

## ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE RELÉS DE SOBREINTENSIDAD MEDIANTE RECURSOS COMPUTACIONALES

Oscar Arreola-Soria, M. C. en Ingeniería Eléctrica  
Arturo Conde-Enríquez, Dr. en Ingeniería Eléctrica  
Oscar Chacón-Mondragón, Ph. D. Especialidad en Optimización

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
A.P. 36-F, Ciudad Universitaria CP 66451, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.  
Tel.: + 528188808535. [oarreola\\_soria@yahoo.com.mx](mailto:oarreola_soria@yahoo.com.mx),

Recibido: 27/sep/2012 - Aceptado: 26/dic/2012 - DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES1013>

### *ANALYSIS OF THE OPERATION OF OVERCURRENT RELAYS USING COMPUTING RESOURCES*

**ABSTRACT:** This article presents a computational tool to support the training of engineers in electrical protections in the analysis of the operation of overcurrent relays in dynamic conditions. The analysis of operation of the overcurrent relays is complex, in comparison with the other principles of protection, because that is not known at the time that the protection should operate as this depends on the developments of the current failure. The main purpose of this article is directed toward the analysis of the operation of the overcurrent relays to different operating conditions using computing resources. The tool developed allows the evaluation of the stages of the design and implementation of relays facilitating analysis of operation before events simulated or real. It also allows the editing of the curves of time conventional and unconventional. Finally, there are some cases of example to illustrate the activities of analyzes that are possible with the tool presented.

**Key Words:** overcurrent relay, dynamic state, graphical programming, training of human resources.

#### RESUMEN

En este artículo se presenta una herramienta computacional para apoyar la formación de ingenieros en protecciones eléctricas en el análisis de la operación de relés de sobreintensidad en condiciones dinámicas. El análisis de operación de los relés de sobreintensidad es complejo, en comparación con los otros esquemas de protección, debido a que no se conoce el tiempo en que la protección debería operar ya que este depende de la evolución que tenga la corriente de falta. La propuesta principal de este artículo es el análisis del relé de sobreintensidad ante diferentes escenarios operativos de su función de protección, utilizando recursos computacionales. La herramienta desarrollada permite la evaluación de las etapas de diseño y aplicación de relés facilitando el análisis de operación ante eventos reales o simulados. También permite la edición de las curvas de tiempo convencional y no convencional. Finalmente, se presentan algunos casos de ejemplo para ilustrar las actividades de análisis que son posibles con la herramienta presentada.

**Palabras clave:** Relé de sobreintensidad, estado dinámico, programación gráfica, formación de recursos humanos.

### 1.- INTRODUCCION

El funcionamiento de un relé de sobreintensidad depende de la capacidad de detectar faltas dentro de su área de protección. Sin embargo esta limitado porque la señal de corriente eléctrica es su única variable medida, la cual es sensible a las condiciones operativas del sistema y también a la topología que se presente hacia el punto de la falta, ambas condiciones hacen impredecible la ubicación de la falta ya que la zona de protección es dinámica y además existen las condiciones de cambios de la carga del sistema eléctrico. En otros esquemas de protección tales como el enlace entre extremos y el diferencial su característica es constante e insensible al estado operativo de la red eléctrica; solo el relé de distancia presente una dinámica limitada debido a la polarización. Es por eso que el análisis post mortem de la operación de un relé de sobreintensidad es complicado porque el tiempo de operación se desconoce ya que este depende de la dinámica de la corriente de falta. Es una práctica común realizar una reconstrucción de la operación del relé aplicándole los registros de eventos a un relé similar en condiciones de laboratorio para validar el tiempo de operación de la protección.

El análisis del funcionamiento y limitaciones de los sistemas de protección es una parte importante en las competencias de ingenieros eléctricos. La educación en clase por parte de catedráticos es limitada debido a que en muchas ocasiones se carece 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 otro lado, las prácticas de laboratorio en algunas ocasiones están limitadas por la falta de suficiente equipo de pruebas para el análisis de los eventos y medios de visualización de las diversas condiciones de operación. Los paquetes comerciales de protecciones además de tener un costo no alcanzable para muchas instituciones educativas además se enfocan en la componente de aplicación más que en la componente didáctica.

En [1] se expone la importancia de la preparación de cursos sobre ingeniería de sistemas de potencia con la necesidad urgente de identificar y desarrollar material ilustrativo para la enseñanza y formación de los ingenieros en el campo de la protección moderna y este trabajo está orientado en esa dirección.

