

Estudio de saturación de transformadores de corriente: análisis y simulación

Current transformer saturation study: analysis and simulation

DOI:10.34115/basrv5n2-045

Recebimento dos originais: 23/03/2021

Aceitação para publicação: 23/04/2021

Byron Fernando Chere Quiñónez

Estudiante de Maestría Académica con Trayectoria de Investigación en Electricidad,
Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí.
Ecuador.

Ingeniero Eléctrico. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas. Ecuador.
Correo electrónico: cherokyfernando@hotmail.com

Raúl Clemente Ulloa de Souza

Magister en Ingeniería Eléctrica en Distribución por la Escuela Politécnica Nacional.
Ecuador

Ingeniero Eléctrico por la Escuela Politécnica Nacional. Ecuador
Correo electrónico: raululloa88@gmail.com

Adrián Gonzalo Ulloa de Souza

Máster en Ingeniería de Sistemas Automáticos y Electrónica Industrial, Especialidad
Gestión Óptima de la Energía Eléctrica por la Universidad Politécnica de Cataluña.
España.

Ingeniero Eléctrico por la Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador
Correo electrónico: adrianuds90@gmail.com

Alejandro Javier Martínez Peralta

Estudiante de Maestría Académica con Trayectoria de Investigación en Electricidad,
Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí.
Ecuador.

Ingeniero Eléctrico. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas. Ecuador.
Correo electrónico: pipoperalta1990@hotmail.com

José Enrique Escobar Sandoval

Estudiante de Maestría Académica con Trayectoria de Investigación en Electricidad,
Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí.
Ecuador.

Ingeniero Eléctrico. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas. Ecuador.
Correo electrónico: ing.escobarsandovaljose@gmail.com

Jorge Daniel Mercado Bautista

Ingeniero Mecánico. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas. Ecuador.
Especialista en Diseño Mecánico y Producción con CAD-CAM-CAE aplicado al Sector
Industrial, Investigador Independiente, Esmeraldas, Ecuador.

Correo electrónico: gmercadobautista@gmail.com

RESUMO

Este artigo descreve o estudo da saturação do transformador de corrente durante uma falta transitória, quando causará distorção da corrente secundária. Quando ocorre a saturação, a corrente secundária não será linearmente proporcional à corrente primária, o que pode causar um mau funcionamento dos dispositivos de proteção. A metodologia é baseada na pesquisa documental, que apresenta os princípios teóricos, causas e efeitos desse fenômeno. Um tipo de medição TC de 2000/5 A, 25 VA nominal, é usado na análise e é testado para condições de falha normais e transitórias usando o software MATLAB-Simulink. Nos resultados da simulação, as formas de onda da corrente secundária são registradas para diferentes valores de corrente de falta no lado primário. Todas as formas de onda atuais são comparadas para analisar o comportamento do TC durante uma falta transitória. O objetivo deste estudo é apresentar uma investigação sobre a modelagem da saturação por TC em software de computador.

Palavras-chave: Falhas transitórias, saturação, transformador de corrente.

ABSTRACT

This article describes the study of current transformer saturation during a transient fault, when it will cause secondary current distortion. When saturation occurs, the secondary current will not be linearly proportional to the primary current, which can cause malfunction of protection devices. The methodology is based on documentary research, which presents the theoretical principles, causes and effects of this phenomenon. A 2000/5 A, 25 VA nominal, TC measurement type is used in the analysis and is tested for normal and transient fault conditions using MATLAB-Simulink software. In the simulation results, the waveforms of the secondary current are recorded for different values of fault current on the primary side. All current waveforms are compared to analyze CT behavior during a transient fault. The objective of this study is to present an investigation on CT saturation modeling in computer software.

Keywords: Transient Faults, Saturation, Current Transformer.

1 INTRODUCCIÓN

El transformador de corriente (CT) es uno de los elementos importantes de la protección del sistema de energía, comúnmente utilizan una componente integral. Las necesidades de los transformadores de corriente son amplias sobre el funcionamiento seguro de los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica (Rajendran, Perumal, & Mathematics, 2018).

El principal requisito de un transformador de corriente es la capacidad de reflejar con precisión la forma de onda de la corriente primaria. Sin embargo, el principio de un transformador electromagnético tradicional se realiza basándose en el acoplamiento del núcleo entre los devanados primario y secundario. Debido a la histéresis del núcleo del CT y sus características no lineales, la corriente secundaria durante la falla puede contener armónicos grandes y componentes de CC en descomposición que pueden causar que el

CT tenga una saturación severa. En consecuencia, la distorsión de la corriente secundaria puede provocar un mal funcionamiento de la protección (Li, 2016).

La señal de corriente en el secundario del transformador de corriente (CT) puede experimentar una distorsión severa debido a la saturación y definitivamente afecta el desempeño del relé de protección. Esencialmente, las grandes corrientes que pueden causar la saturación del TC se clasifican en dos grupos: primero, la saturación del TC causada por una condición de falla y el segundo, la saturación del TC debido a la corriente de entrada (Tajdinian, Bagheri, Allahbakhshi, Seifi, & Distribution, 2018).

El propósito de esta investigación es evaluar el daño de la saturación en la simulación con el MATLAB- Simulink, que es un paquete de software integrado que ofrece a los ingenieros la capacidad de desarrollo, modelado y análisis, diseño y ajuste de algoritmos para el control en variados campos de la industria. Al mismo tiempo, este programa puede realizar simulaciones para sistemas continuos, sistemas discretos y sistemas híbridos continuos y discretos (Escobar-Sandoval, Chere-Quiñónez, & Ângulo-Guerrero, 2020).

El Simulink, proporciona un potente editor gráfico, bloque SimPowerSystems, diferentes solucionadores para modelar y simulando sistemas dinámicos, y exporta los resultados de la simulación a MATLAB para más análisis.

2 DESARROLLO

2.1 TRANSFORMADORES DE MEDIDA (TM)

Cuando los valores de voltaje y corriente en el sistema de potencia son muy intensos, no se pueden medir en forma directa, es por esta razón que se utilizan los transformadores de medida, los cuales reproducen una imagen proporcional de la magnitud eléctrica del sistema de potencia, y además sirven para aislar los circuitos secundarios como; equipos de control, protección y medida. Los altos voltajes de los circuitos primarios; suministran a los equipos mencionados con valores apropiados de corriente y voltaje generalmente de 1 A a 5 A para las bobinas de corriente y 120 V para las bobinas de voltaje (Montaño De Paz, 2011).

El comportamiento de los TM durante y después de la ocurrencia de una falla es crítico en la protección eléctrica puesto que los errores de señal en los TM pueden causar mala operación de los relevadores. Además, factores tales como los periodos de saturación y de transitorios deben ser tenidos en cuenta al seleccionar el TM apropiado. Cuando solo las magnitudes de corriente y de voltaje son requeridas para operar un

relevador, la dirección relativa del flujo de corriente en los devanados del TM no es importante. sin embargo, la polaridad debe tenerse en cuenta cuando los relevadores comparan la suma o la diferencia de las corrientes (Ramírez Castaño, 2003).

