

Sintonización de los Parámetros de Secuencia de un Transformador Trifásico utilizando Métodos de Optimización no Lineal

Oscar Cuasapaz^a, Juan Ramírez^a, Fausto Avilés^a, Nelson Granda^a, Franklin Quilumba^a

^aDepartamento de Energía Eléctrica/ Escuela Politécnica Nacional
oscar.cuasapaz@epn.edu.ec, juan.ramirez@epn.edu.ec, fausto.aviles@epn.edu.ec,
nelson.granda@epn.edu.ec, franklin.quilumba@epn.edu.ec

Resumen—En este documento se presenta la estimación de los parámetros de secuencia: positiva, negativa y cero, de un transformador trifásico de 50 kVA, 6300 – 231.133/125.2 V, a partir de mediciones de eventos de fallas monofásicas a tierra y bifásicas a tierra; con ajustes de curvas simuladas y medidas utilizando métodos de optimización no lineal mediante MATLAB-Simulink. En primer lugar, se realizaron pruebas en un transformador trifásico didáctico utilizando las normas internacionales para determinar los parámetros de secuencia en el laboratorio. Estos valores se constituyen en los valores iniciales a ser usados en la etapa de estimación. Posteriormente, se realizaron eventos de cortocircuitos en donde se registraron datos de corriente con la ayuda de un osciloscopio. La información que resulta de la medición es comparada con la parte simulada, generando dos curvas que se sobrepone y dan ciertas diferencias entre sí. Con el objetivo de sintonizar estas curvas, simuladas con respecto a las medidas, se utilizó la herramienta “Parameter Estimation” de MATLAB-Simulink. Una vez probado el método se trabajó en el transformador de 50 kVA con eventos de fallas alimentado el lado de alto voltaje a 500 V debido a las condiciones físicas del laboratorio.

Palabras Clave—Cortocircuitos en transformadores, estimación de parámetros, optimización no lineal, parámetros del transformador, sintonización de parámetros.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el Sistema Nacional Interconectado del país ha tenido un crecimiento notorio debido al aumento de la población y a la necesidad de mejorar el servicio. En este progreso los transformadores han jugado un papel muy importante: elevar y reducir el

verificar su funcionamiento y calidad se realizan pruebas en fábrica antes de su puesta en servicio; de igual manera este equipo debe protegerse ante eventualidades internas y externas al sistema eléctrico, por tal motivo, se deben realizar pruebas que aseguren su protección. Para tener información y poder coordinar las protecciones se deben realizar pruebas para obtener los parámetros que ayuden a realizar ciertos ajustes para su protección [2].

Para determinar ciertos parámetros, entre estos, los de secuencia positiva, negativa y cero, se deben realizar pruebas según los estándares internacionales ANSI, IEC e IEEE, los cuales proponen aspectos generales para tomar en cuenta durante la medición de secuencias con el fin de no exceder corrientes, voltajes o límites térmicos en el transformador [2], [3], [4]. Estos parámetros en los equipos de protección asociados a los transformadores en un sistema eléctrico requieren de modelos para su simulación, tanto del transformador como de la red eléctrica en la que está instalada. Sin embargo, si el modelo del transformador no es el adecuado, entonces la simulación no va a ser correcta y, por lo tanto, la calibración de las protecciones tampoco va a ser ajustada debidamente.

En el modelo de las componentes simétricas desarrollado por C.L. Fortescue se establecen las condiciones para el cálculo de las fallas trifásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y monofásicas, éstas dos últimas poseen componentes de secuencia cero, por lo que su cálculo es de mucha importancia [5].

En los eventos de fallas monofásicas y bifásicas a tierra, el problema se da debido a la influencia de la impedancia de secuencia cero, este valor se presenta en equipos con conexión estrella principalmente, ya que estos tienen un conductor de neutro que normalmente está sólidamente aterrizado [6]. También se debe a la forma y construcción del transformador, a las paredes del tanque conductor que proporcionan un camino para una parte del flujo magnético de secuencia cero [5].

que permitan un análisis preciso de su comportamiento bajo cargas desequilibradas y fallas.

Con lo antes expuesto, las pruebas en el laboratorio siguen las metodologías de cálculo que se indican en las normas internacionales para la obtención de sus parámetros, sin embargo, en estas pruebas existe una diferencia de valores entre lo medido y lo simulado. Para evidenciar esto, se realiza una comparación de curvas aplicando un evento de cortocircuito al transformador en la parte experimental y la curva del mismo evento, pero en la simulación [7].

Si las curvas resultan ser muy diferentes, significa que los parámetros del modelo del transformador no se asemejan a la realidad, una razón es debida a las limitaciones físicas para elaborar estas pruebas en laboratorio. Con esta problemática se propone un método práctico para reducir la diferencia de curvas de corriente a la salida de los bornes de un transformador trifásico de 50 kVA en el lado de bajo voltaje, comparando la curva del modelo estructurado en el software MATLAB-Simulink con la curva del modelo real obtenido con las pruebas normalizadas en el laboratorio [8] [9].

Se solucionará esta problemática realizando una prueba experimental en el transformador trifásico ante un evento de cortocircuito y se comparará con el del modelo simulado realizando el mismo evento. La diferencia que se obtenga de las dos respuestas se reducirá utilizando métodos de optimización no lineal que tiene la herramienta de estimación de parámetros de MATLAB-Simulink, este estimador calcula la diferencia que existe entre dos curvas y minimiza la curva más grande variando sus parámetros.

II. PRUEBAS NORMALIZADAS PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE SECUENCIA EN UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

A. Prueba de Circuito Abierto

Esta prueba se realiza con el fin de determinar la corriente de magnetización y las pérdidas de hierro en el núcleo del transformador en la rama paralela en función del voltaje aplicado, como se aprecia en la Fig. 1 generalmente se alimenta por el lado de bajo voltaje y se mantienen los terminales del lado de alto voltaje abiertos, los equipos de medida se colocan en el lado de la alimentación a voltaje nominal en una de las ramas. Al encontrarse los terminales abiertos en una rama del transformador, la fuente genera una potencia que se disipa en el núcleo en forma de calor, por esta razón la corriente de magnetización es muy pequeña por lo que se desprecia la resistencia del devanado [4].

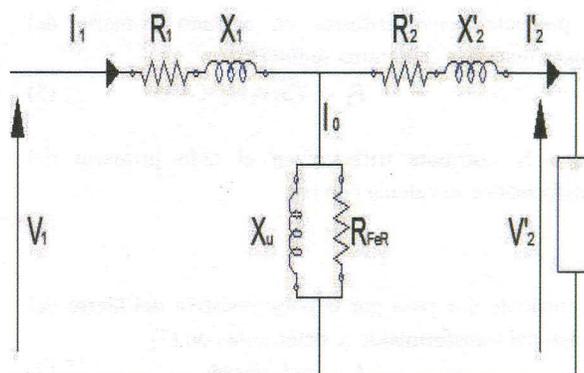


Fig. 1 Circuito equivalente de un transformador en circuito abierto

Las mediciones que se realizan son: voltaje de alimentación, corriente de magnetización y potencias. Para la realización de los cálculos en la prueba de circuito abierto, se energiza al transformador por el lado de bajo voltaje, como se observa en la Fig. 2.

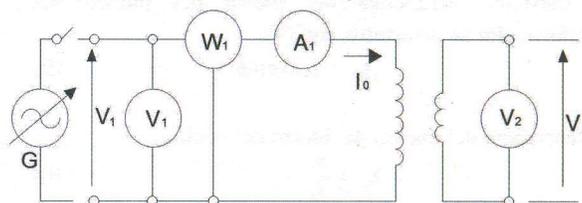


Fig. 2 Diagrama para la realización de prueba en circuito abierto

Los valores principales por determinar son:

- Las pérdidas en el hierro en el bobinado primario a través de la medición de datos de un vatímetro (P_{Fe}).
- Corriente: del primario a través del amperímetro (A_1).

