

Modelado, simulación y validación experimental de relés de protección de sistemas eléctricos de potencia en software para análisis de transitorios electromagnéticos

José Jesús Contreras Pérez¹, América Rosaura Batalla Martínez², Juan Manuel Cano Gallardo³, Miguel Ángel Juárez Requena⁴, Luis Ramon Merchan Villalba⁴

¹ Licenciatura en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato.

² Licenciatura en Ingeniería Electrónica, Universidad de Guanajuato.

³ Maestría Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato.

⁴ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato.

jj.contrerasperez@ugto.mx, ar.batallamartinez@ugto.mx, jm.canogallardo@ugto.mx, requena@ugto.mx, lr.merchan@ugto.mx

Resumen

Este trabajo presenta el modelado y simulación de las funciones de protección ANSI 50 (sobrecorriente instantánea) y 51 (sobrecorriente temporizada) empleando el software EMTP-RV, una herramienta especializada en el análisis de transitorios electromagnéticos. Se integra la evaluación de la implementación de las protecciones en el software, junto con el uso de la herramienta para la coordinación de protecciones de este. Además, se implementa la validación experimental utilizando el relé SEL-451 y el equipo de pruebas JHS903, verificando la coherencia entre las respuestas simuladas y las obtenidas en pruebas de campo. Los resultados permiten evaluar la precisión del modelo digital y su utilidad para el diseño y prueba de esquemas de protección en sistemas eléctricos modernos.

Palabras clave: Sistemas eléctricos de potencia; protecciones; transitorios electromagnéticos.

Introducción

La protección de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) es esencial para garantizar la seguridad operativa, minimizar daños a los equipos y preservar la continuidad del servicio frente a fallas. En este contexto, los relés de sobrecorriente juegan un papel fundamental como primera línea de defensa ante cortocircuitos o sobrecargas. Las funciones ANSI 50 y 51, correspondientes a la protección de sobrecorriente instantánea y temporizada de tiempo inverso respectivamente, son ampliamente utilizadas en protecciones de alimentadores, transformadores, motores y barras (Kezunovic, 2011). La función 50 actúa de forma inmediata ante corrientes elevadas que superan un umbral preestablecido, mientras que la función 51 introduce un retardo proporcional a la magnitud de la corriente, permitiendo la coordinación con otros dispositivos aguas abajo del sistema (*IEEE Standard for Inverse-Time Characteristics Equations for Overcurrent Relays*, 2018). La adecuada configuración y coordinación de estas funciones es crítica para evitar desconexiones innecesarias y lograr una selectividad adecuada (Grainger & Stevenson, 1994).

El modelado de sistemas de protección en software de simulación ha adquirido gran protagonismo en los estudios modernos de ingeniería eléctrica, permitiendo analizar el comportamiento de los relés en escenarios difíciles de reproducir en condiciones reales. Las simulaciones digitales ofrecen ventajas como la repetitividad, la flexibilidad para variar parámetros del sistema y la posibilidad de realizar análisis ante distintos tipos de fallas. Dentro de las distintas categorías de análisis, las simulaciones de transitorios electromagnéticos son especialmente relevantes, ya que permiten observar el efecto de fenómenos rápidos e intensos como cortocircuitos, maniobras de conmutación, energización de líneas o disparos de protecciones, entre otros, sobre los dispositivos de protección (Filizadeh *et al.*, 2025; Modi *et al.*, 2025). Este tipo de simulaciones resulta indispensable para validar el tiempo de operación, la coordinación entre dispositivos y la robustez del sistema ante perturbaciones (Kezunovic *et al.*, 1996). En este contexto, el software EMTP-RV se posiciona como una herramienta fundamental para estudios de este tipo. Desarrollado para simular fenómenos transitorios con alta precisión, EMTP-RV incorpora bloques específicos para el modelado de relés de protección, lógica de control, funciones ANSI estándar (como 50, 51, 87, entre otras), disparo de interruptores y sistemas de medida, lo que lo convierte en una plataforma integral para el diseño y validación de esquemas de protección eléctrica (EMTP® and EMTPWorks, 2025; *Protection: Protection Coordination*, 2025).