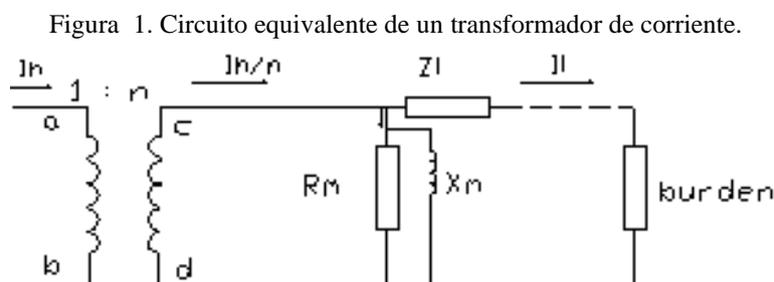
2.2 TRANSFORMADORES DE CORRIENTE (CT)

El devanado primario del TC se conecta en serie con el circuito de potencia de alta tensión, puesto que la impedancia del devanado es despreciable con respecto a la del sistema de potencia donde está instalado y teniendo en cuenta la carga que se conecta al secundario. Los TC usados para medida son diferentes a los TC usados para protección, tanto en su clase de precisión, como en la carga del secundario. Los TC de medida debe trabajar lo más exactamente posible bajo condiciones normales de operación. Los TC de protección debe operar correctamente entre márgenes muy amplios de carga, desde corrientes mínimas hasta valores varias veces mayores que la corriente nominal (Chasi Alarcón & López Bonito, 2019).

Los TC pueden llegar a saturarse por las altas corrientes causadas por las fallas cercanas; para evitar esto, en la figura 1 vemos como debe ponerse cuidado para asegurar que bajo condiciones de falla críticas los TC operen en la porción lineal de la curva de magnetización. en todos estos casos el TC debe ser capaz de suministrar suficiente corriente para que el relevador opere satisfactoriamente.

2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE

El primario de un transformador de corriente se conecta en serie con el circuito que se desea controlar y el secundario se conecta a los circuitos de corriente de uno o varios aparatos de medición o de protección.



Fuente: (Ramírez Castaño, 2003).

Del circuito equivalente se deduce que:

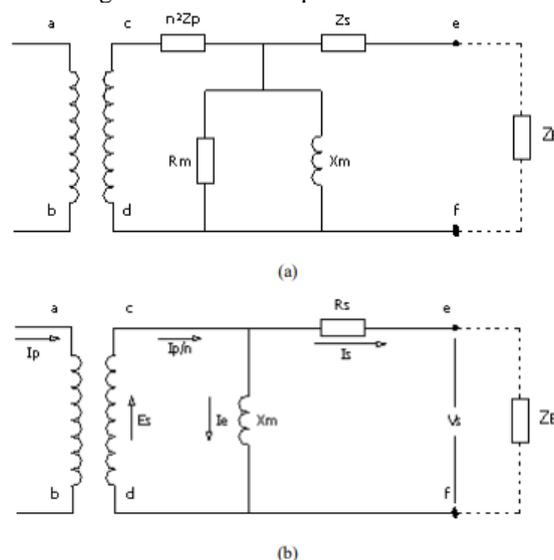
- El núcleo debe ser de buena calidad para trabajar a bajos niveles de saturación y pocas pérdidas.
- No se puede trabajar con un burden superior al nominal (se disminuiría la corriente carga y aumentaría la de excitación).
- No se puede trabajar a circuito abierto, porque se puede llegar a sobresaturación, altas pérdidas, sobre temperatura en el hierro y altos voltajes en los bornes del secundario.

2.4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS TC

- En un margen muy amplio de variación de la carga secundaria (Burden), la corriente secundaria no sufre cambios apreciables.
- El circuito secundario de un TC no debe ser abierto si el primario se halla energizado, puesto que los voltajes desarrollados serían limitados únicamente por la impedancia de la rama de magnetización y pueden ser demasiado altos.
- Los errores de relación y ángulo de fase pueden calcularse fácilmente si la característica de magnetización y la impedancia de carga son conocidas.

2.5 CIRCUITO EQUIVALENTE Y DIAGRAMA VECTORIAL

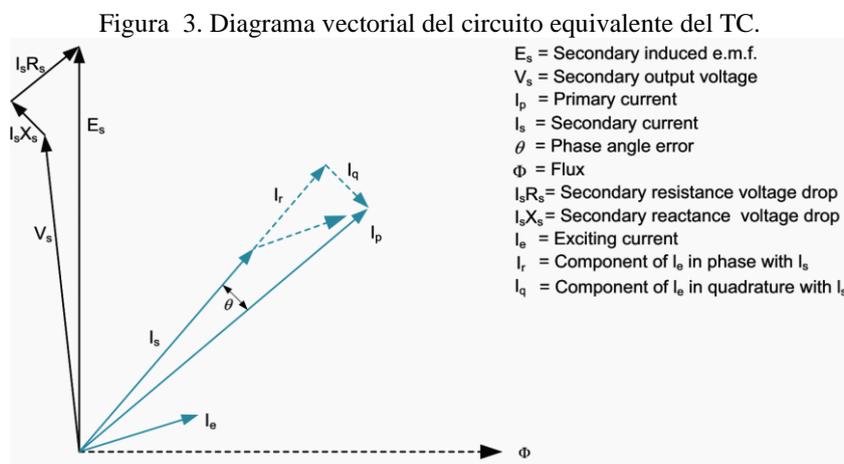
Figura 2. Circuito equivalente del TC.



Fuente: (Ramírez Castaño, 2003).

Un circuito equivalente apropiado para un TC se muestra en la figura 2 donde n^2Z_p representa la impedancia primaria Z_p referida al lado secundario, y la impedancia secundaria es Z_s . R_m y X_m representan las pérdidas y la excitación del núcleo.

La figura 2 puede ser reducida al arreglo, donde Z_p puede ser ignorada, puesto que ella no influye en la corriente I_p/n o el voltaje alrededor de X_m la corriente que fluye a través de X_m es la corriente excitación I_e . El diagrama vectorial, con las caídas de voltaje magnificadas para dar claridad, es mostrado en la figura 3. En general, Z_s es resistiva e I_e retrasa a V_s en 90° , así que I_e es la fuente principal de error. Nótese que el efecto neto de I_e es hacer que I_s se retrase y sea mucho más pequeña que I_p/n , la corriente primaria referida al lado secundario (Ramírez Castaño, 2003).



Fuente: (Ramírez Castaño, 2003).

2.6 SATURACIÓN AC

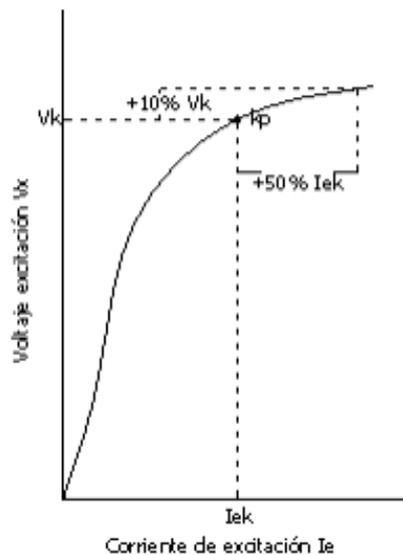
Los errores de los TC resultan de la corriente de excitación con el fin de comprobar si un TC funciona correctamente, es esencial medir o calcular la curva de excitación. La corriente de magnetización de un TC depende de la sección y longitud del circuito magnético, del número de vueltas en el devanado y de las características magnéticas del material. Así, para un TC dado, y refiriéndose al circuito equivalente de la figura 2, se puede ver que el voltaje en la impedancia de magnetización, es directamente proporcional a la corriente secundaria. De esto puede concluirse que, cuando la corriente primaria se incrementa al igual que la corriente secundaria, estas corrientes alcanzan un punto donde el núcleo comienza a saturarse y la corriente de magnetización llega a ser lo suficientemente alta para producir un error excesivo (Ramírez Castaño, 2003).

