

Análisis de Transformadores Trifásicos

Erick Christopher Dávalos González
 Universidad de Guadalajara (CUCEI)
 Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica
 Guadalajara, Jalisco, México
 erick.davalos2937@alumnos.udg.mx

Resumen — En este documento se analiza el comportamiento de diferentes configuraciones de transformadores trifásicos bajo distintas condiciones de operación y carga. Se realizaron simulaciones en MATLAB Simulink para configuraciones D-Y, D-D, Y-Y y Y-D, con medición de variables como voltajes, corrientes y potencias. También se estudia el impacto de armónicos de tercer orden, corrientes de energización y fallas en el sistema, incluyendo análisis fasorial y de secuencias de fase. Los resultados permiten comprender las implicaciones de las diferentes conexiones y condiciones operativas, incluyendo la capacidad de los transformadores para mitigar armónicos y la respuesta frente a fallas.

Palabras clave — *Transformadores trifásicos, Simulink, potencia reactiva, potencia real, simulación, corriente de energización, conexiones de transformadores.*

- P : Potencia Activa
- Q : Potencia Reactiva
- V : Voltaje
- I : Corriente
- RL : Resistivo – Inductivo
- RC : Resistivo – Capacitivo
- $D - Y$: Conexión Delta – Estrella

I. INTRODUCCIÓN

Los transformadores trifásicos son maquinas eléctricas fundamentales en los sistemas eléctricos debido a su capacidad para transferir energía entre diferentes niveles de voltaje y garantizar una operación eficiente de los sistemas eléctricos. Se presenta un análisis de la operación de bancos de transformadores trifásicos en diversas configuraciones (D-Y, D-D, Y-Y y Y-D), incluyendo la evaluación del impacto de armónicos, corrientes de energización y fallas.

Se utiliza un enfoque basado en simulaciones realizadas en Simulink, incorporando mediciones de voltajes, corrientes y potencias en condiciones de carga y vacío. Además, se explora el comportamiento bajo armónicos de tercer orden y el análisis de las corrientes de energización en transformadores con núcleo saturable. Finalmente, se evalúa el desempeño de los transformadores frente a fallas eléctricas y configuraciones abiertas (Y abierta y D abierta).

El trabajo se enfoca en medir y analizar parámetros críticos como voltajes, corrientes y potencias, tanto en el dominio fasorial como continuo, utilizando herramientas de simulación y medición. Los resultados obtenidos permiten una comprensión de los efectos de las condiciones de operación del transformador y ofrecen información sobre la naturaleza del transformador.

En las siguientes secciones, se describen la metodología, los resultados obtenidos y el análisis correspondiente, con el fin de ofrecer una perspectiva integral del impacto de estas configuraciones en la operación de transformadores trifásicos.

II. DESARROLLO DE LAS SIMULACIONES

A. Operación de bancos de transformadores monofásicos formando uno trifásico (1A)

Este análisis se centra en dos configuraciones específicas: la conexión D-Y utilizando un transformador de 12 terminales y la conexión D-D con bancos monofásicos. Estas configuraciones son ampliamente utilizadas en sistemas de distribución por su capacidad para adaptarse a diferentes niveles de voltaje y tipos de carga. Se evalúa el desempeño de bancos monofásicos en una conexión D-D bajo condiciones de carga combinada (trifásica de 200 kVA y monofásica de 80 kVA).

El transformador utilizado es de 200kVA, con tensiones de 23kV/230V voltajes de línea a línea. En este caso se eligió una carga puramente resistiva del valor de la potencia del transformador (200kW). La prueba se realizó con un tiempo de simulación de 0.054s.

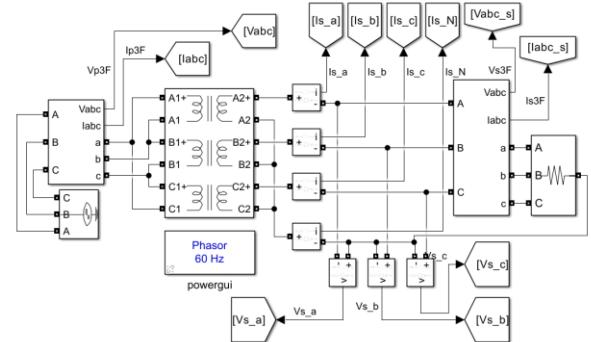


Fig. 1. Modelo para la simulación 1A

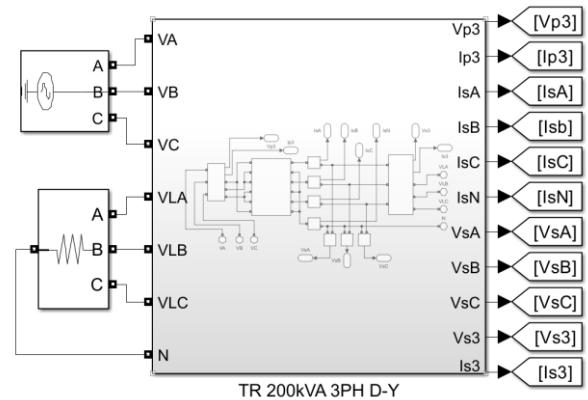


Fig. 2. Modelo para la simulación 1A utilizando la función subsistema.

A continuación, se muestran los resultados de las mediciones, debido a que la carga es una carga trifásica balanceada no existiera corriente por el neutro de la estrella, para obtener resultados más precisos se utilizó el analizador

de secuencia configurado para secuencia positiva debido a que como es una carga balanceada es la única corriente de secuencia que existirá. La relación de transformación para este caso es de 100.

$$I_{3\phi S} = \frac{S}{\sqrt{3}V} = \frac{200}{\sqrt{3} * 0.23} = 502.04A \quad (1)$$

$$I_{3\phi P} = \frac{S}{\sqrt{3}V} = \frac{200}{\sqrt{3} * 23} = 5.02A \quad (2)$$

Sabemos que en una conexión D los voltajes de línea – línea son iguales a los voltajes de fase. En cambio, en una Y los voltajes de línea – línea son afectados proporcionalmente por un factor de raíz de 3 respecto los voltajes de fase.

En el caso de las corrientes en la conexión D las corrientes de línea - línea se ven afectadas de forma proporcional por un factor de raíz de 3 respecto a las corrientes de fase. Para el caso de la Y ambas corrientes son iguales.

En la Fig.3 es necesario agregar que los ángulos que se muestran corresponden a la referencia del sistema, en este caso al ángulo de la fase A, debido a que es un sistema trifásico balanceado los ángulos de las otras fases se obtienen desplazando 120° eléctricos cada fase, manteniendo la misma magnitud.

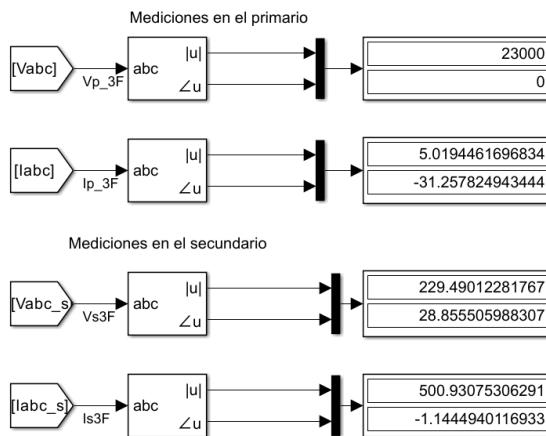


Fig. 3. Mediciones con analizador de secuencia para el primario y secundario del transformador caso 1A.

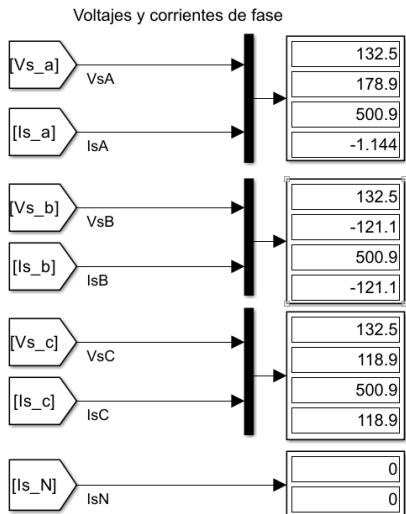


Fig. 4. Mediciones de corrientes y voltajes de fase para el secundario del transformador para el caso 1A.

Para el caso del subsistema los valores obtenidos son idénticos ya que el sistema es el mismo, únicamente embebido en un sistema por puertos.

B. Conexión D-D con bancos monofásicos, carga trifásica de 200kVA y monofásica de 80kVA (1B).

En la Fig. 5, se muestra el circuito que se simulará, este consta de una carga trifásica 200kVA con factor de potencia de 0.8 y una carga monofásica de 80kVA con factor de potencia de 0.9. El transformador denotado con el numero 3 es de 100kVA mientras que los otros dos son de 75kVA, por lo que la potencia total del banco es de 250kVA.

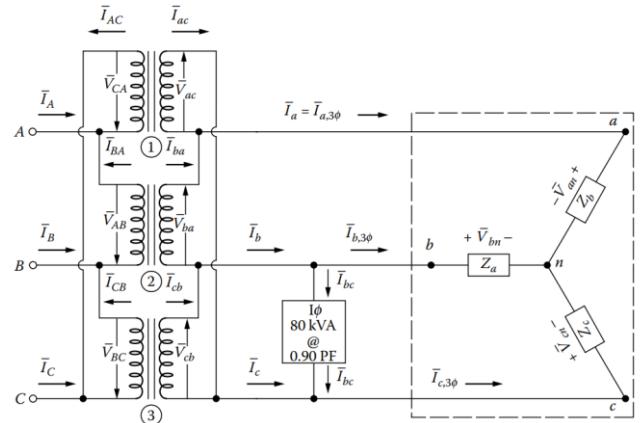


Fig. 5. Conexión D-D para el caso 1B.

Se comienza definiendo los valores de las cargas para nuestro modelo, se nos dice que el factor de potencia es de 0.8 para la carga trifásica y 0.9 para la carga monofásica por lo que:

$$P_{3\phi} = S_{3\phi} * f.p = 200 * 0.8 = 160kW \quad (3)$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{200^2 - 160^2} = 120 kVAR \quad (4)$$

$$P_{1\phi} = S_{1\phi} * f.p = 80 * 0.9 = 72kW \quad (5)$$

$$Q_{1\phi} = \sqrt{82^2 - 72^2} = 37.87 kVAR \quad (6)$$

$$I_{3\phi} = \frac{S}{\sqrt{3}V_{L-L}} = \frac{200}{\sqrt{3} * 0.24} = 481.12A \quad (7)$$

$$I_{1\phi} = \frac{S}{V_{L-L}} = \frac{80}{0.24} = 333.33A \quad (8)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{P}{S}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{160}{200}\right) = 36.86^\circ \quad (9)$$

Para la carga trifásica la corriente de la fase A tiene un ángulo de -36.86° respecto al ángulo del voltaje de referencia (fase A) como se muestra en la ecuación 9. Los ángulos de las corrientes se encuentran desplazados 120° eléctricos entre sí. El ángulo de la corriente bc para la carga monofásica es de -25.84° con respecto al voltaje como se muestra en la ecuación 10, además, el ángulo del voltaje bc atrasa a la referencia Van por 90° , dando un total de -115.8° de desfase de la corriente bc respecto a Van.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{P}{S}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{72}{80}\right) = -25.84^\circ \quad (10)$$

Las corrientes de línea fluyendo en cada fase del sistema secundario se encuentran de la siguiente manera:

$$I_a = I_{a3\emptyset} \quad (11)$$

$$I_b = I_{b3\emptyset} + I_{bc} = 765.05 \angle 219.7^\circ A \quad (12)$$

$$I_b = I_{c3\emptyset} - I_{bc} = 804.33 \angle 75.38^\circ A \quad (13)$$

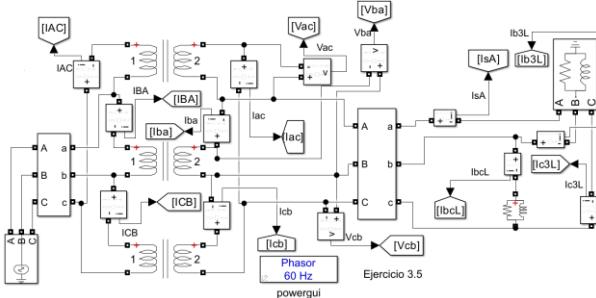


Fig. 6. Modelo utilizado para simular el punto 1B.

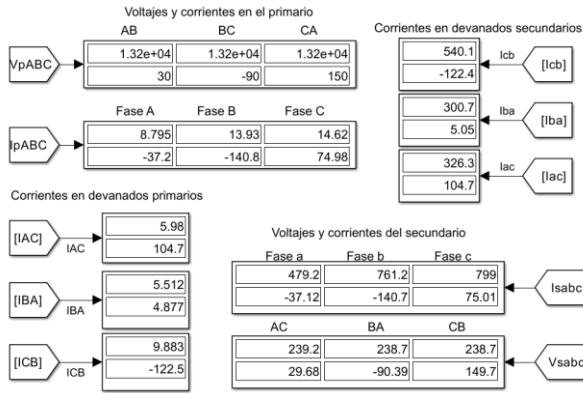


Fig. 7. Resultados de las mediciones de voltajes y corrientes que entran, salen del transformador y corrientes en los devanados para caso 1B.

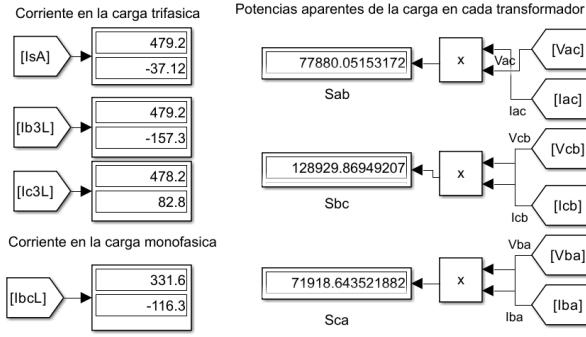


Fig. 8. Resultados de las mediciones de corrientes de la carga monofásica y trifásica y las potencias en cada transformador caso 1B.

De la Fig.8 se puede observar que la suma de las potencias aparentes en los tres transformadores es de 278.72kVA, lo que resulta lógico ya que la potencia total de las cargas es de 280kVA. Sin embargo, hay algo particularmente interesante, el transformador bc se encuentra sobrecargado al 122.4% y el transformador ab únicamente al 104% pero el transformador ca se encuentra por debajo de su capacidad. Se puede concluir de este ejercicio que cuando hay cargas desbalanceadas en bancos de transformación se debe de tener cuidado ya que

podría provocar que algún transformador se sobrecargue poniendo en riesgo la continuidad del servicio y los equipos.

De la Fig. 7 y de las ecuaciones 9 a la ecuación 13 se puede observar que las mediciones obtenidas son similares a las teóricas, la diferencia de potencias, corrientes y tensiones se deben a las características internas del transformador, así como a las cargas conectadas.

C. Operación de transformadores con armónicos múltiples de 3 (2AB).

En esta subsección, se investigará el efecto del tercer armónico sobre un transformador trifásico en configuraciones Y-Y y Y-D, utilizando una fuente programable de voltaje que introduce armónicos controlados a la onda fundamental. Se realizarán mediciones detalladas de voltajes y corrientes en cada caso, analizando cómo el armónico afecta las corrientes de neutro, las tensiones de fase y de línea, y el comportamiento de la carga bajo distintas condiciones de potencia reactiva.

