

Análisis en estado dinámico de la coordinación de relevadores de sobrecorriente

Marines C. Víctor G. y Conde E. Arturo

Dynamic state analysis of the overcurrent relay coordination

Abstract— This paper presents the analysis of the overcurrent relay operation using computational resources. Through the application proposal is possible to analyze the dynamic operation of the relay for the purpose of validating the relay trip times or to provide educational items related to learning electrical protection. The analysis of coordination between overcurrent devices, either relays, fuses and reclosers and the impact of introducing non-conventional time curves is described by developing examples of the application.

Keywords— overcurrent-relay, dynamic state, graphical programming, human resource training.

Resumen— En este artículo se presenta el análisis de la operación de relevadores de sobrecorriente utilizando recursos computacionales. Mediante la aplicación propuesta es posible analizar la operación dinámica del relevador para efectos de validar los tiempos de disparo de relevadores en campo o para proporcionar elementos didácticos relacionados con el aprendizaje de protecciones eléctricas. El análisis de la coordinación entre dispositivos de sobrecorriente, ya sea relevadores, fusibles o restauradores y el impacto de introducir curvas de tiempo no convencionales es descrito mediante el desarrollo de ejemplos de la aplicación.

Índices— Relevador de sobrecorriente, estado dinámico, programación gráfica, formación de recursos humanos.

I. INTRODUCCIÓN

La comprensión del funcionamiento y limitaciones de los sistemas de protección es una parte importante en la formación de ingenieros eléctricos. La enseñanza en clase por parte de académicos es limitada en muchas ocasiones por carecer de elementos demostrativos que permitan evaluar las diferentes condiciones de operación de los sistemas eléctricos de potencia, dificultando, en lo particular, la capacidad de transmisión del conocimiento de las protecciones eléctricas. Por otra parte, las

Manuscrito recibido el 1 de Abril de 2011. Este trabajo fue respaldado por la universidad tecnológica de Santa Catarina y la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Marines C. Víctor G. hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor en la Universidad Tecnológica de Santa Catarina, Nuevo León, México; Carretera Monterrey - Saltillo Km. 61.5, C.P. 66359; Tel. (81) 8124-8400, (81)8316-9894 y (81) 8316-9925; Fax: (81) 8316-9892. (e-mail vic_marines@hotmail.com)

Conde E. Arturo, actualmente es profesor investigador del programa doctoral de ingeniería eléctrica de la FIME-UANL Universidad Autónoma de Nuevo León, México; Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León; C.P. 66451; Tel. (81) 83 29 40 20; Fax (81) 83 32 09 04. (e-mail con_de@yahoo.com)

actividades en un laboratorio en muchas ocasiones son limitadas por la falta de recursos para el análisis de los eventos y medios de visualización de las diversas condiciones de operación. Los paquetes profesionales de protecciones además de tener un costo prohibitivo para muchos centros educativos se centran en la componente de aplicación más que en la componente didáctica.

En [1] se puntualiza la importancia del diseño de cursos de ingeniería de sistemas de potencia con una urgente necesidad de identificar y desarrollar los materiales necesarios para la educación y la formación de los ingenieros de la protección futura, este trabajo esta orientado en esta dirección.

En la búsqueda de materiales que ofrezcan recursos didácticos adecuados, se han adecuado laboratorios para ofrecer una componente de enseñanza del sistema eléctrico de potencia. En [2] se describe la conformación de un laboratorio de simulación de sistemas de potencia a escala de un sistema trifásico para mejorar las actividades de investigación y enseñanza de protecciones. En [3] se presenta un recurso gráfico para el análisis y diseño de sistemas de potencia la cual provee de herramientas para facilitar la creación y modificación de aplicaciones de análisis de sistemas de potencia. En [4] se describe un software interactivo para el apoyo del proceso de aprendizaje en clase, laboratorio y auto-aprendizaje.

La directriz en los recursos didácticos para el aprendizaje de sistemas de potencia y particularmente en protecciones ha sido en aportar recursos gráficos [3,4,5-9], esto es debido a que la evaluación del desempeño de la protección se realiza por medio de la comparación gráfica de las condiciones de operación del sistema eléctrico con la curva del relevador. Mediante esta comparación se evalúa y determinan las condiciones particulares que pueden comprometer el desempeño de la protección. Debido al incremento y factibilidad de comunicaciones en los sistemas eléctricos, la protección pasa de ser un dispositivo de control independiente del sistema a un elemento integral de la operación de la red; la evaluación dinámica de la operación de la protección debe ser analizada ante diferentes condiciones operativas, difícilmente cubiertas en una sola plataforma de simulación.