Cuando se investiga el comportamiento del TC, la corriente de excitación debe ser medida a varios valores de voltaje, esto se denomina prueba de inyección secundaria.

Usualmente es más conveniente aplicar un voltaje variable al devanado secundario dejando el devanado primario cortocircuitado.

La figura 4 muestra la relación típica entre el voltaje secundario y la corriente de excitación determinada en esta forma, en las normas europeas el punto de inflexión K_p es llamado punto de saturación y se define como el punto en el cual un incremento del 10% en el voltaje de excitación produce un incremento del 50% en la corriente de excitación.

Figura 4. Curva de saturación del TC.



Fuente: (Ramírez Castaño, 2003).

2.7 SELECCIÓN DEL TC

Cuando se selecciona un TC, es importante estar seguro que el nivel de falla y las condiciones de carga normal, no resulten en saturación del núcleo y que los errores no excedan los límites aceptables. Estos factores pueden ser calculados de:

- Aplicación de fórmulas.
- Curvas de magnetización de TC.
- Clases de exactitud de TC.

Los primeros dos métodos proporcionan factores precisos para la selección del TC. El tercer método solo proporciona una estimación cualitativa. El voltaje secundario en la figura 2 tiene que ser determinado por los tres métodos. Si la impedancia del circuito, X_m , es alta, esta puede ser removida del circuito equivalente con error pequeño, dando $E_s = V_s$, y así:

$$V_S = I_S (Z_S + Z_C + Z_B)$$

donde:

V_S : Voltaje rms inducido en el devanado secundario.

I_S : Corriente secundaria máxima en amperios; esta se puede determinar dividiendo la corriente máxima de falla en el sistema por la relación de transformación seleccionada.

Z_B : Impedancia externa conectada.

Z_S : Impedancia del devanado secundario.

Z_C : Impedancia del alambrado de conexión.

2.8 EL USO DE LA FÓRMULA

Este método utiliza la ecuación fundamental del transformador:

$$V_S = 4,44 f A N B_{max} 10^{-8} \text{ voltios}$$

donde:

f : Frecuencia en HZ.

A : Área transversal del núcleo (pulg^2).

N : Número de vueltas.

B_{max} : Densidad de flujo. (líneas/ pulg^2).

El área de sección transversal del metal y la densidad del flujo de saturación son algunas veces difíciles de obtener. El último puede tomarse como igual a 100000 líneas/ pulg^2 , que es un valor típico para transformadores modernos.

Para usar la fórmula V_S , es determinado de la ecuación y B_{max} es luego calculado usando la ecuación. Si B_{max} excede la densidad de saturación, allí puede haber errores apreciables en la corriente secundaria y el TC seleccionado puede no ser el apropiado.

2.8 USANDO LA CURVA DE MAGNETIZACIÓN

Las curvas típicas de saturación del TC, son suministradas por los fabricantes, los mismos que establecen la corriente rms obtenida al aplicar un voltaje rms al devanado secundario con el devanado primario en circuito abierto. Las curvas dan la magnitud de la corriente de excitación requerida a fin de obtener un voltaje secundario específico (Zepeda López, 2018).

El método consiste en producir una curva que muestre la relación entre las corrientes primaria y secundaria para una derivación (tap) y las condiciones especificadas de carga tal como se muestra en la figura 5.

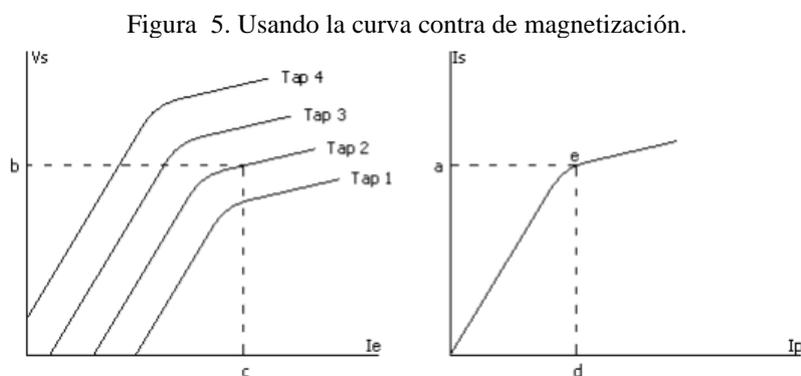
Comenzando en cualquier valor de corriente secundaria y con la ayuda de las curvas de magnetización, el valor de la correspondiente corriente primaria puede ser determinado. El proceso es resumido en los siguientes pasos:

- a) Asumir un valor para I_s .
- b) Calcular V_s de acuerdo con la ecuación.
- c) Localizar el valor de V_s en la curva de magnetización para el tap seleccionado, y encontrar el valor asociado de la corriente de magnetización I_e .
- d) Calcular $I_p/n = I_s + I_e$ y multiplicar este valor por n para referirlo al lado primario del TC.
- e) Esto proporciona un punto en la curva de I_s contra I_p y el proceso es luego repetido para obtener otros valores de I_s y el valor resultante de I_p .

2.9 LA CURVA CONTRA DE MAGNETIZACIÓN

Este método incurre en un error en el cálculo de I_p/n sumando $I_s + I_e$ aritméticamente y no vectorialmente, lo que implica no tomar en cuenta el ángulo de la carga y la rama de magnetización del circuito equivalente. Sin embargo, este error no es grande y la simplificación hace fácil llevar a cabo los cálculos.

Después de la construcción, las curvas deben ser comprobadas para confirmar que la corriente máxima de falla primaria está dentro de la zona de saturación del transformador. Si no, será necesario repetir el proceso, cambiando el tap del TC hasta que la corriente de falla esté dentro de la parte lineal de la característica.



Fuente: (Ramírez Castaño, 2003).

En la práctica no es necesario dibujar la curva completa puesto que es suficiente con conocer la corriente de falla y referirla al devanado secundario asumiendo que no hay saturación para el tap seleccionado. Este valor convertido puede tomarse como I_s inicialmente para el proceso descrito anteriormente. Si el tap es encontrado como conveniente después de finalizar los cálculos, luego el valor de I_p puede ser obtenido y con el que más se ajusta a la corriente de falla.

2.10 PRECAUCIONES CUANDO SE TRABAJA CON TC

Cuando se trabaja con TC asociados con circuitos energizados puede ser extremadamente peligroso. En particular, la apertura del circuito secundario de un TC puede resultar en sobrevoltajes peligrosos que causan daños al personal de operación o dirigirlos a los equipos puesto que los TC están diseñados para emplearlos en sistemas de potencia que tienen una impedancia mucho más grande que la suya propia. Como consecuencia, cuando los circuitos secundarios son abiertos, la impedancia equivalente del circuito primario no es casi afectada pero un alto voltaje se desarrollará por el circuito primario pasando a través de la impedancia de magnetización. Así, los circuitos secundarios asociados con los TC siempre deben ser cortocircuitados para prevenir que ocurran esas situaciones adversas (Ramírez Castaño, 2003).