Para reportar el caso del punto A se agrega un tercer armónico de 0.5p.u sin desplazamiento, las tensiones del transformador Y-Y son de 23kV-220V y se miden los voltajes de fase y de línea de ambos extremos del transformador. En este caso se utiliza un bloque de transformador trifásico con dos devanados. Posteriormente se le conecta una carga RL con potencia reactiva igual a 0.5 veces la potencia activa y se mide la corriente por el neutro. La generación del tercer armónico comienza en el segundo ciclo de la onda y termina hasta que finaliza el tiempo de simulación.

$$S = \sqrt{P^2 + (0.5P)^2} = \sqrt{1.25P^2} = P\sqrt{1.25} \quad (14)$$

$$P = \frac{S}{\sqrt{1.25}} = \frac{200}{\sqrt{1.25}} = 178.89kW \quad (15)$$

$$Q = 0.5P = 0.5 * 178.89 = 89.44kVAR \quad (16)$$

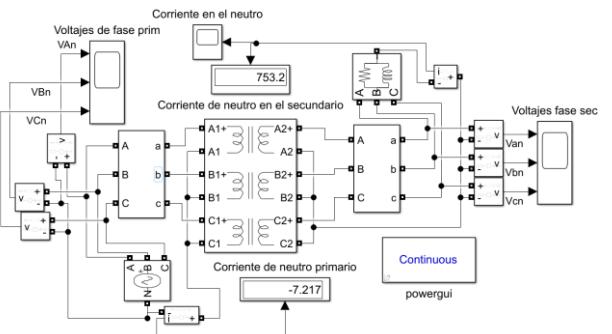


Fig. 9. Modelo utilizado para reportar el caso 2A. TR 200kVA Y-Y 23kV-220V. armónico de 3er orden 0.5pu carga Q=0.5P

En la Fig. 10 y Fig.11 se muestran los voltajes de fase del primario y del secundario respectivamente, se observa que después que se inyectan los armónicos al sistema la onda de voltaje se ve drásticamente afectada, los armónicos de tercer orden son armónicos de secuencia cero, esto significa que todas las fases tienen componentes armónicas con la misma magnitud y fase, por lo que las tres fases se ven distorsionadas.

Ahora, en la Fig. 12 y Fig.13 se muestran las tensiones de línea a línea, se puede observar que estas señales no han sido afectadas por la componente de tercera armónica, debido a que las tensiones se calculan como la diferencia entre voltajes de

fase, por lo que los armónicos de tercer orden se cancelan entre sí. Los voltajes de línea-línea no se ven afectados.

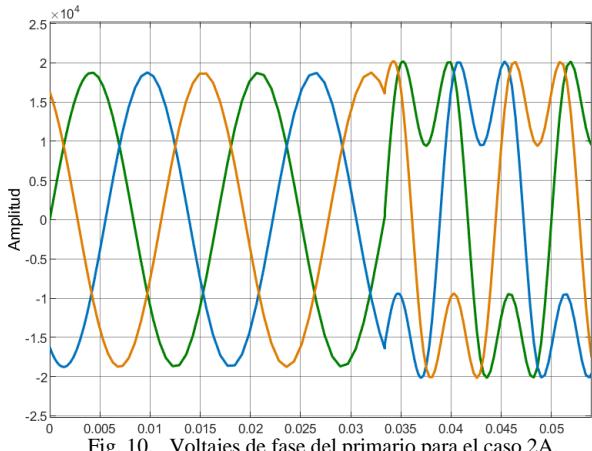


Fig. 10. Voltajes de fase del primario para el caso 2A.

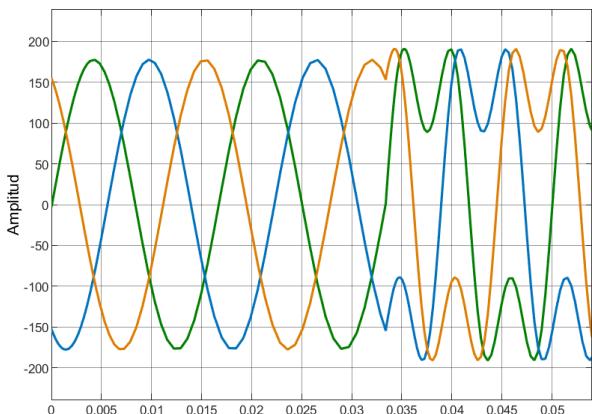


Fig. 11. Voltajes de fase del secundario para el caso 2A.

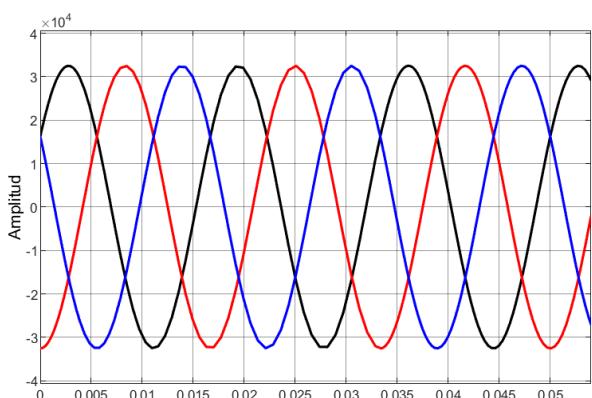


Fig. 12. Voltajes de línea a línea del primario para el caso 2A.

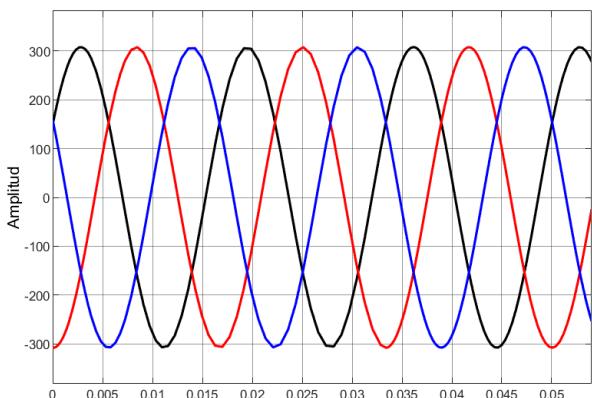


Fig. 13. Voltajes de línea a línea del secundario para el caso 2A.

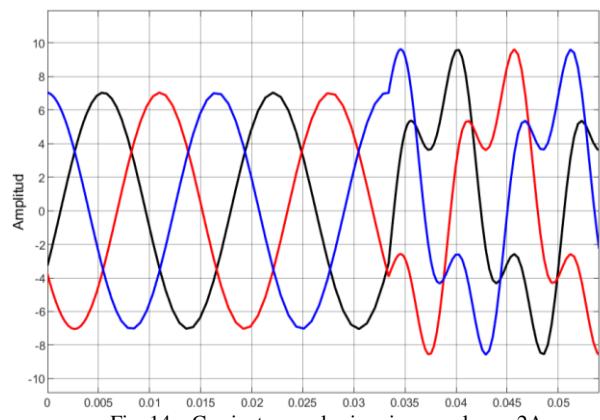


Fig. 14. Corrientes en el primario para el caso 2A.

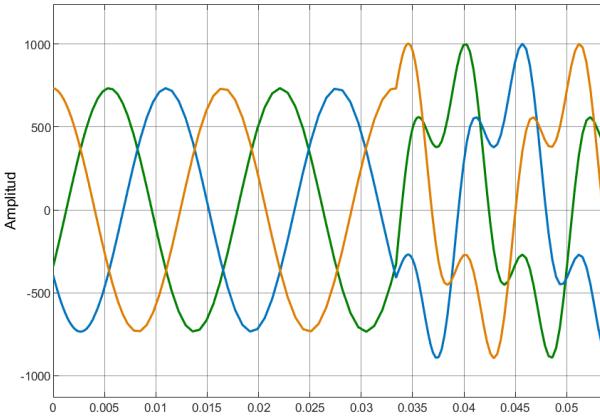


Fig. 15. Corrientes en el secundario para el caso 2A.

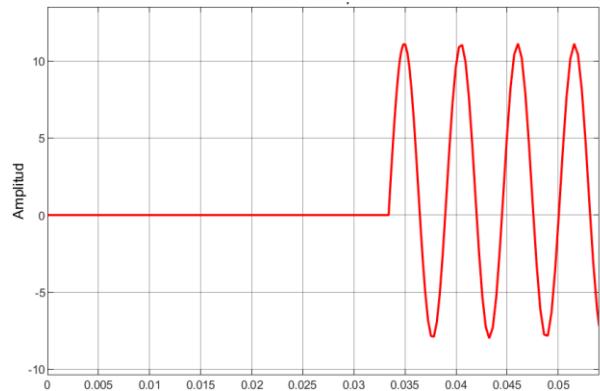


Fig. 16. Corriente en el neutro primario para el caso 2A.

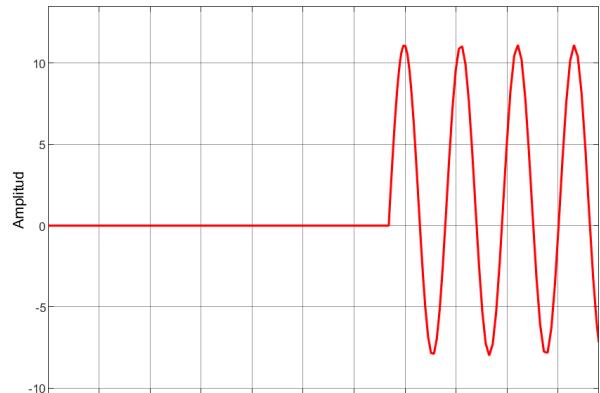


Fig. 17. Corriente en el neutro secundario para el caso 2A.

En la Fig.14 y Fig.15 se observa que las corrientes sí se ven afectadas por esta componente de tercera armónica y

debido a que las corrientes de fase son igual a las corrientes de línea para el caso de la conexión Y-Y, esta distorsión debido a los armónicos se ve reflejado en las corrientes de ambos lados del transformador.

$$I_{linea} = \frac{200kVA}{\sqrt{3} * 220} = 524.8A \quad (17)$$

En la Fig.16 y Fig.17 la corriente que fluye por el neutro es la corriente generada por la componente de tercera armónica. Esto es:

$$I_{neutro} = 3I_{A3} \quad (18)$$

Se está utilizando una magnitud de tercera armónica de 0.5pu por lo que la corriente por el neutro representa 1.5 veces la corriente de la fase A. Esto quedaría como:

$$I_{neutro} = 3(0.5)(524.8) = 787.2A \quad (19)$$

A continuación, se muestran las mediciones.

Voltajes y corrientes de línea RMS

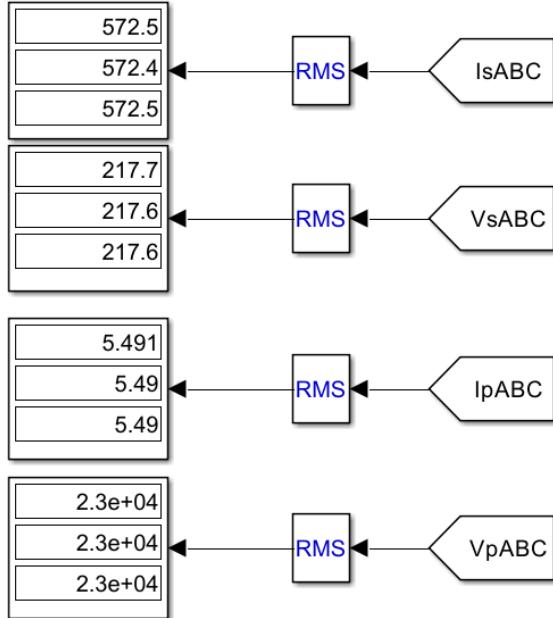


Fig. 18. Resultados de las mediciones para el caso 2A.

La corriente medida del lado secundario del transformador es mayor que la corriente trifásica calculada en la ecuación 17, esto se debe a la componente de tercera armónica que se le está inyectando al sistema, esto hace que el transformador experimente una sobrecarga, aunque la carga conectada sea igual a la capacidad del transformador, con este incremento en la corriente en el secundario el transformador estaría entregando 218.1kVA. La tensión del secundario se ve ligeramente afectada por la carga.

Previamenete se analizó el caso para el transformador Y-Y, ahora el análisis será similar, pero utilizando un transformador Y-D. Los parámetros de la simulación serán los mismos que en el caso anterior, un tiempo de simulación de 0.054s, carga RL con Q = 0.5P y tercer armónico de 0.5pu, la carga en este caso es conectada en el lado de delta y se mide la corriente del neutro del lado de la estrella. En el caso de la conexión delta, los voltajes de fase y línea - línea son los mismos, mientras que las corrientes de línea - línea y fase son diferentes.

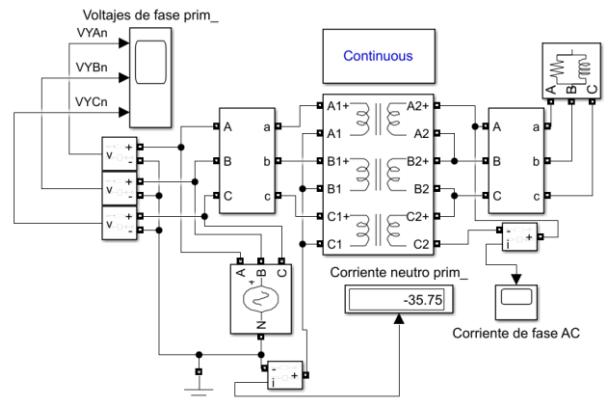


Fig. 19. Modelo utilizado para reportar el caso 2B. TR 200kVA Y-D 23kV-220V. armónico de 3er orden 0.5pu carga Q=0.5P

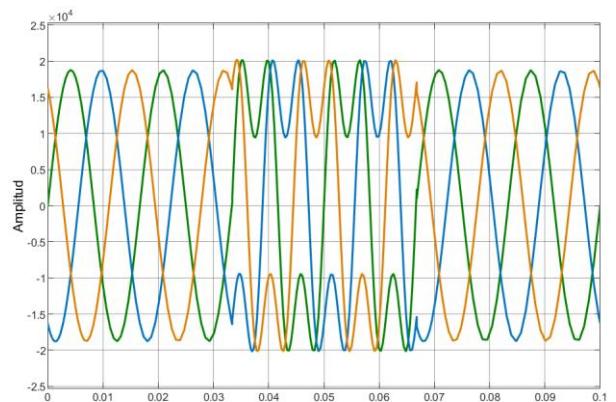


Fig. 20. Voltajes de fase del primario para el caso 2B.

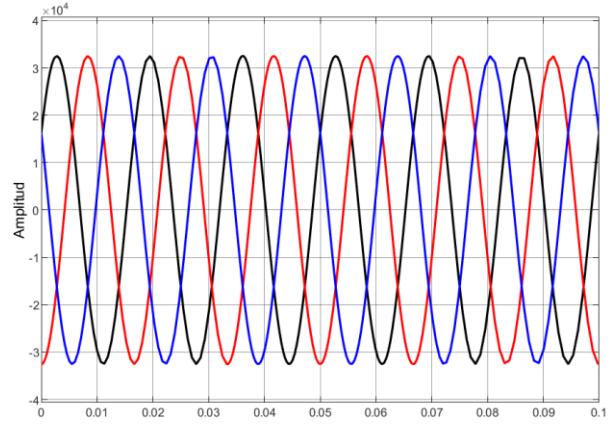


Fig. 21. Voltajes de línea a línea del primario para el caso 2B.