En este trabajo se estudia el modelado de las funciones 50 y 51 dentro del entorno EMTP-RV, analizando su desempeño ante diferentes condiciones de operación en un sistema eléctrico simulado. Posteriormente, se realiza una validación experimental mediante la comparación de los resultados obtenidos en simulación con la respuesta real de un relé SEL-451 configurado en condiciones equivalentes. Esta comparación busca verificar la coherencia en tiempos de actuación y selectividad, demostrando la utilidad del software para estudios avanzados de protección y facilitando el diseño de esquemas confiables en aplicaciones reales.

Modelado en EMTP-RV

El modelado de relés de protección en el software EMTP-RV involucra dos componentes fundamentales, un sistema de adquisición y procesamiento de señales, y la implementación de las funciones de protección.

El sistema de adquisición y procesamiento toma las señales de corriente y voltaje de los sistemas eléctricos de potencia a través de transformadores de corriente (TC) y de voltaje (TP) (Ver Figura 1). Las señales de voltaje y corriente son procesadas inicialmente mediante un filtro de suavizado para posteriormente ser muestreadas. La tasa de muestreo se debe especificar mediante el número de muestras por ciclo deseadas. En la Figura 2 se presenta un ejemplo considerando una tasa de 16 muestras por ciclo. Posteriormente se procesa la señal mediante un filtro coseno para obtener la información de la señal a la componente fundamental. Finalmente, este sistema entrega valores de fasores y rms de las señales medidas, los cuales serán utilizados para las funciones de protección.

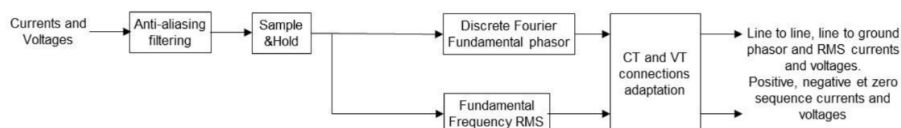


Figura 1. Subsistema de adquisición de señales (EMTP-EMTPWorks, 2025a).

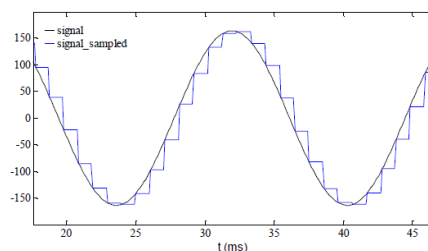


Figura 2. Muestro de una señal con una tasa de 16 muestras por ciclo (EMTP-EMTPWorks, 2025a).

La implementación de la función de relé de sobrecorriente de tiempo reproduce los estándares ANSI 51P, 51N, 51Q, 51G, 50P, 50N, 50Q y 50G, los estándares IEC PTOC y PIOC y algunos estándares de fabricantes. Este sistema tiene como salida señales digitales que indican la activación de las funciones de protección. La Figura 3 presenta el bloque de la función 51.

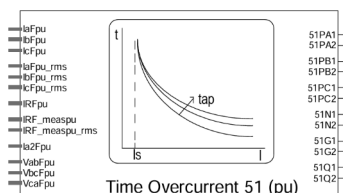


Figura 3. Subsistema de adquisición de señales (EMTP-EMTPWorks, 2025b).

El sistema implementa curvas de protección definidas en el estándar IEEE/ANSI y IEC. La curva IEC corresponde a las siguientes ecuaciones.

$$t_{tripping} = Tap \left[\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{pkp}} \right)^E - 1} \right] \quad (1)$$

$$t_{reset} = \frac{t_r}{1 - \left(\frac{I}{I_{pkp}} \right)^2} \quad (2)$$

Donde, $t_{tripping}$ es el tiempo de disparo, t_{reset} es el tiempo de reset, Tap es el tiempo de dial, t_r es el retardo del reset, I es la corriente medida y I_{pkp} es la corriente de pickup.

