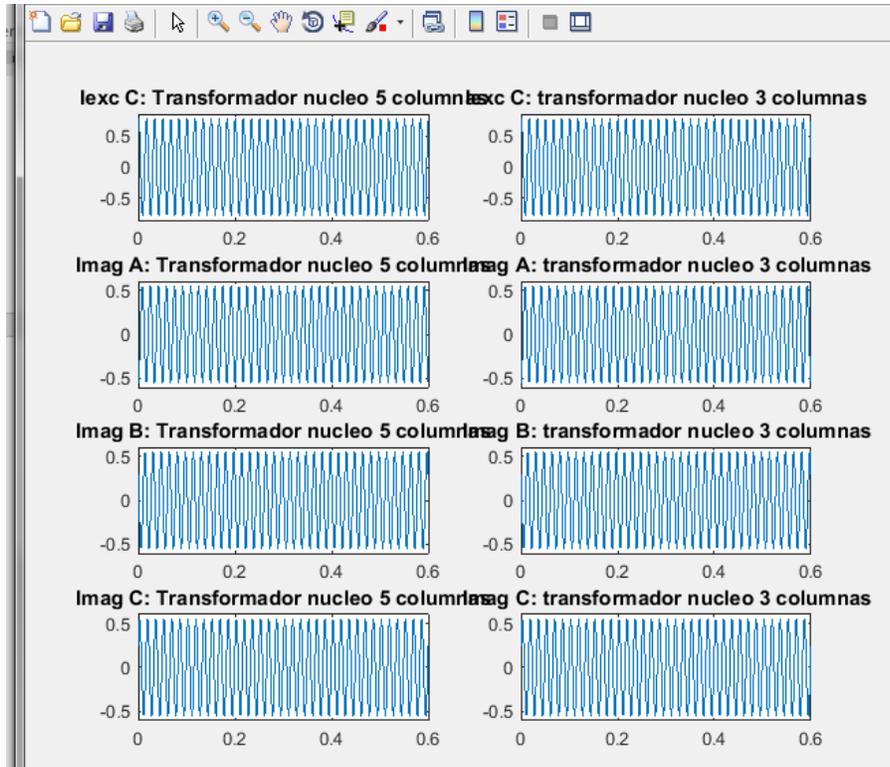


Figura 2.12

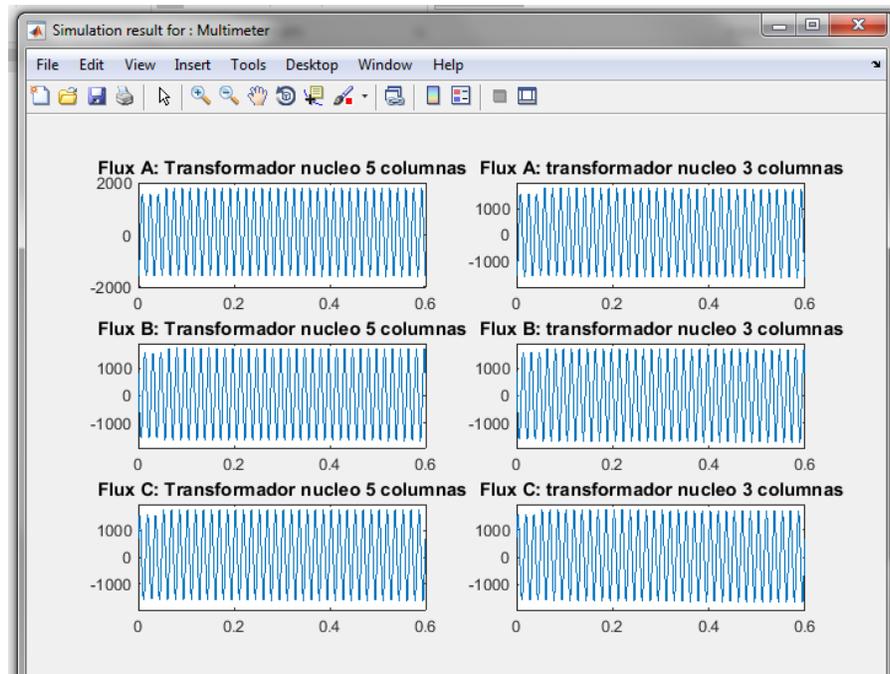


Figura 2.13

2.2.2 Modelo usando el transformador trifásico de dos devanados con armónicos en el suministro y sin considerar la saturación

En este caso en la fuente se introduce la generación de 3ro y 5to armónico, como se muestra en la ventana de parámetros de la fuente programable de la figura 2.14

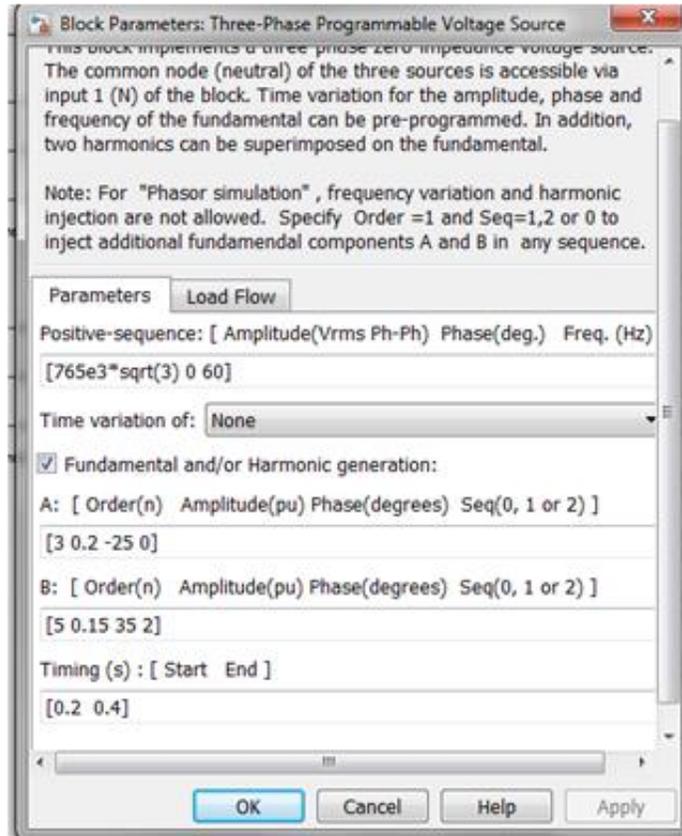


Figura 2.14

Los resultados de la simulación para ambos transformadores en las variables seleccionadas se muestran en las figuras 2.15, 2.16 y 2.17