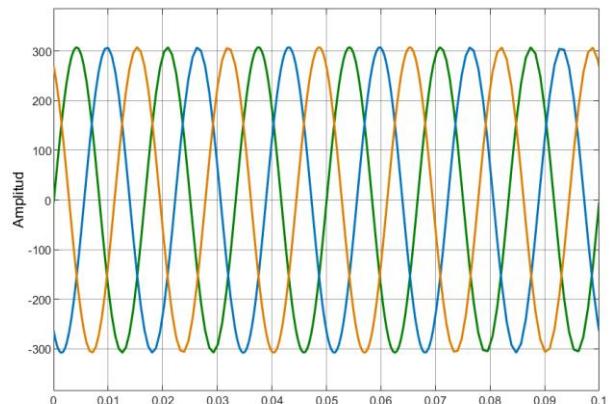


Fig. 22. Voltajes del secundario para el caso 2B.

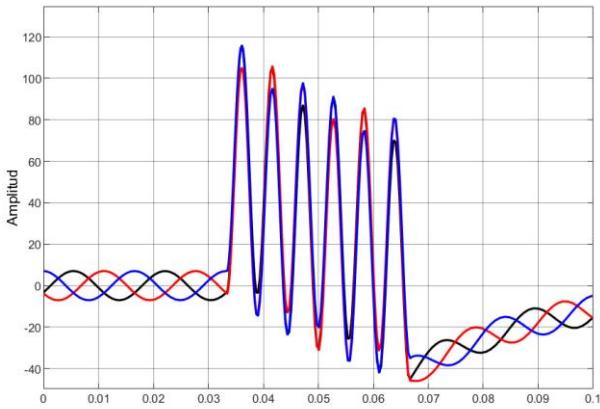


Fig. 23. Corrientes en el primario para el caso 2B.

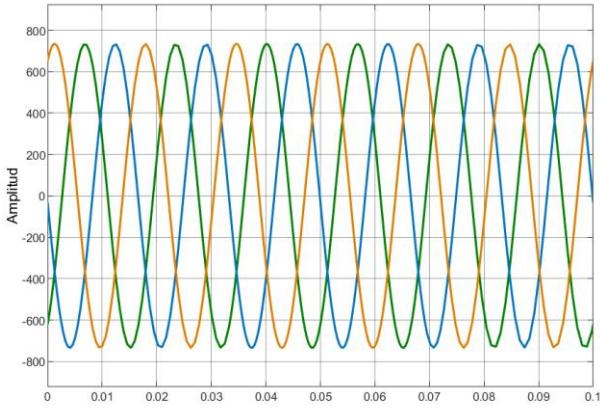


Fig. 24. Corrientes línea – línea del secundario para el caso 2B.

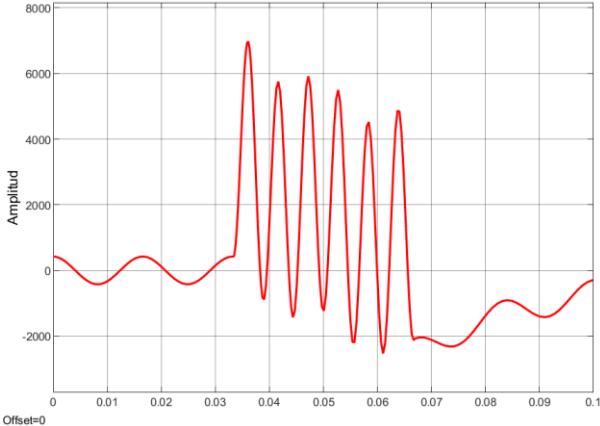


Fig. 25. Corriente de fase AC del secundario para el caso 2B.

En la Fig. 20 se puede observar que los voltajes de fase del lado de la Y se ven afectados por la inyección del tercer armónico mientras que los voltajes de línea no. En los voltajes del lado secundario debido a que los voltajes línea - línea y fase son iguales los voltajes de la D no se ven afectados por el tercer armónico.

En el caso de las corrientes para la Y cuando se hace la inyección del tercer armónico al sistema podemos observar como las tres corrientes se ponen en fase y su magnitud aumenta a casi 10 veces la corriente de estado estacionario, cuando los armónicos desaparecen las corrientes comienzan a amortiguarse para llegar a su estado estacionario.

En el caso de las corrientes de línea - línea en la D estas no se ven afectadas debido a que para obtener estas corrientes es

la diferencia entre corrientes, por lo que el armónico de tercer orden homopolar es cancelado. Sin embargo, en el caso de las corrientes de fase dentro de la D estas corrientes de secuencia cero fluyen dentro de la delta.

En la Fig. 25 se puede observar como cuando existe un tercer armónico la corriente sube hasta 17 veces de la corriente de estado estacionario que fluye por la fase, este incremento se debe a diversos factores como la saturación del núcleo, las corrientes que de tercera armónica que fluyen dentro de la delta o un posible fenómeno de resonancia.

Para comparar los resultados de la Fig. 18 del caso 2A el tiempo de simulación pasa de ser 0.1s a 0.054s como lo era en el caso 2A.

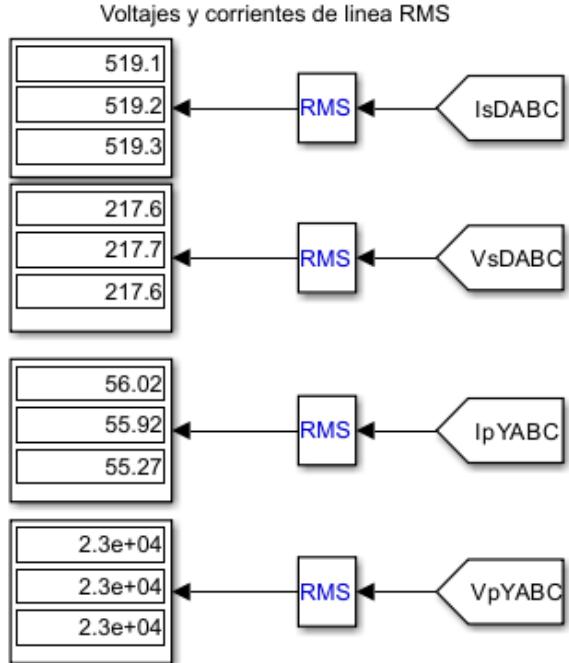


Fig. 26. Resultados de las mediciones para el caso 2B.

En la conexión Y-D los armónicos de tercer orden quedan confinados dentro de la delta y no contribuyen a la corriente de línea, resultando en una corriente más baja la cual es similar a la calculada en la ecuación (17).

En cuanto a las corrientes en el lado primario que son más elevadas debido a que existe una circulación de corrientes armónicas dentro de la delta lo que hace que se reflejen en el primario, generando un flujo magnético adicional que se refleja hacia el lado primario. Aun que el neutro del lado Y está aterrizado, los armónicos de secuencia cero reflejados desde la D suman a la corriente fundamental del primario. Esto es, el lado Y debe de suministrar corrientes necesarias para alimentar el flujo magnético adicional generado por los armónicos dentro de la D.

D. Operación de Transformadores Trifásicos con Núcleo de 5 Columnas.

En este apartado, se analiza el desempeño de un transformador trifásico con núcleo de 5 columnas (tipo acorazado) Y-Y. Este tipo de núcleo, ampliamente utilizado en sistemas de potencia, ofrece un mejor confinamiento del flujo magnético y menor dispersión. Se miden voltajes, corrientes y potencias en el primario y secundario bajo diferentes tipos de carga.

Las simulaciones inician en vacío y, tras unos ciclos, se conectan progresivamente cargas resistivas, inductivas y capacitativas, permitiendo analizar los transitorios y las condiciones estacionarias.

El tiempo de simulación para el caso del transformador en vacío, con carga resistiva y carga RC será de 0.5s, pero para el caso de la carga RL el tiempo de simulación será de 11s. La potencia del transformador es de 200KVA, a una tensión de 23kV/220V, en el caso de la carga se elige una carga con potencia activa de 50kW y 193.63kVAR para el caso RL y RC, esto nos da un total de 200kVA. Se mide potencia activa y reactiva en cada caso y se presentan graficas de corrientes y tensiones de línea – línea ya que el sistema no tiene neutro.

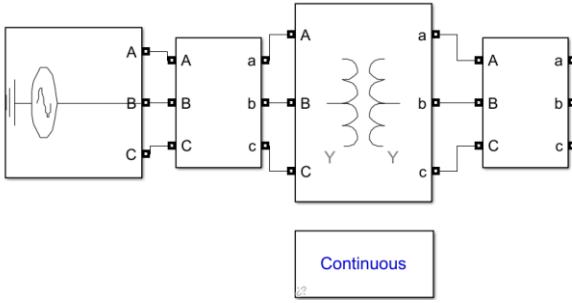


Fig. 27. Modelo para el caso sin carga del punto 3.

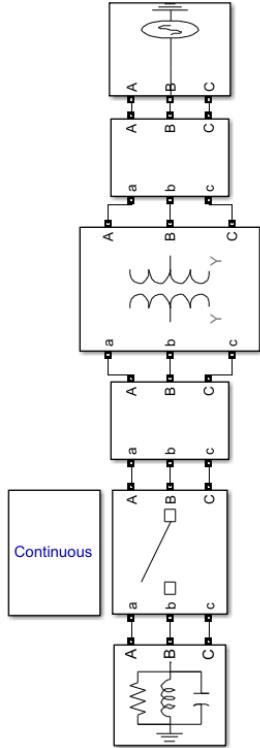


Fig. 28. Modelo general para la simulación del punto 3, conmutación de carga R, RL, RC.

En la Fig. 29 y Fig. 30 se muestran las corrientes y los voltajes del primario y secundario del transformador en vacío correspondiente a la Fig. 27. Se observa que la corriente en el secundario es cero debido a que no hay carga conectada y no existe caída de tensión con respecto al voltaje nominal secundario. La corriente del primario es muy pequeña, aproximadamente 14 miliamperes en 23kV, esta corriente es la corriente de magnetización.

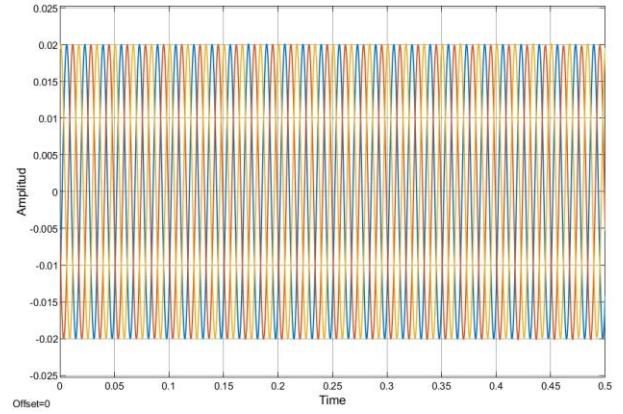


Fig. 29. Corrientes en el primario del transformador en vacío punto 3.

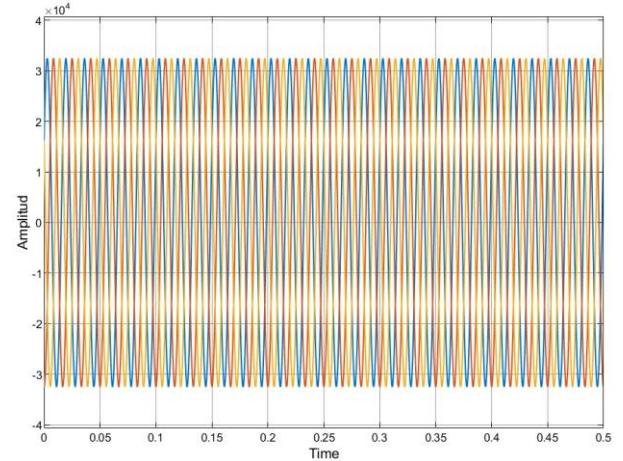


Fig. 30. Voltajes del primario del transformador en vacío punto 3.

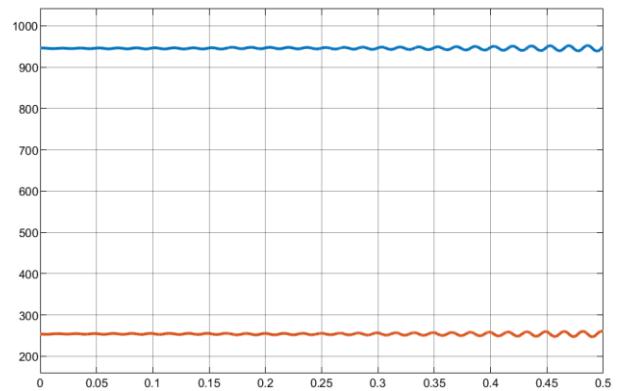


Fig. 31. Potencias del primario del transformador en vacío punto 3 (azul potencia reactiva y naranja potencia activa).

En la Fig. 31 se observa que en un transformador en vacío la potencia que se demanda es mayormente potencia reactiva, en este caso se demanda aproximadamente 3.5 veces más potencia reactiva que activa. En la Fig. 32 se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones en un display numérico.

A lo largo de las Fig. 33 hasta la Fig. 38 se muestran las graficas y los resultados obtenidos para el caso de una carga resistiva conectada al secundario del transformador Y-Y el valor de la carga es de 200kW. La comutación sucede después de 10 ciclos y la carga dura conectada 10 ciclos, la carga es una carga trifásica balanceada.

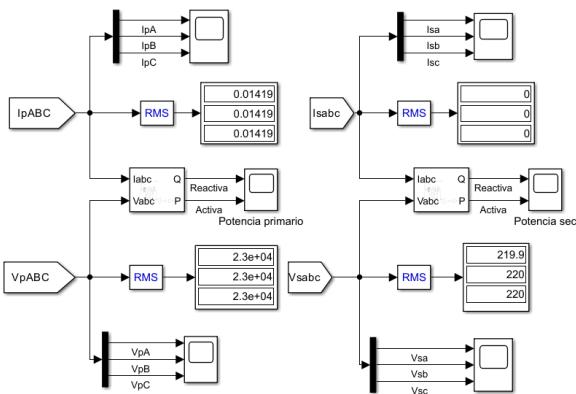


Fig. 32. Resultados de las simulaciones del transformador Y-Y en vacío para el punto 3.

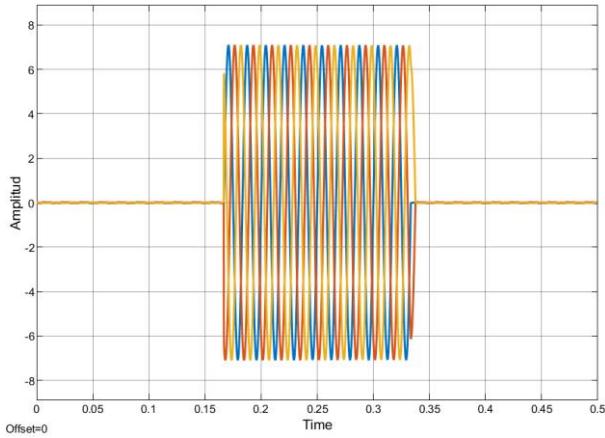


Fig. 33. Corrientes en el primario con carga resistiva para el punto 3.