Las curvas establecidas en el estándar se especifican adicionalmente a través de parámetros definidos para las expresiones anteriormente mencionadas. De este modo, se definen las curvas C1 inversa estándar, C2 muy inversa, C3 extremadamente inversa, C4 inversa de tiempo largo y C5 inversa de tiempo corto, la cuales están definidas tal como lo presenta la Figura 4.

Name of the curve	K	E	t_r	Manufacturers
C1 standard inverse	0.140	0.0200	13.5	SEL
C2 Very Inverse	13.5	1.00	47.3	SEL
C3 Extremely inverse	80.0	2.00	80	SEL
C4 Long-Time inverse	0.0500	0.0400	120	SEL
C5 Short-Time Inverse	120	1.00	4.85	SEL

Figura 4. Parámetros de las curvas IEC (EMTP-EMTPWorks, 2025b).

Para el desarrollo de la simulación del relé, se implementó un sistema compuesto por una fuente de corriente, una resistencia y el sistema de protección, compuesto por un TC y el relé 50/51. La implementación del sistema se presenta en la Figura 5. La configuración del relé 51 se establece para que opere en función a la curva C1, con una corriente de pickup de 0.5 A, un tiempo dial de 0.1. Para la protección 50 se considera una corriente instantánea de 5 A. Las configuraciones del relé dentro del software se presentan en la Figura 6.

Adicionalmente, el software tiene una herramienta para la valoración de la coordinación de protecciones, la cual permite evaluar las configuraciones de todo un sistema de protección y así identificar que todo el sistema este configurado adecuadamente. En la Figura 7 se muestra la coordinación de protecciones para el sistema de prueba, donde se puede identificar la presencia de las funciones de tiempo inverso e instantáneo. Además, se presenta el tiempo de disparo para valores de corriente, los cuales se utilizarán en la sección de resultados.

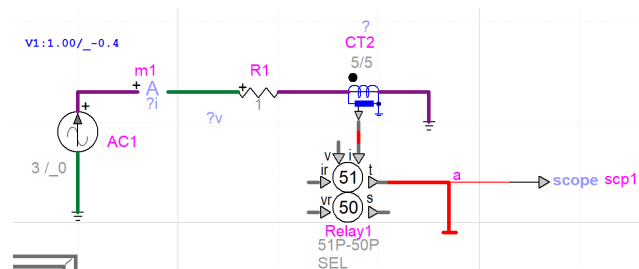


Figura 5. Implementación sistema de prueba en EMTP-RV (EMTP-EMTPWorks, 2025b).

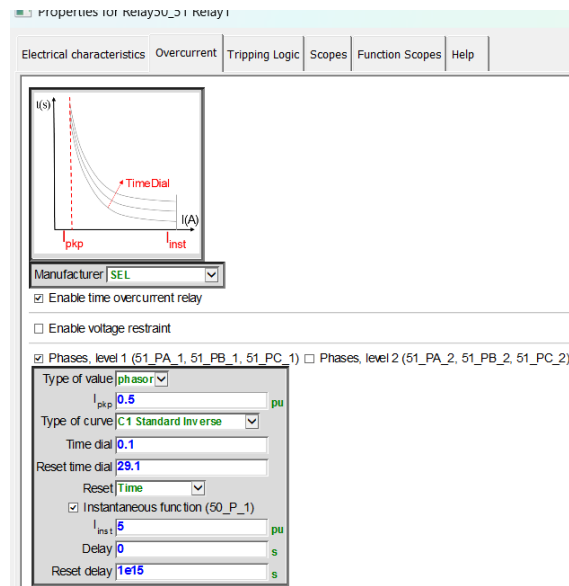


Figura 6. Configuración relé 50/51.

