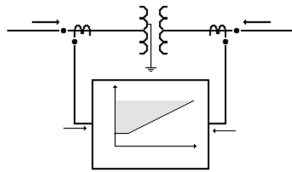


# Análisis de los modelos de transformadores para la simulación de la protección diferencial

Víctor Marín Castillo, Gina Idárraga Ospina,  
Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica en FIME-UANL  
vic.gmarines@gmail.com , gidarraga@gmail.com

**Enrique Esteban Mombello**

Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina  
mombello@iee.unsj.edu.ar



## RESUMEN

*En el presente trabajo se realiza un análisis de las características de distintas herramientas de simulación de transitorios electromagnéticos para la simulación de la operación de la protección diferencial de transformadores. Se evaluaron las características de los programas EMPT/ATP, PSCAD y Matlab/Simulink considerando la característica de magnetización, la corriente de magnetización y las condiciones de sobreexcitación del núcleo de un transformador de potencia. Finalmente se presentan los resultados de la simulación de una protección diferencial con restricción por armónicas realizada en PSCAD, para realizar la discriminación entre corrientes de magnetización y corrientes de cortocircuito.*

## PALABRAS CLAVE

Corriente de energización, transformador saturable, protección diferencial, transitorios electromagnéticos, ATP, PSCAD, MatLab.

## ABSTRACT

*This paper describes the characteristics of three electromagnetic transients simulation programs for the simulation of differential protection scheme in power transformers. The evaluation was done for the programs EMPT/ATP, PSCAD and Matlab/Simulink, considering the following model featuring, magnetization curve, inrush current and over excitation conditions in the transformer core. Finally, the results of differential protection simulation in PSCAD with harmonic restriction are presented, the proposed scheme discriminates between inrush and short circuit currents.*

## KEYWORDS

Inrush current, Saturable transformer, Differential protection, Electromagnetic transients. ATP, PSCAD, Matlab.

## INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia forman parte del equipo primario del sistema eléctrico de potencia (SEP), y son elementos indispensables para transmitir los bloques de energía a través de las grandes distancias que separan los centros de generación y los consumidores. La calidad y continuidad de la energía eléctrica depende en gran medida del buen estado de estos equipos, a pesar de que los transformadores son elementos muy confiables, están expuestos a fallas de cortocircuito las cuales, pueden llegar a ser muy severas, al grado de destruir por completo el transformador.

Para proteger el transformador se cuenta en la actualidad con el relevador de protección diferencial,<sup>1</sup> el cual es el encargado de realizar la detección de cortocircuitos en terminales y devanados del transformador (fallas internas). Dicho relevador basa su operación en la suma fasorial entre las corrientes de entrada y salida del transformador,<sup>2</sup> como puede verse en la figura 1. Es decir, en estado estable y en condición de falla externa, esta suma siempre es prácticamente cero (ideal). Por el contrario, cuando ocurre una falla interna la suma fasorial toma valores muy elevados, haciendo que el relevador reconozca el alto valor de corriente como una falla y entre en operación. Sin embargo, la protección diferencial de transformadores puede operar incorrectamente ante corrientes de energización (inrush).

La corriente de energización del transformador, producida por la conexión inicial o por re-cierre de un interruptor automático de liberación de falla, es transitoria con valores muy elevados (hasta 30 veces la corriente a plena carga).<sup>1</sup> La misma fluye desde la fuente hacia el transformador sin fluir fuera de él

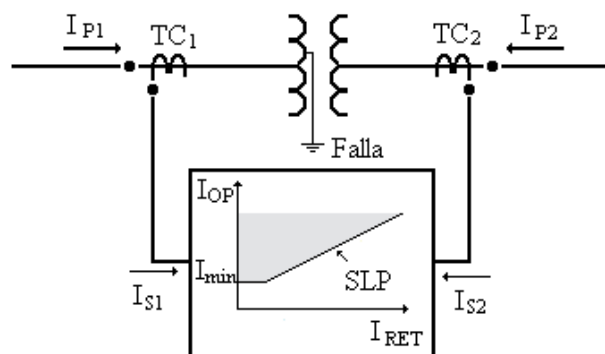


Fig. 1. Diagrama de conexión del relevador de porcentaje diferencial.<sup>7</sup>

(similar a una falla interna), por esta razón se presenta una corriente diferencial. Dicha corriente puede provocar un mal funcionamiento en el esquema de protección diferencial, motivo por el cual la corriente de energización debe ser detectada de forma tal que la protección permanezca sin actuar durante el periodo de energización del transformador, lo que convierte en una de las mayores preocupaciones en los esquemas de protección diferencial de transformadores la distinción exacta y rápida entre corrientes de energización y corrientes de falla. Lo anterior, debido a que la corriente de magnetización de energización presenta características diferentes a las corrientes de falla, la más significativa es su contenido armónico, presente en los transformadores por la característica no lineal del núcleo magnético, por tener sobreexcitación o también por presentar magnetización residual en el núcleo.<sup>3</sup>

Actualmente el esquema de protección diferencial más utilizado para la detección de la corriente de energización, es la protección diferencial con retención por armónicas. La retención se lleva a cabo discriminando la corriente de energización de una corriente de cortocircuito a partir del contenido de la segunda armónica y, utiliza el quinto armónico para discriminar condiciones de sobreexcitación. El algoritmo de retención por armónicas compara el valor de la segunda armónica con respecto a la componente de frecuencia fundamental y, si ésta relación es mayor que un valor predeterminado, se bloquea la operación de la protección.<sup>4</sup>