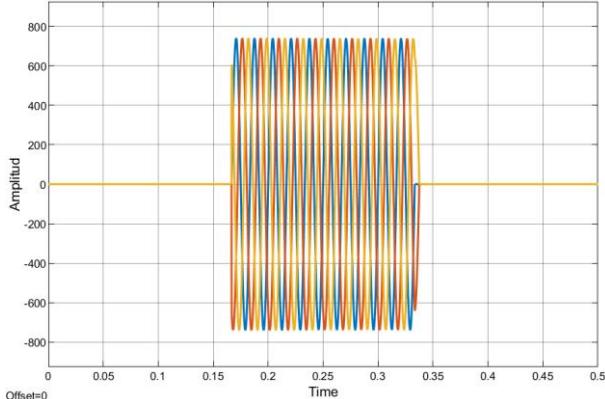


Fig. 34. Corrientes del secundario con carga resistiva para el punto 3.

Se puede observar que la carga resistiva no genera afectaciones a ninguna de las tres fases de corriente, esta carga no introduce ningún desfase. Sin embargo, en la Fig. 37 se puede apreciar un abatimiento de las tensiones del lado del secundario el cual se recupera casi de forma instantánea.

En la Fig. 38 se puede observar que aun que la carga es puramente resistiva 200kW, existe una gran cantidad de potencia reactiva (línea azul) esto se puede traducir como que el transformador esta demandando gran cantidad de potencia reactiva, este fenómeno puede deberse a la componente reactiva de la corriente de magnetización, así como las impedancias de dispersión del transformador, los parámetros de los devanados son de 0.001 R(pu) y 0.01 L(pu) para ambos devanados. Estos valores pueden considerarse como pequeños

lo que hace que aumente la potencia reactiva demandada por el transformador.

$$I_m = \frac{V}{X_m} = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ pu} \quad (20)$$

$$Q_m = V * I_m = 10 \text{ kVAR (pu)} \quad (21)$$

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}V} = \frac{200}{\sqrt{3}} = 155.5 \text{ A (pu)} \quad (22)$$

$$Q = I^2 X = (115.5)^2 (0.01) = 133.4 \text{ kVAR} \quad (23)$$

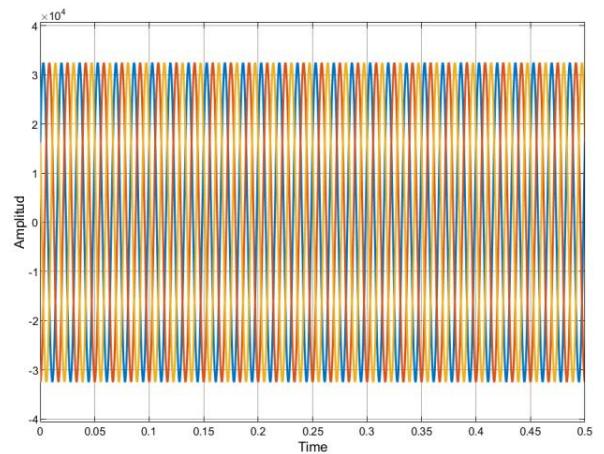


Fig. 35. Voltajes del primario con carga resistiva para el punto 3.

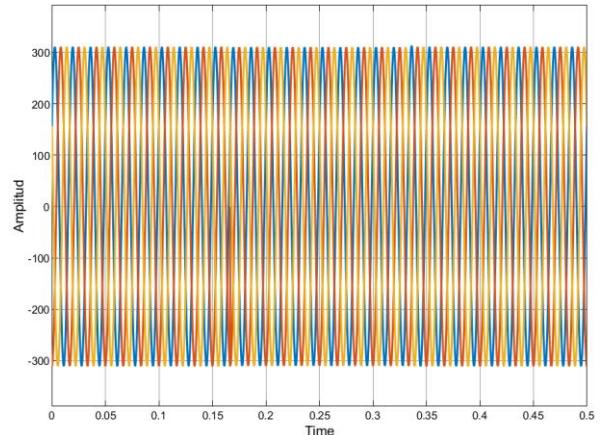


Fig. 36. Voltajes del secundario con carga resistiva para el punto 3.

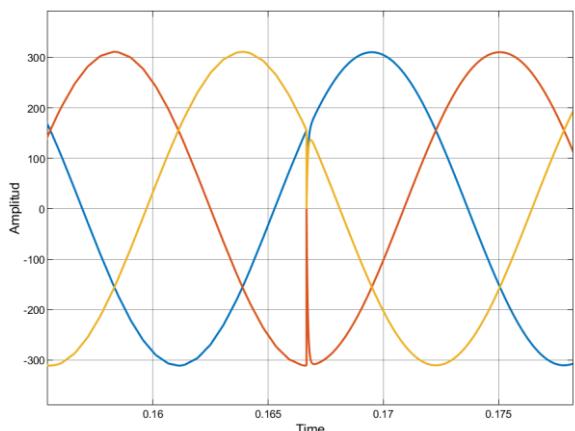


Fig. 37. Abatimiento del voltaje secundario cuando se conecta la carga resistiva, punto 3.

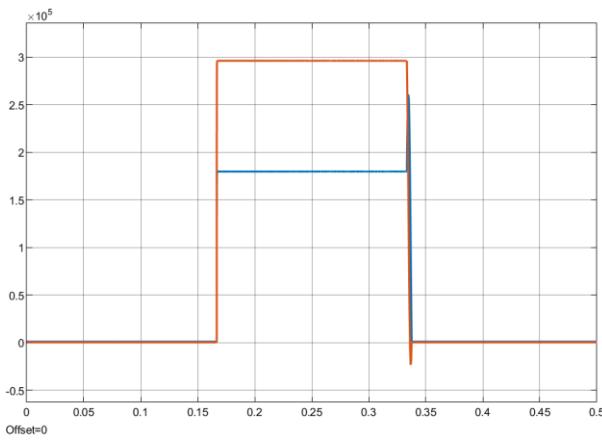


Fig. 38. Potencias del transformador con carga resistiva punto 3 (azul potencia reactiva y naranja potencia activa).

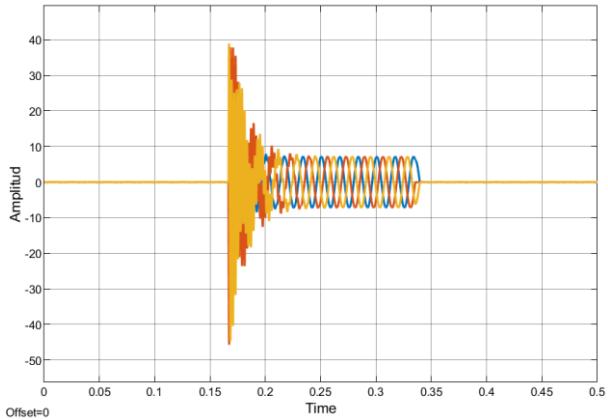


Fig. 39. Corrientes en el primario con carga RC para el punto 3.

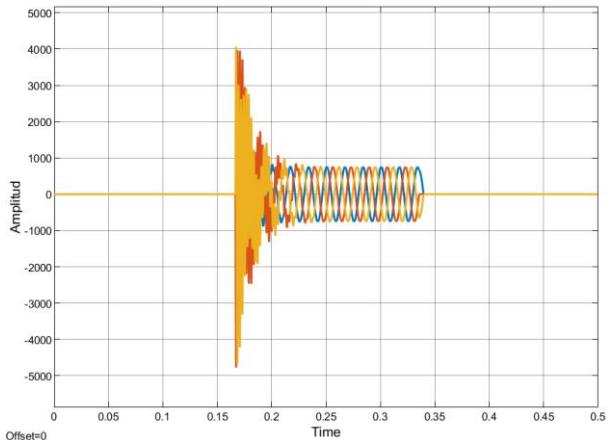


Fig. 40. Corrientes del secundario con carga RC para el punto 3.

En las Fig. 39 y Fig. 40 se observa un transitorio aproximadamente hasta 0.2s en donde las corrientes se comienzan a estabilizar, este transitorio es típico cuando se conectan cargas altamente reactivas. Estas oscilaciones se deben al proceso de carga y descarga del condensador que induce fluctuaciones de corriente hasta que alcanza el estado estacionario. El flujo magnético del núcleo del transformador también está ajustándose a la energización, lo que amplifica los transitorios.

Por otro lado, vemos que las tensiones en la Fig. 42 también se ven distorsionadas por el alto componente de contenido reactivo en la commutación de la carga.

Las potencias de la Fig. 43 nos indican que entre 0.15s y 0.25s ambas potencias oscilan, la potencia reactiva tiene un mayor pico de potencia lo que indica que la componente reactiva domina el comportamiento del sistema en esta etapa. Esto es debido a la interacción entre la capacitancia de la carga y la inductancia del transformador, así como al ajuste del flujo magnético del transformador al conectar la carga. Los picos iniciales de la carga reactiva podrían deberse a una posible resonancia transitoria entre la carga capacitativa y la inductancia del transformador.

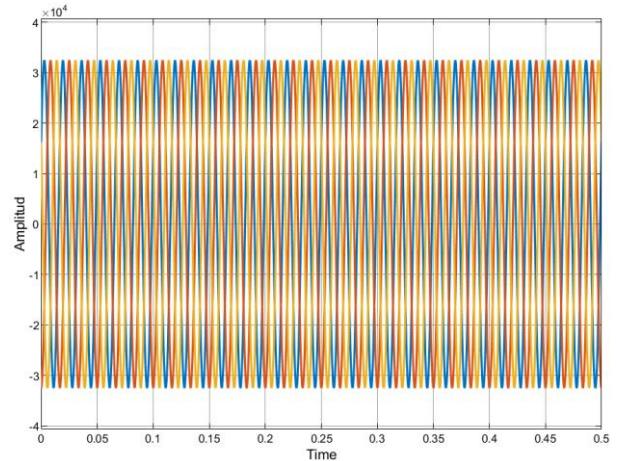


Fig. 41. Voltajes del primario con carga RC para el punto 3.

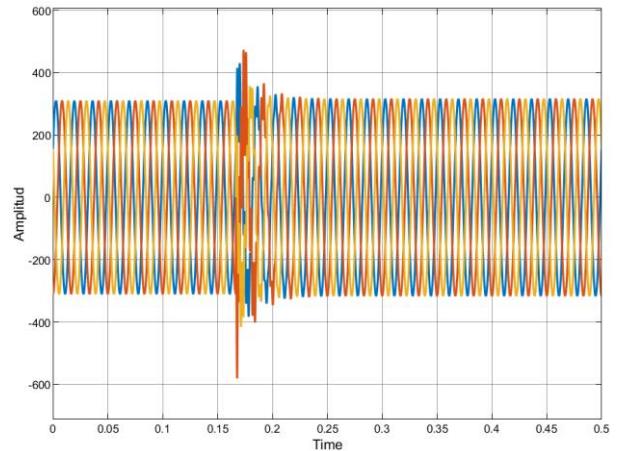


Fig. 42. Voltajes del secundario con carga RC para el punto 3.

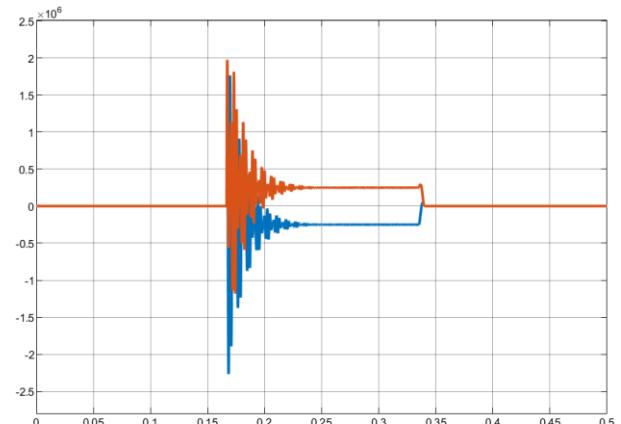


Fig. 43. Potencias del transformador con carga RC punto 3 (azul potencia reactiva y naranja potencia activa).

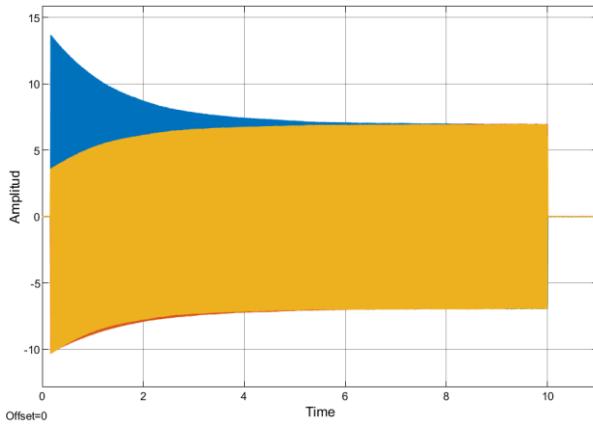


Fig. 44. Corrientes en el primario con carga RL para el punto 3.

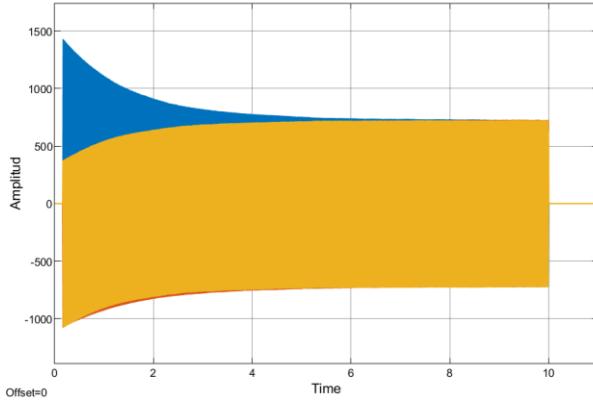


Fig. 45. Corrientes del secundario con carga RL para el punto 3.

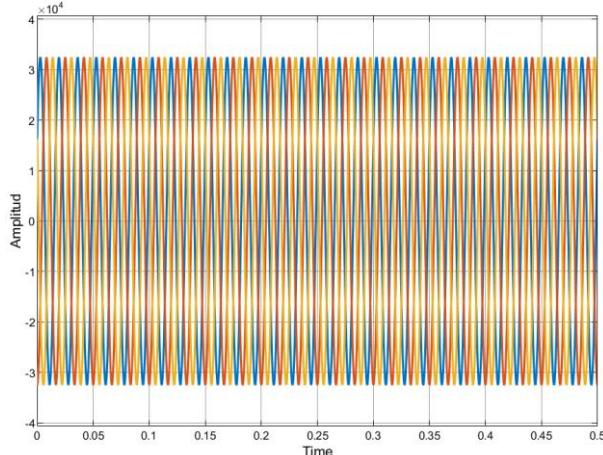


Fig. 46. Voltajes del primario con carga RL para el punto 3.

En los dos primeros segundos, las corrientes muestran un comportamiento transitorio que se amortigua gradualmente, este transitorio es típico de cargas RL, ya que la inductancia introduce una oposición al cambio de corriente, lo que causa oscilaciones hasta que el sistema alcanza un estado estacionario aproximadamente en el segundo 9. El comportamiento se ve magnificado por la interacción de las inductancias del transformador y la alta carga reactiva conectada al transformador.