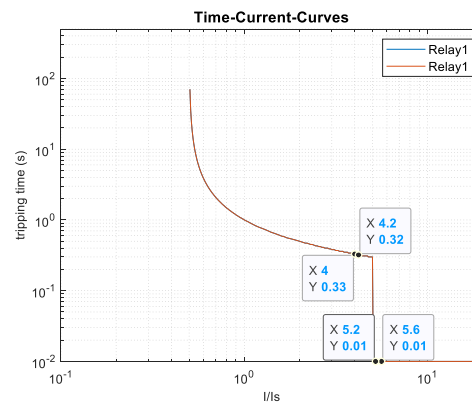


Figura 7. Evaluación de la coordinación de protecciones para el ejemplo.

Validación experimental de las protecciones 50/51

Para la validación experimental del modelo se utilizó el relé SEL-451 (Schweitzer Engineering Laboratories, n.d.), al cual se le establecieron las configuraciones presentadas en la Figura 8. Para el desarrollo de la prueba se utilizó el equipo de generación de señales (Wuhan Jiuhua Jingce Power Equipment, 2024), mediante el cual se generarán las señales de corriente a inyectar en el relé para validar su operación. El montaje del sistema de prueba se presenta en la Figura 9.

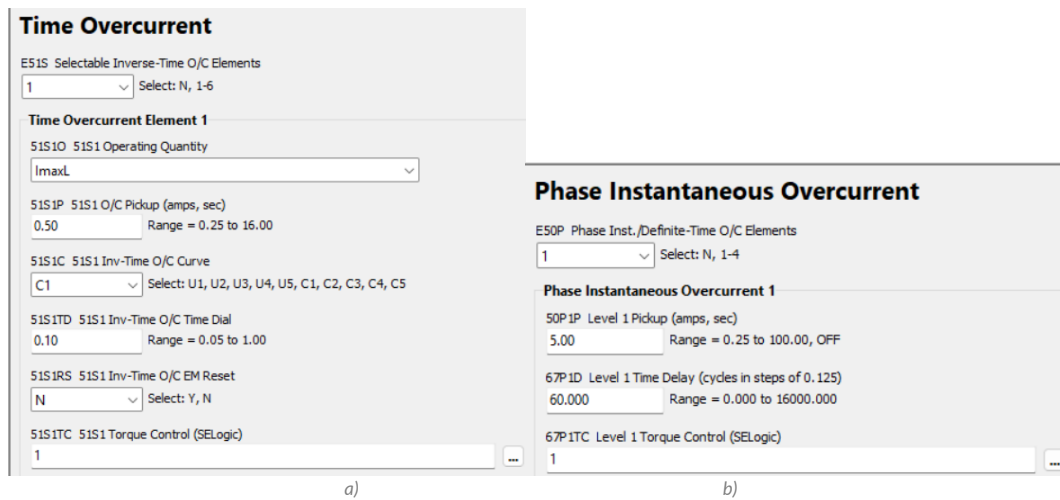


Figura 8. Configuración relé SEL-451, a) función 51 y b) función 50.

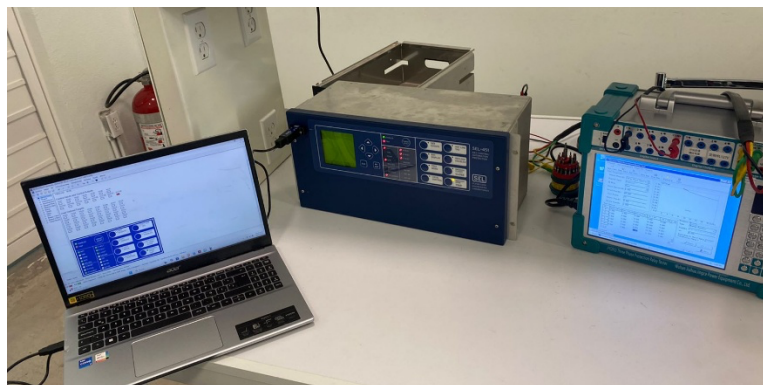


Figura 9. Montaje validación experimental.