La evaluación del desempeño de un relevador de sobrecorriente está en función de su capacidad de detectar fallas dentro de su zona de protección. Sin embargo la señal de corriente es la única variable eléctrica medida, la cual es sensible a la condición de operación del sistema y de la conexión en el punto de falla, por tanto la determinación de la ubicación de la falla es difícil ya que su zona de protección es dinámica y muy sensible a las condiciones de operación del sistema eléctrico. En los demás principios de protección tal como el diferencial y

piloto su característica es constante e insensible al estado operativo de la red eléctrica, únicamente el relevador de distancia presenta una dinámica limitada debido a la polarización. Es por esa razón que el análisis *post mortem* de la operación de un relevador de sobrecorriente es complicado debido a que no se conoce el tiempo en que la protección debería operar ya que este depende de la dinámica de la corriente de falla. Es una práctica común realizar una reconstrucción de la operación del relevador inyectándole los registros de eventos a un relevador similar en condiciones de laboratorio para validar el tiempo de operación de la protección.

Se han presentado diversos desarrollos educativos de relevadores de sobrecorriente en *hardware*. En [2] se describe el diseño de un relevador electrónico- analógico de sobrecorriente de tiempo inverso con funciones direccionales e instantáneo, el relevador propuesto es destinado para aplicaciones de laboratorio. El desarrollo de relevadores por parte de instituciones educativas es una labor complicada y de una inversión de tiempo considerable principalmente por el acondicionamiento de la señal y la estabilidad del *hardware*; la evaluación de la operación de un relevador mediante esta alternativa no es recomendable. Otra alternativa es la evaluación mediante un recurso computacional en donde de forma similar se inyecten las señales de los eventos y se evalúe la operación del relevador. Esta segunda alternativa es la propuesta en este trabajo.

Este artículo está orientado hacia el análisis de la operación de los relevadores ante diferentes condiciones operativas. El análisis del comportamiento del relevador ante diversos escenarios es cubierto en forma teórica de manera adecuada, sin embargo la reproducibilidad de tales escenarios en laboratorio es deseable y aconsejable para la formación de futuros ingenieros en protecciones [1], este aspecto puede ser cubierto de manera satisfactoria con una herramienta computacional que permita la reproducibilidad de diferentes escenarios y la visualización de la operación del relevador. La herramienta computacional propuesta permite simplificar y profundizar en la enseñanza de protecciones de alumnos de pregrado y postgrado en un espectro amplio de tópicos y escenarios dinámicos de operación de la protección; es factible la realización de diversas actividades didácticas y de análisis de la operación de relevadores. En esta herramienta computacional no se evalúa la función direccional del relevador, se asume que esta función está presente y que opera de manera satisfactoria.

II. ESTRUCTURA FUNCIONAL

La estructura funcional para el acondicionamiento de la señal de entrada y el algoritmo del relevador es mostrado en la figura 1. La señal eléctrica de entrada al relevador proveniente del secundario de los transformadores de corriente, está compuesta de señales que si bien son representativas del fenómeno eléctrico, no son requeridas para determinar el criterio de operación del relevador debido a que presentan un carácter aleatorio que imposibilita la determinación de condición de falla, el procesamiento digital debe eliminar las cantidades no deseadas y retener las cantidades de interés [10]. La operación del relevador de sobrecorriente debe ser establecida únicamente con la componente de la señal a la frecuencia nominal debido a que esta

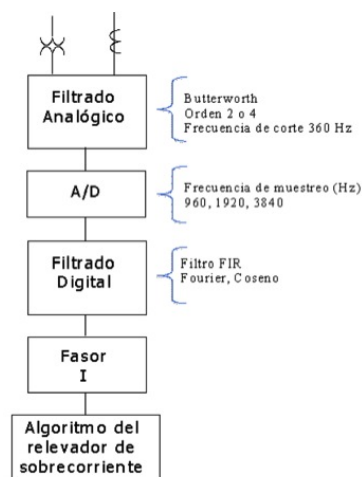


Fig. 1. Estructura para el procesamiento de las señales para propósitos de protección.

componente de la señal es afectada proporcionalmente por la ubicación de la falla.

Por otra parte, la presencia de componentes no filtradas representan un error en la operación del relevador, esta condición si es crítica para relevadores de distancia por ejemplo, no lo es tanto para relevadores de sobrecorriente ya que los tiempos de operación son mayores; así el porcentaje de tiempo debido al error es diluido en el tiempo total del relevador. El mismo razonamiento se aplica en lo referente al retardo debido a la ventana de datos.