Sin embargo, el esquema de protección diferencial con retención por armónicas no realiza una adecuada discriminación entre la corriente de energización y la corriente de falla, causando una incorrecta operación del relevador, ya que el segundo armónico puede presentarse durante fallas internas en los transformadores, esto es debido a la saturación de los transformadores de corriente (TC), o a la presencia de capacitancias en el sistema que alimenta al transformador, así que el segundo armónico generado bajo estas circunstancias puede ser mayor que el segundo armónico generado por la corriente de energización del transformador.<sup>5</sup> Aunado a esto, el uso de materiales amorfos para la elaboración de núcleos magnéticos de mejor calidad, y que generen menos pérdidas, disminuye el contenido armónico de la corriente de energización.<sup>6</sup>

En el presente artículo se analiza el modelo del transformador saturable para su aplicación en el diseño de algoritmos de protección diferencial de transformadores, mediante una comparación de programas de simulación de fenómenos electromagnéticos. Cada programa de simulación tiene sus ventajas, por ello los autores no pretenden hacer una comparación exhaustiva de las funciones que tiene cada programa sino modelar el transformador tan real como sea posible para determinar el modelo que presenta las mejores características, que a criterio de los autores, son las necesarias para la aplicación en el diseño de algoritmos aplicables en la protección diferencial.

### PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

En la figura 1 se presenta el esquema de protección de porcentaje diferencial conectado en las terminales de un transformador de potencia a través de los transformadores de corriente (TC). En el recuadro se muestra la característica del relevador, donde la región de operación es representada por el área sombreada sobre la pendiente (SLP). Por lo tanto, el relevador genera la señal de disparo si la corriente de operación  $I_{OP}$  es mayor que un porcentaje de la corriente de retención  $I_{RET}$  según.

$$I_{OP} > SLP \times I_{RET} + I_{\min} \quad (1)$$

donde las corrientes de operación y retención son obtenidas como.

$$I_{OP} = \left| \vec{I}_{S1} + \vec{I}_{S2} \right| \quad (2)$$

$$I_{RET} = k \left| \vec{I}_{S1} - \vec{I}_{S2} \right| \quad (3)$$

En la (1), la comparación de una corriente de retención (escalada por la pendiente SLP) con la corriente de operación, se realiza para evitar falsas corrientes de operación en la protección diferencial, debido a la corriente de desbalance o de error, principalmente, por errores de relación de los TC; el porcentaje SLP es calculado de forma tal que represente un valor mayor a dicha corriente de desbalance.

Los errores de relación de los TC no son la única causa de producir corrientes falsas de operación en el relevador diferencial. La tabla I enumera los principales factores que causan corrientes falsas

de operación y la solución típica a cada problema. Los primeros 3 problemas de la tabla I, tienen una solución directa al seleccionar conexiones apropiadas de los TC ó utilizar características de porcentaje diferencial en el esquema de protección diferencial, pero un problema muy complejo es el discriminar entre corrientes de falla interna y corrientes de energización.

### MODELO DEL TRANSFORMADOR SATURABLE

Los programas de simulación de fenómenos electromagnéticos PSCAD,<sup>8</sup> ATP<sup>9</sup> y MatLab<sup>10</sup> presentan una gran variedad de modelos de

Tabla I. Factores que afectan la aplicación de la protección diferencial en transformadores de potencia.

Problema	Causa	Solución
Desplazamiento de fase entre la corriente del primario y secundario del transformador de potencia.	Conexión delta-estrella de los devanados del transformador de potencia.	Conexión apropiada de los TC como: estrella-delta. Compensación interna en relevadores digitales.
Relación de transformación variable del transformador de potencia.	Cambiadores de Tap para control de voltaje	Característica de porcentaje diferencial en el relevador típicamente resuelve este problema
Desajuste entre relación de transformación del transformador de potencia y TC.	Diferentes niveles de voltaje entre el primario y secundario del transformador de potencia tiene como consecuencia diferentes tipos de TC, relación de transformación y característica de funcionamiento.	
Desbalance en la corriente aplicada al relevador (corriente diferencial).	Corriente de magnetización de energización, sobreexcitación, saturación en TC, transitorios en el SEP, energización de transformadores paralelos al que esta puesto en servicio.	Algoritmos de discriminación.

transformadores dentro de sus librerías, desde el transformador ideal hasta el modelo del transformador saturable, monofásico y trifásico, además de permitir el desarrollo e implementación de nuevos modelos. Un resumen del estado del arte en modelos de transformadores para la simulación de transitorios de baja frecuencia (corriente de energización, ferresonancia e interacciones armónicas) puede verse en la referencia<sup>11</sup>. La figura 2 muestra el modelo circuital del transformador saturable monofásico el cual por su sencillez discutiremos en esta sección. El modelo considera la característica de magnetización la cual modela la rama de excitación con una resistencia  $R_m$ , que simula las pérdidas en el núcleo, y una inductancia saturable  $L_{sat}$ .

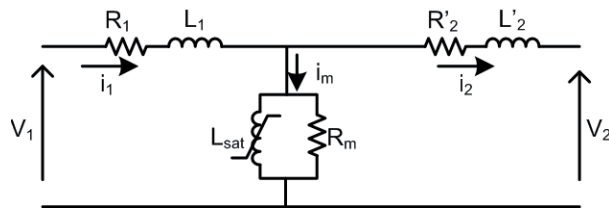


Fig. 2. Modelo circuital del transformador monofásico saturable.