Los laboratorios se han adaptado al desarrollo de nuevo material didáctico para poder ofrecer apropiadamente la enseñanza de los sistemas eléctricos de potencia. En [2] se presenta la conformación de un laboratorio para simular la operación del sistema de potencia a escala de una red trifásica y así realizar actividades de enseñanza e investigación en protecciones. En [3] se utiliza un ambiente gráfico para la enseñanza de sistemas eléctricos industriales en su análisis y diseño, usando como herramienta una computadora personal, y la vez facilita la creación y modificación de aplicaciones de protección. En [4] se describe un software interactivo para el apoyo del proceso de aprendizaje en clase, laboratorio y auto-aprendizaje.

La tendencia de los materiales didácticos para el aprendizaje de sistemas de potencia y particularmente en protecciones ha sido en aplicar recursos gráficos [5-9]. Esto es debido a que la protección es más clara de interpretar gráficamente, ante diferentes condiciones de operación del sistema eléctrico de potencia. Usando respuestas gráficas es fácil evaluar y determinar visualmente condiciones comprometidas del 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.

Se han presentado diversos desarrollos educativos de relé de sobreintensidad en equipos informáticos. En [2] se describe el diseño de un relevador electrónico-analógico de sobreintensidad de tiempo inverso con funciones direccional e instantáneo, que se propone destinar para aplicaciones de laboratorio. El desarrollo de relés 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 relé mediante esta alternativa no es recomendable. Otra alternativa es la evaluación mediante un recurso computacional en donde de forma similar se aplican las señales de los eventos y se evalúa la operación del relevador. Esta segunda alternativa es la propuesta en este trabajo.

El análisis teórico del comportamiento del relé es cubierto de manera adecuada, pero la reproducibilidad de varios escenarios en laboratorio es deseable y aconsejable para la mejor formación de los 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 la realización de diversas actividades didácticas tal como el diseño de curvas de tiempo, el análisis de eventos mediante la lectura de datos de eventos reales o simulados en cualquier plataforma comercial o académica, la generación interna de señales con el fin de reproducir una gama amplia de situaciones operativas y la evaluación de esquemas de carga fría o reconexión de sistemas de distribución. Estas actividades están orientadas a explorar con mayor resolución el desempeño de los relés.

En esta primera etapa de la herramienta computacional presentada no se evalúa la función direccional del relé y se asume la aplicación de potencia por un solo terminal. El no considerar la función direccional en la aplicación presentada, no representa una limitación debido a que no influye en la dinámica del relevador, al ser únicamente una condición permisiva de operación. El implementar esta herramienta computacional en la enseñanza de protecciones les da a los alumnos un plus al poder considerar diversos tópicos y escenarios dinámicos de la operación de la protección de sobreintensidad. Los principios de coordinación serán abordados en la continuación de este trabajo. La importancia

de desarrollar esta herramienta computacional está en evitar los altos costos de los paquetes profesionales que están en el orden de diez mil dólares o más, además estos paquetes no tienen componente didáctica si no que son para aplicaciones específicas o muy dirigidos a usuarios de sistemas de protección que lo emplean para pruebas y ajustes de dispositivos de protección antes de la puesta en operación de estos equipos en el sistema eléctrico de potencia [23].

## 2.- ESTRUCTURA FUNCIONAL

El algoritmo del relé fue programado en una herramienta gráfica [11], su estructura funcional consta de tres módulos: generación de señal, estimación fasorial y funciones de protección. La evaluación del algoritmo del relé es realizado por medio de la generación de señales internas y por medio de la lectura de datos de archivos externos en formato ASCII generados en programas de simulación (como el EMTP, PSCAD, Matlab, PSS), o de archivos de datos de registros de faltas reales. Para la inserción de la señal de falta y de la fuente adicional para evaluar la presencia de componentes de diversas frecuencias se emplea el principio de superposición Fig. (1).