Para el desarrollo de la prueba experimental se consideran dos evaluaciones. La primera evalúa la inyección de corriente con valores desde 1 A hasta 9 A con pasos de 1 A, y la segunda con valores desde 4 A hasta 6 A con pasos de 0.2 A para tener un mejor detalle en la transición del uso de la función 51 de tiempo inverso a la función 50 instantánea. Los resultados de la evaluación se presentan en la Figura 10, donde se puede identificar la operación del relé según lo establecido por la curva C1, y por la característica instantánea.

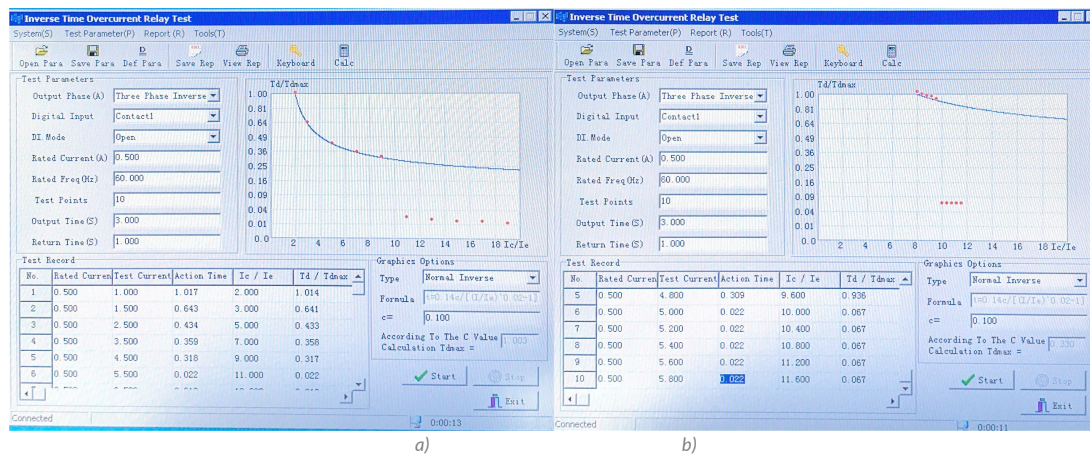


Figura 10. Resultado prueba experimental a) primera y b) segunda prueba.

Resultados

Finalmente se procede con la comparación de los resultados de la evaluación de la simulación y los resultados experimentales. Para esto se evalúa la respuesta del sistema simulado y experimental ante la misma condición de corriente, tomando dos valores tanto para la función de tiempo inverso como para la función instantánea.

Inicialmente se considera la inyección de una corriente de 4.2 A, teniendo los resultados de la Figura 11, donde se tiene un tiempo de respuesta de simulación de 329 ms y experimental de 327 ms. Luego se evalúa para una corriente de 4.0 A, cuyos resultados se tienen en la Figura 12, teniendo un tiempo de disparo simulado de 337.5 ms y experimental de 339.5 ms. De este modo, se puede observar que los tiempos de respuesta son muy similares, teniendo la simulación y experimentación resultados similares.