La relación de transformación se presenta en (1).

$$a = \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

G: Fuente de corriente alterna variable.

Para esto se procede a tomar lecturas de las mediciones de voltajes y potencias:

- V_1 trifásico
- P
- Q

A partir del triángulo de potencias los siguientes valores según (2):

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (2)$$

En (3) se presenta la función coseno del ángulo ϕ .

$$\text{Cos}\phi = \frac{P}{S} \quad (3)$$

Mediante (4) se determina el seno del ángulo ϕ .

$$\text{Sen}\phi = \frac{Q}{S} \quad (4)$$

La potencia activa trifásica en el lado primario del transformador se determina según (5).

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_0 \cdot \cos\phi \quad (5)$$

Luego la corriente trifásica en el lado primario del transformador se calcula con (6).

$$I_1 = \frac{I_0}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

La corriente que pasa por la parte resistiva del hierro del núcleo del transformador se determina con (7).

$$I_{FeR} = I_1 \cdot \cos\phi \quad (7)$$

Y la parte resistiva del hierro del núcleo del transformador se calcula con (8).

$$R_{FeR} = \frac{V_1}{I_{FeR}} \quad (8)$$

La corriente magnética del hierro del núcleo del transformador se determina con (9).

$$I_\mu = I_1 \cdot \sin\phi \quad (9)$$

La reactancia del núcleo del hierro del núcleo

$$X_\mu = \frac{V_1}{I_\mu} \quad (10)$$

La ecuación 11 indica la inductancia magnética del transformador se encuentra con (11).

$$L_m = X_\mu / 2\pi f \quad (11)$$

Donde:

V_1 : Voltaje de alimentación línea trifásica en el lado primario.

I_1 : Corriente de fase en el lado primario.

I_0 : Corriente de línea en el lado primario.

P : Potencia activa.

Q : Potencia reactiva.

S : Potencia aparente.

I_μ : Corriente inductiva en el núcleo.

I_{FeR} : Corriente resistiva en el núcleo.

B. Prueba de Cortocircuito

Esta prueba se realiza con el fin de determinar las pérdidas en los devanados, para esto, los terminales del primario se alimentan con una fuente regulable hasta la corriente nominal del secundario y los terminales del secundario se cortocircuitan obteniendo la corriente mencionada, como se aprecia en la Fig. 3. Las mediciones de voltaje, corriente y potencia deberán realizarse cuando estén conectados sus devanados en el tap principal. En el lado del lado de alto voltaje, el voltaje se reduce entre el 4-10% del voltaje nominal, expresado en porcentaje, como se aprecia en la Fig. 4 [4].

Las pérdidas en el núcleo del transformador son despreciables al igual que el flujo en el núcleo, esto se debe a que una fracción del voltaje nominal pasa por el lado del

primario. Estas mediciones se las debe hacer de manera conjunta y mediante cálculos se puede separar valores para determinar los parámetros de los devanados de corto circuito en el lado de bajo voltaje [4].

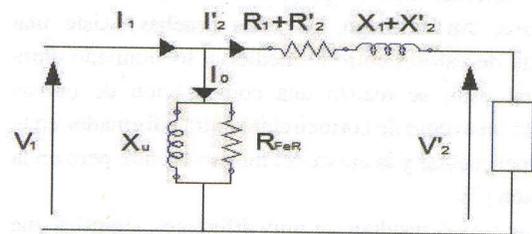


Fig. 3 Circuito equivalente de un transformador en cortocircuito

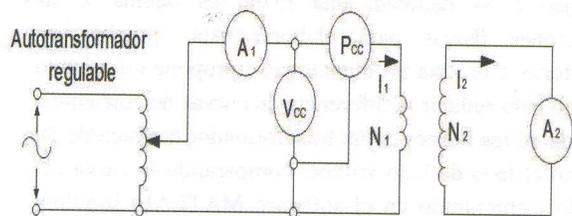


Fig. 4 Diagrama para realizar la prueba de cortocircuito

Se deben tomar las mediciones del voltaje de cortocircuito V_{ccL} , corriente de cortocircuito I_{ccL} , potencias de cortocircuito P_{ccL} , Q_{ccL} .

Mediante (12) se conoce la expresión para la potencia activa de la prueba de cortocircuito.

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot V_{ccL} \cdot I_{ccL} \cdot \cos\phi \quad (12)$$

La impedancia de la prueba de cortocircuito se determina con (13).

$$Z_{cc} = \frac{V_{ccL}}{I_{ccL}} \quad (13)$$

El valor de la resistencia de la prueba de cortocircuito se determina con (14).

$$R_{cc} = Z_{cc} \cdot \cos\phi \quad (14)$$

Y la reactancia de la prueba de cortocircuito se calcula con (15).

$$X_{cc} = Z_{cc} \cdot \sin\phi \quad (15)$$

En (16) se presenta la resistencia de cortocircuito en función de R_1 y R_2 .

$$R_1 + a^2 \cdot R_2 = R_{cc} \quad (16)$$

El factor de relación de transformación en el transformador didáctico Dyn5 está dado por (17).

$$a = \frac{V_1}{V_1/\sqrt{3}} = \sqrt{3} \quad (17)$$

Mediante (18) se refiere la resistencia R_1 al lado primario.

$$R_1 = \frac{R_{cc}}{2} \quad (18)$$

Por medio de (19) se observa la resistencia reflejada R_2' al lado primario.

$$R_2' = \frac{R_{cc}}{2} \quad (19)$$

Se establece que la resistencia del primario y la resistencia del secundario reflejada al primario son iguales según (20).

$$R_1 = R_2' \quad (20)$$

Mediante (21) se calcula la resistencia del secundario reflejada al primario.

$$a^2 * R_2 = R_2' \quad (21)$$

La resistencia de cortocircuito en función de sus resistencias del lado primario y la resistencia del primario reflejada se determina con (22).

$$R_1 + R_2' = R_{cc} \quad (22)$$

La reactancia en el lado primario se determina con (23).

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{cc}}{2} \quad (23)$$

Mediante (24) se calcula la inductancia del lado primario.

$$L_1 = X_1 / 2\pi f \quad (24)$$

La reactancia en el lado secundario se determina con (25).

$$X_2 = \frac{X_2'}{a^2} \quad (25)$$

Y la inductancia del lado secundario se calcula mediante (26).

$$L_2 = X_2 / 2\pi f \quad (26)$$

Donde:

P_{cc} : Potencia de cortocircuito en el lado de bajo voltaje.

V_{ccl} : Voltaje de cortocircuito de línea en el lado de bajo voltaje.

I_{ccl} : Corriente de cortocircuito de línea en el lado de bajo voltaje.

V_{ccf} : Voltaje de cortocircuito de fase en el lado de bajo voltaje.

Z_{cc} : Impedancia de cortocircuito en el lado de bajo voltaje.

R_{cc} : Resistencia de cortocircuito en el lado de bajo voltaje.

R_1 y R_2 : Resistencia del lado primario y secundario.

R_2' : Resistencia del primario reflejada hacia el lado secundario.

X_1 y X_2 : Reactancia del lado primario y secundario.

X_2' : Reactancia del primario reflejada hacia el secundario.

L_1 y L_2 : Inductancia del lado primario y secundario.