Sin considerar las pérdidas en el núcleo, las expresiones matemáticas que describen el circuito equivalente del transformador, mostrado en la figura 2 se pueden escribir de la siguiente forma:

$$v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

$$v_2 = R'_2 i_2 + L'_2 \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

donde,  $\Phi$  es la suma de los flujos que ligan una bobina con los producidos por la otra. Podemos asumir, que estos flujos mutuos son producidos por la acción combinada de las corrientes que actúan simultáneamente, esto permitirá que los efectos no lineales sean incluidos y, por lo tanto,  $\Phi$  se puede mirar como la suma de flujos separados.

Para modelar la característica no lineal entre flujo y corriente, los programas de simulación generalmente utilizan la curva de saturación y advierten al usuario de la necesidad de un modelo más riguroso para condiciones específicas como lo es modelar el lazo de histéresis (aspecto que se explicará posteriormente).

Como el fenómeno transitorio de energización de transformadores se presenta por la relación no lineal

flujo-corriente es importante definir, con base a pruebas, el modelo del transformador que se requiere para su aplicación en el diseño de un algoritmo para la protección diferencial.

### Modelo de saturación sin histéresis

Dicho modelo también es conocido como el modelo que representa la característica no lineal del núcleo del transformador mediante un lazo de histéresis sin área, como se muestra en la figura 3, los programas de simulación; PSCAD®, MatLab® y ATP, presentan éste modelo mediante secciones o trozos lineales del primer cuadrante de la característica de saturación. Ésta curva puede ser diseñada como flujo contra corriente de magnetización ó también como tensión (en RMS) contra corriente de magnetización (en RMS).

Otro de los modelos de saturación sin histéresis es el que presenta PSCAD® y se conoce como método de compensación de fuente de corriente.<sup>12</sup> EMTDC utiliza un algoritmo de ajuste de curvas para representar la saturación del transformador en una forma lisa y continua. Para realizar el ajuste de curva, el método necesita la reactancia del núcleo de aire  $X_{AIR}$ , la corriente de magnetización  $IMR$ , y el punto de la rodilla  $X_{KNEE}$ .

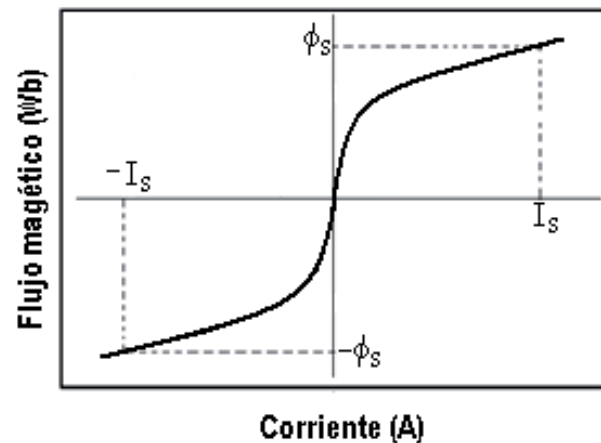


Fig. 3. Curva de saturación sin histéresis.

### Modelo de saturación con histéresis

En MatLab® (Simulink) se puede modelar la no linealidad de  $L_{sat}$  mediante el lazo de histéresis, con ayuda de una herramienta llamada psbhyteresis, la cual genera un archivo con dirección \*.mat necesaria cuando se requiere de la modalidad de

histéresis, los parámetros requeridos para diseñar la curva de histéresis son el flujo remanente  $\phi_r$ , el flujo de saturación  $\phi_s$ , la corriente de saturación  $I_s$ , la corriente coactiva  $I_C$  y la pendiente  $d\phi/dt$ ; como se muestra en la figura 4, MatLab® realiza el ajuste de curva utilizando la expresión analítica arctangente. En ATP se puede añadir al modelo de saturación sin histéresis una inductancia  $L_{sat}$  con histéresis y de esta forma se obtiene un modelo del transformador con histéresis. PSCAD no presenta este modelo.

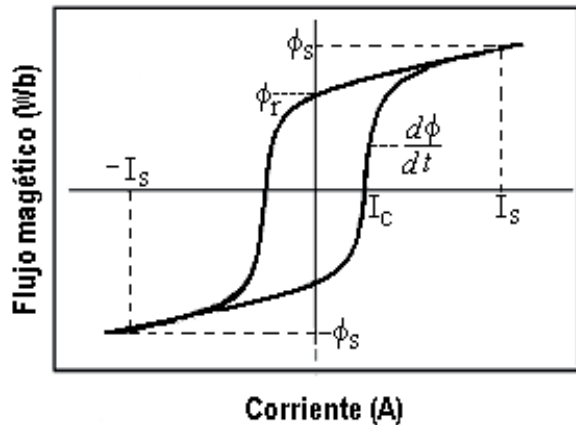


Fig. 4. Lazo de histéresis.

### Corriente de magnetización

El fenómeno transitorio de magnetización de transformadores es considerado un fenómeno complejo y difícil de modelar para un transformador en particular, debido a que existe un gran número de diseños del núcleo del transformador y que algunos de sus parámetros son no-lineales y dependientes de la frecuencia. Actualmente, existen diversas funciones analíticas que ajustan adecuadamente la curva de saturación,<sup>13-16</sup> pero pueden llegar a ser muy complejas y requerir de mucha información.

Despreciando las pérdidas, la corriente de magnetización se encarga de establecer el flujo en el núcleo circulando principalmente por la rama de excitación del transformador, en estado estable esta corriente se encuentra en un rango de 0.1% - 5% del valor de corriente nominal del transformador.