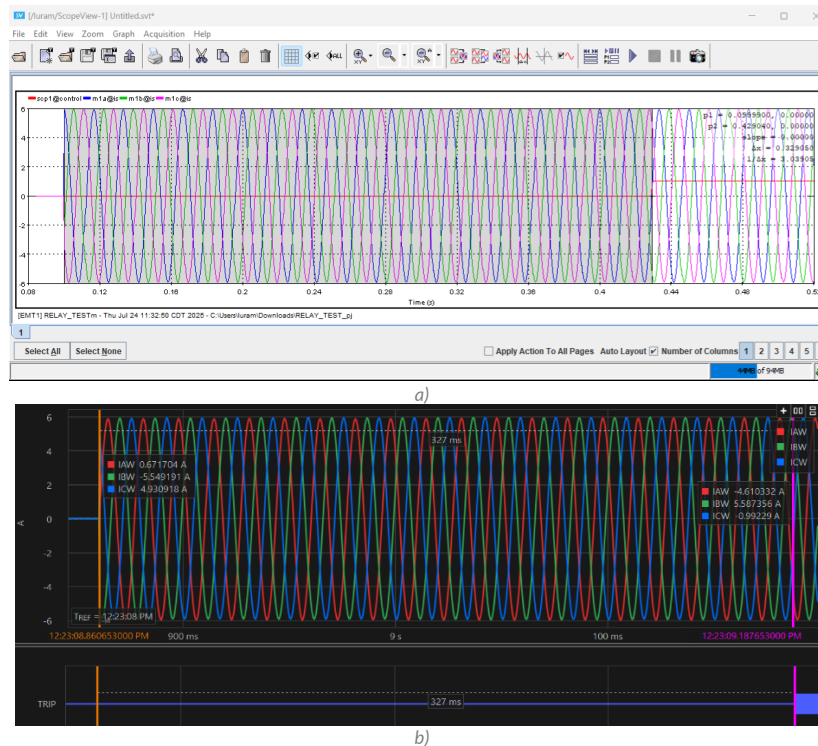
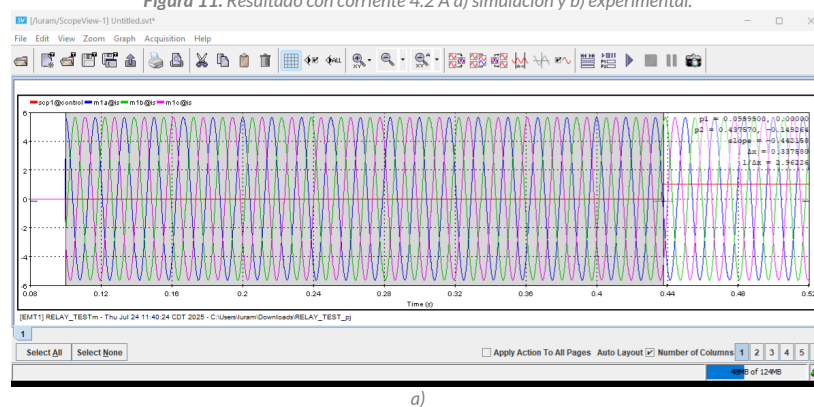


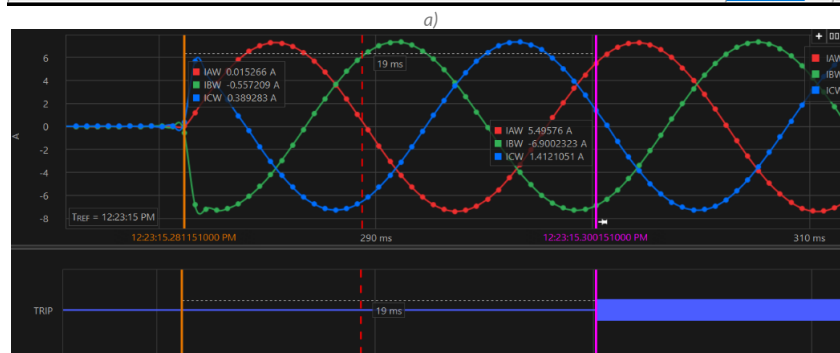
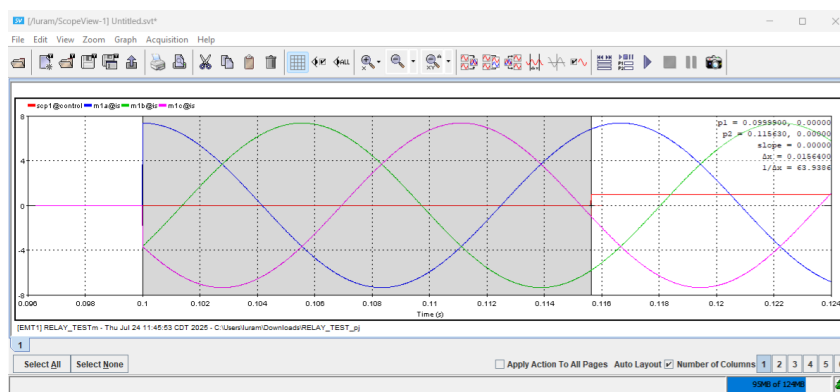
Figura 11. Resultado con corriente 4.2 A a) simulación y b) experimental.