C. Prueba de Secuencia Cero

En los transformadores eléctricos es preciso conocer la impedancia cero para estudios con diversos fenómenos

en redes de potencia trifásica en condiciones de desequilibrio. En una red eléctrica con carga simétrica, solamente aparecen las impedancias positiva y negativa; sin embargo, ante una perturbación asimétrica, la magnitud de las corrientes de cortocircuito o sobretensiones en fallas monofásicas y bifásicas a tierra en estado estacionario, la red está influenciada por la impedancia de secuencia cero en su gran parte [3].

Para el transformador u otro elemento no rotativo de la red eléctrica las impedancias positiva y negativa son iguales razón por la cual hay que poner mayor atención a la impedancia cero. Por otra parte, el transformador dependiendo del tipo de conexión, construcción del núcleo en cuanto a su posición de sus devanados y a su circuito magnético va a tener diferentes características de impedancia de secuencia cero [3].

La impedancia de secuencia cero de un transformador se expresa en ohmios/fase a la frecuencia de la red y se obtiene conectando en paralelo las 3 bobinas de un transformador en estrella (Y) y su terminal neutro, tal como se indica en la Fig. 5 [3].

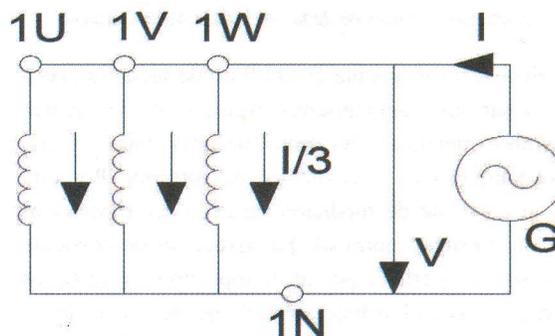


Fig. 5 Esquema para determinar la impedancia cero

Para que exista un valor de impedancia cero diferente de infinito en un transformador trifásico sus arrollamientos deben tener una conexión en estrella o zigzag. De igual manera es preciso que la red tenga neutro para que existan corrientes de secuencia cero.

El cálculo de la impedancia de secuencia cero se presenta en (30).

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{V}{I} \quad (30)$$

Donde:

V = Voltaje aplicado fase neutro.

I = Corriente de prueba del neutro.

La impedancia de secuencia cero consta de dos componentes: resistiva cero (R_0) y reactiva cero (X_0). La componente resistiva cero es mucho menor a su componente reactiva cero ($R_0 \ll X_0$), debido a esto se desprecia la componente resistiva y la impedancia de secuencia cero solo queda en términos de reactancia [3].

Para realizar la medición de secuencia cero en un transformador trifásico en conexión YNd alimentado con una fuente monofásica se debe colocar una fuente de voltaje alterna (AT). Para la medición se pueden utilizar transformadores de corriente y voltaje (CT, VT), banco de capacitores (C) y luego de ellos el transformador bajo prueba (TT), como se indica en la Fig. 6 La medida debe realizarse a la frecuencia nominal [10].

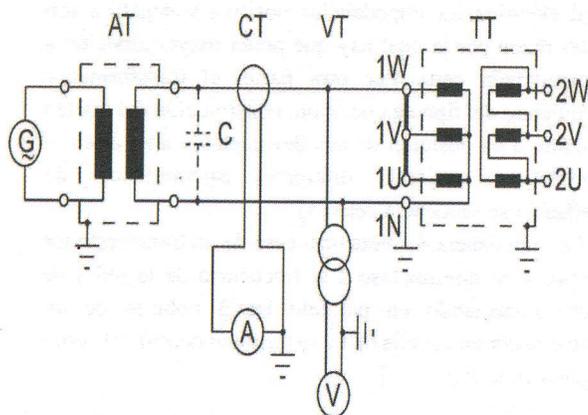


Fig. 6 Circuito para la medición de la impedancia de secuencia cero

Se debe tener en cuenta que el flujo de secuencia cero puede causar un calentamiento excesivo en las partes estructurales metálicas del transformador bajo prueba como el tanque, tapa y elementos de sujeción. Por este motivo la corriente de medición no debe ser superior al 30% de la corriente nominal. La inyección de corriente nominal solo se permite por un tiempo muy corto (unos pocos segundos) y el voltaje aplicado no debe exceder el voltaje de fase a neutro que se produce durante el funcionamiento normal [10].

III. METODOLOGÍA

Las pruebas se realizarán en un transformador didáctico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional en el que se ejecutarán las pruebas para determinar las impedancias de secuencia (Z^+ , Z^- , Z_0). Para obtener las curvas de cortocircuito se realizarán dos eventos de fallas, una monofásica a tierra y una bifásica a tierra. En esta primera parte se realizan todas estas pruebas en el transformador trifásico didáctico con conexión Dyn5 debido a que el transformador de 50 kVA que se usará posteriormente tiene internamente esta conexión; para obtener los valores iniciales de sus parámetros y validar el modelo estructurado en MATLAB-Simulink. Por último, se realizará la sintonización de los parámetros de secuencia.

En segundo lugar, se realiza el mismo procedimiento, pero ahora en el transformador de 50 kVA que se encuentra en el Laboratorio de Alto Voltaje. Se realizan las pruebas

para determinar las impedancias de secuencia (Z^+ , Z^- , Z_0). En la realización de los eventos de fallas cuando se trabaja con el transformador de 50 kVA se alimenta al transformador por el lado de alto voltaje a 500 V debido a las condiciones físicas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas que no dispone de un voltaje de 6300 V para poder alimentarlo. Por último, se realizará la sintonización de los parámetros de secuencia.

Debido a que las modelaciones de los cortocircuitos en Simulink requieren del valor de la resistencia de puesta a tierra, se midió la resistencia de puesta a tierra del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, utilizando el método del 62% dado por la norma ANSI IEEE 80 [11].

A. Transformador Trifásico Didáctico

El transformador que se indica en la Fig. 7 es una máquina estática que tiene sus tres devanados de cada fase en un solo núcleo ferromagnético con bobinas de 120 V a 5 A. Esta máquina se encuentra en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional y es utilizada en prácticas de laboratorio de distintas asignaturas, también se realizan pruebas eléctricas con distintos tipos de conexión y en este caso Dyn5, de igual manera esta máquina transforma magnitudes, ángulos de corrientes y voltajes en un sistema, y según la relación de transformación puede ser un transformador elevador o reductor.



Fig. 7 Transformador trifásico bajo prueba ubicado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EPN

B. Transformador Trifásico de 50 kVA

En la Fig. 8 se observa el transformador en el que se aplicará la metodología para determinar los parámetros de secuencia (Z^+ , Z^- , Z_0). Este transformador tiene internamente una conexión Dy5, razón por la cual se realizó la misma conexión en el transformador didáctico. En los eventos de falla, se alimentará a un voltaje reducido de 500 V y no al voltaje que necesita de 6300 V por disposición física en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, donde se realizarán estos eventos.

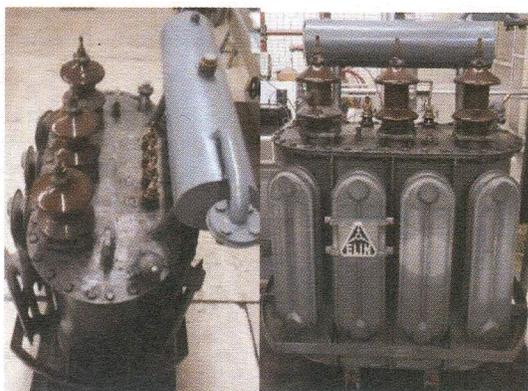


Fig. 8 Transformador trifásico de 50 kVA bajo prueba ubicado en el Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN

Los datos de placa de este equipo se encuentran en la Tabla I.