La figura 5 muestra la energización de un transformador en el instante que la forma de onda de voltaje corresponde al flujo magnético residual del momento en que fue desconectado, si se presenta una continuación uniforme del flujo  $\phi_r$ , entonces el fenómeno transitorio de magnetización no existe.

En la práctica, el fenómeno transitorio de corriente de energización es inevitable ya que el instante de la conmutación no puede ser controlado fácilmente. La figura 6 presenta el caso de máximo valor de corriente de energización cuando el transformador es desenergizado, la corriente de excitación sigue la curva de histéresis y se reduce a cero, mientras que el valor del flujo magnético disminuye hasta ubicarse en  $\phi_r$  como se puede ver en figura 4. Cuando el transformador es re-energizado en el valor máximo negativo  $-\phi_{MAX}$  y el flujo residual tiene un valor positivo, la densidad de flujo magnético no inicia en  $-\phi_{MAX}$  comenzará en  $\phi_r$  y alcanzará su valor máximo positivo en  $(\phi_r + 2\phi_{MAX})$ .

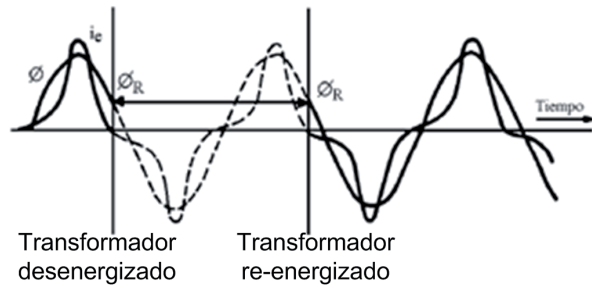


Fig. 5. Caso de energización con corriente de energización nula.

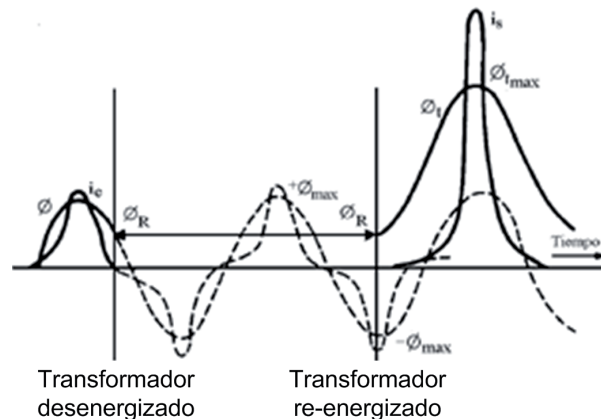


Fig. 6. Caso de energización con corriente de energización máxima.

### Sobreexcitación de transformadores

La densidad de flujo magnético que circula por el núcleo del transformador es directamente proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional a la frecuencia del sistema V/Hz. Una sobreexcitación puede producir niveles de flujo magnético que saturan el núcleo, teniendo como resultado un incremento de la corriente

de magnetización y consigo la operación de la protección diferencial, sin embargo el transformador puede tolerar como máximo entre 105% y 110%<sup>17</sup> con respecto a los valores nominales de V/Hz y no es deseable que su protección diferencial opere cuando el transformador se encuentre por debajo de su tolerancia por lo cual se utilizan métodos de bloqueo de la protección diferencial. Una característica de la corriente de sobreexcitación es su alto contenido de armónicas impares, en especial la tercera y la quinta, siendo ésta última utilizada para bloquear la protección diferencial en condiciones de sobreexcitación. La tercera armónica no se usa debido a la conexión delta-estrella de transformadores la cual anula naturalmente la tercera armónica, adicionalmente el uso de dicha armónica puede confundirse con condiciones de desbalance.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Descripción del sistema de prueba

El sistema de prueba monofásico se muestra en la figura 7. Dicho sistema y sus parámetros son tomados como base para la implementación en cada programa de simulación, ya que corresponde a un ejemplo del toolbox de MatLab®<sup>10</sup> y consiste en un transformador monofásico de 150MVA, 288/132 kV, alimentado por una fuente de tensión que suministra 288 kV rms a 60 Hz.

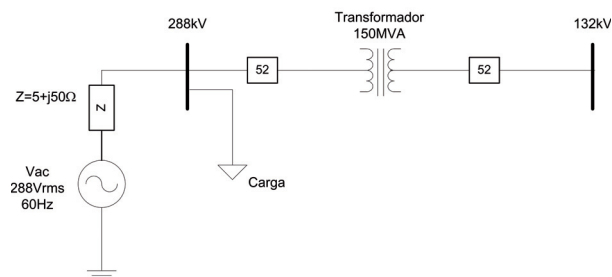


Fig. 7. Diagrama del sistema de prueba.

Después de hacer un gran número de simulaciones de la corriente de energización en diferente instante de tiempo de energización, y con una curva de saturación sin histéresis en cada programa, se comprobó que no existe diferencia significativa entre los programa de simulación, todos representan a la corriente de energización con el contenido armónico que la caracteriza, como se muestra en figura 8.