En los voltajes, vemos que los voltajes del primario no se ven afectados. Sin embargo, en los voltajes del secundario hay una caída de tensión mientras que la carga está conectada,

cuando la carga se desconecta el voltaje se restablece a los valores nominales del sistema.

En la Fig. 49 se observa que la potencia reactiva es predominante en este caso, la forma cónica de las potencias durante el transitorio inicial muestra que el sistema tiene una buena amortiguación, esto significa que las oscilaciones se reducen con el tiempo y el sistema no entra en resonancia.

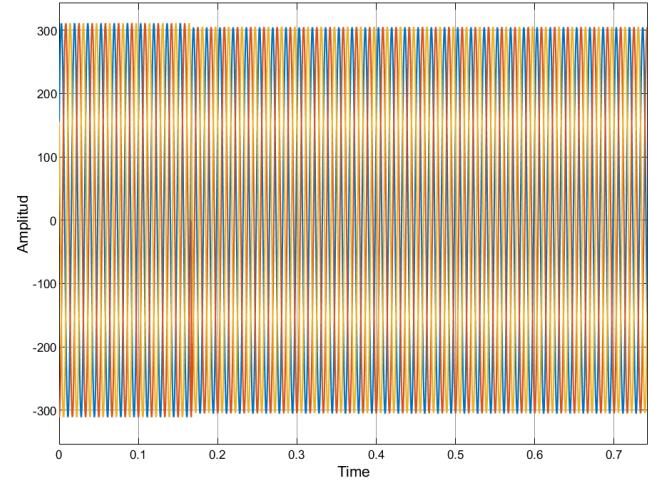


Fig. 47. Voltajes del secundario del transformador al comutar la carga RL para el punto 3.

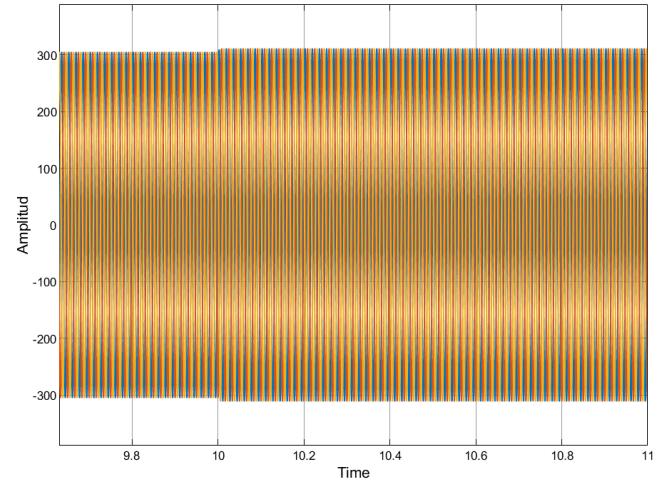


Fig. 48. Voltajes del secundario del transformador al quitar la carga RL para el punto 3.

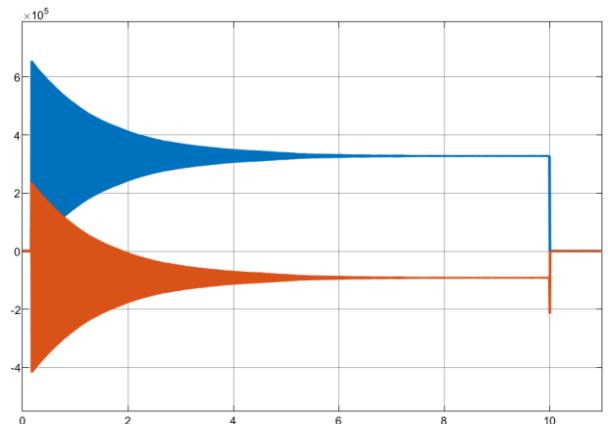


Fig. 49. Potencias del transformador con carga RL punto 3 (azul potencia reactiva y naranja potencia activa).

E. Corriente de Energización de Transformadores Trifásicos

En este apartado se analiza la corriente de energización de un transformador trifásico de 25kVA, con una configuración Yg/Yg, con tensiones de 23kV/220V. La simulación incluye una carga trifásica del 30% de potencia reactiva respecto a la activa, esto es 20kW y 15kVAR. Se mide el comportamiento de los voltajes y corrientes trifásicas en la entrada y salida del transformador, así como las potencias reales y reactivas. Adicionalmente se habilita la opción de saturación en el núcleo y se estudia su impacto.

Se incluyen flujos iniciales configurados en pu como [-0.7, 0.6, 0.6] se decide ajustar el ángulo de la fuente a 90° y un tiempo de simulación de 0.1s. Se evalúa la presencia del segundo armónico en la corriente de energización bajo diversas condiciones, activando y desactivando la saturación. Los resultados permiten comparar el comportamiento del transformador con y sin saturación, observar la influencia de los flujos iniciales y el ángulo de fase.

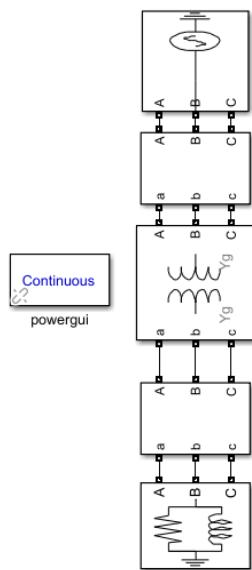


Fig. 50. Modelo utilizado para simular la corriente de energización del transformador Yg - Yg

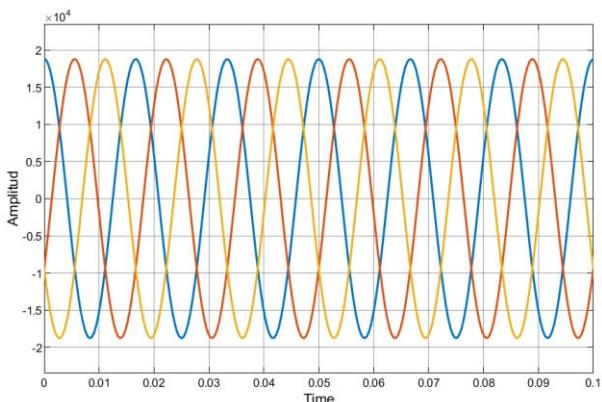


Fig. 51. Voltajes de fase del primario sin saturación para el punto 4 (energización de transformador)

Podemos observar en las graficas que no existe ninguna anomalía en las corrientes ni en los voltajes, debido a las condiciones ideales en las que se realiza la prueba. El tamaño de la carga reactiva es muy pequeño por lo que parece no

afectar a los voltajes ni a las corrientes del sistema, también el flujo inicial es ideal.

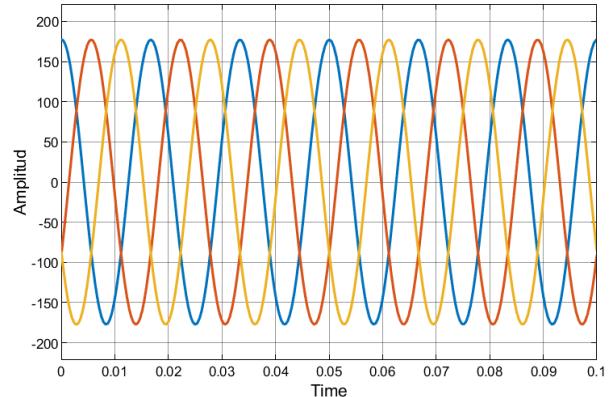


Fig. 51. Voltajes de fase del secundario para el punto 4.

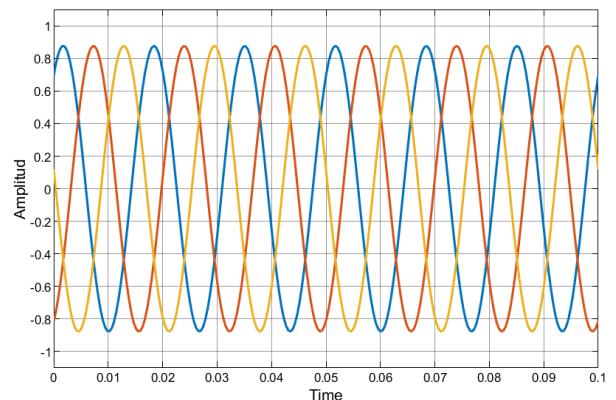


Fig. 52. Corrientes del primario sin saturación para el punto 4.

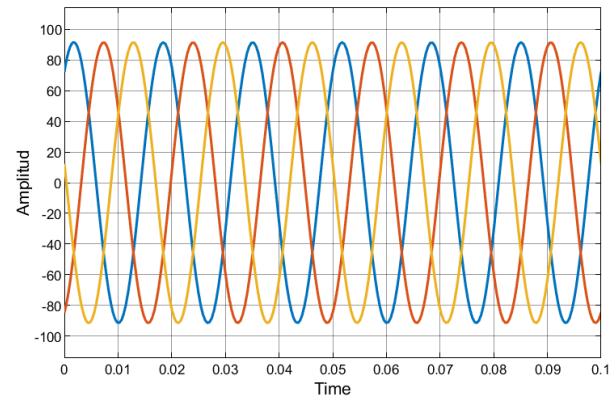


Fig. 53. Corrientes del secundario sin saturación para el punto 4.

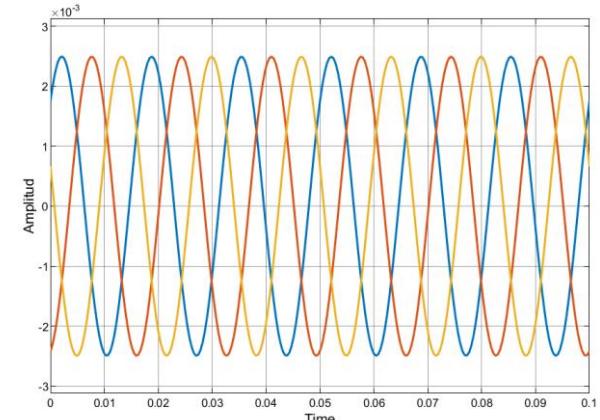


Fig. 54. Corrientes de excitación (^-3) sin saturación para el punto 4.

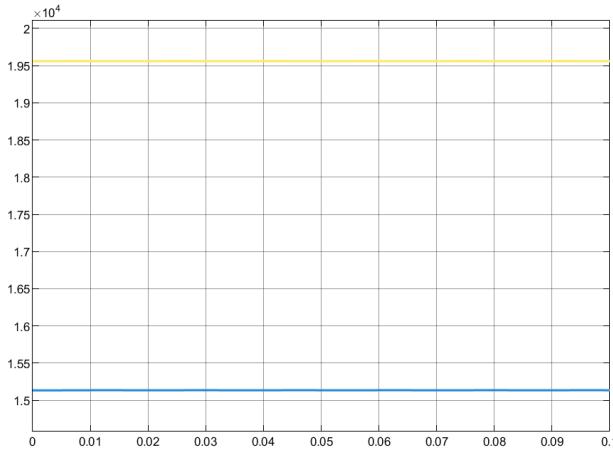


Fig. 55. Potencia activa (amarillo) y potencia reactiva (azul) para el caso sin saturación del punto 4.

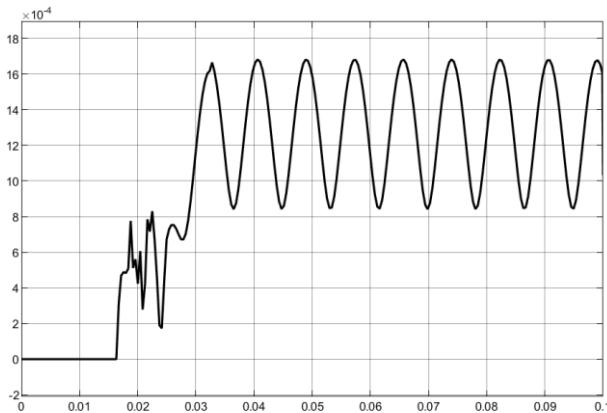


Fig. 54. Corrientes de segundo armónico (I^{-4}) sin saturación para el punto 4.

La corriente de segundo armónico es del orden $\times 10^{-4}$ por lo que se considera que no existe corriente de segunda armónica.

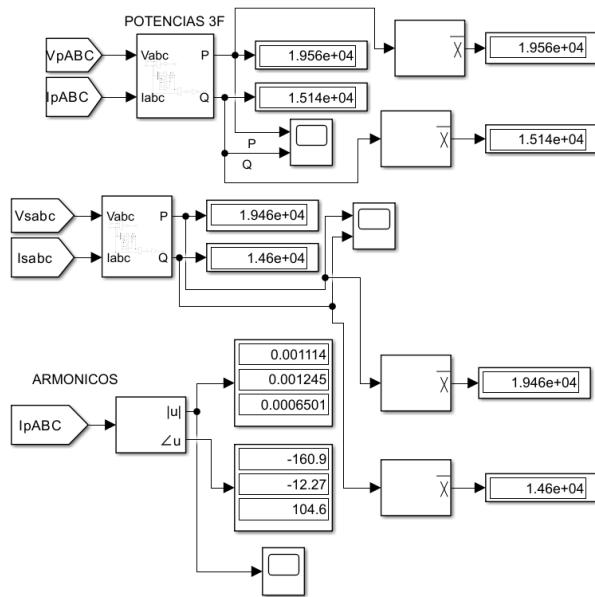


Fig. 55. Potencias trifásicas y armónicos de segundo orden para el caso sin saturación del punto 4.

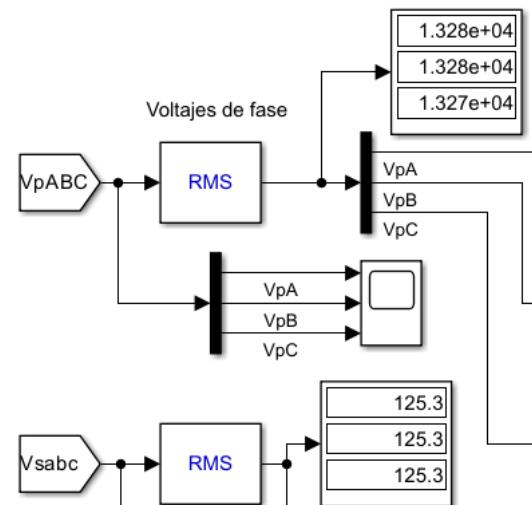


Fig. 56. Voltajes de fase RMS del primario y secundario sin saturación para el punto 4.

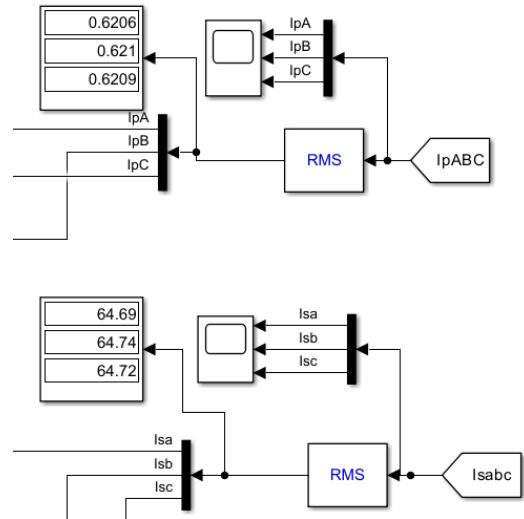


Fig. 57. Corrientes RMS del primario y secundario sin saturación para el punto 4.