b)
Figura 12. Resultado con corriente 4.0 A a) simulación y b) experimental.

Finalmente, se evaluar con una inyección de corriente de 5.2 A, con los resultados de la Figura 13, con la respuesta de simulación de 15.6 ms y experimental de 19 ms. Seguido, se considera una corriente de 5.6 A, cuyos resultados se tienen en la Figura 14, teniendo un tiempo de disparo simulado de 15.6 ms y experimental de 19 ms. Así, se tienen resultados de simulación y experimentales similares.



b)
Figura 13. Resultado con corriente 5.2 A a) simulación y b) experimental.

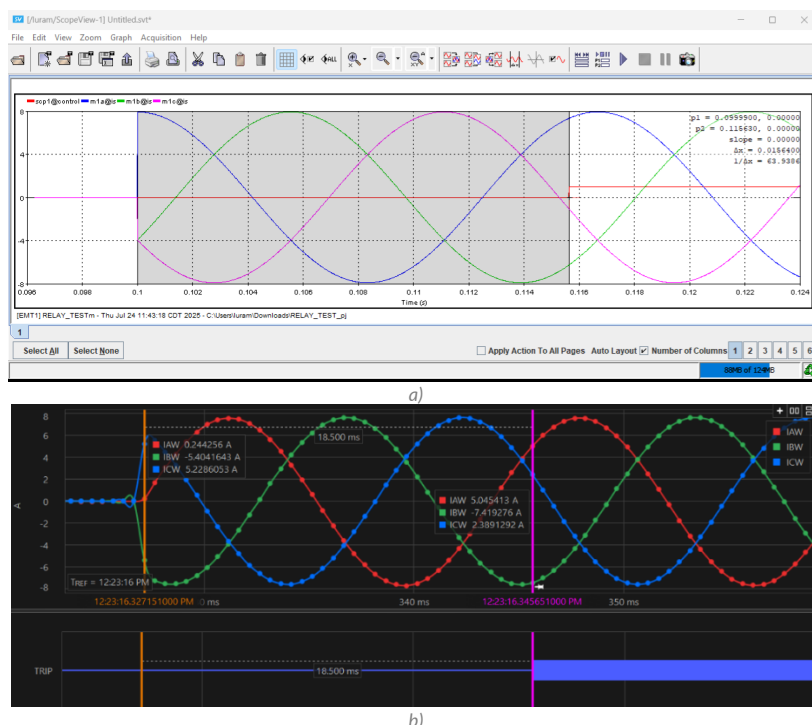


Figura 14. Resultado con corriente 5.6 A a) simulación y b) experimental.

En la Tabla 1 se registran los valores de tiempo de disparo para las pruebas realizadas, tomando como valores teóricos los indicados por el software a través de la herramienta de coordinación de protecciones presentada en la Figura 7. Se observa una alta correspondencia entre los valores simulados, experimentales y teóricos, teniendo así la validación del modelo de protección implementado en el software respecto del sistema experimental.

Tabla 1. Resultados de las pruebas.