3 METODOLOGÍA

3.1 EL EFECTO DE LA SATURACIÓN DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE

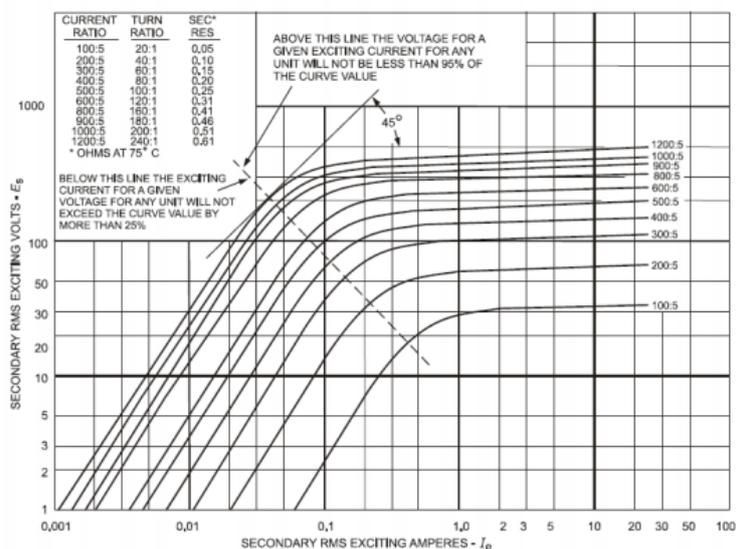
Una discusión sobre el factor de saturación y la influencia del tiempo que se dará para saturar. En teoría, la saturación de los transformadores de corriente, se pueden evitar mediante las siguientes situaciones.

La normativa **IEEE Std C37.110-1996** presenta varios factores que afectarán la saturación del TC. Dado que puede funcionar correctamente durante uno a tres ciclos después de la saturación, el tiempo de saturación es importante para diseñar el relé. Las siguientes variables determinan la saturación del TC:

- **Grado de compensación de la corriente de falla:** Porque el componente de CC en el lado primario contribuirá a un aumento de la densidad de flujo del núcleo del TC, la relación de X / R y la falla ángulo de incidencia que determina el desplazamiento del componente de CC influye en el primario y forma de onda secundaria.

- **Magnitud de la corriente de falla:** Bajo la misma situación de compensación, una alta corriente de falla hace que el TC entre directamente en la región de saturación.
- **Flujo remanente en el núcleo de TC:** El flujo que queda en el núcleo mientras que el primario se interrumpe la corriente, acortará o aumentará el tiempo de saturación dependiendo de la polaridad. Si el flujo remanente es extremadamente alto, el núcleo alcanzará la saturación casi inmediatamente.
- **Impedancia del circuito secundario:** En una situación similar, la impedancia más alta del lado secundario, el TC se saturará más rápido. Como mencionamos anteriormente, la gran carga hará que el voltaje en el núcleo sea más alto de lo normal, en este caso, el flujo que corresponde al voltaje, aumentará y acortará el tiempo de saturación.
- **Relación de vueltas:** Para una corriente primaria conocida, aumentar la relación de vueltas reducirá la corriente secundaria. Incluso cuando la corriente de falla no alcanza el límite superior de la corriente primaria, el TC no se saturará. Sin embargo, en la práctica el aumento de los giros también provocará aumentos de la impedancia de carga. Por lo tanto, el efecto real del aumento de la relación de vueltas dependerá de la situación específica. Con base en la Figura 6 y el factor de saturación anterior, la decisión de elegir un TC se debe tener en cuenta la relación múltiple que pueda existir. Mientras tanto, el proveedor de equipos probablemente esté utilizando un núcleo pequeño para satisfacer la clase de precisión en un alto relación TC (Li, 2016).

Figura 6. Relación entre V_s e I_m para un conjunto de clase C sin espacios.



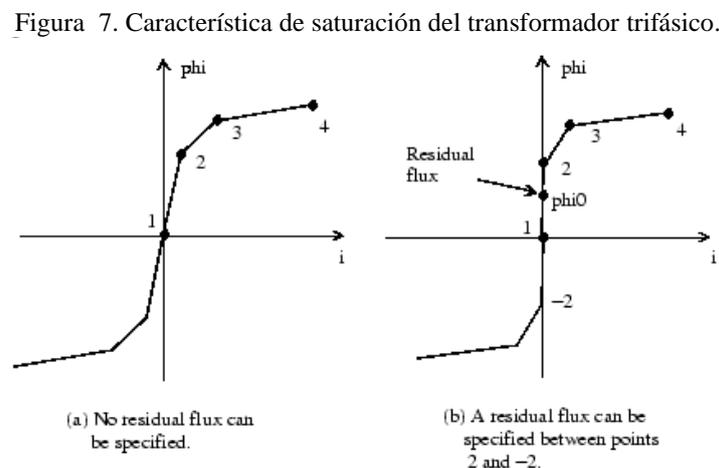
Fuente: (Li, 2016).

Una ecuación básica que puede expresar la relación entre el tiempo de saturación y el factor de impacto es: $Ts \cdot T1 \text{ en } 1 \cdot s \frac{K \cdot 1}{X/R}$.

Donde $T1 \cdot \frac{X}{R \cdot T}$ significa el tiempo de saturación T que es la hora principal del sistema constante, X es la reactancia del sistemas primario al punto de falla, R es la resistencia del sistema primario al punto de falla, y Ks es el factor de saturación que puede ser obtenido dividiendo el voltaje de saturación V x y voltaje de excitación secundario Vs. Debido a que el transformador de corriente convierte proporcionalmente la corriente del lado primario, la saturación del TC también afectara a los dispositivos de medición y protección.

3.2 CARACTERÍSTICA DE SATURACIÓN SIN HISTÉRESIS

Cuando no se modela la histéresis, la característica de saturación del bloque del transformador saturable se define mediante una relación lineal por partes entre el flujo y la corriente de magnetización (Pineda, Rodrigues, & Tellez, 2018).



Fuente: (Pineda et al., 2018).

Por lo tanto, si desea especificar un flujo residual, phi0, el segundo punto de la característica de saturación debe corresponder a una corriente nula, como se muestra en la figura (b).

$$\Phi = \Phi_{pu} \Phi_{base} \quad I = I_{pu} I_{base},$$

donde el enlace de flujo de base (Φ_{base}) y la corriente de base (I_{base}) son los valores pico obtenidos a la potencia y frecuencia de voltaje nominal:

$$I_{base} = \frac{Pn}{VI} \sqrt{2}$$

$$\phi_{base} = \frac{VI}{2\pi fn} \sqrt{2}$$

El flujo base se define como el valor pico del flujo sinusoidal (en webers) cuando el devanado 1 está conectado a una fuente de voltaje sinusoidal de 1 pu (voltaje nominal). El valor Φ_{base} definido anteriormente representa el enlace de flujo base (en voltios-segundos). Está relacionado con el flujo base por la siguiente ecuación:

$$\Phi_{base} = \text{flujo base} \times \text{número de vueltas del devanado 1.}$$

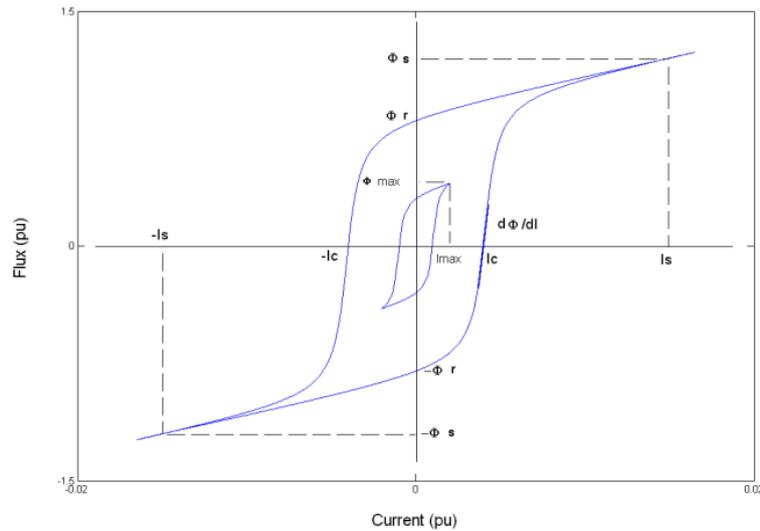
Cuando se expresan en pu, el flujo y el enlace de flujo tienen el mismo valor.