Se procede a activar la saturación en el núcleo con flujos iniciales de $[-0.7, 0.6, 0.6]$ para las fases A, B, C respectivamente.

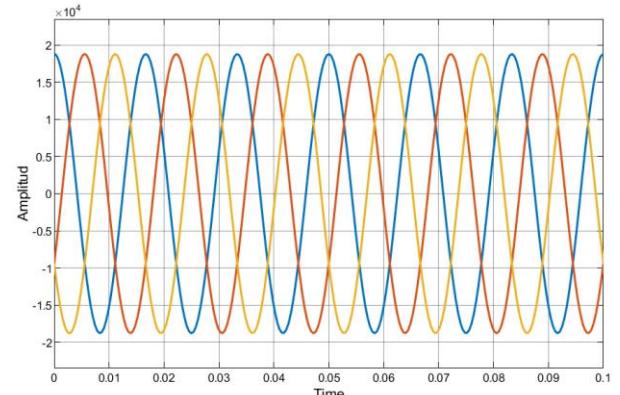


Fig. 58. Voltajes de fase del primario con saturación para el punto 4 (energización de transformador)

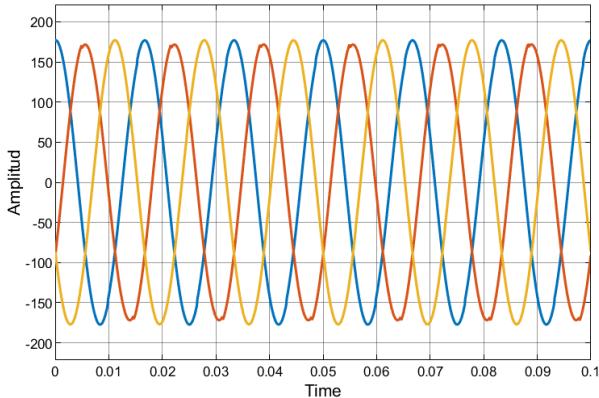


Fig. 59. Voltajes de fase del secundario con sat para el punto 4.

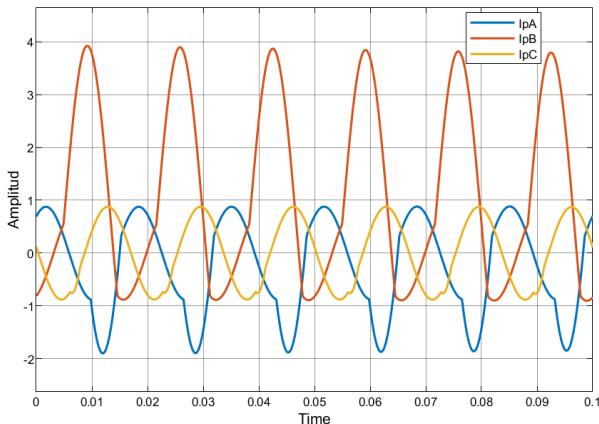


Fig. 60. Corrientes del primario con saturación para el punto 4.

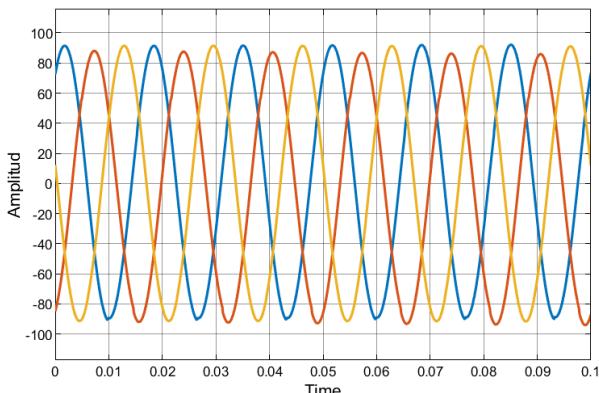


Fig. 61. Corrientes del secundario con saturación para el punto 4.

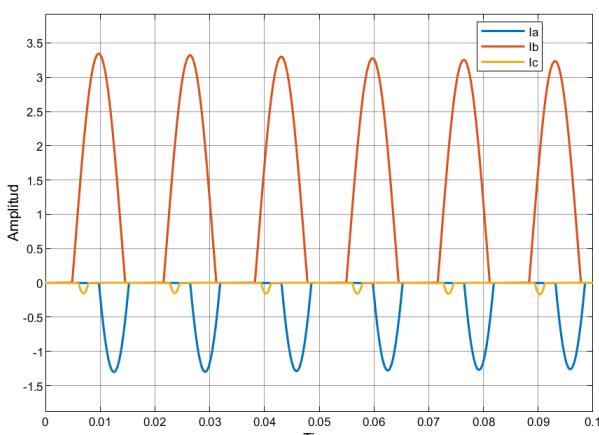


Fig. 62. Corrientes de excitación con saturación para el punto 4.

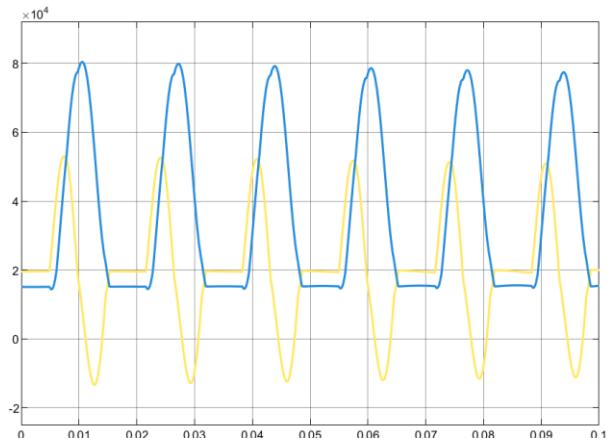


Fig. 63. Potencia activa (amarillo) y potencia reactiva (azul) del primario para el caso con saturación del punto 4.

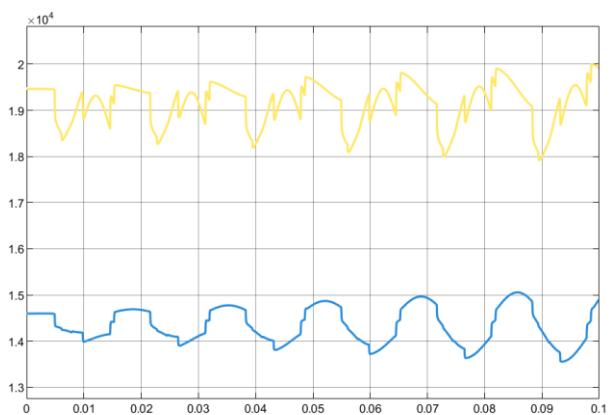


Fig. 64. Potencia activa (amarillo) y potencia reactiva (azul) del secundario para el caso con saturación del punto 4.

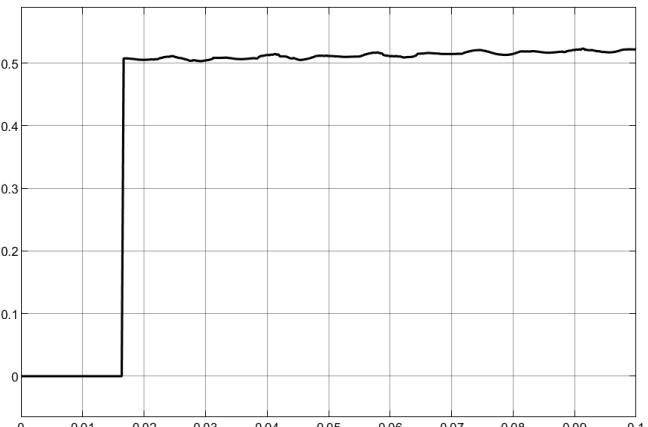


Fig. 65. Corriente segundo armónico con saturación para el punto 4.

Las corrientes en el primario se ven distorsionadas por la corriente de excitación que demanda el transformador.

En la Fig. 63 y Fig. 64 se muestra que en el lado primario además de la corriente necesaria para transferir potencia a la carga también fluye la corriente de magnetización, esta corriente no es lineal y puede generar picos en las potencias medidas, es por esto también que la forma de onda esta distorsionada por la saturación del núcleo. Por otro lado, en el secundario las corrientes dependen directamente de la carga, existen perdidas en el núcleo y perdidas en los devanados, es

por esto por lo que hay diferencia en las potencias medidas, estas potencias son ligeramente diferentes

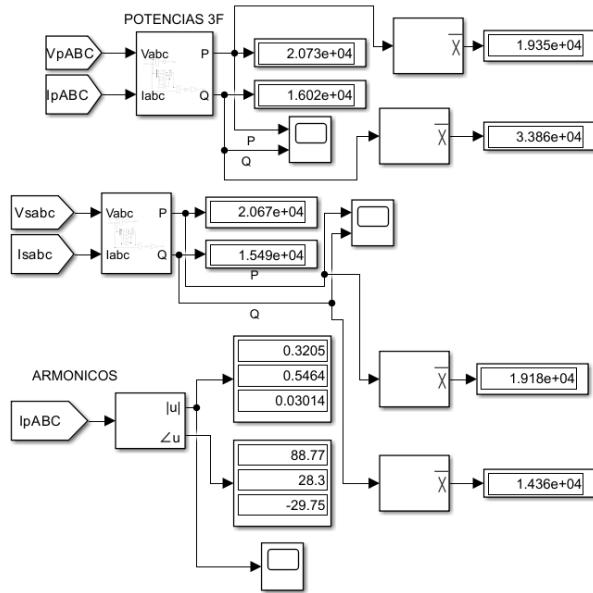


Fig. 65. Potencias trifásicas y armónico de segundo orden para el caso con saturación del punto 4.

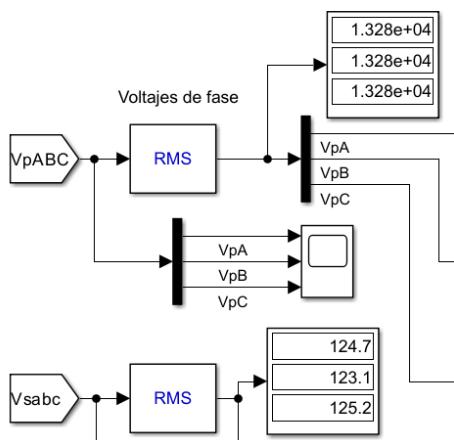


Fig. 66. Voltajes de fase RMS del primario y secundario con saturación para el punto 4.

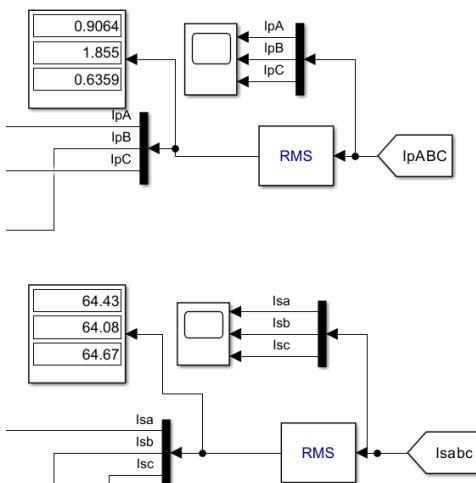


Fig. 67. Corrientes RMS del primario y secundario con saturación para el punto 4.

Cuando el núcleo del transformador se satura se requiere una corriente significativamente mayor para generar pequeños incrementos en el flujo magnético, este incremento en la corriente de magnetización tiene un componente reactivo mayor debido a las características inductivas del núcleo. La generación de armónicos también contribuye a la magnitud total de corriente del primario, las perdidas en el núcleo también incremental la demanda de potencia reactiva.

F. Fallas en el secundario del transformador trifásico

En esta sección se analiza el comportamiento de un transformador trifásico de 25kVA con configuración $Yg-Yg$ de 13.2kV/220V durante una falla monofásica (fase A) a tierra en su lado secundario. La falla se configura para ocurrir entre el ciclo 10 permaneciendo activa hasta el final de la simulación. Se utilizan herramientas como el powergui en modo continuo y fasorial para observar los efectos de la falla, midiendo las corrientes de entrada y salida del transformador, además de las componentes de secuencia de fase positiva, negativa y cero.

Las mediciones de corriente y voltaje se extraen utilizando bloques multímetro, y se grafican junto con sus valores RMS para un análisis más detallado. Además, se exportan las corrientes de falla a MATLAB para un procesamiento adicional en el caso fasorial. Este análisis permite estudiar el impacto de las fallas monofásicas en la operación del transformador.

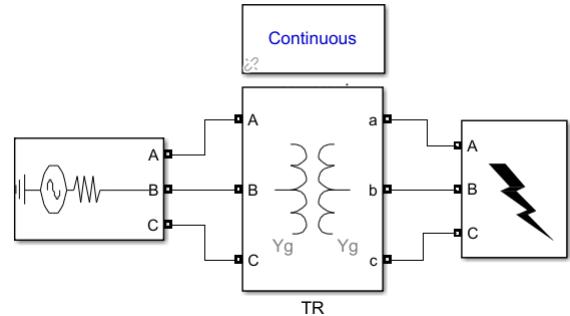


Fig. 68. Modelo para simular fallas en modo continuo, punto 5A.

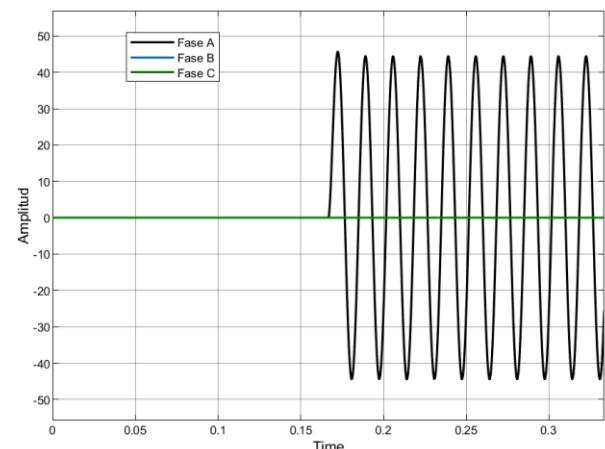


Fig. 69. Corriente en el primario del transformador para el punto 5A.

En una falla monofásica la tensión de la fase afectada cae drásticamente y si es una falla franca se podría decir que tiende a cero, esto se puede apreciar en la Fig. 72, en la Fig. 70 se puede observar que la corriente de la fase A incrementa hasta alrededor de 2600A.

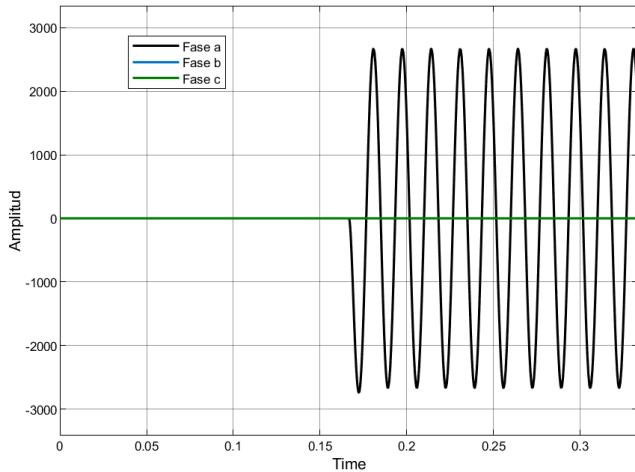


Fig. 70. Corriente en el secundario del transformador punto 5A.