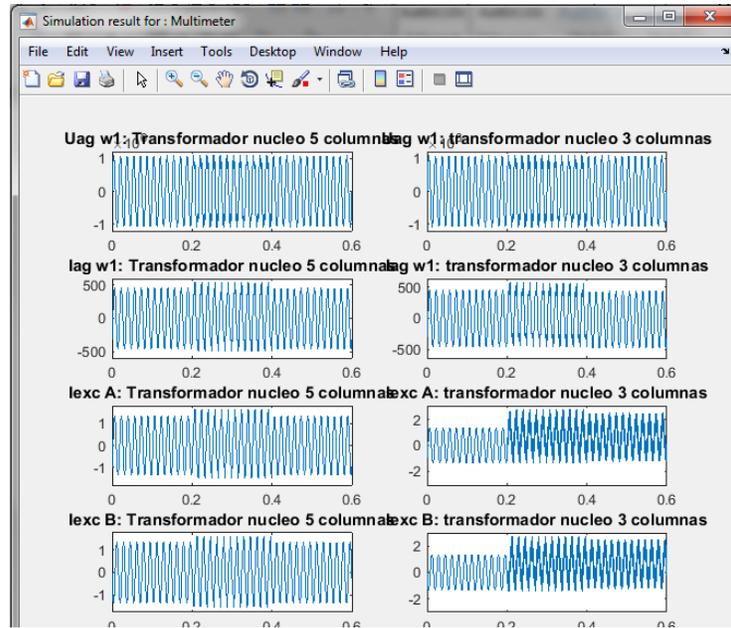


Figura 2.15

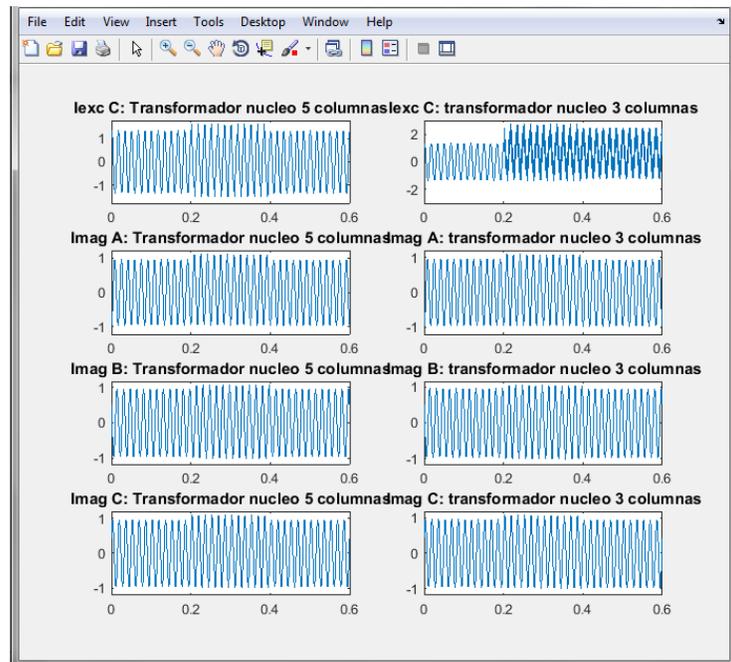


Figura 2.16

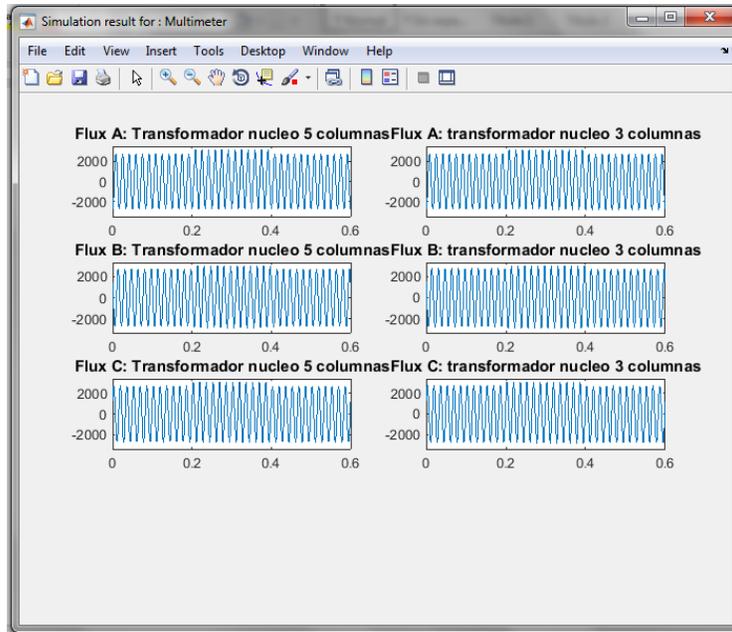


Figura 2.17

2.2.3 Modelo usando el bloque de transformador trifásico de dos devanados con armónicos en el suministro considerando la saturación

Al considerar la saturación (lo cual se logra seleccionando esto en la ventana de parámetros del bloque que modela al transformador la máscara del bloque cambia como se muestra en la figura 2.18).