3.3 CARACTERÍSTICA DE SATURACIÓN CON HISTÉRESIS

La corriente de magnetización I se calcula a partir del flujo Φ obtenido al integrar el voltaje a través de la rama de magnetización. El modelo estático de histéresis define la relación entre el flujo y la corriente de magnetización evaluada en CC, cuando las pérdidas por corrientes parásitas no están presentes.

El modelo de histéresis se basa en una característica semi-empírica, usando una expresión analítica arcángente $\Phi(I)$ y su inversa $I(\Phi)$ para representar las trayectorias de los puntos de operación. Los parámetros de expresión analítica se obtienen mediante el ajuste de curvas de datos empíricos que definen el bucle principal y la característica de saturación de valor único. La herramienta de diseño de histéresis del bloque Powergui se utiliza para ajustar el bucle principal de histéresis de un tipo de núcleo en particular a los parámetros básicos. Estos parámetros están definidos por el flujo remanente (Φ_r), la corriente coercitiva (I_c) y la pendiente ($d\Phi / dI$) en el punto $(0, I_c)$ como se muestra en la siguiente figura.

Figura 8. Características de saturación con histéresis.



Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

El semiciclo del ciclo principal está definido por una serie de N puntos equidistantes conectados por segmentos de línea. El valor de N se define en la herramienta de diseño Histéresis del bloque Powergui. El uso de $N = 256$ produce una curva suave y, por lo general, da resultados satisfactorios.

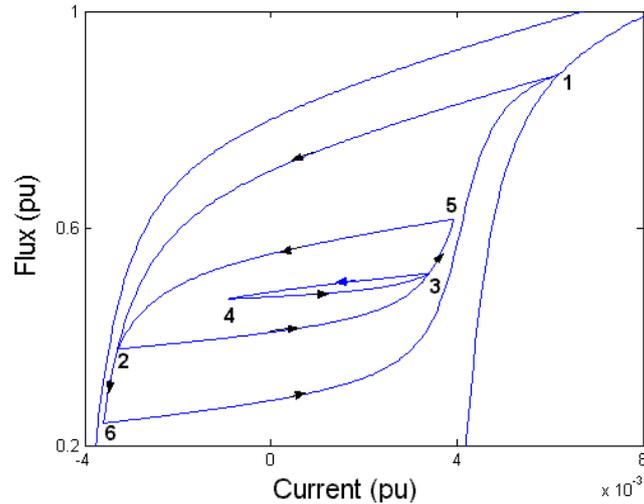
La característica de saturación de valor único se define mediante un conjunto de pares de flujo de corriente que definen una curva de saturación que debe ser asintótica con la inductancia del núcleo de aire L_s .

Las principales características del modelo de histéresis se resumen a continuación:

Una variación simétrica del flujo produce una variación de corriente simétrica entre $-I_{max}$ y $+I_{max}$, lo que da como resultado un bucle de histéresis simétrico cuya forma y área dependen del valor de Φ_{max} . El bucle principal se produce cuando Φ_{max} es igual al flujo de saturación (Φ_s). Más allá de ese punto, la característica se reduce a una característica de saturación de un solo valor.

En condiciones transitorias, una corriente de magnetización oscilante produce bucles asimétricos menores, como se muestra en la siguiente figura 9, y se supone que todos los puntos de operación están dentro del bucle principal. Los bucles una vez cerrados no tienen más influencia en la evolución posterior.

Figura 9 Características de saturación con histéresis en condición transitoria.



Fuente: MathWorks MATLAB-Simulink.

La trayectoria comienza desde el punto de flujo inicial (o residual), que debe estar en el eje vertical dentro del bucle principal. Puede especificar este valor de flujo inicial ϕ_0 , o se ajusta automáticamente para que la simulación comience en estado estable.

4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

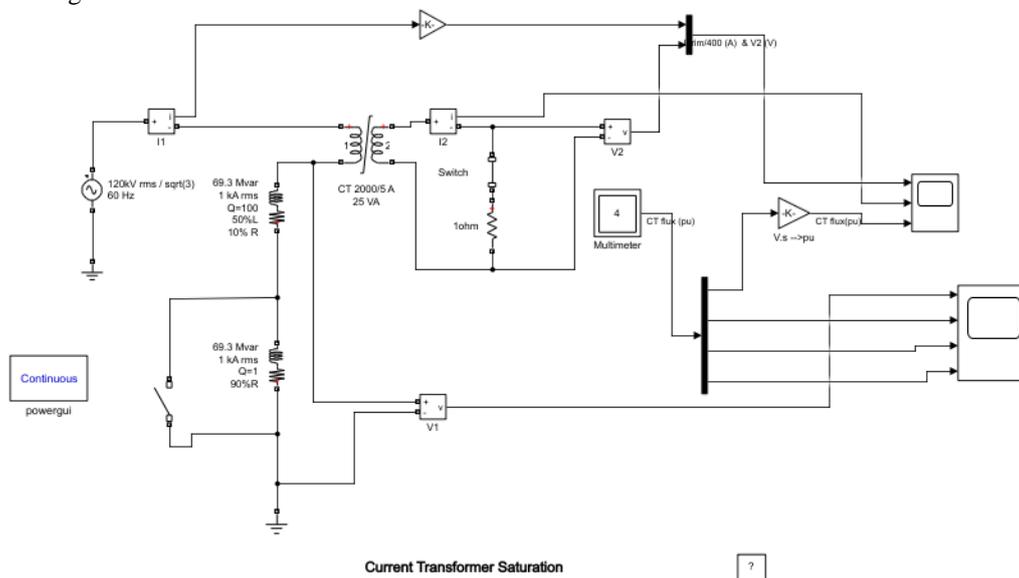
4.1 MODELO DEL TC EN MATLAB-SIMULINK

Los componentes de SimPowerSystems se utilizan para modelar el sistema de energía eléctrica, las bibliotecas y las herramientas de análisis proporcionadas ayudan a construir sistemas de manera eficaz. Incluye fuentes eléctricas, elementos básicos, dispositivos electrónicos de potencia, máquinas de diferentes tipos, aplicaciones prácticas y diversos tipos de control y medidas. El Powergui block es el bloque de entorno para los modelos SimPowerSystems. La caja útil de herramientas puede ayudar a realizar análisis de armónicos, flujo de carga y otros análisis de sistemas de energía eléctrica, que funciones nos ayudan a evaluar el desempeño del diseño. MATLAB ofrece un ejemplo diseñado por G. Sybille (Hydro-Quebec), para indicar la saturación del transformador de corriente. Se ha realizado una pequeña modificación al modelo original. La figura 10 es el modelo de saturación del transformador de corriente integrado en Simulink.