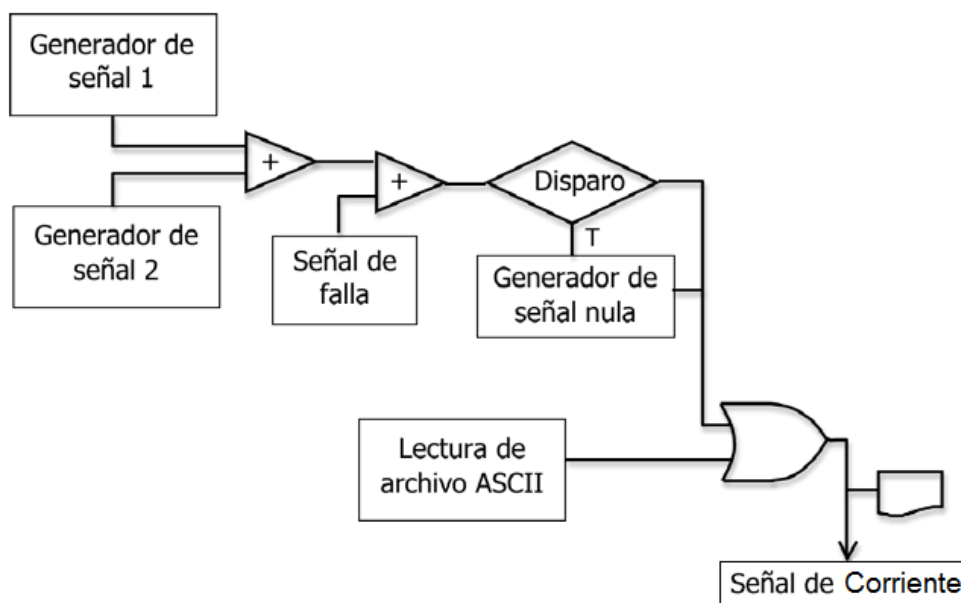


Fig. 1: Estructura funcional del módulo de generación de la señal.

La señal eléctrica de entrada al relé 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 relé debido a que presentan un carácter aleatorio que imposibilita la determinación de condición de falta, el procesamiento digital debe eliminar las cantidades no deseadas y retener las cantidades de interés [11]. La operación del relé de sobreintensidad debe ser establecida únicamente con la componente de la señal a la frecuencia nominal debido a que esta componente de la señal está afectada proporcionalmente por la ubicación de la falta. La función de la estimación fasorial es la obtención del fasor de la señal de entrada.

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*, de 2° ó 4° orden con una frecuencia de corte de 360 Hz Fig. (2), este filtro es preferido por tener respuestas planas en la banda de paso y mono-tónica decreciente en la banda de parada [12]. 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. La reducción del efecto de *aliasing* (proceso por el cual curvas y otras líneas aparecen separadas, debido a una reducción de la resolución del dispositivo gráfico), 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 [13].

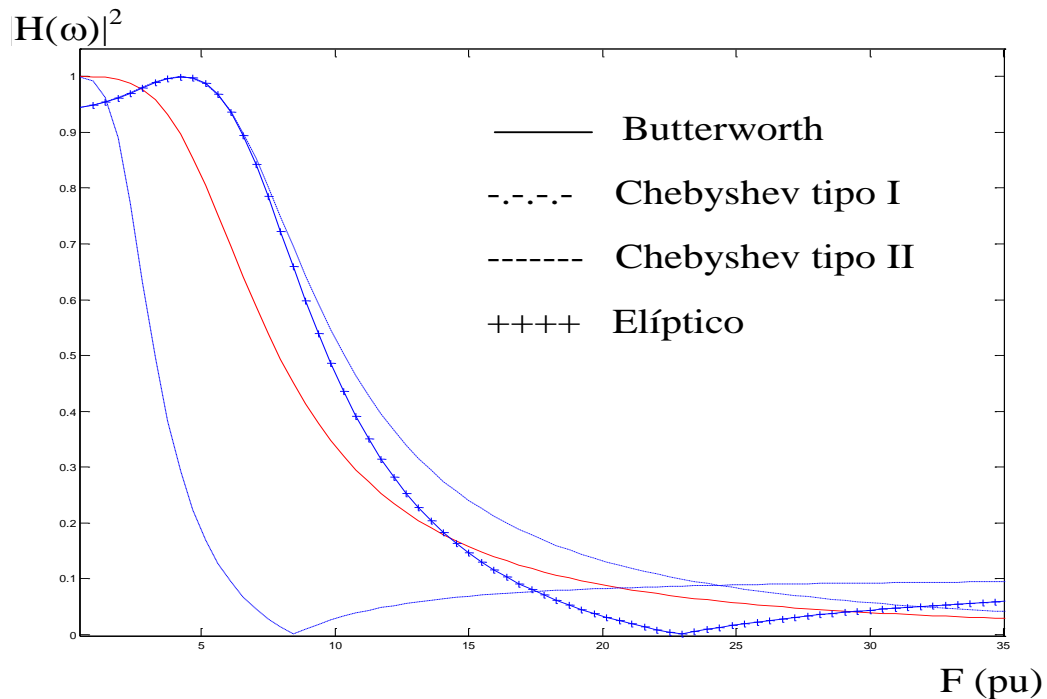


Fig. 2: Respuestas a la frecuencia de filtros analógicos.