La saturación de los transformadores de corriente (TC) [11][12] aun cuando impacta en el desempeño de los relevadores, generalmente está presente en condiciones muy específicas de operación y de falla; estando directamente asociada al dimensionamiento del transformador de corriente su efecto puede reducirse significativamente. La no linealidad de la respuesta de los transformadores de instrumentos no es simulada en la herramienta propuesta; es decir, no se disponen de los modelos matemáticos de los transformadores, el efecto de la saturación en los relevadores puede ser analizado introduciendo señales saturadas generadas en algún paquete académico o comercial.

Para la obtención del fasor fue necesario incorporar dos etapas de filtrado, un filtro analógico y otro digital para eliminar las componentes frecuenciales indeseadas. Generalmente el filtro analógico utilizado es el filtro Butterworth, este filtro es preferido por tener respuestas planas en la banda de paso y monótona decreciente en la banda de parada [13]. Posterior a la etapa de filtrado analógico se realizó el proceso de digitalización de la señal analógica, el incremento en la frecuencia de muestreo permite lograr un incremento sustancial en la resolución de la señal, pero incrementa la carga del procesador. Debe considerarse la operación del esquema completo de protección de línea es decir los elementos de fase y tierra operados ante una falla para la estimación de la carga del procesador. La reducción del efecto de "aliasing", fue obtenida mediante una sintonización entre el filtrado analógico y el filtrado digital permitiendo un traslape de las frecuencias de filtrado; es posible eliminar el filtrado analógico mediante el sobremuestreo de la señal [14]. El filtrado digital se realizó con filtros tipo FIR, ya que no hay recursión. Además que los filtros IIR producen en general

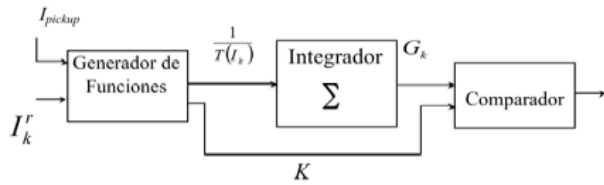


Fig. 2. Diagrama funcional de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso.

distorsión de fase, contrario a los FIR que son de fase lineal. Esta condición permite que su respuesta a la frecuencia tenga ceros naturales en las frecuencias armónicas permitiendo un rechazo de estas componentes. Es utilizado el filtro tipo coseno por tener un mejor rechazo a la componente en directa.

Teniendo el fasor de la señal de corriente de la frecuencia fundamental, se puede modelar los algoritmos digitales del relevador de sobrecorriente.

III. ALGORITMO DIGITAL DE UN RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE

El modelo básico y los criterios para la implementación digital de un relevador de sobrecorriente son presentados en [15]. En la figura 2 se presenta el diagrama funcional de la implementación del relevador realizada en este trabajo. El relevador digital recibe como entrada la magnitud del fasor de la componente fundamental de la corriente I_k^r y el valor de ajuste I_{pickup} . La característica de tiempo inverso $T(I_k)$ está en función de la corriente de operación $I_k = I_k^r / I_{pickup}$ es evaluada en el tiempo. El valor acumulado del integrador G_k (magnitud y signo) depende de I_k (ver figura 2).

La representación del valor acumulado del integrador para la zona de operación (T_O) y para la zona de reposición (T_R) es:

$$\Delta G_k = \begin{cases} \Delta t \frac{1}{T_O(I_k)} & I_k \geq 1 \text{ Zona de Operación} \\ \Delta t \frac{1}{T_R(I_k)} & 0 \leq I_k < 1 \text{ Zona de Reposición} \end{cases} \quad (1)$$

donde: $G_k = G_{k-1} + \Delta G_k$
 Δt periodo de muestreo

La representación del valor acumulado del integrador (G_k) o, analógicamente la posición del disco de inducción en un relevador electromecánico en cualquier instante de tiempo es establecido por (1). En la zona de operación, la integración de la función $T_O(I_k)$ es positiva, incrementando el valor del acumulador en el integrador (recorrido del disco hacia el cierre de contactos); de otra forma, en la zona de reposición la integración de la función $T_R(I_k)$ es negativa y decreta el valor del acumulador (retorno del disco a la posición de accionamiento). Ambas funciones son definidas en [16].