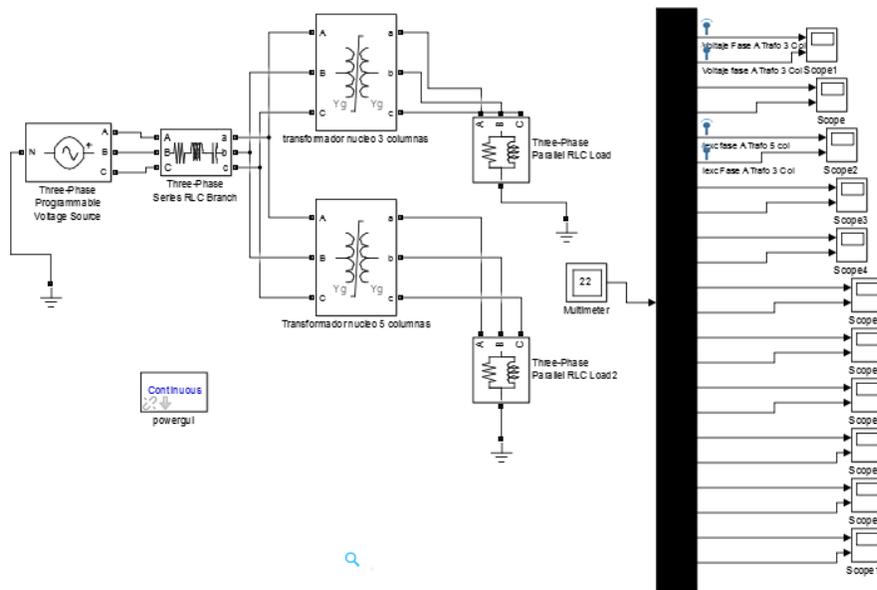


Figura 2.18

Los resultados se reflejan en las figuras 2.19, 2.20 y 2.21

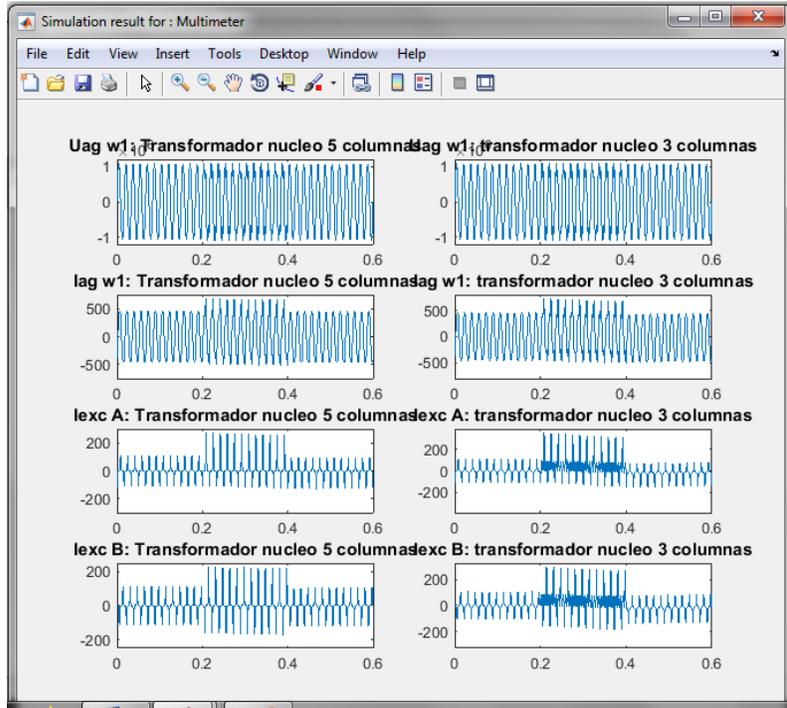


Figura 2.19

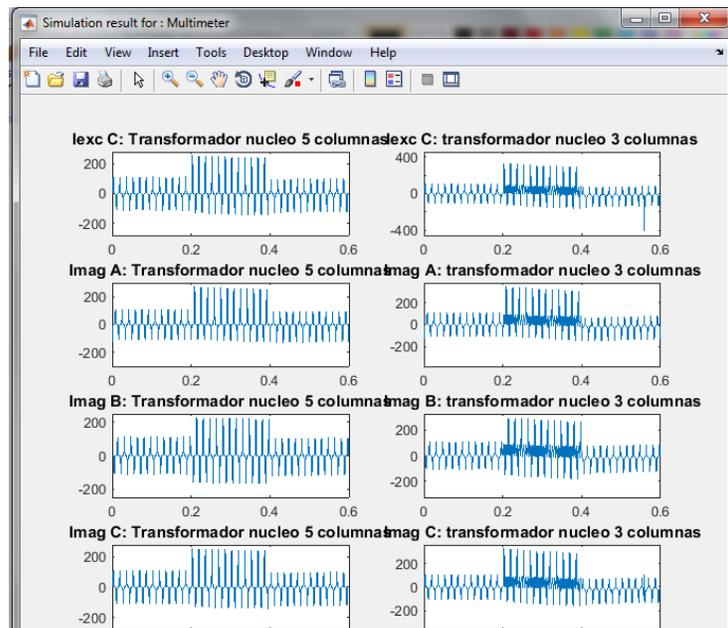


Figura 2.20

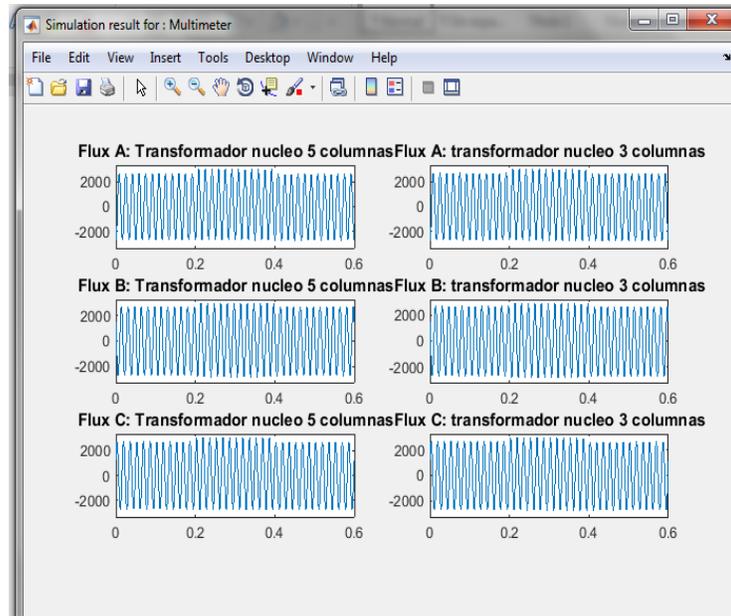


Figura 2.21

2.2.3 Modelo usando el bloque que modela mediante matriz de inductancias el transformador trifásico