TABLA I
DATOS DE PLACA DEL TRANSFORMADOR PARA PRUEBA.

Transformador trifásico								
Marca	Elin		Año		1965			
Tipo	OD 51/10		N° serie		1077117			
Frecuencia	60	Hz	Conexión		Dy5			
Potencia	50	kVA	Impedancia		3.95	%		
Primario				Secundario				
1	6300	V	4.82	A	231.13	V	125.2	A
2	6150							
3	6000							
4	5700							

C. Falla Monofásica a Tierra en los Transformadores Bajo Prueba

La falla monofásica a tierra es una de las fallas asimétricas (causadas por líneas que caen a tierra, por cadena de aisladores que se rompen debido a las cargas de hielo, por daños permanentes en las torres y por fallas de los apartarrayos) que más ocurren en el sistema, es la falla que con más frecuencia se presenta. El 70% y 80% de las fallas ocasionadas en el sistema son fallas monofásicas a tierra [12].

Una vez realizada la conexión Dyn5 y alimentado por el lado primario con una fuente variable trifásica, se procederá a conectar en el lado secundario una de las tres fases libres a tierra, para el caso del transformador trifásico didáctico. Para generar el evento de cortocircuito se utilizará un interruptor bipolar de 25 A – 125 V; en el cual, al momento de cerrar el interruptor, se generará un cortocircuito monofásico a tierra. Para tomar la información se procederá a capturar rápidamente la curva de corriente de cortocircuito con ayuda del osciloscopio digital en la fase a tierra como se aprecia en la Fig. 9. Se coloca una resistencia de muy bajo valor entre la fase que va a tierra del lado secundario y el interruptor bipolar que donde se mide el valor de corriente en forma de voltaje con el osciloscopio.

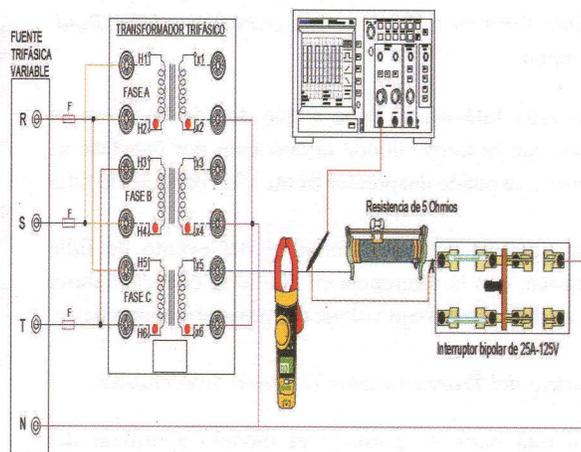


Fig. 9 Conexión del transformador trifásico didáctico para el evento de falla monofásica a tierra

Para la realización del evento de cortocircuito en el transformador trifásico de 50 kVA, se alimentará con una fuente regulable de 500 V trifásica por el lado de alto voltaje. Para su protección en el lado de alto voltaje se colocarán fusibles en cada fase que soporten valores de corriente de hasta 5 A. En el lado de bajo voltaje se conectará una de las tres fases a tierra para luego tomar mediciones de corriente cortocircuito. Para generar el evento de cortocircuito se utilizará un interruptor tripolar de 100 A – 500 V, al momento de cerrar las cuchillas, la medición a tomar deberá realizarse rápidamente para no causar errores significativos con ayuda del osciloscopio y la pinza amperimétrica como se aprecia en la Fig.10. Para la protección en el lado de bajo voltaje se colocará un fusible que soporte hasta 120 A en cada fase a tierra, para esto se coloca en paralelo alambre fusible de 60 A. En cada una de las dos fases a tierra se coloca un transformador de corriente (TC) para reducir su valor y registrar los datos de corriente de cortocircuito en el osciloscopio.

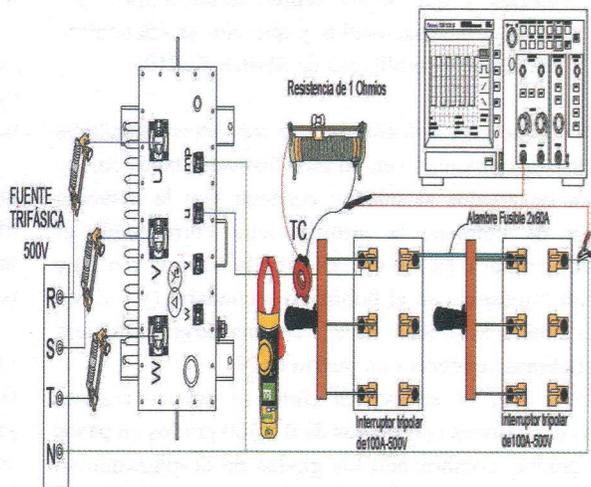


Fig. 10 Conexión del transformador trifásico de 50 kVA para el evento de falla monofásica a tierra

D. Falla Bifásica A Tierra en los Transformadores Bajo Prueba

La falla bifásica se debe a que dos de las fases se vinculan con la tierra, donde la corriente por una fase se hace nula o se puede despreciar frente a la corriente de falla [10].

Esta prueba es muy similar al del evento de falla monofásica, con la diferencia en la que se conectan ahora dos fases del lado de bajo voltaje del transformador a tierra.

E. Modelo del Transformador Trifásico Seleccionado

En esta parte se presenta el modelo a utilizar del transformador trifásico, se utiliza el modelo “Three-Phase Transformer (Two-Windings)”, el modelo a utilizar se encuentra en la biblioteca de MATLAB-Simulink en la sección *Specialized Power Systems /Fundamental blocks/ Elements*.

El modelo del transformador trifásico a utilizar debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Los parámetros poseen la capacidad de ajustarse a los valores calculados en las pruebas de laboratorio.
- Posee la capacidad de manejar los parámetros que se ingresan al modelo como variables para realizar la estimación de parámetros utilizados los métodos de optimización con la herramienta de Matlab *Parameter Estimation*.
- Tiene la capacidad de realizar los mismos eventos que se realizan en el laboratorio, en la que se aplica un cortocircuito y se puede obtener una respuesta que ayudará con la sintonización de los parámetros eléctricos.
- Este es un modelo que tiene una sustentación teórica y que se ha venido desarrollando con normas internacionales y que aún se encuentran activas en la biblioteca de Matlab R2019a.

El bloque está constituido con tres transformadores monofásicos implantado en un transformador trifásico.

Los devanados se pueden conectar con la notación estándar de bobinas, la primera letra corresponde al bobinado primario ya sea este en estrella o delta (Y o D) y con letra minúscula en el bobinado secundario (y o d) en estrella o delta. Si se selecciona Y con neutro en cualquiera de las bobinas, aparecerá un puerto de N.

En la Fig. 11 se explica cómo se pueden realizar muchas conexiones con rangos de 0 a 360 grados en pasos de 30 grados, combinando los grados de desplazamiento por la configuración D11 y D1.

Posición de las	Desplazamiento de fase (grados)	Conexión	1 conexión de la bobina	2 la conexión de la bobina	Terminales de la bobina Delta para conectar a red ABC
0	0	Yy0 Dd0	Y D1	Y D1	— ABC
1	-30	Yd1 Dy1	Y D11	D1 Y	ABC ABC
2	-60	Dd2	D11	D1	ABC
5	-150	Yd5 Dy5	Y D11	D1 Y	BCA CAB
7	+150	Yd7 Dy7	Y D1	D11 Y	CAB BCA
10	+60	Dd10	D1	D11	ABC
11	+30	Yd11 Dy11	Y D1	D11 Y	ABC ABC

Fig. 11 Diferentes conexiones posibles que se pueden obtener en el modelo de Simulink

Como ejemplo se presenta una conexión Yd5, esta se puede obtener conectando el bobinado primario en (Y) y el bobinado secundario en (D1) obteniéndose los terminales a la red.