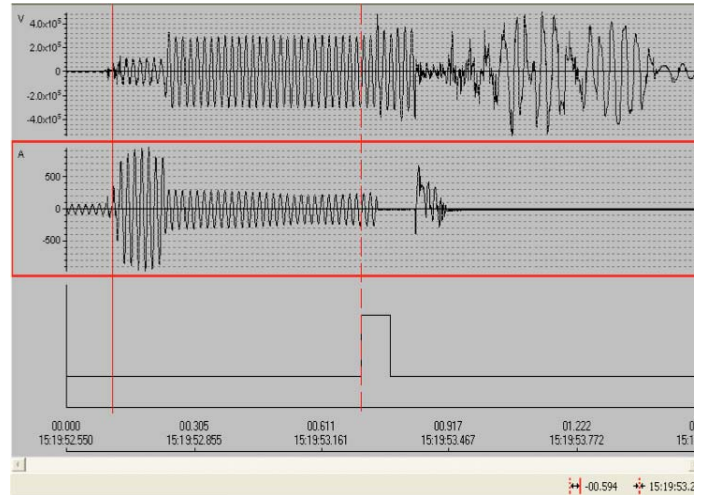


Fig. 3. Registro de un evento real en una red de distribución de 34.5-kV en una aplicación comercial.

El valor de la función generada $T_O(I_k)$ o $T_R(I_k)$ depende de la magnitud del fasor cuando la muestra k es procesada; por lo tanto, la expresión descrita en (1) considera el comportamiento dinámico del relevador de sobrecorriente ante corrientes de falla variables.

La condición de operación y reposición es satisfecha cuando:

$$G_k = K \quad (2)$$

donde:

$$K = \begin{cases} 1 & \text{el tiempo de operación es obtenido como } T_{op} = k_{op} \Delta t \\ 0 & \text{el tiempo de reposición es obtenido como } T_{res} = k_{res} \Delta t \end{cases}$$

k_{op} y k_{res} son el intervalo de muestras entre el arranque del relevador y el cumplimiento de la condición de operación y reposición respectivamente.

IV. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

A. Validación de tiempo de operación

El tiempo de operación de un relevador de sobrecorriente está definido por la dinámica de la corriente de falla, en muchos eventos existe incertidumbre respecto a si el tiempo de operación es el correcto. En esta sección se presenta la validación de la operación de un relevador de sobrecorriente de tierra a partir del registro del evento real capturado por un registrador de eventos. En la figura 3 se presenta el registro de un evento real desplegado en una aplicación comercial correspondiente a una falla monofásica en una línea de distribución de 34.5 kV. Se muestra el voltaje y la corriente del neutro del evento de falla registrado y el estado del contacto de disparo del relevador direccional de sobrecorriente de tierra 67N. La validación del tiempo en el cual opera el relevador puede ser realizado de dos formas, mediante la inyección de la señal a un relevador similar con un equipo de pruebas de relevadores, o efectuando la simulación algorítmica de la operación del relevador. Esta segunda opción es la presentada en esta sección auxiliándose de la herramienta computacional propuesta.

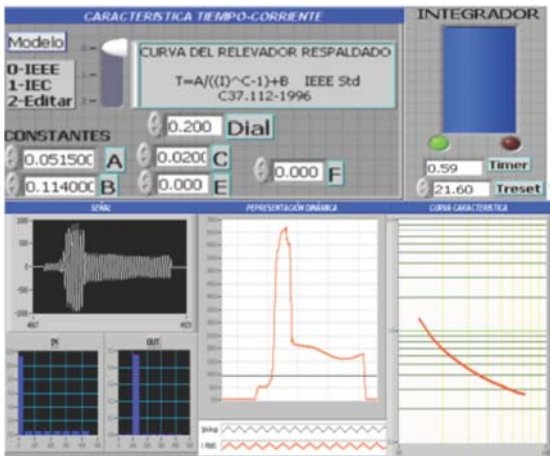


Fig. 4. Registro del evento real obtenido por la aplicación propuesta.

Los ajustes del 67N de campo son:

$$I_{pickup} = 92 \text{ A}$$

Curva Moderadamente inversa [16], Dial=0.2

Los ajustes del relevador se definen en la herramienta presentada, se reproduce la operación del relevador y se registra el tiempo de operación resultante. Se muestran resultados de las diferentes secciones de la herramienta computacional propuesta. El tiempo de operación de la protección es muy aproximado (menor a un ciclo) con el registrado (figura 4), el tiempo obtenido fue de:

$$\text{Tiempo} = 0.59 \text{ s o } 35.4 \text{ ciclos (f=60hz)}.$$

En la figura 4 se muestran algunas rutinas de la herramienta computacional propuesta, en la sección de característica tiempo-corriente se define el modelo estandarizado del relevador, adicionalmente esta rutina permite la edición de curvas por medio de la definición de su expresiones analíticas propuestas. En el integrador se emula el recorrido del disco de inducción del relevador, así cuando el indicador de nivel se llena se tienen el cumplimiento de la condición de operación. Se dispone de salidas gráficas donde es posible visualizar la señal de entrada, su espectro frecuencia antes y después del filtrado digital, la magnitud del fasor y ajuste para visualizar el arranque del algoritmo de integración, por último se presenta la curva de tiempo del relevador.