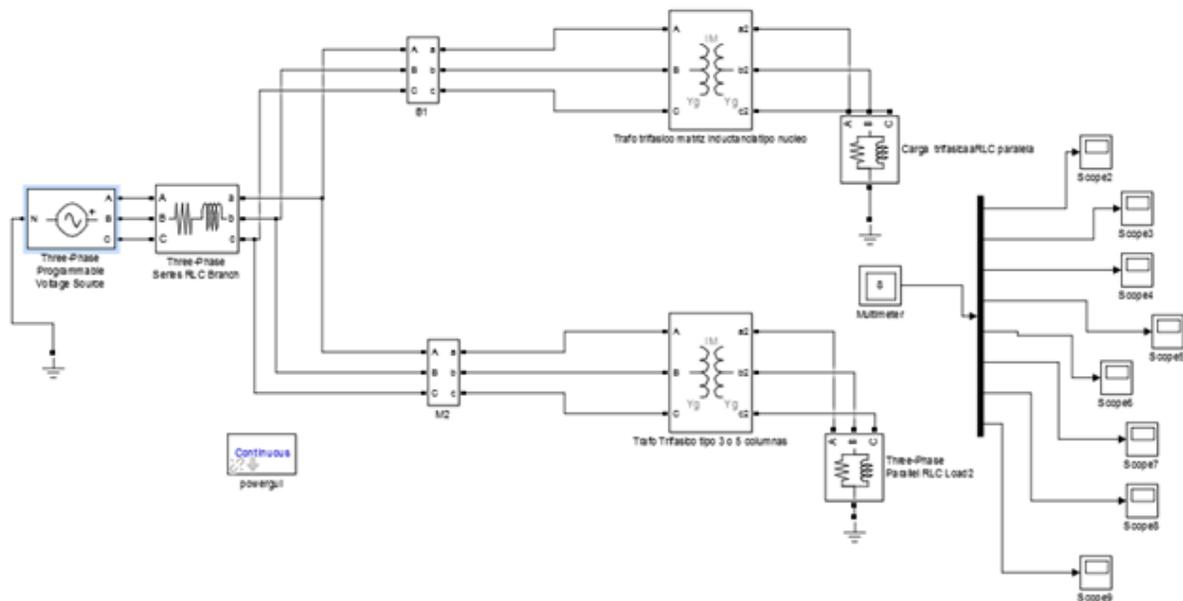


Figura 2.22 Modelo usando el bloque del transformador representado por matriz de inductancias sin saturación.

En la figura 2.23 se muestran los resultados de la simulación del modelo anterior, en la cual se considera sinusoidal la fuente de suministro y además el modelo del transformador es lineal (no incluye la saturación).