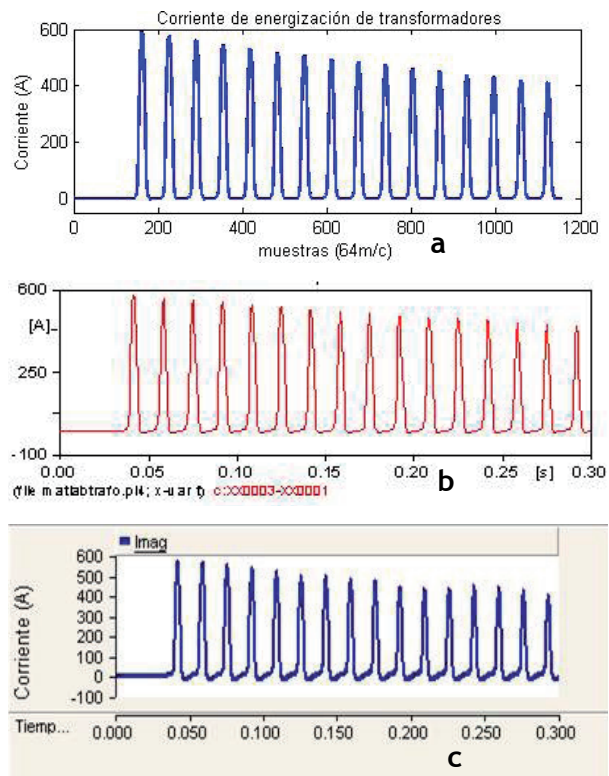


Fig. 8. Caso de energización en el máximo valor (cruce por cero de tensión), a) Simulink, b) ATP, c) PSCAD.

### Comparación entre el modelo del transformador saturable con histéresis y sin histéresis

La característica no lineal flujo-corriente que presentan los transformadores puede ser modelada con la característica de saturación o con un modelo aún más elaborado considerando la curva de histéresis. Es importante discutir las características que presenta cada modelo desde el punto de vista de la aplicación de la protección diferencial y de esta forma discernir las ventajas y limitaciones de cada modelo.

#### 1) Energización en el punto de flujo máximo

Energizar un transformador para condiciones de flujo máximo no presenta diferencia significativa alguna entre el modelo con histéresis y sin histéresis, ésta comparación es mostrada en figura 9. La semejanza de los resultados se debe a que durante la energización el transformador opera en la zona de saturación lugar donde el lazo de histéresis es tan delgado que no tiene área, la figura 10 muestra el lazo de histéresis formado.

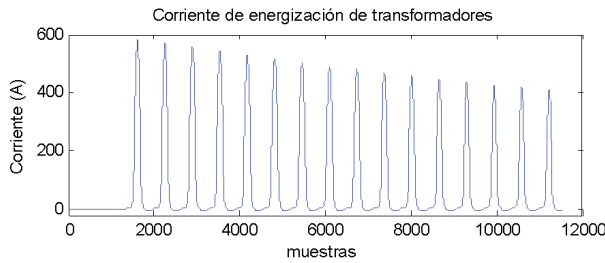


Fig. 9. Energización en el máximo valor (modelo con histéresis).

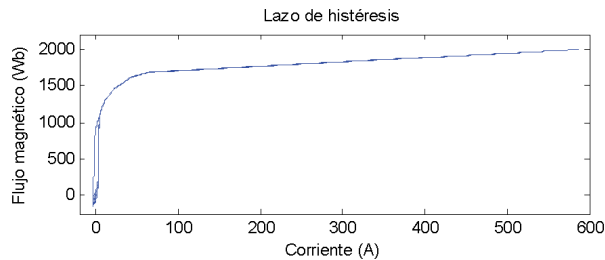


Fig. 10. Lazo de histéresis formado al arrancar el transformador en el valor de flujo máximo.

## 2) Condiciones de flujo residual

Una de las diferencias que se presentan entre el modelo con histéresis y sin histéresis, además de la carga computacional, radica en el flujo residual ( $\phi_r$ ). El modelo de transformador con histéresis tiene la capacidad de recordar el flujo residual cuando ha sido desconectado del sistema mientras que una característica de saturación como la que se muestra en la figura 3, no tiene esta capacidad. La figura 11 muestra la desconexión y conexión del transformador modelado en Simulink® con histéresis y sin histéresis; en la grafica superior, figura 11(a), se muestra el comportamiento del flujo magnético, se puede observar que cuando el transformador es desenergizado y re-energizado el flujo magnético tiene un valor de  $(\phi_r + 2\phi_{MAX})$  mientras que para el modelo sin histéresis el valor de flujo es  $(2\phi_{MAX})$ . Esto repercute en el valor esperado de pico de corriente como se puede ver en figura 11(b).

Cabe mencionar que para modelar el flujo residual con una característica sin histéresis se puede utilizar el modelo de trozos lineales y representar la curva de saturación con dos pendientes donde la primera se encuentra en el eje vertical con un valor máximo de  $\phi_r$  y la segunda pendiente corresponde a la inductancia en el núcleo de aire correspondiente a la zona de saturación, de esta forma es posible obtener flujo residual y simular adecuadamente condiciones de