El objetivo de presentar este análisis es para mostrar el procedimiento de validación de la operación de los relevadores de campo mediante el uso de herramientas computacionales. Además la aplicación de esta herramienta en la educación permitirá fortalecer las actividades de análisis de eventos y la evaluación de la respuesta de la operación de los relevadores empleando señales de eventos reales, señales generadas en diversos paquetes comerciales de simulación o utilizando el módulo de generación interna de señales de la aplicación.

B. Coordinación

La coordinación entre dispositivos de protección de sobrecorriente debe satisfacer la expresión (3) para la corriente de falla máxima vista por ambas protecciones [17].

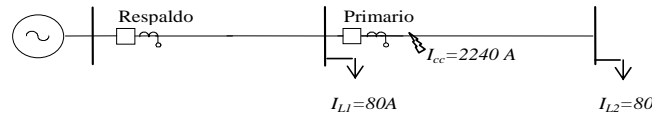
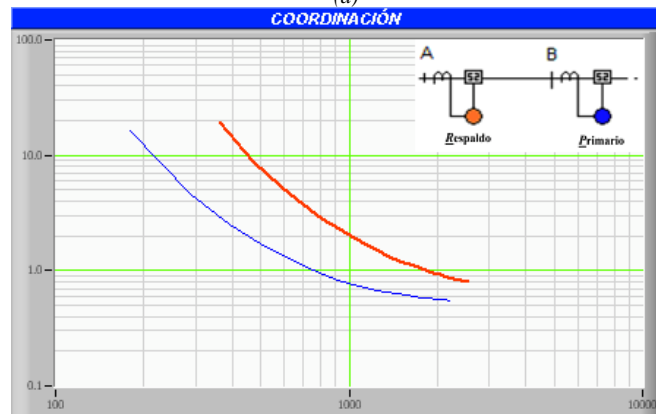


Fig. 5. Sistema radial, caso base.



(a)



(b)

Fig. 6. Simulación de caso base en la aplicación propuesta. (a) Definición de parámetros de ajuste en la aplicación, (b) visualización de curvas de operación.

$$T_{respaldo}(I_k^{respaldo}) = T_{primario}(I_k^{primario}) + CTI \tag{3}$$

donde:

$T_{respaldo}(I_k^{respaldo})$ es el tiempo de la protección de respaldo.

$T_{primario}(I_k^{primario})$ es el tiempo de la protección primaria.

CTI es el intervalo de coordinación (0.2-0.4 s).

$I_k^{primario}$ e $I_k^{respaldo}$ es la corriente de operación en la muestra k para la protección primaria y de respaldo respectivamente.

La corriente de operación es determinada por el cociente entre la corriente de falla del sistema $I_k^{sistema}$ y la corriente de arranque del relevador $I_{pickup}^{primario}$ e $I_{pickup}^{respaldo}$.

C. Coordinación relevador-relevador.

La coordinación fue realizada en el sistema mostrado en la figura 5 considerando el valor máximo posible de la corriente de cortocircuito. Los parámetros de ajuste fueron definidos en la aplicación. En la figura 6 se muestran los parámetros definidos y la carta de coordinación. La corriente de ajuste del relevador primario y de respaldo es establecida en esta rutina, se definen las corrientes de coordinación y la relación de transformación. Los tiempos de operación de los relevadores reflejados en la carta de

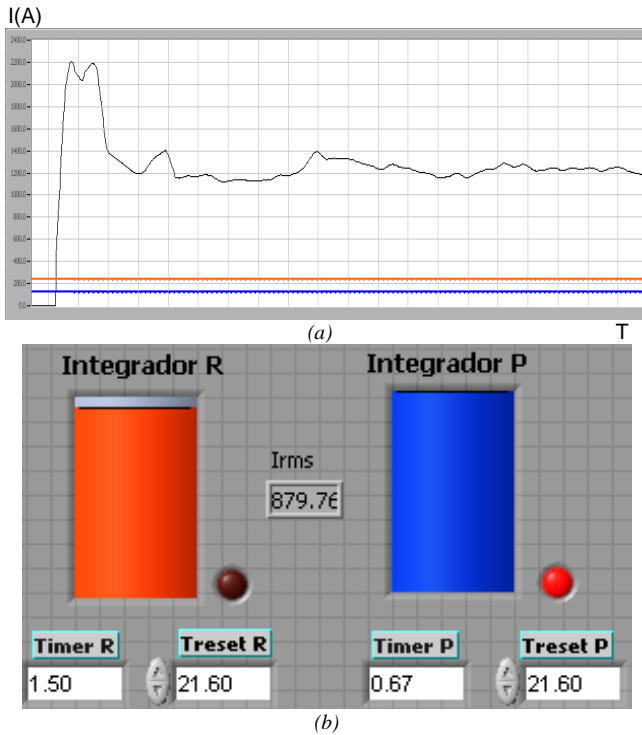


Fig. 7. Registro de tiempos de operación con señal dinámica de falla. (a) Señal de falla real, (b) registro de los tiempos de operación de los relevadores con ajuste similar al caso base.

coordinación se cumplen si la corriente de falla es una señal escalón, para valores dinámicos y efectos de resistencia de arco y resistencia de falla los tiempos de operación serán diferentes.