El filtrado digital se realizó con filtros tipo FIR, ya que no hay recursión, es decir la salida depende sólo de la entrada y no de valores pasados de la salida, la memoria de las condiciones previas de la señal no tiene beneficio en la determinación de la condición de falla por el relé. Además que los filtros IIR producen en general 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 fig. (3). Es utilizado el filtro tipo coseno, ya que presenta un mejor rechazo a la componente en directa. La herramienta propuesta ofrece la versatilidad para la variación de parámetros de ajuste del proceso de acondicionamiento de la señal. Se disponen de controles para modificar los parámetros de filtrado analógico, es posible reproducir efectos de *aliasing* y evaluar el efecto del sobremuestreo de la señal por ejemplo Fig. (4). Sin embargo el efecto del tamaño de la ventana de datos tiene un mínimo impacto en la operación del relé de sobreintensidad, este parámetro es pre-establecido a un ciclo.

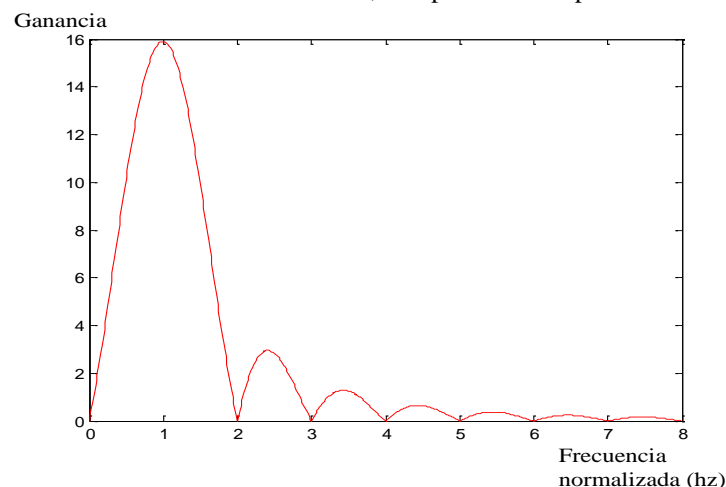


Fig. 3: Respuesta a la frecuencia de un filtro de respuesta impulsiva finita (FIR).

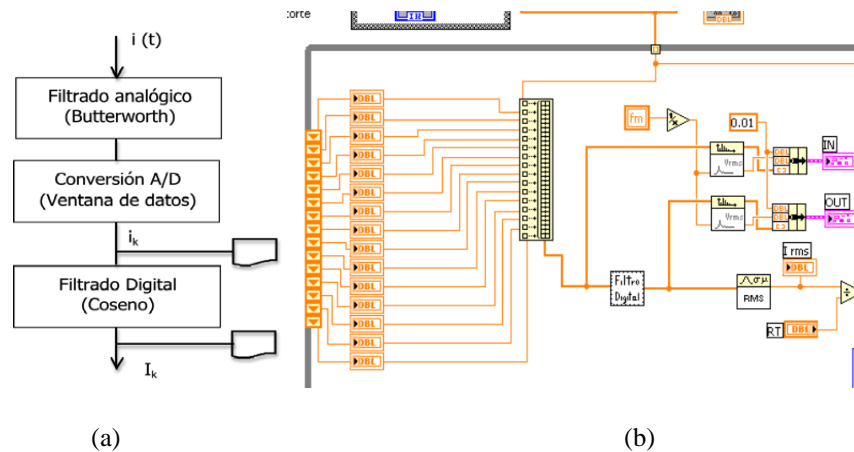


Fig. 4: a) Estructura para la estimación fasorial de la señal. b) formación de la ventana de datos.

Los algoritmos dinámicos del relé de sobreenintensidad tienen como señal de entrada del fasor estimado de la intensidad. Aun cuando el filtro digital tiene la capacidad de rechazo de las componentes armónicas, las señales inter-armónicas son moduladas pero no son rechazadas totalmente, además las componentes sub-armónicas no son rechazadas ni moduladas, representando una fuente de error en la estimación fasorial. Lo anterior puede ser evaluado en la herramienta propuesta.