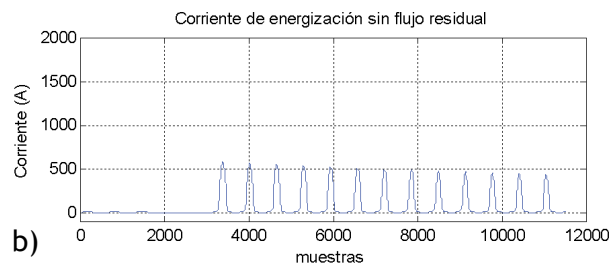
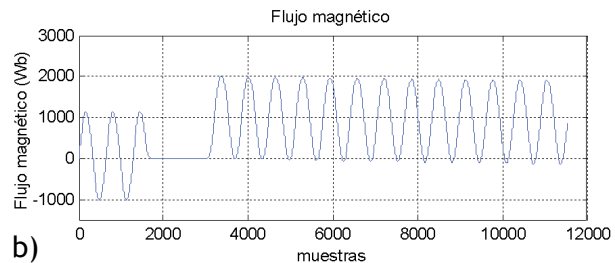
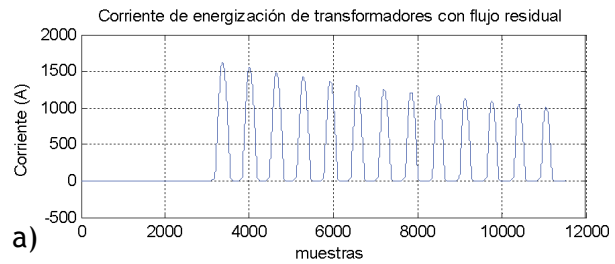
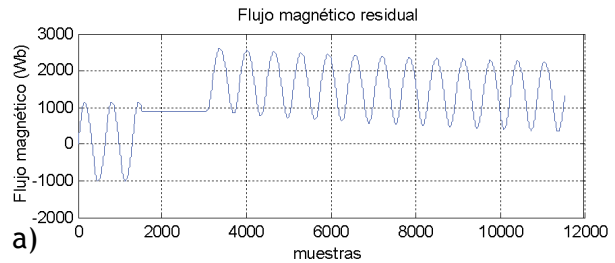


Fig. 11. Energización en el valor máximo, a) con histéresis, b) sin histéresis.

desenergización y re-energización de transformadores. La figura 12 muestra el comportamiento del flujo y la corriente cuando se diseña una característica de saturación de dos pendientes simulada en PSCAD; se puede observar que el flujo se mantiene en el valor de  $\phi_r$  correspondiente al modelo con histéresis, figura 12(a). Resultados semejantes se obtienen en ATP y MatLab.

## 3) Condiciones de sobreexcitación

Para modelar condiciones de sobreexcitación, en los programas de simulación empleados, cuando se utiliza una curva de saturación sin histéresis, es necesario diseñar el codo de saturación con suficientes puntos y una característica de dos

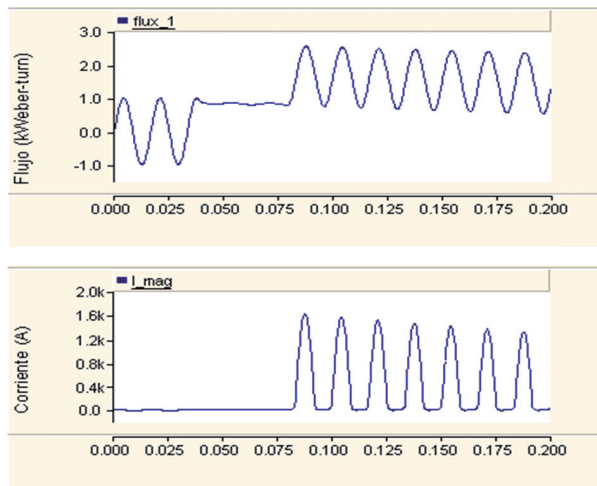


Fig. 12. Re-energización en el valor máximo de flujo magnético con una curva de saturación de dos pendientes.

pendientes no serviría para representar correctamente condiciones de sobreexcitación ya que su contenido armónico se ve afectado. Para analizar condiciones de sobreexcitación es recomendable modelar la característica no lineal del transformador mediante el lazo de histéresis o en su defecto una curva de saturación por trozos con los puntos que representen adecuadamente la zona de saturación.

## SELECCIÓN DEL MODELO PARA SU APLICACIÓN EN LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Modelar la corriente de magnetización suele ser una tarea compleja y demandante de mucho tiempo, por tal motivo se recurre a los programas de simulación de fenómenos electromagnéticos. Modelar la corriente de magnetización no es la única característica que se debe cumplir en la evaluación de algoritmos de protección diferencial de transformadores, los siguientes son requerimientos para dicha tarea:

- Modelar corriente de magnetización de energización.
- Modelar condiciones de sobreexcitación.
- Simular la corriente de energización con flujo residual.
- Modelar condiciones de falla interna.
- Modelar condiciones de falla externa.
- Modelar condiciones de saturación de TC.
- Simular fallas interna con alto contenido de 2da armónica.
- Simular transitorios como, tensión de restablecimiento (TRV).
- Simular la energización de un transformador en paralelo al que se encuentra en servicio.

Tabla II. Características de los programas para la aplicación en la protección diferencial.

Programa	Saturación		Unidades		Otras características
	Con Histéresis	Sin Histéresis	Pu	SI	
ATP		•		•	Programa de Transitorios electromagnéticos (EMTP). El modelo de transformador tiene opción de graficar la corriente del primario. Para simular el caso de máximo valor de corriente de energización asegurarse que el ángulo de la fuente de tensión sea 90°, 270°. Se puede modelar la característica de saturación con lazo de histéresis añadiendo una rama no lineal de inductancia con histéresis.
MatLab Simulink	•	•	•	•	Programa de simulación de sistemas dinámicos generales. El modelo de transformador tiene opción de graficar la corriente del primario, corriente de magnetización, densidad de flujo. MatLab es una herramienta poderosa para el tratamiento digital de la señal.
PSCAD		•	•		Programa de Transitorios electromagnéticos (EMTP). El modelo de transformador tiene opción de graficar la corriente del primario y secundario, corriente de magnetización (modelo clásico) y densidad de flujo. Presenta dos métodos para modelar la característica de saturación. Cuenta con una librería de protecciones, donde se encuentran modelos de TC, filtros digitales y relevadores de protección (distancia, sobrecorriente, diferencial). Cuenta con un modelo de transformador para fallas internas.