Las curvas de los relevadores fueron definidas como muy inversas [16] y los ajustes fueron calculados según se recomienda en [17] con un CTI (*time coordination interval*) de 0.3.

La evaluación en estado dinámico de la coordinación se muestra en la figura 7. Se muestra la posición de los integradores o discos de inducción del relevador primario y respaldo, además del tiempo de operación y el tiempo de reposición. Con esta información es posible verificar la coordinación en estado dinámico. La señal de falla utilizada fue obtenida de un evento real. Se observa que los tiempos de operación de los relevadores son mucho mayores que los establecidos en la coordinación debido a que se define un escenario pesimista en el cual la corriente de falla se mantiene en su valor máximo, esta consideración es adecuada para el proceso de ajuste. Sin embargo el tiempo real de operación comúnmente será mayor impactando directamente a la calidad de voltaje del sistema.

D. Coordinación fusible y rele. Caso 1.

La herramienta propuesta cuenta con un editor de ecuaciones donde es posible representar curvas de relevadores, fusibles o restauradores, esta opción es útil para la evaluación de nuevas curvas o de curvas ajustadas obtenidas de los modelos propuestos. Las curvas de tiempo de los fusibles no están definidas en forma analítica. Los valores se obtuvieron de la información proporcionada por los fabricantes. Para la obtención de la expresión analítica se utilizan criterios similares a los de los relevadores [18] utilizando parejas de valores tiempo corriente igualmente espaciados pero en el doble de número que el de los

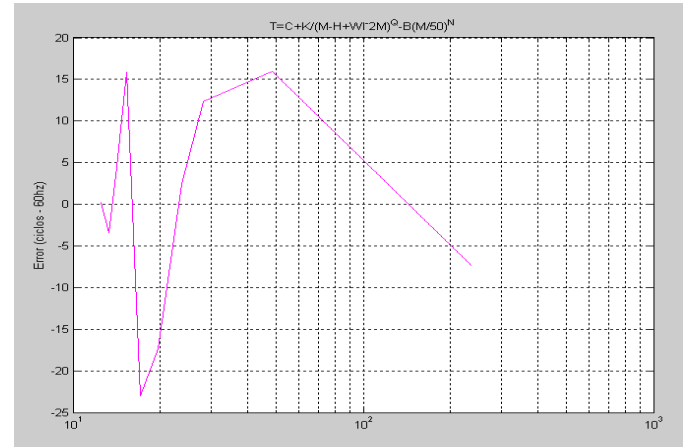


Fig. 8 Error de ajuste de la curva de tiempo.

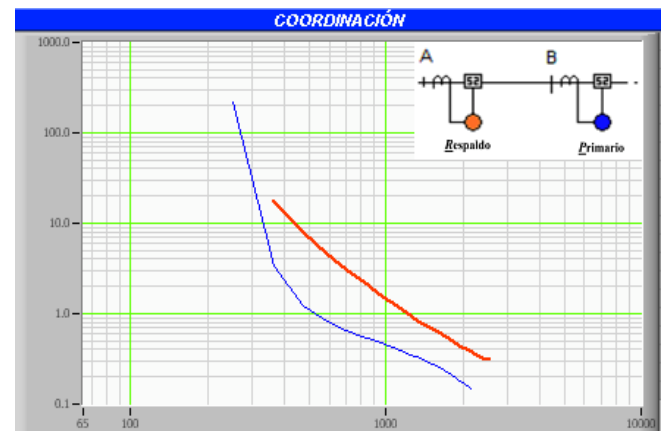


Fig. 9 Coordinación entre fusible y relevador. Caso 1.

relevadores (20 puntos), debido a que en los fusibles no hay ninguna región crítica para ajuste de curvas, todo el rango es considerado; además la forma de la curva de tiempo tiene mas diversidad que en los relevadores.