Se selecciona *Three-limb core (core-type)* y se trabajará con un transformador trifásico de tres ramas, tipo núcleo. Este tipo de modelo produce resultados exactos durante un evento de falla asimétrica. En la condición que dure el voltaje asimétrico, el flujo de secuencia cero de un transformador tipo núcleo vuelve fuera del núcleo, a través de un boquete de aire, acero estructural y un tanque. Así, la inductancia de secuencia cero natural L_0 de un transformador de núcleo de tipo es generalmente muy baja (típicamente $0,5 \text{ pu} < L_0 < 2 \text{ pu}$) en comparación con un transformador trifásico con tres unidades monofásicas ($L_0 > 100 \text{ pu}$). Este bajo valor de L_0 afecta a voltajes, corrientes, y desequilibra flujo durante la operación lineal y saturada [13].

Los parámetros que nos permite ingresar en este bloque son los mismos que se calcularan en las pruebas en laboratorio a excepción de la saturación y el flujo inicial.

En primera instancia se debe escoger las unidades en las que se desea trabajar, en este trabajo se escogerá en p.u. para evitar que los resultados en las simulaciones se vean reflejado desde la bobina 1 o la bobina 2.

La potencia que se debe trabajar será la nominal con una frecuencia de 60 Hz. Para los bobinados 1 y 2 se debe ingresar el voltaje rms, el valor de las resistencias e inductancias calculadas de las pruebas de laboratorio, tanto para el lado primario como para el lado secundario.

Para la parte de magnetización se debe ingresar los valores R_m y L_m , valores que son calculados de las pruebas de laboratorio. Para la inductancia L_0 solo existe esa opción ya que la resistencia de secuencia cero es muy pequeña comparada a su parte inductiva y este valor se lo saca de las pruebas de laboratorio como se aprecia en la Fig. 12.

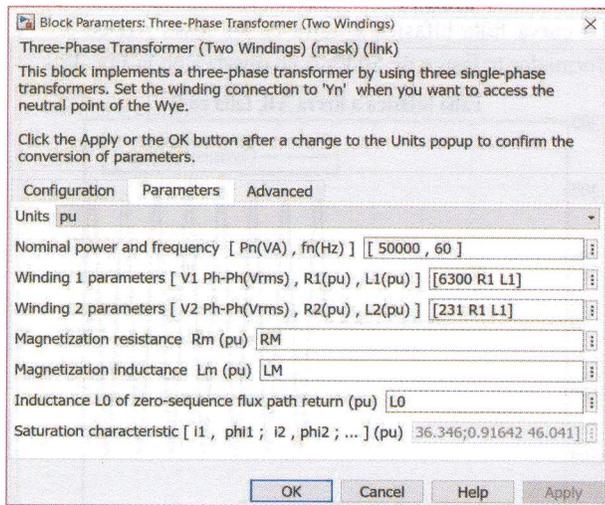


Fig. 12 Bloque de parámetros del transformador trifásico de dos bobinados

F. Sintonización de Parámetros

Se desarrolla en el software de MATLAB una rutina donde se ingresan los valores de los parámetros que se obtendrán después de realizar las pruebas antes descritas en los transformadores. Adicionalmente, reconoce la información que se registrará en el osciloscopio de los eventos de fallas monofásicas y bifásicas a tierra en formato Excel donde se puede generar las curvas de corriente de cortocircuito.

En Simulink se estructura mediante bloques la simulación de un transformador trifásico con la conexión deseada, donde también se puede realizar eventos de cortocircuitos monofásicos y bifásicos a tierra. Este archivo también reconoce los valores de corriente de cortocircuito que fueron registrados de la parte experimental en el osciloscopio ante las fallas monofásicas y bifásicas a tierra con el objetivo de superponer las curvas reales y simuladas. Este modelo se aprecia en la Fig.13.

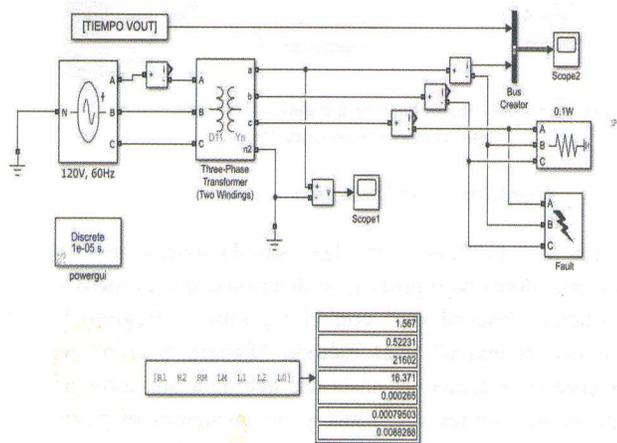


Fig. 13 Estructuración del programa para la optimización de parámetros de secuencia en un transformador trifásico

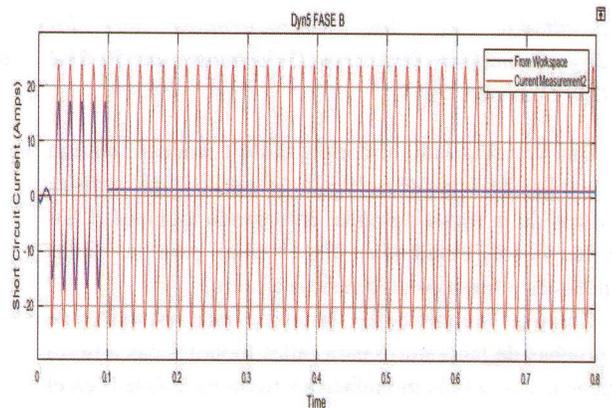


Fig. 14 Curvas de corriente de cortocircuito en los terminales del lado de bajo voltaje del transformador ante un evento de falla monofásica a tierra

Al correr este programa se generarán dos curvas; la simulada y la real, en la cual, ajustando el ángulo de desfase del generador, las curvas puedan quedar simétrica empezando sus valores desde el valor cero como se muestra en la Fig. 14 la curva simulada de color rojo y la curva real de color azul.

Para la sintonización de los parámetros de secuencia se utilizarán métodos de optimización no lineal de los que dispone la herramienta como son: Levenberg-Marquadt, Trust-Region-Reflective, Active-Set, Interior-Point, Sequential Quadratic Programming, and Simplex Search [8], [9].

La utilización de estos algoritmos se realiza con la herramienta *Parameter Estimation* de Simulink que hace que los parámetros antes mencionados varíen hasta un valor donde las curvas reales y simuladas de corrientes de cortocircuitos queden lo más ajustadas posibles.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Parámetros de Secuencia

En la Tabla II se presentan de los valores iniciales de los parámetros calculados con las pruebas de laboratorio para trabajar en las simulaciones de MATLAB-Simulink.

TABLA II
RESUMEN GENERAL DE VALORES EN P.U. DE LOS PARÁMETROS DE SECUENCIA DE LOS DOS TRANSFORMADORES DE TRABAJO.

Parámetros	Valores en p.u. para trabajar en el modelo	
	Transformador Didáctico	Transformador de 50 kVA
R1	0.065243	0.011174
R2	0.065243	0.011174
RM	299.75	499.007
LM	85.637	47.1318
L1	0.012449	0.016175
L2	0.012449	0.016175
L0	0.000123	0.041204

B. Resultados de los Cortocircuitos en los Transformadores Trifásicos Didácticos y de 50 kVA Con Conexión Dyn5

Una vez realizado el cortocircuito cuando se cierran las cuchillas del interruptor bipolar, el osciloscopio registra los datos de la forma de onda, entregando archivos .CSV que luego son tratados en Excel tanto para las fallas monofásica a tierra como bifásicas a tierra.