Los requerimientos mencionados son incluidos en el criterio de elección. La tabla II presenta las características principales consideradas en cada programa.

Con el análisis de resultados obtenidos y las características de cada programa de simulación presentadas en la tabla II, se hace la elección de PSCAD como el programa de simulación de transitorios electromagnéticos para su aplicación a la protección diferencial. Considerado por los autores como la herramienta que presenta las mejores características para la tarea de obtención y evaluación. En la figura 13 puede verse el esquema de protección diferencial con restricción por armónicas, implementado en PSCAD®.

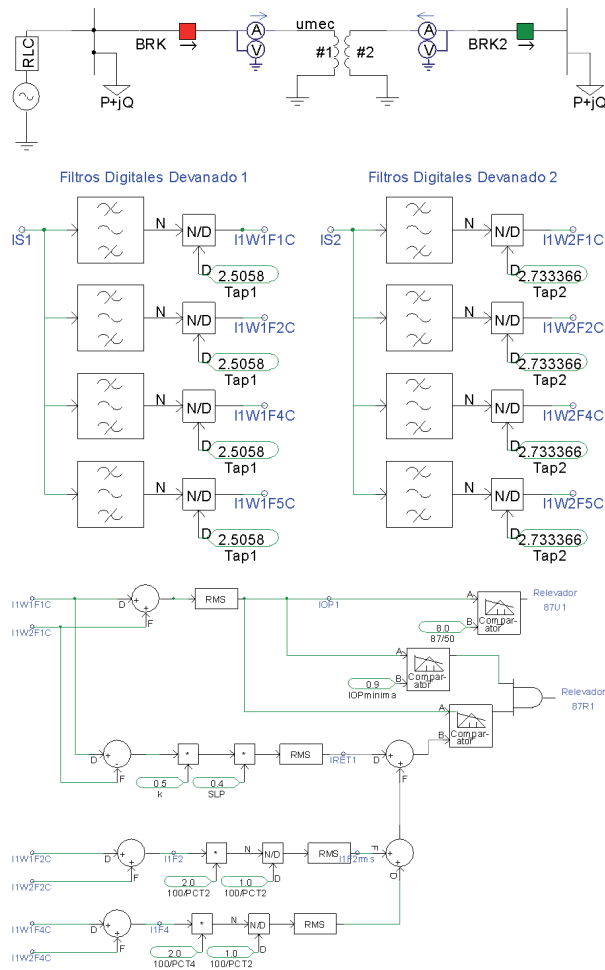


Fig. 13. Esquema de protección diferencial con restricción por armónicas. Implementado en PSCAD®; a) sistema de prueba, b) filtros digitales (fundamental, 2<sup>da</sup>, 4<sup>ta</sup> y 5<sup>a</sup> armónica), c) lógica de operación del relevador diferencial instantáneo (87U1) y lógica de operación del relevador diferencial con retención por armónicas (87R1).

En el esquema diferencial de la figura 13 se utilizaron TC's, con modelos Jiles-Atherton no mostrados en la figura. En la figura 14 se muestra la operación de los relevadores con el método de discriminación tradicional de armónicos, ante una corriente de energización figura 14a) y una corriente de falla de cortocircuito figura 14b).

En la figura 14a) y figura 14b), se puede ver que el relevador diferencial instantáneo 87U1 no opera debido a que la corriente no es lo suficientemente severa como para hacer operar esta unidad, ésta unidad solo opera para fallas muy severas. En la figura 14a), la unidad de restricción por armónicas 87R1 hace una identificación correcta, al no operar, debido a que la finalidad de ésta unidad es aumentar la región de no falla, sumando el contenido de 2da y 4ta armónica en la pendiente SLP. En la figura 14b),

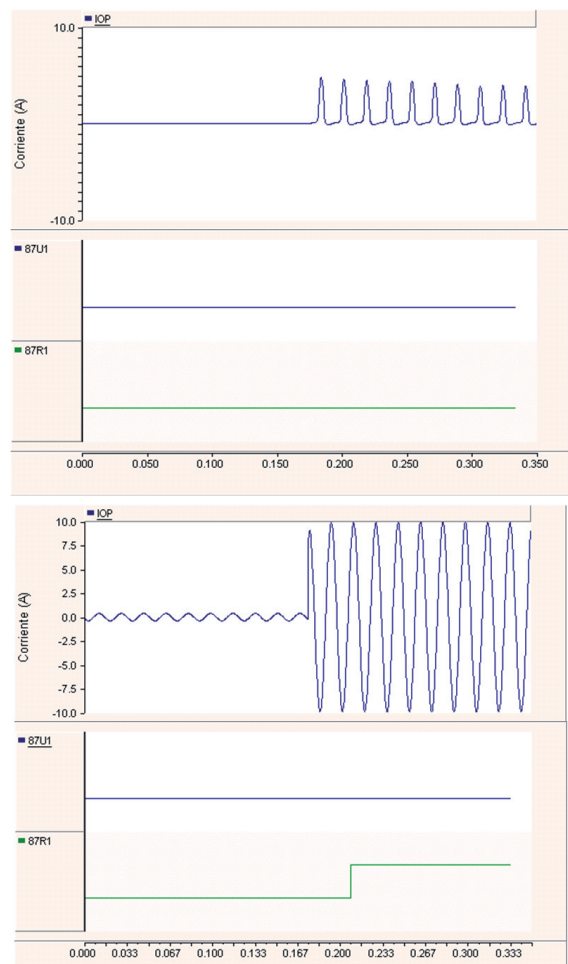


Fig. 14. Operación del relevador diferencial con retención por armónicas. a) corriente de energización, b) falla interna de cortocircuito.

la unidad de restricción por armónicas 87R1 hace una identificación correcta de la falla, mandando la señal de disparo del interruptor.