Se realizó el ajuste de la curva de máximo tiempo de liberación de un fusible Tipo K de 240V y 200 A. La expresión empírica obtenida utilizando el modelo propuesto por Heiber [19] fue:

$$T = 395.08 + \frac{441.307}{(I - 11.29 + I^{-21})^{2.686}} - 394.65 \left(\frac{I}{50}\right)^{0.00093} \quad (4)$$

El error del ajuste, aunque es independiente de la aplicación propuesta, fue el mostrado en la figura 8.

En la figura 9 se muestra la coordinación entre el fusible (primario) y el relevador (respaldo), la expresión analítica del fusible fue obtenida por algoritmos de regresión no lineal y la expresión introducida en la aplicación generó la curva del fusible. El sistema eléctrico mostrado en la Fig. 5 fue utilizado para determinar los ajustes de los dispositivos de protección. El relevador 1 fue definido como un relevador con curva extremadamente inversa según [16] con una palanca de tiempo de 0.8.

E. Coordinación fusible y rele. Caso 2.

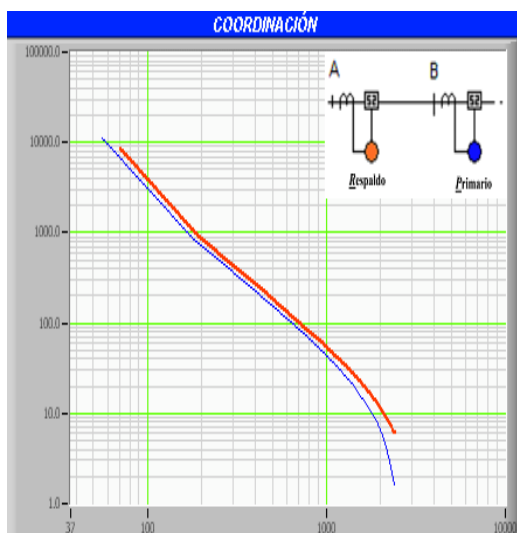


Fig. 10. Coordinación entre fusible y relevador. Caso 2.

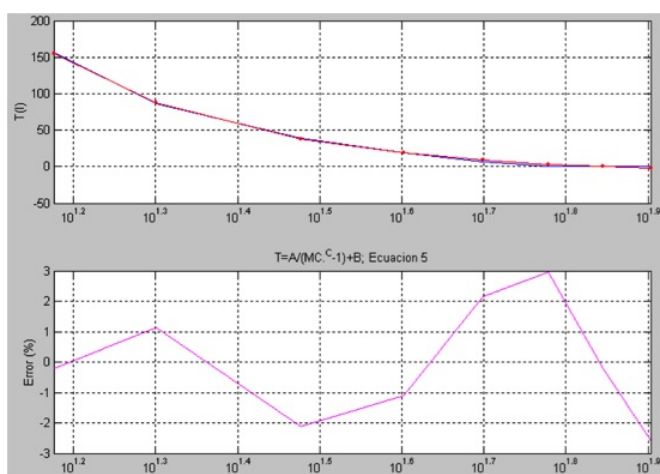


Fig. 11. Error de ajuste de la curva de tiempo.

La curva de tiempo de los relevadores de sobrecorriente es definida según los modelos establecidos en los estándares. Otros dispositivos de protección tales como fusibles y restauradores presentan curvas diferentes, la coordinación es complicada. Una posibilidad de ajuste es que el relevador tenga modelos con mayor flexibilidad tal que permitan emular con mayor detalle la curva de fusibles o restauradores. En la figura 10 se presenta este escenario, se ajusta un fusible de 5kV y 200 A, utilizando el modelo de la IEEE los coeficientes A, b y n son parámetros de ajuste [16]. El modelo obtenido es:

$$T = \left(\frac{9655.406}{I^{1.56} - 1} \right) - 12.91 \quad (5)$$

El relevador 2 es definido con la misma expresión matemática, la coordinación resultante se muestra en la figura 10. En la figura 11 se muestra el error del modelo obtenido del proceso de ajuste de curvas del fusible, esta información es incluida para darle factibilidad al proceso de coordinación descrito.

La evaluación del comportamiento ante corrientes de falla dinámicas es posible asignando un comportamiento dinámico del fusible similar al del relevador, el modelo dinámico del fusible

no está definido en la aplicación, sin embargo este escenario es muy aproximado a la realidad.

Los casos presentados muestran la posibilidad de análisis que es posible realizar con la aplicación propuesta, la exactitud de los modelos de fusibles o restauradores obtenidos es ajeno a la aplicación desarrollada, sin embargo la posibilidad de visualización y análisis con señales simuladas o de eventos reales es factible.