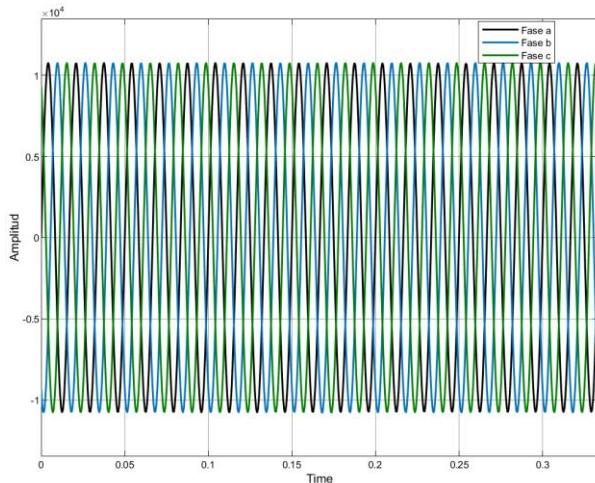


Fig. 71. Voltajes de fase del primario, punto 5A.

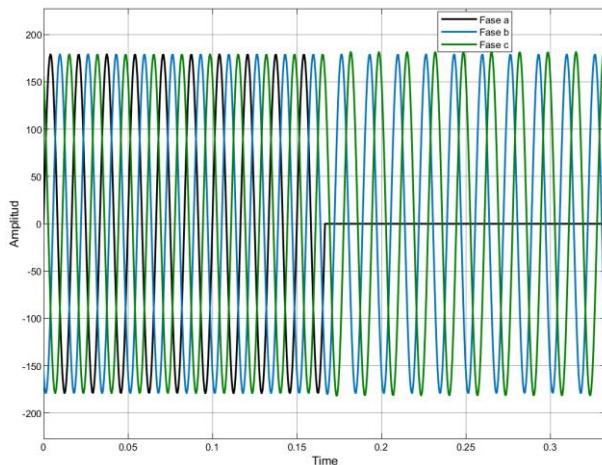


Fig. 72. Voltajes de fase de la carga en el secundario, punto 5A.

En el caso de las corrientes de secuencia en la Fig. 73 únicamente se alcanza a visualizar la corriente de secuencia cero, sin embargo, las corrientes de secuencia positiva y negativa existen y son de la misma magnitud. Recordemos que en una falla monofásica las tres redes de secuencia se conectan en serie, esto se puede apreciar más a detalle en uno de los display que se encuentra en la Fig. 74 donde se aprecia que la magnitud de cada corriente es de 144.8A.

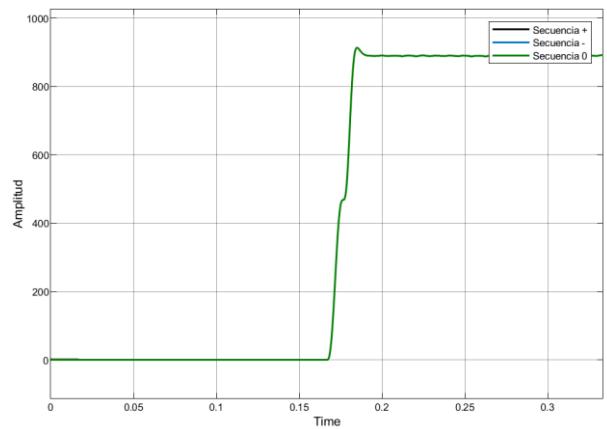


Fig. 73. Corrientes de secuencia falla monofásica, punto 5A.

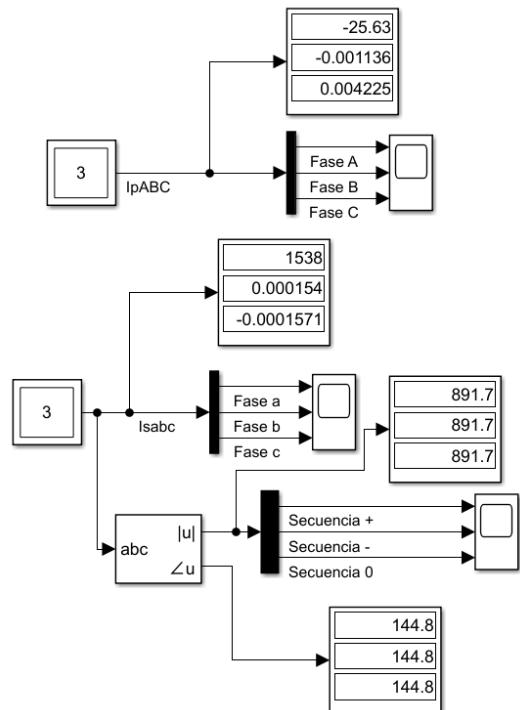


Fig. 74. Mediciones de las corrientes del primario, secundario y de secuencia para el punto 5A.

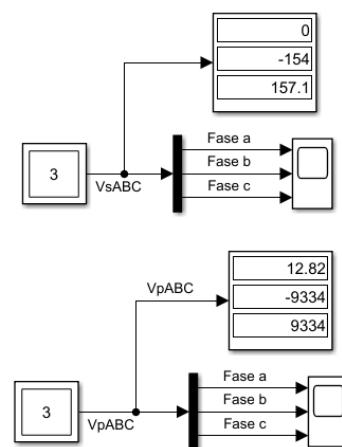


Fig. 75. Mediciones de los voltajes de fase del primario, secundario y de secuencia para el punto 5A.

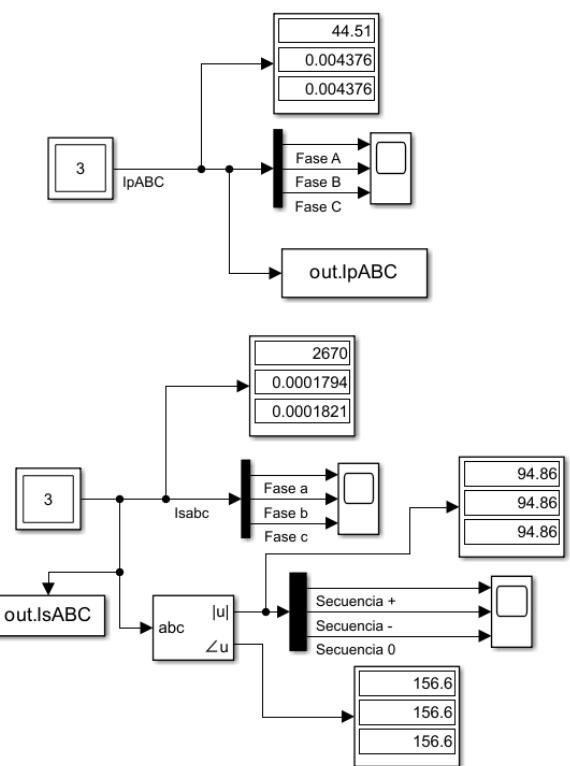
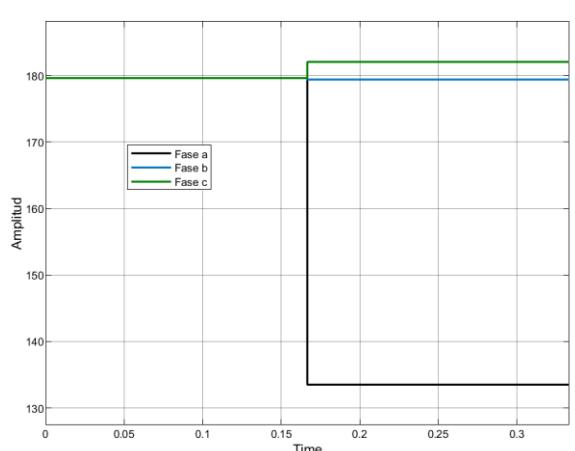
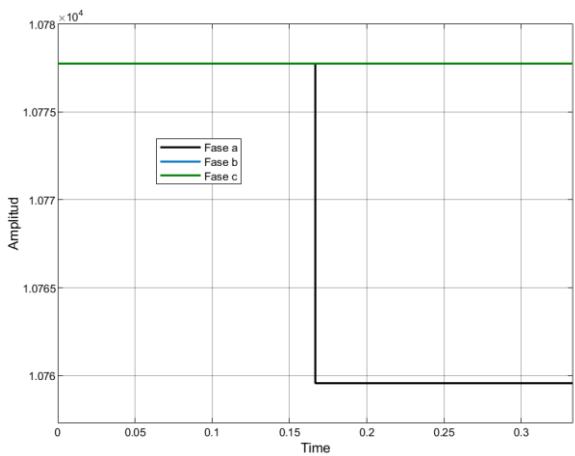
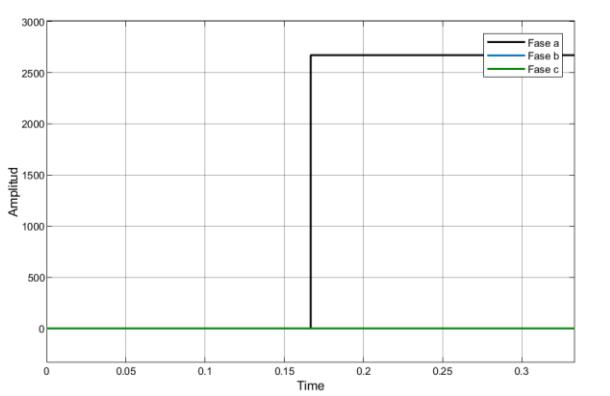
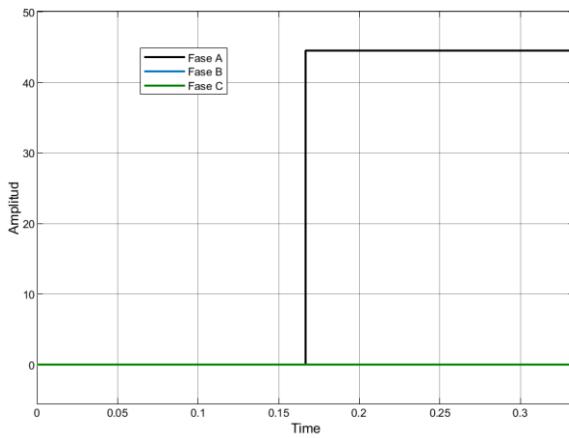


Fig. 80. Mediciones las corrientes del primario, secundario y de secuencia para el punto 5B.

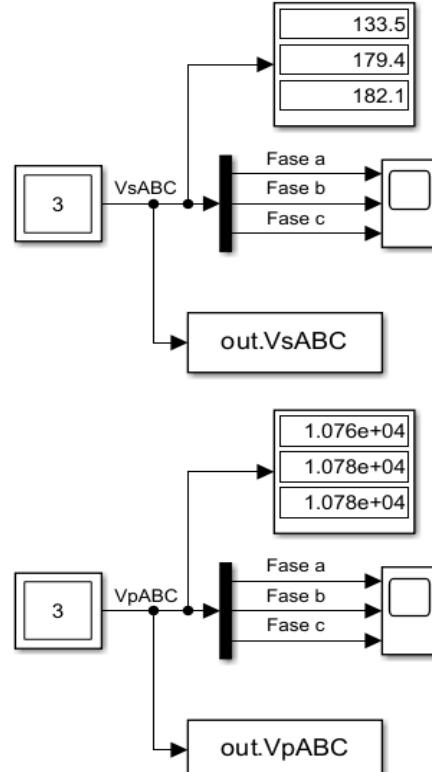


Fig. 81. Mediciones las corrientes del primario, secundario y de secuencia para el punto 5B.

A lo largo de la Fig. 76 a la Fig. 81 se muestran las graficas y resultados obtenidos utilizando el modo fasorial para el caso de la falla monofásica a tierra (fase A). Debido a que la impedancia de la falla no es exactamente 0 significa que la

corriente no es infinita y como resultado queda una tensión residual en la fase A, es por esto por lo que en la Fig. 79 se muestra ese comportamiento, cayendo la tensión, pero no de forma drástica hasta 0 como se vio con el modelo continuo. El modo fasorial representa valores promediados y estacionarios, descartando dinámicas transitorias, por lo que para este caso no es lo más adecuado.

G. Transformador Y abierta – D abierta (6A)

En esta sección se analiza el comportamiento de un transformador conectado en configuración Y abierta – D abierta con relación de 23kV/220V. Se utiliza una carga trifásica balanceada RL conectada en paralelo en el lado de la delta abierta, donde la potencia reactiva Q es al menos el 20% de la potencia activa P. Posterior a esto se conecta una carga monofásica adicional a una de las fases de la delta abierta mediante un interruptor controlado.

Durante la simulación, se miden y analizan las corrientes y voltajes en ambos lados del transformador, mostrando valores RMS y formas de onda. Además, se registra la corriente en el neutro del lado de la Y abierta para evaluar los efectos de la configuración y la desbalanceada introducida por la carga monofásica.

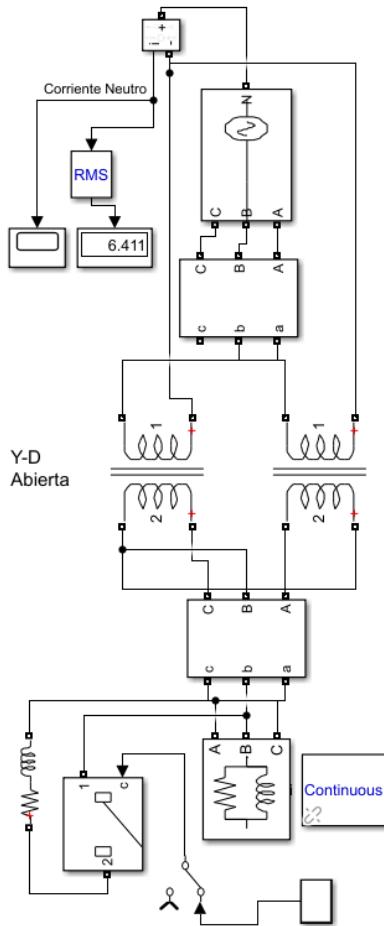


Fig. 82. Modelo para simular la conexión Y abierta – D abierta para el punto 6A.

En la corriente del primario se aprecia que únicamente hay corriente en las fases A, B esto por la conexión Y abierta, se observa un incremento brusco de corriente en la fase B durante el periodo de conexión de la carga monofásica, este aumento

es una respuesta al desbalance introducido en el sistema efectos de la configuración y la desbalanceada introducida por la carga monofásica. El neutro ayuda a compensar el desbalance generado, en este caso la corriente que fluye por el neutro es de 4.77A.

En la delta abierta cuando se conecta la carga monofásica introduce un desbalance notable en las fases donde se conecta la carga, este desbalance se propaga al primario lo que provoca el desbalance antes mencionado, y se generan corrientes en el neutro para tratar de compensar este desbalance.

La configuración Y abierta – D abierta es funcional bajo condiciones de carga balanceada pero los desbalances generan un incremento notable en las corrientes, casi el doble más de corriente que fluye por la fase fluirá por el neutro lo que debe considerarse al dimensionar los equipos.