Este modelo de transformador de corriente de la Figura 10 se utiliza para medir la corriente secundaria en un sistema de energía de una sola línea de 120 kV 60Hz conectado con un inductor de derivación, usando el solucionador ode23tb (stiff / TR-BDF2) con tamaño de paso predeterminado y tolerancia relativa en MATLAB / Simulink.

El TC utilizado en este modelo tiene una clasificación de 2000 A / 5 A, 25 VA. La resistencia del devanado primario y secundario del parámetro TC es 0.001pu y la inductancia $L = 0.04\text{pu}$, la resistencia a la pérdida del núcleo es $R_m = 100 \text{ p.u.}$ La serie de carga conectada con la bobina primaria es un inductor de derivación con capacidad nominal 69,3 MVar, corriente nominal 1 kA y factor de calidad $Q = 100$. Por lo tanto, la resistencia de carga R es 0.693 ohm y la inductancia L es 0.221 H. El lado secundario del TC está conectado con una resistencia de carga de 1 ohmio. La carga está configurada para medir la rama actual. La corriente obtenida por el multímetro 1 es la corriente secundaria, que debe ser proporcional a la corriente primaria en condiciones normales.

Figura 10. Modelo de saturación del transformador de corriente construido en Simulink.

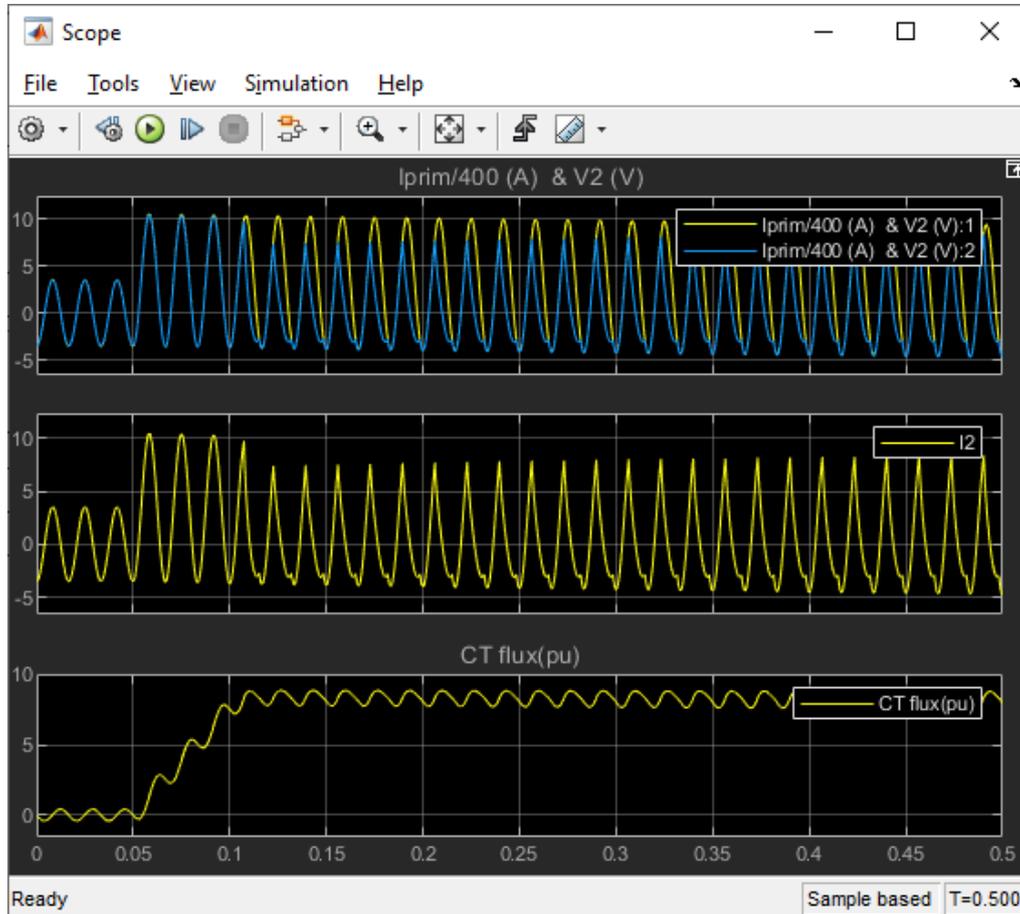


Fuente: Elaboración propia.

En funcionamiento estable, la corriente secundaria convertida por el TC es $1000 * 5/2000 = 2,5 \text{ A}$ (3,54 A pico leído por el multímetro 1). El TC se puede configurar con o sin simulación histéresis. Los graficas se utilizan para observar directamente la forma de onda de cada variable. La gráfica 1 se superponen la corriente secundaria y la corriente primaria dividida por la relación de vueltas. El flujo de TC medido por el bloque multímetro en p.u se convierte dividiendo $0.0125 \text{ V} * \text{sqrt}(2) / (2 * \text{pi} * 60)$ y se observa a través de la gráfica 2. La carga primaria (relación de X / R) controla la constante de tiempo primaria. El cambio del tiempo del interruptor del lado primario determina la magnitud del componente aperiódico. En la prueba normal, el interruptor se cierra a un

voltaje máximo ($t = 1.25$ ciclos). La simulación se ejecutó, y la corriente primaria y secundaria del TC se pueden observar en la Figura 11.

Figura 11. Corriente primaria (azul) VS Corriente secundaria (amarilla), Flujo del transformador de corriente en $t = 1.25 / 60$ s.



Fuente: Elaboración propia.

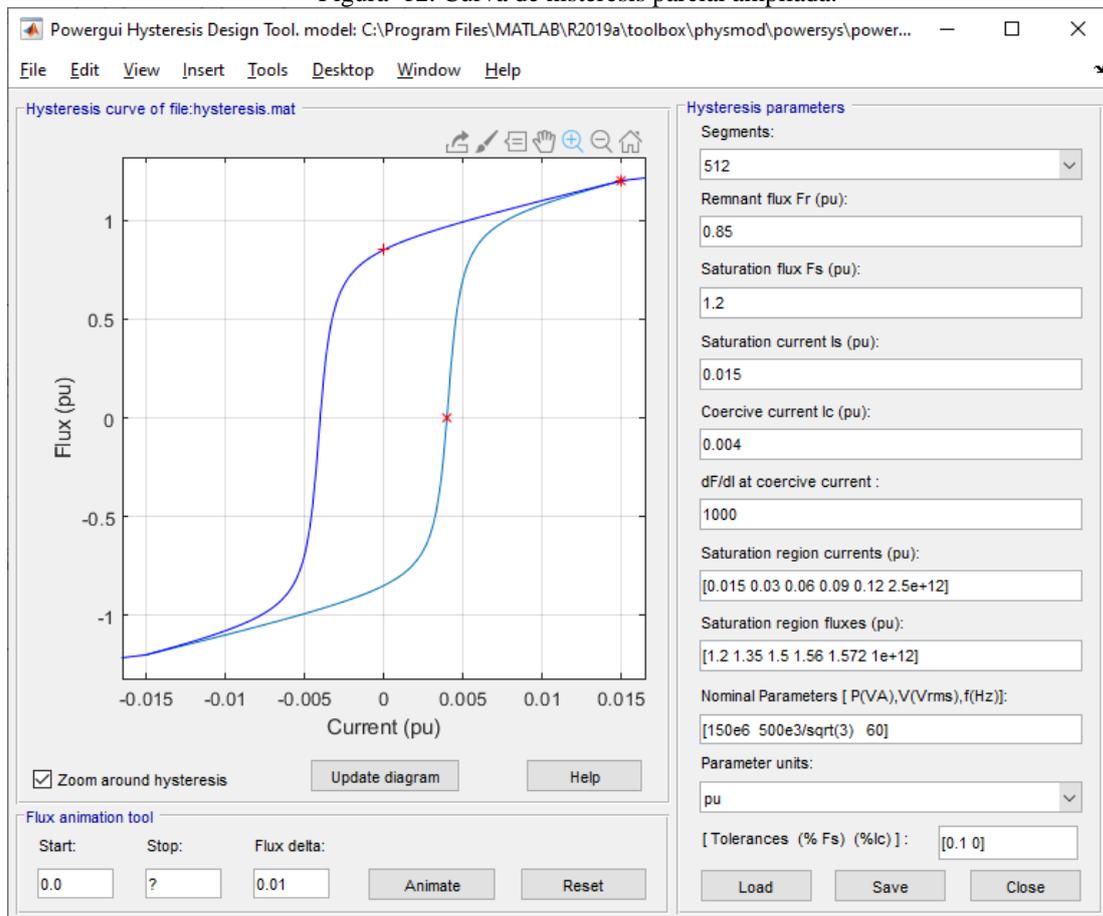
La línea azul es la relación de vueltas dividida de la corriente primaria 400, y la amarilla superpuesta línea es la corriente secundaria. Como era de esperar, el componente aperiódico es 0 y TC no alcanzar la región de saturación. El flujo de TC que se muestra en la Figura 10 es un seno aproximado. El efecto del componente de desintegración de CC no es significativo.