V. CONCLUSIONES

El uso de herramientas computacionales para el apoyo en la formación de futuros ingenieros representa una alternativa viable para permitir un incremento en el conocimiento de la operación de los relevadores en estado dinámico y el funcionamiento de los diferentes esquemas de protección. Además la programación de las funciones de protección en una herramienta computacional independiente, permite una mejor interacción con diversas arquitecturas de software incrementando la diversidad de condiciones operativas posibles de realizar.

VI. REFERENCIAS

- [1] Brahma, S., De La Ree, J., Gers, J., Girgis, A.A., Horowitz, S., Hunt, R., Kezunovic, M., Madani, V., McLaren, P., Phadke, A.G., Sachdev, M.S., Sidhu, T.S., Thorp, J.S., Venkata, S.S. & Wiedman, T. The Education and Training of Future Protection Engineers: Challenges, Opportunities, and Solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(2), 538 – 544, 2009.
- [2] Wei-Jen Lee, Jyh-Cherng Gu, Ren-Jun Li & Didsayabutra, P. A physical laboratory for protective relay education. *IEEE Transactions on Education*, 45(2), 182 – 186, 2002.
- [3] Huang, J.A. & Galiana, F.D. An integrated personal computer graphics environment for power system education, analysis and design. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(3), 1279 – 1285, 1991.
- [4] Jian Yang; Anderson, M.D. Teaching tool shows results through visualization [power systems education]. *Computer Applications in Power*, IEEE, 11(1), 37-42, 1998.
- [5] P.M. Hirsch. Interactive graphics for load flow. *IEEE Power Industry Computer Applications Conference Proceedings*, Toronto, Canada, 159-165, 1977.
- [6] S.H. Salon. An interactive computer graphics package for electric power engineering education. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 102 m(7), 1954-1959, 1983.
- [7] Lo, C.H., Anderson, M.D. & Richards, E.F. An interactive power system analyzer with graphics for educational use. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1(2), 174-181, 1986.
- [8] Papadopoulos, M., Hatziarfryiou, N.D. & Papadakis, M.E. Graphics aided interactive analysis of radial distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2(4), 1297-1302, 1987.
- [9] Daneshdoost, M. & Shaat, R. A pc based integrated software for power system education. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(3), 1285-1292, 1989.
- [10] E.O. Schweitzer, III, Daqing Hou, "Filtering for protective relays," 47th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, Georgia, April 28-30, 1993.
- [11] *Standard Requirements for Instrumental Transformers*. IEEE Standard, C57.13-1993, 1993.
- [12] Tziouvaras, D.A., McLaren, P., Alexander, G., Dawson, D., Esztergalyos, J., Fromen, C., Glinkowski, M., Hasenwinkle, I., Kezunovic, M., Kojovic, L., Kotheimer, B., Kuffel, R., Nordstrom, J. & Zocholl, S. (2000). Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1), 62-72.
- [13] Proakis, John G. & Manolakis, D.G. (1998). *Tratamiento digital de señales*. Madrid: Prentice hall.
- [14] Brahma, S.M.; De Leon, P.L.; Kavasseri, R.G. "Investigating the Option of Removing the Antialiasing Filter From Digital Relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24(4), pp. 1864 - 1868 Oct. 2009.

- [15] G. Benmouyal, "Some aspects of the digital implementation of protection time functions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1705-1713.
- [16] *IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays*, IEEE Std. C37.112-1996.
- [17] IEEE Std. C37.113-1999, *Guide for protective relay applications to transmission lines*, September 1999.
- [18] M.S. Sachdev, J. Singh, R.J. Fleming, Mathematical models representing time-current characteristics of overcurrent relays for computer application, *IEEE Paper A78 131-5*, January 1978.
- [19] J.E. Hieber, "Empirical equations of overcurrent relay curves for computer application," *IEEE Winter Power Meeting*, New York, N.Y., January/February 1965, Paper No. 31 CP 65-91, pp. 1-11.



Arturo Conde-Enríquez. Se graduó como ingeniero mecánico electricista en la Universidad Veracruzana en 1993. Obtuvo la maestría en ciencias de la ingeniería eléctrica y el grado de doctor en ingeniería eléctrica en la Universidad Autónoma de Nuevo León en 1996 y 2002, respectivamente. Actualmente es profesor investigador del programa doctoral de ingeniería eléctrica de la FIME-UANL y es miembro del sistema nacional de investigadores.



Víctor Guadalupe Marín Castillo nació en Monterrey Nuevo León, México, en 1984. Obtuvo el grado de Ingeniero Mecánico Electricista en 2006 y el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con Orientación en Sistemas Eléctricos de Potencia en 2010, ambos en la Universidad Autónoma de Nuevo León. Actualmente se desarrolla como profesor en la Universidad Tecnológica de Santa Catarina, Nuevo León, México.