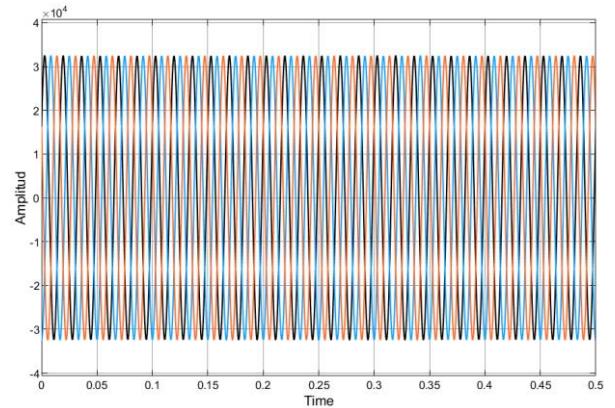


Fig. 83. Voltajes de línea – línea en el lado primario, punto 6A.

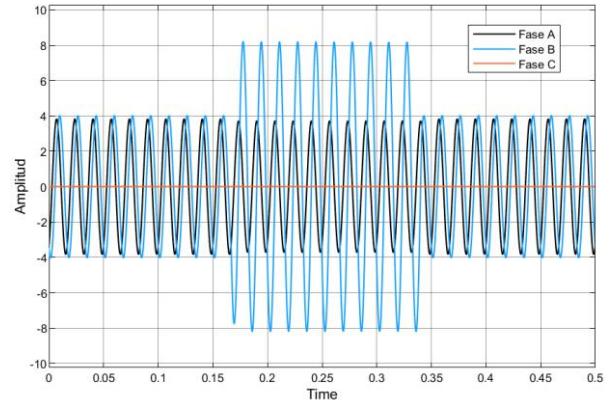


Fig. 84. Corriente en el primario, punto 6A.

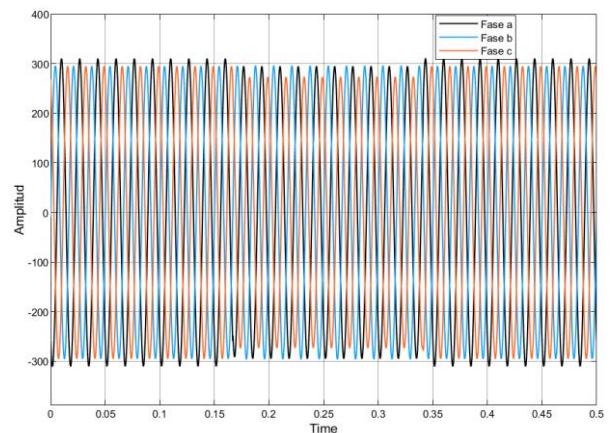


Fig. 85. Voltajes de línea – línea en el lado secundario, punto 6A.

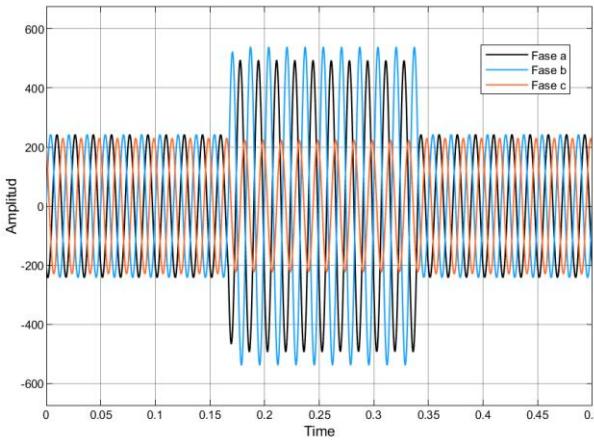


Fig. 86. Corriente en el secundario, punto 6A.

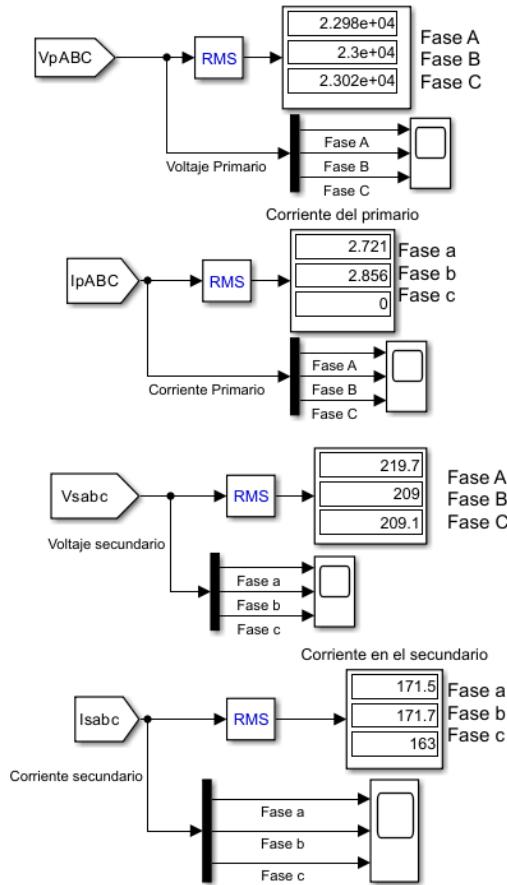


Fig. 87. Mediciones las corrientes y voltajes del primario y secundario para el punto 6B.

H. Transformador D abierta – D abierta (6B)

En esta sección se analiza el comportamiento de un transformador conectado en configuración D abierta – D abierta con relación de 23kV/220V. Se utiliza una carga trifásica balanceada RL conectada en paralelo en el lado secundario, donde la potencia reactiva Q es al menos el 20% de la potencia activa P.

A la mitad del tiempo de simulación, se introduce una carga monofásica en una de las fases del lado secundario utilizando un interruptor controlado manualmente. Esta carga se desconecta a las 3/4 partes del tiempo de simulación. Durante la simulación, se miden los voltajes y corrientes en

ambos lados del transformador, mostrando las formas de onda y valores RMS.

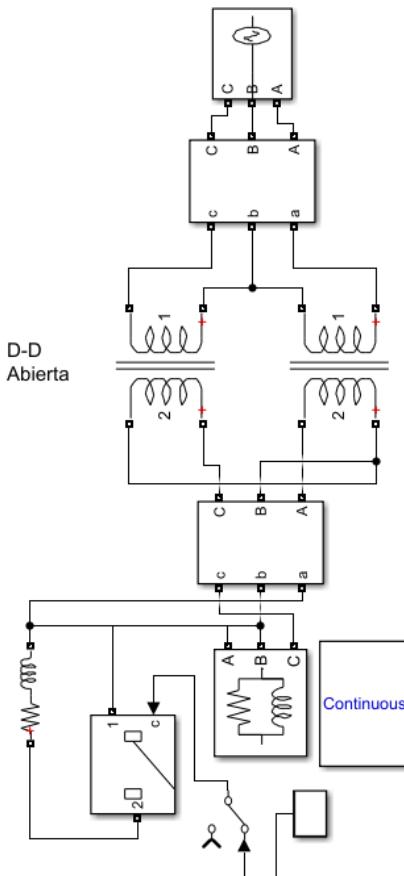


Fig. 88. Modelo para simular la conexión D abierta – D abierta para el punto 6B.

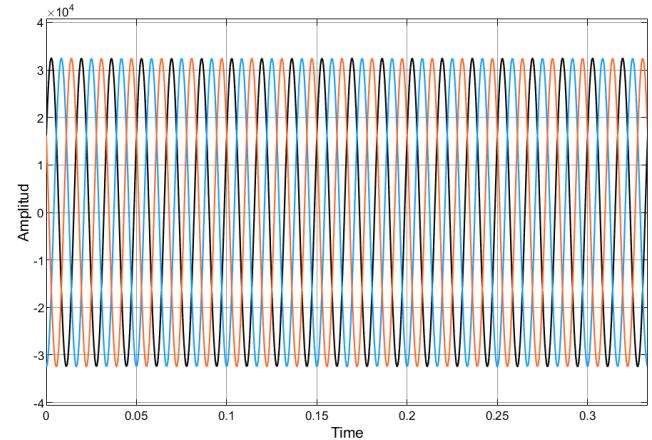


Fig. 89. Voltajes de línea – línea en el lado primario, punto 6B.

En la configuración Y abierta - D abierta, el comportamiento de las corrientes se ve influenciado significativamente al conectar y desconectar una carga monofásica en el lado secundario. Durante la operación inicial, con una carga trifásica RL balanceada, las corrientes permanecen equilibradas en ambas configuraciones del transformador, reflejando el adecuado funcionamiento de esta conexión. Sin embargo, al introducir una carga monofásica, la fase afectada experimenta un incremento notable en su corriente, mientras que las otras fases presentan cambios menores debido a la redistribución del desbalance en el

sistema. Este efecto es más evidente en el lado primario, donde las corrientes de las fases activas compensan el aumento de la demanda en el secundario. Una vez que la carga monofásica es desconectada, el sistema regresa a un estado cercano al balance original, aunque con pequeños transitorios propios del ajuste dinámico.

Al comparar esta configuración con la Y abierta - D abierta, la principal diferencia radica en la respuesta al desbalance introducido por la carga monofásica. En el caso Y abierta - D abierta, la presencia del neutro permite disipar parcialmente los efectos del desbalance, lo que reduce el impacto en las corrientes de las fases activas. Por el contrario, en D abierta - D abierta, la ausencia de un neutro genera un mayor esfuerzo en las fases activas para mantener el flujo de potencia, resultando en un incremento más pronunciado de las corrientes.

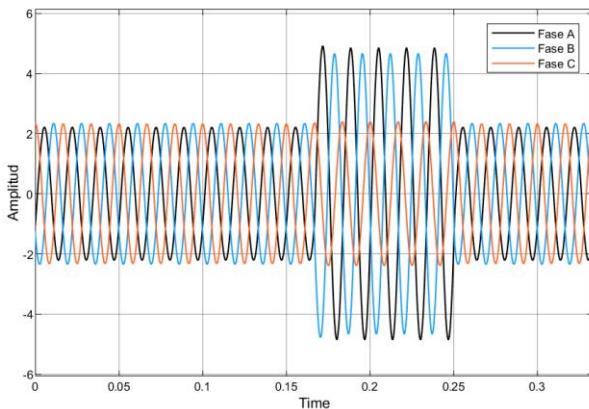


Fig. 90. Corriente en el primario, punto 6B.

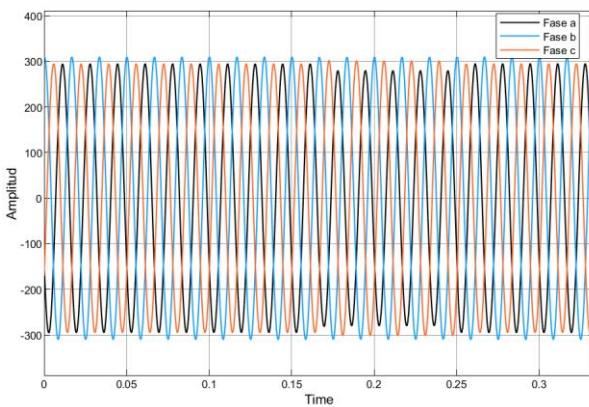


Fig. 91. Voltajes de línea – línea en el lado secundario, punto 6A.

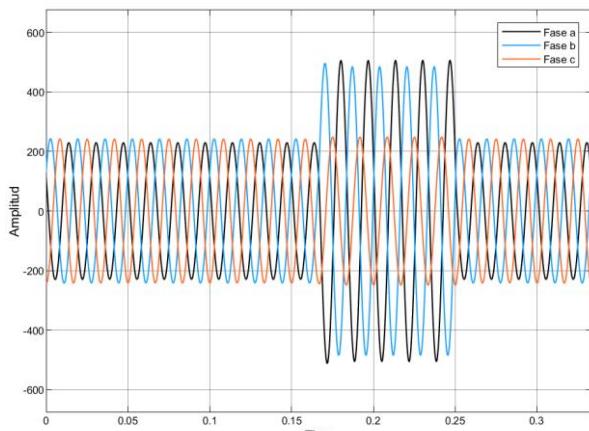


Fig. 92. Corriente en el secundario, punto 6B.

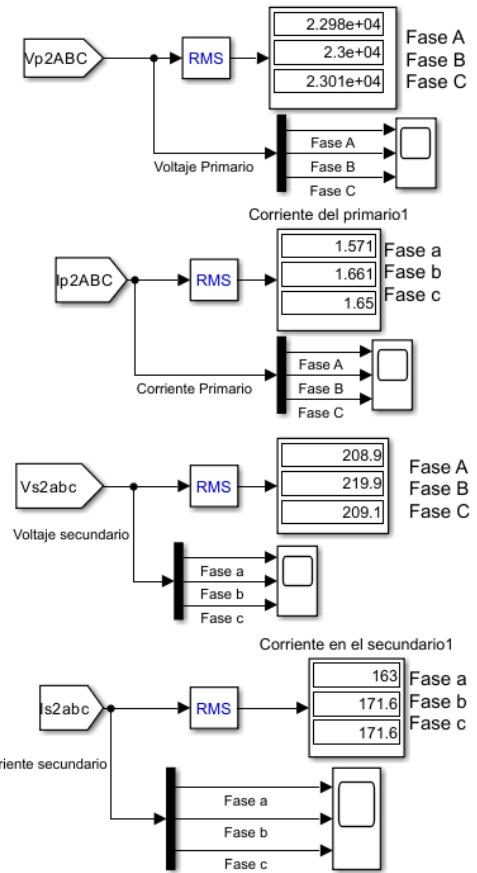


Fig. 93. Mediciones las corrientes y voltajes del primario y secundario para el punto 6B.

III. CONCLUSIONES

En este estudio se presentó un análisis exhaustivo del comportamiento de transformadores trifásicos bajo diversas configuraciones y condiciones operativas, utilizando simulaciones en MATLAB Simulink. Las principales configuraciones estudiadas incluyen Y-Y, Y-D, D-D, Y abierta - D abierta y D abierta - D abierta. Adicionalmente, se evaluaron escenarios específicos como la inyección de armónicos de tercer orden, corrientes de energización y fallas monofásicas, resaltando la respuesta dinámica y estacionaria de los sistemas.

Entre los hallazgos más relevantes, destaca el impacto de los armónicos de tercer orden, que en configuraciones Y-Y afectan directamente las corrientes de línea debido a su naturaleza de secuencia cero, mientras que en configuraciones Y-D, dichos armónicos quedan confinados dentro del devanado delta, minimizando su impacto en el sistema. Las corrientes de energización también mostraron ser sensibles a la saturación del núcleo, donde se observa un aumento significativo en la demanda de potencia reactiva y la generación de armónicos de segundo orden.

Por otra parte, se analizaron configuraciones abiertas como Y abierta - D abierta y D abierta - D abierta, observando que la ausencia de un neutro en la segunda configuración genera un mayor esfuerzo en las fases activas al enfrentar desbalances, como la conexión de cargas monofásicas. Esto resalta la importancia de un diseño adecuado para evitar sobrecargas y garantizar la estabilidad del sistema.

El análisis presentado ofrece una visión integral del desempeño de transformadores trifásicos, destacando la importancia de considerar los efectos de armónicos, saturación, desbalances y fallas en el diseño y operación de estos sistemas. Estos resultados proporcionan herramientas útiles para optimizar la operación de transformadores y mitigar posibles riesgos en sistemas eléctricos complejos.

IV. REFERENCIAS

- [1] Turan Gonen, Electric Power Distribution System Engineering, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [2] The MathWorks, Inc., *Simulink Documentation*, Natick, MA, USA, 2023. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/simulink/>