Como un ejemplo de las formas de onda resultantes de las pruebas de laboratorio para fallas monofásicas a tierra se tiene la curva falla monofásica a tierra en la fase B en el transformador trifásico didáctico que se observa en la Fig. 15.

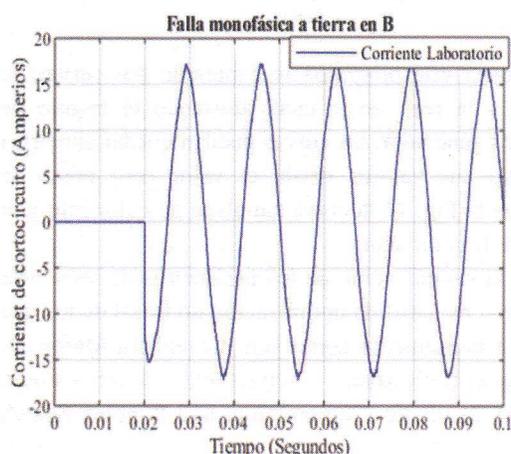


Fig. 15 Forma de onda de la corriente de cortocircuito para el evento de falla monofásica a tierra en B.

El proceso detallado para el transformador didáctico también se aplica para el transformador de 50 kVA tanto para las fallas monofásicas y bifásicas a tierra. La curva falla monofásica a tierra en la fase B en el transformador trifásico de 50 kVA se observa en la Fig. 16.

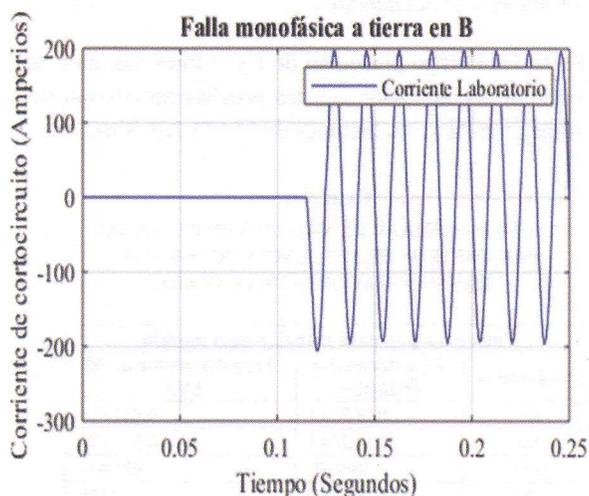


Fig. 16 Forma de onda de la corriente de cortocircuito para el evento de falla monofásica a tierra en B.

La curva falla bifásica a tierra en las fases AB en el transformador trifásico de 50 kVA se observa en la Fig. 17

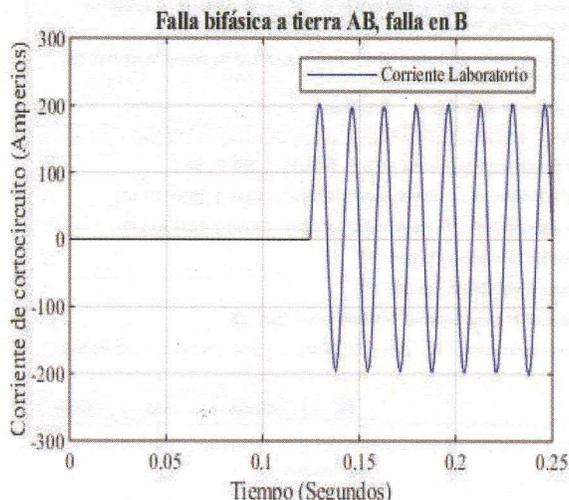


Fig. 17 Forma de onda de la corriente de cortocircuito para el evento de falla bifásica a tierra en este caso AB con falla en B.

Se observa en la Fig. 15 la corriente de cortocircuito para este transformador oscila entre los 15 [A] y 18[A]. En las Fig. 16 y Fig. 17 la corriente de cortocircuito para este transformador oscila entre los 180 [A] y 200 [A].

C. Sintonización de Parámetros

El programa en Simulink tiene el mismo procedimiento para realizar los dos tipos de eventos de fallas tanto en el transformador didáctico como en el transformador de 50 kVA como se observa en la Fig. 18.

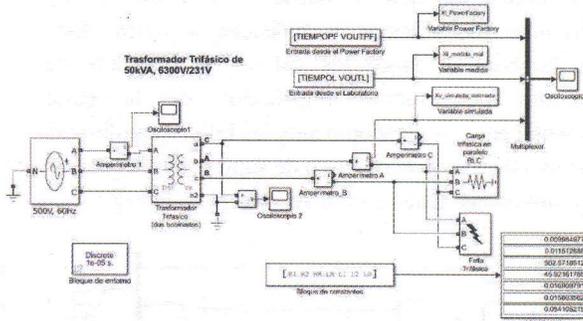


Fig. 18 Modelo desarrollado para eventos de cortocircuito en el transformador trifásico de 50 kVA.

1) Transformador Didáctico

En el transcurso de las simulaciones en los transformadores bajo prueba, se determinó que el método “Gradiente descendente” con el algoritmo “Región de confianza reflexiva” y el método “Pattern Search” no converge en ninguna circunstancia debido a que estos no respetan los límites inferiores y no encuentra el punto óptimo para ir iterando para mejorar su función objetivo. Con estos dos métodos la herramienta de MATLAB-

Simulink para optimizar indica un aviso de alerta que no puede converger.

En el proceso de la sintonización de parámetros en el transformador didáctico se utilizaron todos los métodos de optimización Levenberg Marquadt, Gradiente Descendente, Conjunto Activo, Punto Interior, Trust Region Reflective, Programación Cuadrática Secuencial (SQP), Pattern y Simplex Search.

Para este proceso se comparó las formas de onda de corriente de cortocircuito del lado de bajo voltaje del transformador trifásico bajo prueba con la curva de corriente que resulta del modelo estructurado en MATLAB-Simulink. Para lograr esto, se debe ajustar la curva del modelo a la curva real, variando el ángulo de fase entre 0° y 360° ajustando con prueba y error. Además, los tiempos donde inicia el cortocircuito deben ser iguales tanto del modelo en MATLAB como de la parte medida en el laboratorio, la comparación de estas curvas se aprecia en la Fig. 19

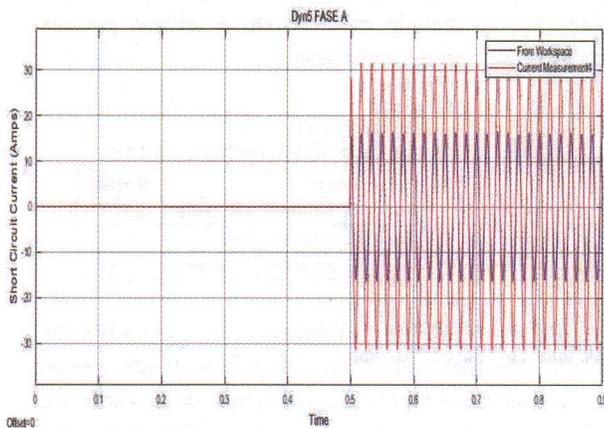


Fig. 19 Comparación de las curvas de corriente de cortocircuito para un evento de falla monofásica en la fase A del transformador trifásico didáctico. Curva roja: prueba de laboratorio. Curva azul: simulación.