### PROPUESTA PARA REALIZAR LA DISTINCIÓN ENTRE CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN Y FALLAS INTERNAS EN TRANSFORMADORES

Buscando contribuir en la mejora del esquema de la protección diferencial se propone una metodología basada en dos etapas. En dichas etapas se busca realizar un algoritmo que discrimine entre corrientes de energización y corrientes de falla; finalmente se realizará la validación del nuevo algoritmo usando datos reales obtenidos en laboratorio.

- Etapa 1. Desarrollo del algoritmo de protección.

Se incluye la investigación y desarrollo de los algoritmos y su evaluación por simulación digital. Se tomarán datos de las simulaciones requeridas para la validación de algoritmos de protección diferencial de transformadores, mencionado en IV-C, y obtenidos previamente de.<sup>8</sup> Con ésta base de datos se probará y verificará el algoritmo desarrollado.

- Etapa 2. Validación del algoritmo en tiempo real.

Se propone crear una versión virtual de la protección diferencial desarrollada. La versión virtual consta de una computadora equipada con una tarjeta de adquisición de datos. La corriente de falla y energización del transformador será adquirida por dicha tarjeta, después será procesada mediante los algoritmos desarrollados.

### CONCLUSIONES

En el presente artículo se realizó una comparación de los modelos existentes en los programas de simulación de fenómenos electromagnéticos: EMTP/ATP©, PSCAD® y MatLab® (Simulink), y se seleccionó, revisando los parámetros del transformador que reconoce cada programa, el modelo que presenta las mejores características para su aplicación en el estudio del esquema de protección diferencial.

Se expuso como la corriente de magnetización de energización, sobreexcitación, saturación de TC, transitorios en el SEP, y la energización de un

transformador paralelo puesto en servicio, son los factores que afectan el esquema de protección de porcentaje diferencial de transformadores.

Se demostró que para desarrollar un algoritmo capaz de discriminar entre corrientes de magnetización y corrientes de fallas, para la protección diferencial de transformadores, no es necesaria la modelación del transformador con histéresis. Lo anterior debido a que las características esenciales de la corriente de energización, requeridas en la protección diferencial, son obtenidas de modelos sin histéresis y para estas mismas características no se requiere de una curva de saturación que represente el codo de la curva de forma exacta, por lo que se puede recurrir a características de saturación de dos pendientes cuando se requiera modelar condiciones de flujo residual.

### REFERENCIAS

1. J. Lewis Blackburn, Thomas J. Domin. Protective relaying principles and applications. Third edition. Taylor and Francis group, New York, 2006.
2. Ed. Phillip, A. Laplante, Electrical Engineering Dictionary. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000
3. W. K. Sonnemann, C. L. Wagner, G. D. Rockefeller, "Magnetizing inrush phenomena in transformer banks", AIEE Transactions, part III, vol.77, Oct. 1958. pp.884-892.
4. M. A. Arman, B. Jeyasura, "A State of art review of transformer protection algorithms", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 2, April 1988, pp. 534-544.
5. P. Liu, O. P. Malik, D. Chen, G. S. Hope, Y. Guo, "Improved operation of differential protection of power transformers for internal faults", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 4, 1992, pp. 1912-1919.
6. T. S. Siduh, M. S. Sachdev, H. C. Wood, M. Nagpal, "Desing, implementation and testing of a micro-processor-based high-speed relay for detecting transformer winding faults", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no 1, 1992, pp. 108-117.
7. R. E. Cordray, "Percentage differential transformer protection," Elect. Eng., vol. 50, pp. 361-363, May 1931.

8. Manitoba HVDC Research Center, PSCAD / EMTCD, V.4.2.1.
9. ATPDraw/EMTP Version 4.2
10. Matlab Software. Version 7.4, the Mathworks, Inc, Natick, MA, USA.
11. A. Martinez, A. Mork, "Transformer Modeling for Simulation of Low-Frequency Transients", 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting
12. H. W. Dommel, Transformer Models in the Simulation of Electromagnetic Transients, Proc. 5th Power Systems Computing Conference, Cambridge, England, September 1-5, 1975, Paper 3.1/4.
13. A. Medina, J. Arrillaga, "Simulation of Multilimb Power Transformers in the Harmonic Domain", IEE PROCEEDINGS-C, Vol. 139, No.3, May.1992, pp. 269-276.
14. Francisco de León, Adam Semlyen, "A Simple Representation of Dynamic Hysteresis Losses in Power Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No.1, pp. 315-321, January 1995.
15. C.E. Lin, C.L. Cheng C. L. Huang, "Hysteresis Characteristic Analysis of Transformer Under Different Excitations using Real Time Measurement", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 6, No. 2, April 1991.
16. C. Pérez-Rojas, "Fitting saturation and hysteresis via arctangent functions", IEEE, Power Engineering Review, Vol. 20, November 2000 pp. 55-57
17. IEEE Std. 242-2001, IEEE Recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power system, IEEE, 2001

Anúnciese en:

# Ingenierías



**INFORMES:**  
Tel: (52) (81) 83294020 Ext. 5854  
Fax: (52) (81) 83320904  
E-mail: [revistaingenierias@gmail.mx](mailto:revistaingenierias@gmail.mx)  
Internet: <http://ingenierias.uanl.mx>