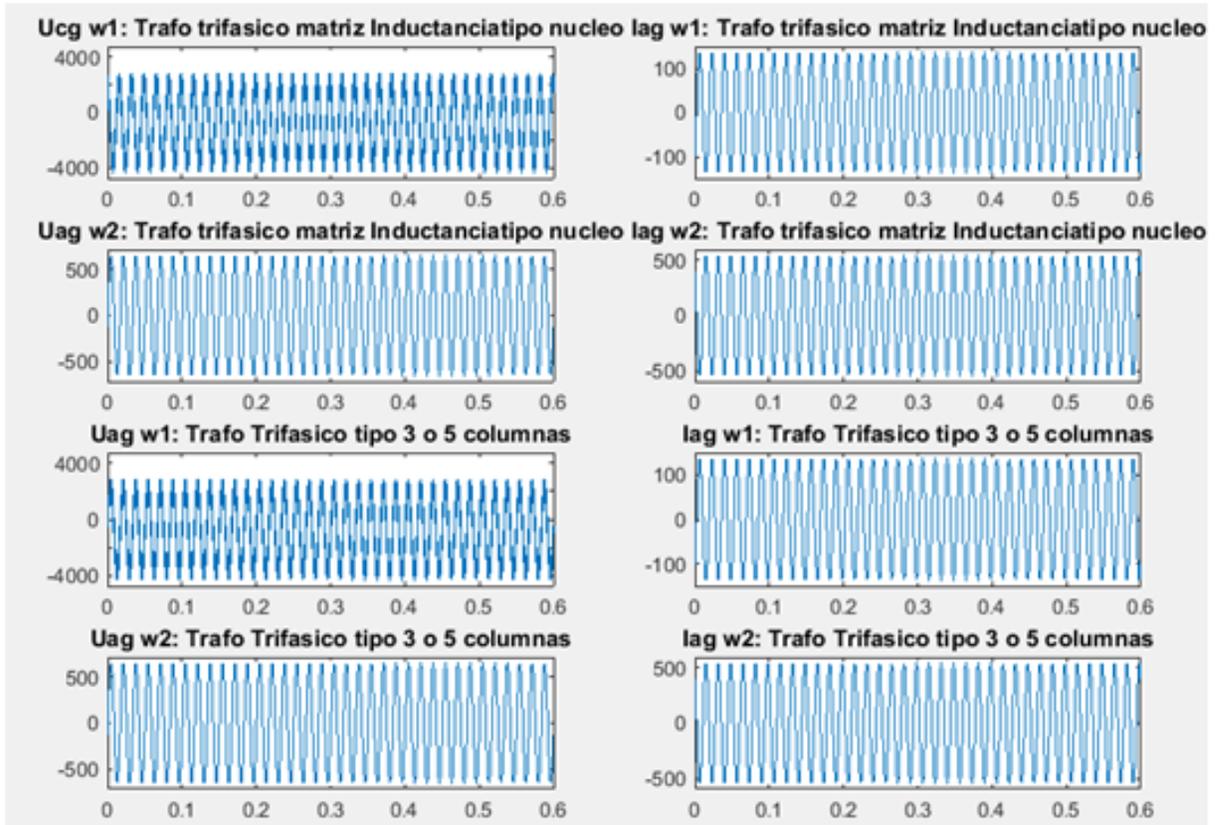


Figura 2.23 Resultados sin saturación y fuente sinusoidal simétrica

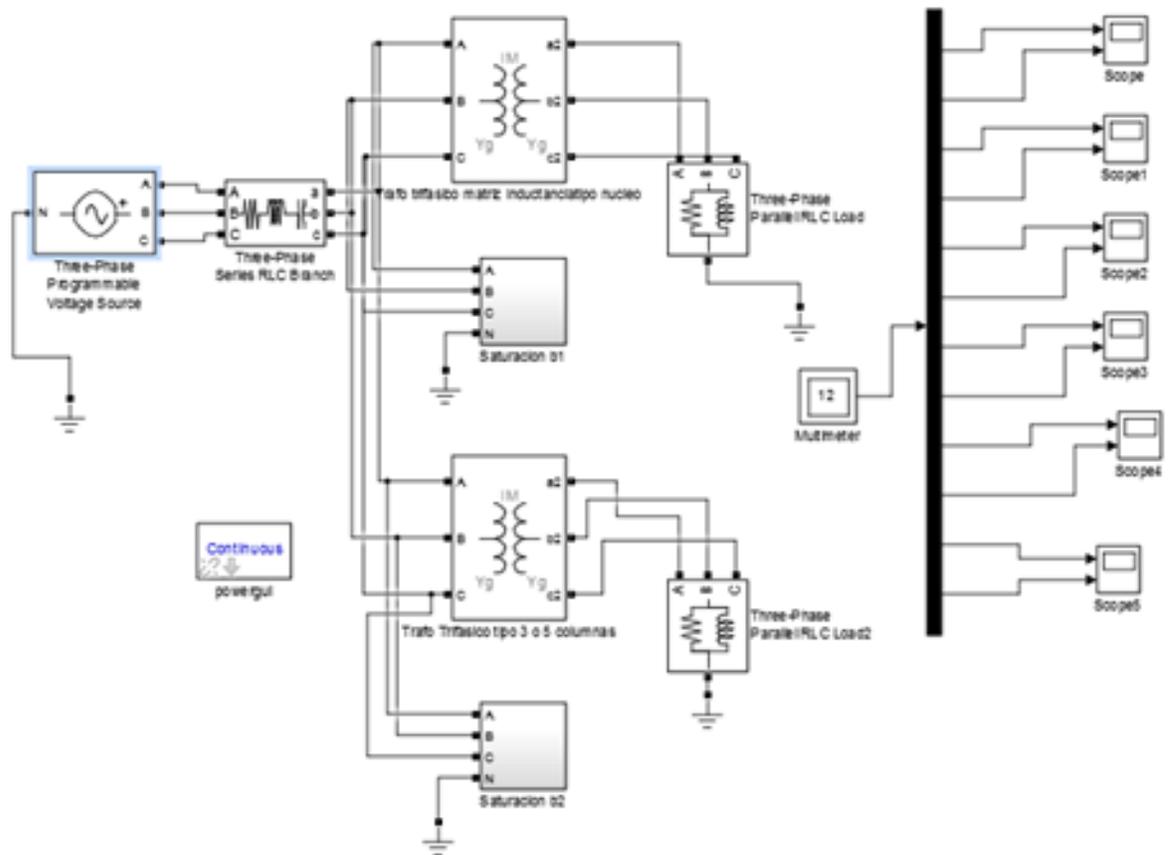


Figura 2.24 Modelo con saturación

En las figuras 2.25 y 2.26 se muestran los resultados de la simulación del modelo de Simulink de la figura anterior, para las corrientes de magnetización de las tres fase de los dos modelos de transformadores de matriz de inductancias (uno con una configuración de tipo núcleo y el otro con configuración de 3 o 5 columnas). Nótese el efecto de la saturación sobre la corriente de magnetización, que es ahora altamente no lineal.