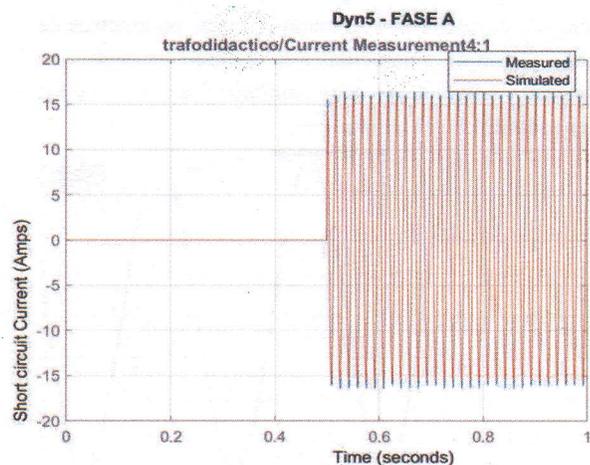


Fig. 20 Sintonización de las curvas de corriente de cortocircuito para un evento de falla monofásica en la fase A del transformador trifásico didáctico. Curva roja: prueba de laboratorio. Curva azul: simulación.

Posteriormente de la sintonización se logra que la curva del modelo se asemeje a la curva real variando sus parámetros como se observa en la Fig. 20.

Para un ejemplo de análisis se ha escogido el mejor método que es *Levenberg-Marquadt* para la falla monofásicas a tierra en A y las bifásicas a tierra AB con falla en la A, debido a que presenta errores RMSE muy bajos.

Al realizar las iteraciones e ir ajustando las dos formas de onda, la función objetivo que utiliza este método se va reduciendo hasta un valor que sea el óptimo durante todo el proceso.

También indica las variaciones de todos los parámetros, en algunos casos tiene mucha variación con respecto a la curva medida y esto sucede con el fin de cumplir la sintonización de la curva.

2) Transformador Trifásico de 50 kVA

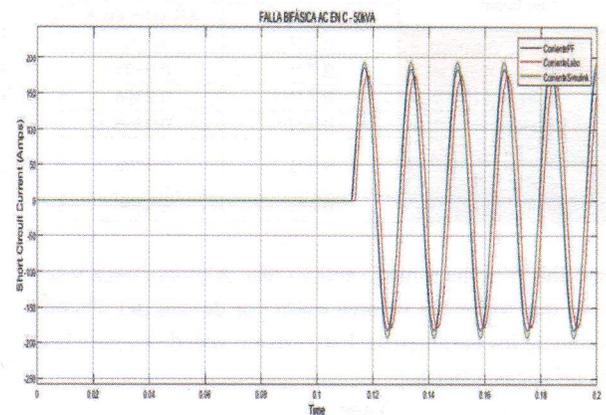


Fig. 21 Curvas de corriente de falla. Verde: del modelo. Roja: medida y Azul: Power Factory.

Para una mayor comprobación del modelo, se ha realizado en el programa computacional Power Factory una simulación de un transformador trifásico de 50 kVA de las mismas características y efectuando los mismos eventos de fallas, monofásicas a tierra y bifásicas a tierra. Los parámetros ingresados en este transformador son los que resultaron de las simulaciones de MATLAB, lo que resultan curvas muy parecidas a la del modelo como se presenta en la Fig. 21.

No hay mucha diferencia entre las curvas, lo que significa que bajo las mismas condiciones de falla e iguales características del transformador trifásico de 50 kVA el modelo se asemeja mucho a la realidad.

En la Tabla III y Tabla IV se observan los errores RMSE antes y después de la sintonización utilizando todos los métodos de optimización dando como resultado valores menores a 5%, lo que indica que las curvas están muy cerca entre sí.

TABLA III
VALORES DE LOS ERRORES RMSE ANTES DE LA SINTONIZACIÓN DE TODOS LOS MÉTODOS UTILIZADOS.

RMSE antes de la simulación		
Método de optimización no lineal	Monofásica a tierra	Bifásica a tierra
	A	AB falla en A
Levenberg-Marquadt	2.496	3.645
Trust-Region-Reflective	2.496	3.597
Active-Set	2.495	3.551
Interior-Point	2.807	3.614
Sequential Quadratic Programming	2.812	3.654
Simplex search	2.761	3.554

TABLA IV
VALORES DE LOS ERRORES RMSE DESPUÉS DE LA SINTONIZACIÓN DE TODOS LOS MÉTODOS UTILIZADOS.

RMSE después de la simulación		
Método de optimización no lineal	Monofásica a tierra	Bifásica a tierra
	A	AB falla en A
Levenberg-Marquadt	0.721	0.931
Trust-Region-Reflective	0.721	0.9306
Active-Set	0.721	0.9306
Interior-Point	0.721	0.9306
Sequential Quadratic Programming	0.721	0.9306
Simplex search	0.721	0.9306

En la Tabla V se ha tomado solo la fase A monofásica y se observa que todos los valores están por debajo del 5% en cada uno de los parámetros. Esto mismo sucede en para las fallas bifásicas a tierra.

TABLA V
SIMULACIONES DE LOS PARÁMETROS DE SECUENCIA EN EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 50 KVA UTILIZANDO EL MÉTODO LEVENBERG MARQUADT PARA FALLAS MONOFÁSICAS A TIERRA

Método de optimización		Nonlinear least squares			
Algoritmo		Levenberg-Marquadt			
Tipo de Falla		Monofásica a tierra			
Falla en la fase		A			
# Iteraciones del método		1			
Función objetivo minimizada		2.4664			
Resistencia de falla		0.44			
50 kVA		Medidos	Dyn5	Error Relativo (%) A	
PARÁMETROS EN P.U.	R1	0.011	0.012		3.289
	R2	0.011	0.011		0
	RM	499.007	499.054		0.009
	LM	47.132	47.589		0.96
	L1	0.016	0.017		2.929
	L2	0.016	0.016		0
	L0	0.041	0.04		1.748

Una vez calculado el promedio del parámetro de las diversas simulaciones, se ha determina un valor promedio total de todas las fallas, las cuales se presentan en resumen en la Tabla VI.

TABLA VI
TABLA CON LOS VALORES PROMEDIOS TOTALES DE LOS PARÁMETROS DE SECUENCIA.

PARÁMETRO	PROMEDIO	VALOR INICIAL
R1	0.009984977	0.011174
R2	0.011512888	0.011174
RM	502.5718512	499.007
LM	45.92161765	47.1318
L2	0.015803562	0.016175
L1	0.016909791	0.016175
L0	0.054105219	0.041204

Estos valores son los estimados de todas las simulaciones en conjunto, las cuales presentan valores cercanos a los valores iniciales.

El mejor método de estimación fue *Levenberg Marquadt*. Con el método de punto interior, los parámetros R_m y L_m se elevan demasiado con respecto a los valores iniciales y los únicos que no varían tanto son los R_1 y L_1 , es decir los de secuencia positiva por lo que diremos que tampoco se recomienda este método a utilizar por los parámetros que tienden a elevarse.

TABLA VII
PRESENTA LOS ERRORES RMSE ENTRE CURVAS.

Formas de onda		RMSE
Xi medida real	vs. Xi estimada simulada	2.8773
Xi medida real	vs. Xi PowerFactory	4.453
Xi PowerFactory	vs. Xi estimada simulada	2.515

Los errores RMSE se presentan en la Tabla VII entre las tres curvas (del modelo, medida y PowerFactory) con una simulación que utiliza los parámetros de la Tabla VI, dando como resultado valores muy bajos, por lo tanto, esto demuestra que la diferencia entre las formas no es muy grande al compararlas con la realidad.