Cambio del tiempo de conmutación del interruptor para cerrar en el punto de cruce cero de voltaje ($t = 1/60$ s). En este momento, el voltaje de la fuente instantánea es cero, lo que significa que el ángulo de fase es $\alpha = 0$, y eso provocará la componente aperiódica máxima. La derivación del reactor generará una corriente de asimetría después de la conmutación. En la Figura 9, podemos observar que al principio el TC todavía es capaz de reflejar la corriente primaria en proporción. Sin embargo, después de 3 ciclos, la

asimetría de flujo producida por el primario de falla la corriente provoca la saturación del TC, que provoca una distorsión de la corriente secundaria, Figura 9 muestra el flujo que ha alcanzado el nivel de saturación de 10 pu.

Como se discutió en la sección anterior, hay muchos factores que afectarán la corriente saturación del transformador. Basado en el modelo de Simulink, seguirá una discusión para analizar el tamaño de la carga, histéresis y corriente primaria extremadamente alta que causará saturación en estado estacionario. Al utilizar la herramienta de diseño de histéresis incorporada de Powergui, podemos simular la histéresis curva. Configurar la corriente de la región de saturación como [0.015 0.03 0.06 0.09 0.12] y saturación flujos de región como [1,2 1,35 1,5 1,56 1,572], la curva de histéresis ampliada parcial que se muestra en Figura 8. Luego, abrimos el parámetro de bloque del TC, podemos configurarlo para simular histéresis. La corriente primaria frente a la corriente secundaria en $t = 1 / 60s$ con histéresis que se muestra en la Figura 11 indica el flujo del transformador de corriente.

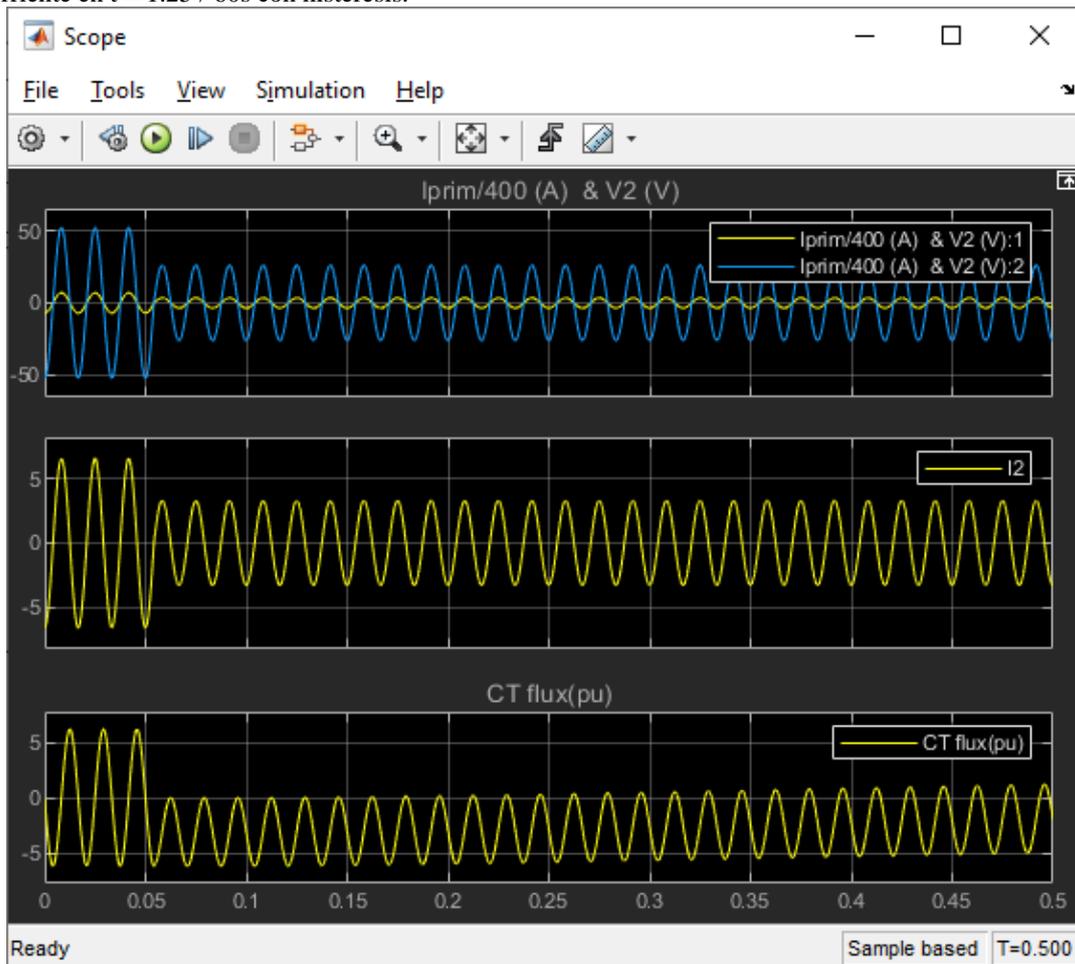
Figura 12. Curva de histéresis parcial ampliada.



Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las gráficas de la Figura 11 y 13, podemos observar que el TC no puede convertir la corriente primaria proporcional desde el principio. La forma de onda del flujo que se muestra en la figura 12 sucede debido al efecto del magnetismo residual, el núcleo es más fácil de saturar.