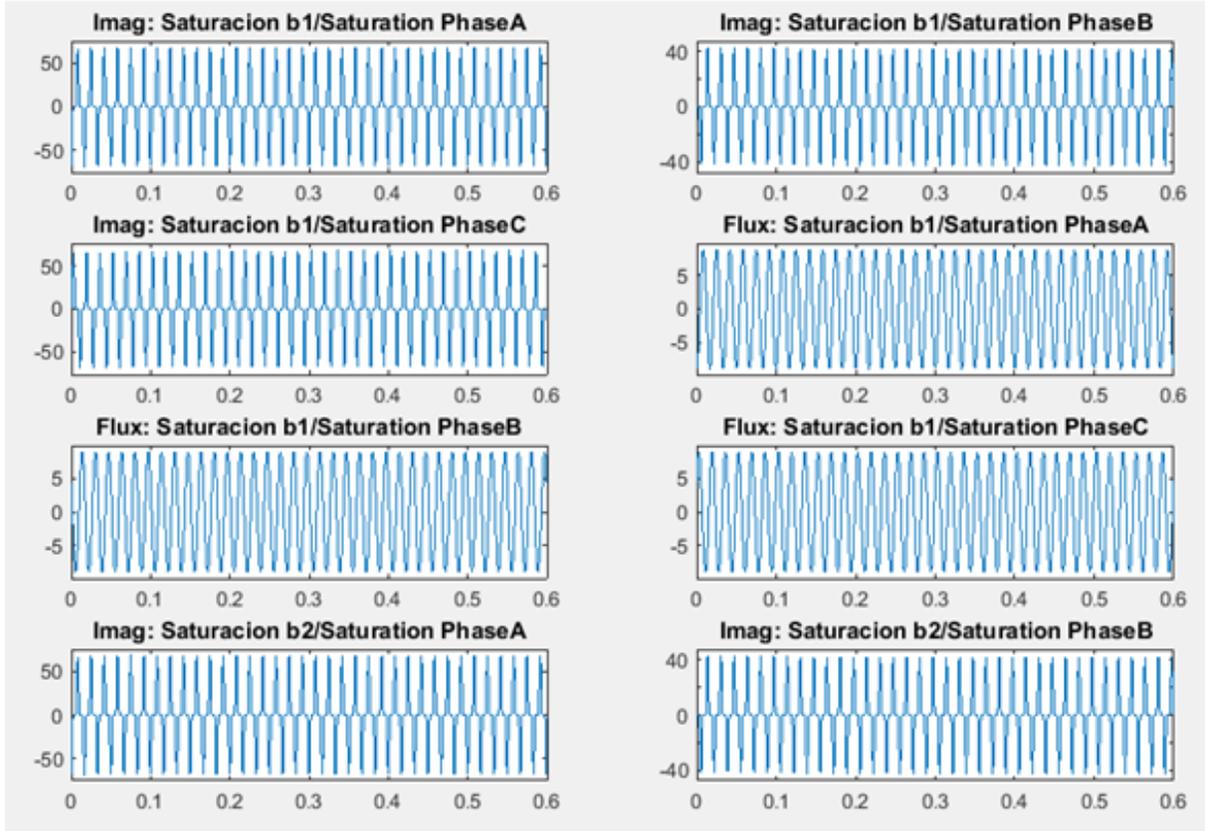


Figura 2.25

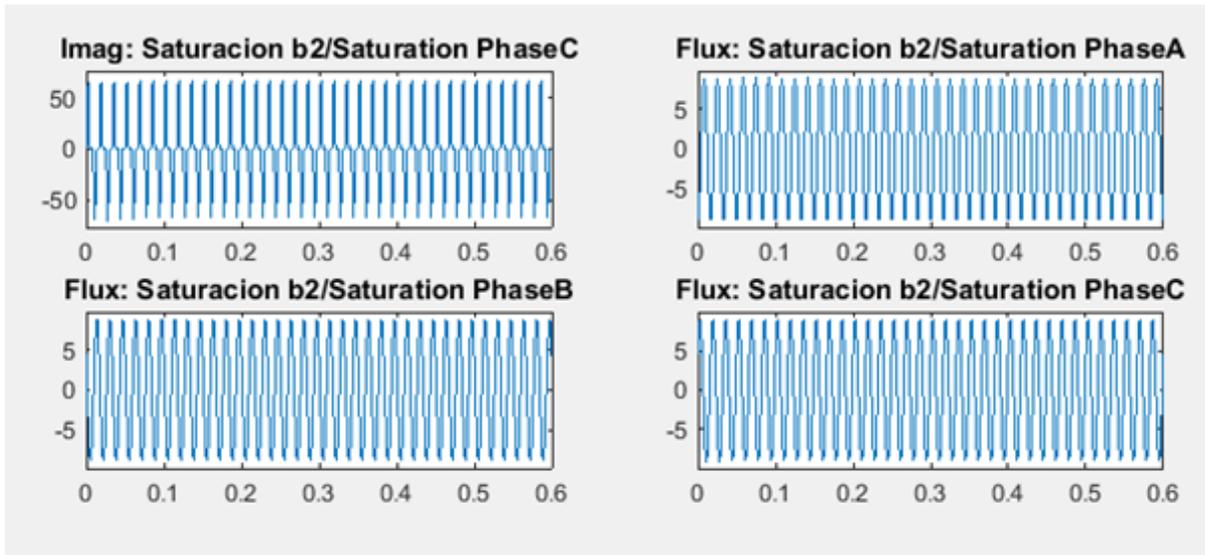


Figura 2.26 Resultados de la simulación del modelo de la figura 2.24

2.2.4 Simulación de los modelos de matrices de inductancia de los transformadores con saturación y armónicos en el suministro

El modelo es el mismo que se muestra en la figura 2.24, solo que ahora se incluye la presencia de armónicos, lo que se implementa de forma muy sencilla en la ventana de parámetros del bloque correspondiente a la fuente trifásica programable, tal y como se muestra en la figura 2.27

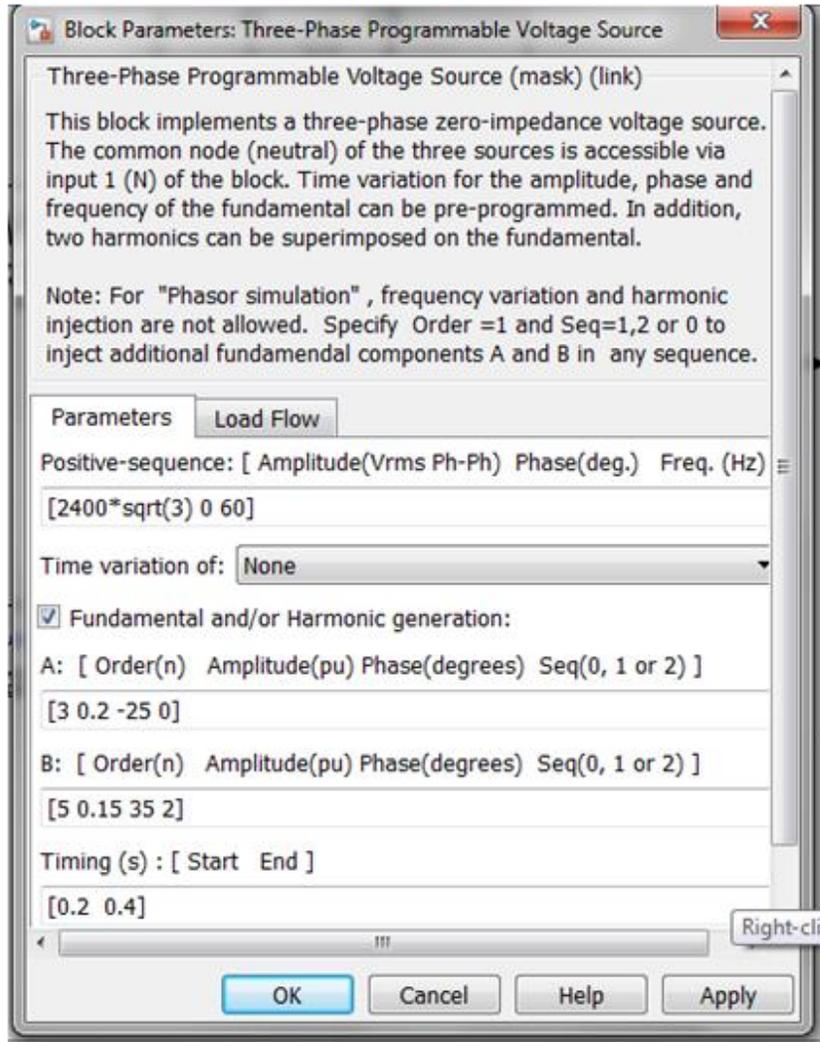


Figura 2.27 Ventana de parámetros del bloque de la fuente programable

Los resultados de la simulación, considerando la saturación y la presencia de armónicos, en este caso el tercero con una amplitud de 0.2 en pu, un ángulo de fase de -25 grados y de secuencia cero y el quinto, con amplitud 0.15 en pu, un ángulo de fase de 35 grados y de secuencia negativa se muestran en las figuras 2.28 y 2.29