En la Fig. 22 como se puede apreciar, las formas de corriente de cortocircuito obtenidas con los parámetros de la Tabla VI son muy parecidas a la realidad, es decir, que los parámetros finales son muy similares y se ajustan a los valores medidos en el laboratorio.

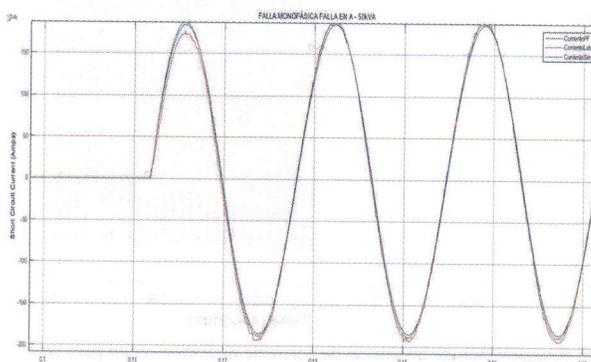


Fig. 22 Formas de onda de la corriente de cortocircuito: La de Power Factory de color azul, la del laboratorio de color rojo y la de Simulink de color verde.

Como resultado de la simulación final presentada en la Fig.22 y la Tabla VII se obtiene la validación de los parámetros dados en la Tabla VI como los valores de los parámetros aceptables para el transformador de 50 kVA en estudio dentro del margen de error de la sintonización.

V. CONCLUSIONES

Se realizó la sintonización de parámetros de secuencia mediante la herramienta *Parameter Estimation* de MATLAB la cual contiene diferentes métodos de optimización no lineal para lograr sintonizar de curvas producidas por los eventos de fallas en el transformador trifásico de 50 kVA el cual reduce los errores hasta encontrar el punto óptimo de la función objetivo y así entregar nuevos parámetros que servirán para reproducir en un transformador real.

En los resultados analizados se observa que todos los métodos reducen el error RMSE, pero este valor no significa que se impone para decir que es el mejor método para estimar los parámetros. En las tablas también se analiza el error relativo y en algunos métodos puede ser muy grande, lo que significa que, muchos parámetros diferentes pueden producir la misma curva y por esta razón no necesariamente son los valores reales. Debido a esto se requiere analizar tanto el error RMSE y el error relativo.

El modelo presentado puede tomar medidas de un transitorio de corriente de un transformador trifásico y estimar sus parámetros sin saber los de partida, en este proyecto sí se conocen estos valores y se pueda correr varias simulaciones y de todos estos concluir cual es el mejor de los métodos.

Para escoger el mejor método hay que combinar el que realice el ajuste lo mejor posible por medio del menor RMSE y por medio del menor error relativo de los parámetros de partida el cual fue en este proyecto el de *Levenberg Marquadt*.

VI. REFERENCIAS

- [1] V. Tibanlombo y N. Granda, Estudio de la respuesta en frecuencia mediante Pruebas de impulso para la evaluación del estado del aislamiento en transformadores, Quito: EPN, 2017.
- [2] E. Ruíz, Determinación de la impedancia homopolar de transformadores de potencia, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [3] International Electrotechnical Commission, «Standard 60076-1 Power Transformer-Part 1,» IEC, 2011.
- [4] IEEE, «IEEE Standard Test Code for Liquid Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformer,» IEEE, 2015.
- [5] E. Sorrentino y J. C. Burgos, «Comparison of methods for measuring zero sequence impedances in 3-phase core-type transformers,» de *2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Londres, 2012.
- [6] A. Ramos, J. C. Burgos, A. Moreno y E. Sorrentino, «Determination of Parameters of Zero-Sequence Equivalent Circuits for Three-Phase Three-Legged YNyd Transformers

Based on Onsite Low-Voltage Tests,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, n° 3, pp. 1618-1625, 2013.

- [7] A. Ramos y J. C. Burgos, «Influence of tertiary stabilizing windings on zero-sequence performance of three-phase three-legged YNyd transformers. Part I: Equivalent circuit models,» *Electric Power Systems Research*, vol. 144, n° 1, pp. 32-40, 2017.
- [8] B. Chiguano, A. Valenzuela y C. Gallardo, Estimación de parámetros eléctricos de la máquina sincrónica utilizando Matlab-Simulink, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [9] B. Chiguano, J. Ramírez, F. Quilumba y C. Gallardo, «Estimación de los Parámetros Eléctricos de un Generador Sincrónico basada en Mediciones de Laboratorio usando Métodos de Optimización No Lineal,» *Revista Técnica Energía*, vol. 15, n° 1, pp. 40-53, 2018.
- [10] A. Carlson, J. Fuhr, G. Schemel y F. Wegscheider, Testing of Power Transformers Routine tests, Type tests and Special tests, Düsseldorf: ABB AG, 2003.
- [11] IEEE, IEEE Std 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE, 2015.
- [12] M. Thakre, S. Kumar Gawre y M. Kumar Mishra, «Distribution System Faults Classification And Location Based On Wavelet Transform,» *International Journal on Advanced Computer Theory and Engineering (IJACTE)*, vol. 2, n° 4, pp. 2319-2526, 2013.
- [13] MathWorks, «Three-Phase Transformer (Three Windings),» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasetransformerthreewindings.html>. [Último acceso: 01 03 2019].

VII. BIOGRAFÍAS



Oscar Fernando Cuasapaz Bejarano, Nació el 20 de julio de 1986 en Ibarra provincia de Imbabura, Ecuador. Se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2019. Sus áreas de interés son los Sistemas Eléctricos de Potencia y Construcción de Redes de Distribución.



Juan D. Ramírez Guasgua, se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en el 2015. Actualmente está realizando sus estudios de posgrado en Administración de Empresas de los Sectores Estratégicos en la Escuela Politécnica Nacional. Se ha desempeñado como especialista técnico en la construcción de líneas de transmisión de electricidad en CELEC EP TRANSELECTRIC y en la actualidad trabaja como Profesor Ocasional en el Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés incluyen: teorías de sistemas y control aplicadas al sistema eléctrico de potencia, modelación y simulación de sistemas eléctricos, ingeniería de alto voltaje, y operaciones comerciales del sector eléctrico.



Fausto Guillermo Avilés Merino, Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia, de la Escuela Politécnica Nacional de Quito 1978. Título de PROFESOR de la Escuela Politécnica Nacional 2003, Magister en Ingeniería Industrial y Productividad MSc. 2007. Coordinador de la carrera de ingeniería Eléctrica 2001-2013, Profesor de la EPN hasta el 2014. Actualmente Profesor Honorario a tiempo parcial.



Nelson V. Granda, - Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2006 y de Doctor en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan (Argentina), en el año 2015. Se ha desempeñado como Ingeniero Eléctrico en varias instituciones del sector eléctrico y petrolero como son el Operador Nacional de Electricidad (CENACE), Petroamazonas EP y CELEC-EP TRANSELECTRIC.

Actualmente se desempeña como parte del staff docente del Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son análisis y control de sistemas eléctricos de potencia en tiempo real y aplicaciones de Sistemas de Medición de Área extendida (WAMS) basados en unidades de medición sincrofásorial (PMU).



Franklin L. Quilumba obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en Quito, Ecuador, en el 2008. Realizó sus estudios de posgrado en la Universidad de Texas Arlington, en Arlington, Estados Unidos de América, donde obtuvo el grado de Master of Science y el título de Doctor of Philosophy Ph.D., en Ingeniería Eléctrica, en el 2014. Entre 2014 y 2018 fue docente titular en el Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. En la actualidad se desempeña como ingeniero de protecciones de sistemas de transmisión de la compañía Oncor Electric Delivery, Fort Worth, TX, USA. Sus áreas de interés son estabilidad, protección y control de sistemas eléctricos de potencia.