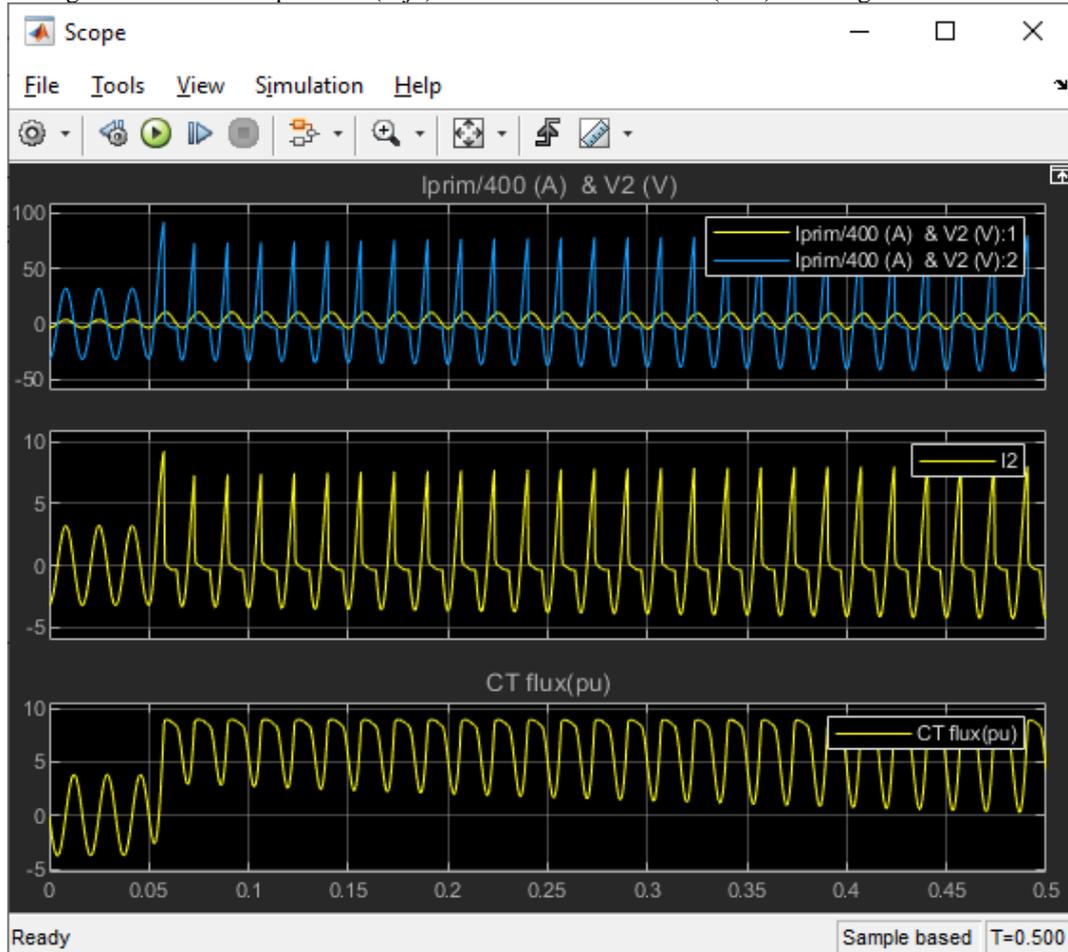
Figura 13. Corriente primaria (azul) VS Corriente secundaria (amarilla), Flujo del transformador de corriente en $t = 1.25 / 60s$ con histéresis.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 13 muestra el resultado de la prueba de restablecer la impedancia de carga $R = 8$ ohmios. En comparación con la Figura 14, cuanto mayor es la impedancia del lado secundario, más rápida es la saturación del TC.

Figura 14. Corriente primaria (rojo) VS Corriente secundaria (azul) con carga de 10 ohmios.



Fuente: Elaboración propia.

5 CONCLUSIONES

I. El modelo de simulación del CT para una relación 2000/5 A nominal funciona correctamente según el rango diseñado.

II. Se observan las formas de onda de la corriente primaria y secundaria para analizar el comportamiento de la falla transitoria. Los resultados de la prueba aclaran que el núcleo del CT se satura durante los transitorios, pero la saturación se basa en la magnitud de la corriente de falla. A medida que el TC se modela para saturarse para un flujo de 1,6 pu, el núcleo del TC se satura parcialmente para una corriente de falla equivalente a dos veces la corriente primaria nominal.

III. Un mayor aumento en el valor de la corriente de falla da como resultado la reducción de la magnitud de la corriente secundaria. Resulta en perder su proporcionalidad y precisión de transformación. Esto se debe a la saturación del núcleo para una corriente primaria de mayor magnitud.

IV. Modelar la histéresis requiere una carga de cálculo adicional y, por lo tanto, ralentiza la simulación. El modelo de histéresis debe reservarse para aplicaciones específicas donde este fenómeno es importante.

V. La saturación del transformador de corriente provocará una distorsión de la corriente secundaria. Cuando saturación, la corriente secundaria no será linealmente proporcional a la primaria corriente, lo que puede provocar un mal funcionamiento de los dispositivos de protección.

VI. Al comparar los resultados de la simulación, notamos que el modelo revisado tiene un rendimiento satisfactorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chasi Alarcón, K. S., & López Bonito, E. S. (2019). *Modelamiento de un transformador óptico de corriente ideal para sistemas de protecciones*. (Investigación), Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). Retrieved from <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/5595/1/PI-001117.pdf>

Escobar-Sandoval, J. E., Chere-Quiñónez, B. F., & Ângulo-Guerrero, R. J. J. D. d. I. C. (2020). Uso del programa MATLAB/SIMULINK en la descripción de motores eléctricos de corriente alterna. *Análisis documental*, 6(5), 348-360.

Li, X. (2016). *Mathematical Model for Current Transformer Based On Jiles-Atherton Theory and Saturation Detection Method*. (Theses and Dissertations--Electrical and Computer Engineering), University of Kentucky, Retrieved from https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://scholar.google.es/&httpsredir=1&article=1093&context=ece_etds

Montaño De Paz, H. S. (2011). *TRANSFORMADORES DE CORRIENTE TC*. Universidad Don Bosco VITAM IMPENDERE VERO, Retrieved from <https://cutt.ly/jxMD5z4>

Pineda, R. P., Rodrigues, R., & Tellez, A. A. J. I. L. A. T. (2018). Analysis and simulation of ferroresonance in power transformers using simulink. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 16(2), 460-466. doi:10.1109/TLA.2018.8327400

Rajendran, M., Perumal, V. J. I. J. o. P., & Mathematics, A. (2018). Saturation analysis on current transformer. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 118(18), 2169-2176.

Ramírez Castaño, S. J. D. d. I. E., *Electrónica y Computación*. (2003). *Protección de sistemas eléctricos*.

Tajdinian, M., Bagheri, A., Allahbakhshi, M., Seifi, A. R. J. I. G., Transmission, & Distribution. (2018). Framework for current transformer saturation detection and waveform reconstruction. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(13), 3167-3176. doi:10.1049/iet-gtd.2017.1742

Zepeda López, W. S. (2018). *Efecto de saturación del núcleo en transformadores de corriente de media y baja tensión*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Retrieved from <http://www.repositorio.usac.edu.gt/11020/1/Werner%20Sa%C3%BAI%20Zepeda%20L%C3%B3pez.pdf>

Casoria, S., P. Bfghjklrunelle, and G. Sybille, "Hysteresis Modeling in the MATLAB/Power System Blockset," *Electrimacs 2002*, École de technologie supérieure, Montreal, 2002.

Frame, J.G., N. Mohan, and Tsu-huei Liu, "Hysteresis modeling in an Electro-Magnetic Transients Program," presented at the IEEE PES winter meeting, New York, January 31 to February 5, 1982.