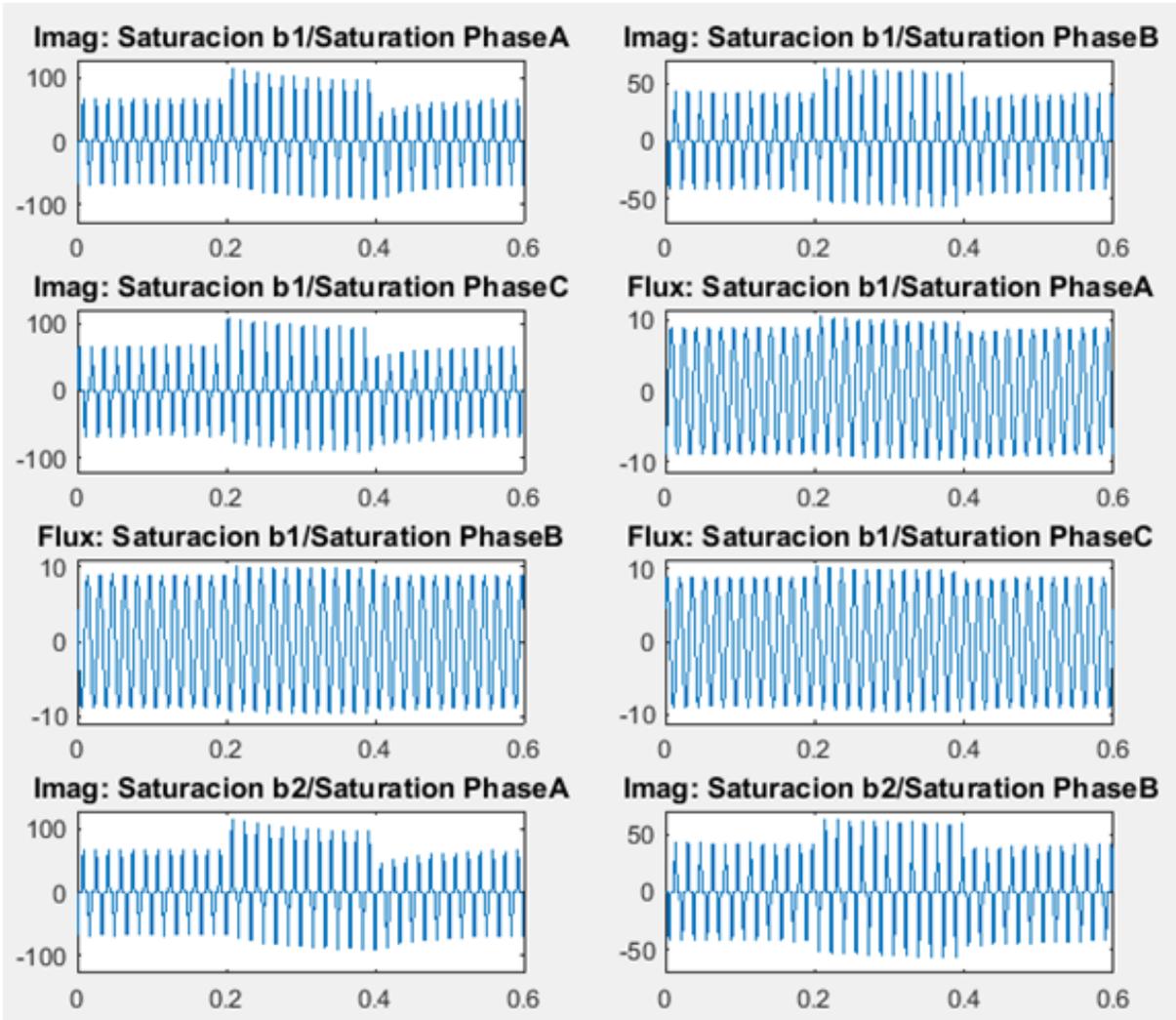


Figura 2.28

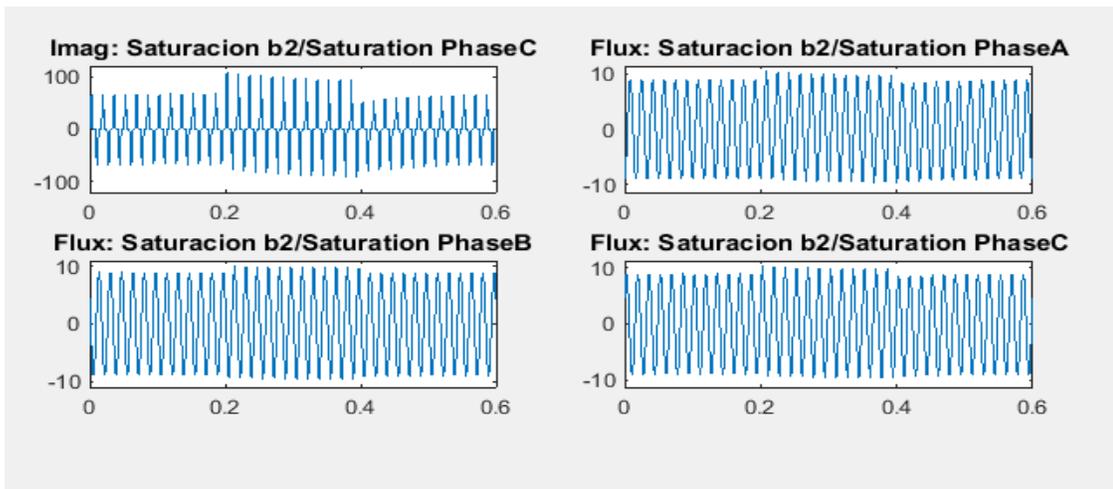


Figura 2.28

2.3 Consideraciones finales del Capitulo

Se realizan simulaciones con dos modelos de transformadores trifásicos de dos devanados disponibles en la librería SimPowerSystem del Matlab/Simulink, los cuales permiten analizar el comportamiento de parámetros fundamentales de un transformador de este tipo como son el flujo en las fases, la corriente de excitación o la de magnetización con y sin inclusión de los efectos de la saturación del núcleo magnético y con la presencia de armónicos en su alimentación. Es importante señalar que estos modelos permiten considerar estructuras magnéticas de 3 y 5 columnas.