Corriente inyectada	Simulación	Experimental	Teórico
4.2 A	329	327	320
4.0 A	337.5	339.5	330
5.2 A	15.6	19	10
5.6 A	15.6	19	10

Conclusiones

Este trabajo presentó el modelado, simulación y validación experimental de relés de protección de sistemas eléctricos de potencia en software especializado para análisis de transitorios electromagnéticos. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que el modelado de las funciones de protección ANSI 50 (sobrecorriente instantánea) y 51 (sobrecorriente de tiempo inverso) en el entorno EMTP-RV ofrece una representación precisa y confiable del comportamiento real de estos esquemas de protección. La implementación detallada de los bloques de adquisición, procesamiento de señales y lógica de disparo, junto con el uso de curvas normalizadas IEC, permitió reproducir adecuadamente las condiciones de operación del sistema. La comparación entre los tiempos de disparo simulados y los obtenidos experimentalmente mediante el relé SEL-451 mostró una alta correspondencia, con diferencias mínimas en milisegundos que validan la efectividad del modelo implementado. Además, el uso de herramientas de coordinación de protecciones dentro del software facilitó la evaluación integral del sistema, confirmando la utilidad de EMTP-RV como una plataforma robusta para el diseño, análisis y validación de protecciones eléctricas en estudios académicos e industriales.

Bibliografía/Referencias

- EMTP® and EMTPWorks. (2025). *EMTP® User Manual*. <https://www.emtp.com/documentation/emtp-user-manual>
- EMTP-EMTPWorks. (2025a). *Protection: Signal Acquisition*. <https://www.emtp.com/documents/EMTP-Documents/doc/toolboxes/protection/signals-acquisition.pdf>
- EMTP-EMTPWorks. (2025b). *Protection: Time overcurrent relay functions*.
<https://www.emtp.com/documents/EMTP-Documents/doc/toolboxes/protection/relay50-51.pdf>
- Filizadeh, S., Belanger, J., Fernandez, F., Forsyth, P., Mahseredjian, J., Morales, J., & Lietz, G. (2025). Electromagnetic Transient Modeling and Simulation of Large Power Systems: EMT Simulators for the Future Grid [Feature]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 23(4), 53–65. <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3515921>
- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1994). *Power system analysis*. McGraw-Hill.
- IEEE Standard for Inverse-Time Characteristics Equations for Overcurrent Relays. (2018). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8635630>
- Kezunovic, M. (2011). Smart Fault Location for Smart Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1), 11–22. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2118774>
- Kezunovic, M., Domaszewicz, J., Skendzic, V., Aganagic, M., Bladow, J. K., McKenna, S. M., & Hamai, D. M. (1996). Design, implementation and validation of a real-time digital simulator for protection relay testing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(1), 158–164. <https://doi.org/10.1109/61.484012>
- Modi, N., Fecteau, M., Unruh, L., Gomes Guerreiro, G. M., Rose, J., Thant, A., & Zhang, Q. (2025). Electromagnetic Transient Models: Importance of Performance Testing and Validation [Feature]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 23(4), 99–111. <https://doi.org/10.1109/MPE.2025.3526079>
- Protection: Protection coordination. (2025).
<https://www.emtp.com/documents/EMTP-Documents/doc/toolboxes/protection/protectioncoordination.pdf>
- Schweitzer Engineering Laboratories. (n.d.). *SEL-451 Sistema de protección, automatización y control de bahía*. Retrieved June 28, 2023. <https://selinc.com/es/products/451/>
- Wuhan Jiu Hua Jingce Power Equipment. (2024). *JHS903 Relay Protection Tester Microcomputer Secondary Current Injection Relay Test Set 3 Phase*. <https://jiuhuaqingce.en.made-in-china.com/product/mQLrgpRYFSWz/China-Relay-Protection-Tester-Microcomputer-Secondary-Current-Injection-Relay-Test-Set-3-Phase.html>