Uno de los modelos está basado en analizar al transformador como tres transformadores monofásicos e incluye las resistencias de los devanados, las inductancias de dispersión y representa los efectos de la magnetización mediante una resistencia y una inductancia constantes. El efecto de la saturación se incluye a través de la característica B vs H del mismo, , la cual está disponible en el mismo modelo.

El otro modelo representa al transformador como una matriz de inductancias. En este caso para incluir los efectos de la saturación es necesario utilizar un bloque adicional, que se ha denominada aquí Saturación y que consiste de tres transformadores monofásicos saturables, a cada uno de los cuales es necesario introducir los datos de potencia nominal, los voltajes nominales de ambos devanados, así como el valor de las resistencias de los mismos en pu tomando como potencia base la nominal.

Los efectos de la saturación y de la presencia de armónicos en el suministro sobre los flujos y corrientes de magnetización son más o menos similares, destacándose de que en el caso de los armónicos, se aprecia un crecimiento del flujo y de las corrientes de magnetización correspondientes sobre todo al considerar la saturación lo que corrobora la necesidad del denominado factor de reducción de la capacidad nominal de estos transformadores cuando se emplean en ambientes contaminados por armónicos.

CONCLUSIONES

La modelación de los transformadores y sobre todo de los trifásicos es de gran importancia, dada la complejidad y costo de la instrumentación para la experimentación real de los mismos. Este tipo de transformador ocupa posiciones estratégicas dentro de los sistemas eléctricos de potencia, por lo que es necesario poder analizar su comportamiento ante diferentes fenómenos a los que está sometido, lo que también plantea restricciones a la experimentación, por las implicaciones que la misma pudiera tener sobre los consumidores conectados al transformador, por lo que la simulación mediante modelos adecuados es un paliativo de menor costo e implicaciones económicas y sociales. Para esto se requieren modelos que sean los más apropiados.

Dada la diversidad de fenómenos cuyos efectos se desea simular, aparecen en la literatura científica consultada múltiples modelos, algunos más generales y otros más específicos, sin embargo, solo por las datas de las publicaciones queda claro que esto de la modelación todavía es un campo abierto a la investigación. También es importante la cantidad de herramientas de softwares que se emplean, que van desde el Pspice, el ATP, de implementación del método de elementos finitos, el Matlab/ Simulink, etc.

Se realizan simulaciones con dos modelos de transformadores trifásicos de dos devanados disponibles en la librería SimPowerSystem del Matlab/Simulink, los cuales permiten analizar el comportamiento de parámetros fundamentales de un transformador de este tipo como son el flujo en las fases, la corriente de excitación o la de magnetización con y sin inclusión de los efectos de la saturación del núcleo magnético y con la presencia de armónicos en su alimentación. Es importante señalar que estos modelos permiten considerar estructuras magnéticas de 3 y 5 columnas.

Los efectos de la saturación y de la presencia de armónicos en el suministro sobre los flujos y corrientes de magnetización son más o menos similares, destacándose de que en el caso de los armónicos, se aprecia un crecimiento del flujo y de las corrientes de magnetización correspondientes sobre todo al considerar la saturación lo que corrobora la necesidad del

denominado factor de reducción de la capacidad nominal de estos transformadores cuando se emplean en ambientes contaminados por armónicos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar probando los modelos con otros tipos de conexiones y variando el estado de carga de los mismos.

Implementar otros fenómenos que afectan la calidad de la energía como huecos de tensión para ver su efecto sobre los parámetros del transformador.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. G. López, "Modelos de Transformadores a Altas Frecuencias," Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas.
- [2] G. McPherson and R. Laramore. An Introduction to Electrical Machines and Transformers. 156-237.
- [3] G. d. Profesores, "Generalidades y Explotación de Transformadores de Fuerza," Departamento de Electroenergética, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2005.
- [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] J. S. Navarro, "Aplicación informática con Matlab para la modelización del transformador trifásico en régimen permanente y condiciones desequilibradas," Universidad Politécnica de Cataluña, 2007.
- [6] M. Á. R. Pozueta, "Transformadores," Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2012.
- [7] A. H. Maldonado, "Acerca de los Transformadores," Departamento de Electroenergética, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2004.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] V. Bradwajn, O. Hydro, H. W. Donnel, and I. I. Dommel, "Matrix Representation of Three-Phase N-Winding Transformers for Stady-State and Transient Studies," IEEE vol. PAS-101, pp. 1369-1378, 2007.
- [11] 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.

- [12] X.S. Chen and P. Neudorfer, " Digital Model for Transient Studies of a Three-phase Five-Legged Transformer, " IEE Proceedings, Vol. 139, No.4, July, 1992, pp. 351-358.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Cheng, X, Venkata, S.S. A three-phase three-winding core-type transformer model for low-frequency transient studies. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997.
- [16] Paul S. Moses, Mohammad A. S. Masoum, and Hamid A. Toliyat, Dynamic Modeling of Three-Phase Asymmetric Power Transformers With Magnetic Hysteresis: No-Load and Inrush Conditions Fellow, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 25, NO. 4, DECEMBER 2010.
- [17] D. Dolinar, J. Pihler, B. GrEar, Dynamic Model of a Three-Phase Power Transformer, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, October 1993.
- Hettiwatte, S.N., Crossley, P.A., Wang, Z.D., Darwin, A., Edwards, G.:
- [18] Hettiwatte, S.N., Crossley, P.A., Wang, Z.D., Darwin, A., Edwards, G.: 'Simulation of a transformer winding for partial discharge propagation. studies'. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 1394–1399 2002.
- [19] Gustavsen, B.: 'Wide band modeling of power transformer', IEEE Trans. Power Deliv. , 19, (1), pp. 414–422, 2004.
- [20] Jaime Vinicio Bardales Oliva, "Análisis del desempeño de los transformadores ante la presencia de armónicos ", Guatemala, junio de 2010.

Anexos