**Clases de relés de sobreenintensidad de acuerdo a su principio de operación.**

Los principios físicos que gobiernan la operación de los relés de sobreenintensidad producen fuerzas resultantes que actúan sobre elementos móviles que cierran finalmente los contactos del circuito de disparo del interruptor. Los principios físicos usados son los de atracción electromagnética (AE) e inducción electromagnética (IE) y los elementos usados en el diseño de los relés producen diferentes características de operación aplicables para determinadas situaciones, relés sobreenintensidad: función 50 instantáneo, función 51 de tiempo inverso, función 67 direccional y función 52 interruptor automático de corriente alterna. Fig. (5a y b) muestra sus curvas de operación. Entre los diseños más usados se encuentran: Armadura móvil, émbolo móvil, disco de inducción, y copa de inducción. En la tabla 1 se muestran algunas características principales de estos tipos de relés de sobreenintensidad.

Tipo	Principio	Cantidad actuante		Aplicación	Calibración
		Operación	Polarizante		
Armadura móvil	AE	I		50 Direccional	Taps
Émbolo	AE	I		50 Direccional	Taps
Polarizados	AE	I <sub>1</sub> I	I <sub>2</sub> v	Direccional DC	
Disco de inducción	IE	I	V I <sub>2</sub>	51	Taps(I) Dial[T]
Copa de inducción	IE	I I <sub>1</sub>		Direccional AC	

TABLA 1. Características de operación del relé de sobreenintensidad a diferentes funciones

Los relés direccionales de CA están capacitados para distinguir el flujo de intensidad de una dirección a la otra en un circuito de CA reconociendo las diferencias en el ángulo de fase entre la intensidad y la magnitud de polarización. La capacidad para distinguir entre el flujo de corriente de una dirección a la otra depende de la selección de magnitud de polarización y del ángulo de par máximo, y todas las variaciones en la función proporcionadas por los relés direccionales de CA dependen de estas dos magnitudes.

La protección de sobreintensidad direccional es usada cuando es necesario proteger el sistema contra intensidades de falta que pueden circular en ambas direcciones a través de un elemento del sistema, y cuando la protección de sobreintensidad bidireccional puede producir desconexión innecesaria de circuitos. Esto puede suceder en sistemas en anillo o enmallados y en sistemas con una variedad de puntos de alimentación.

La conexión de un relé direccional es definida sobre la base del número de grados en el que una intensidad a un factor de potencia unitario adelanta el voltaje de polarización. El ángulo de máximo par (AMT), es el ángulo por el que este desplazamiento produce el máximo par y por tanto, está siempre alineado con el voltaje de polarización.

*Polarización con voltaje entre fases adyacentes-conexión 30° (0° AMT).*

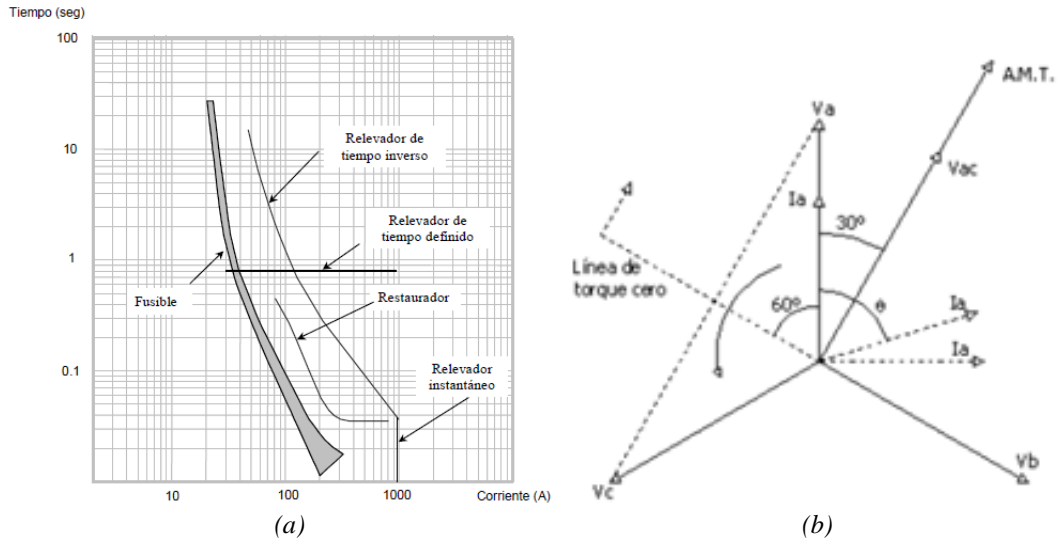


Fig. 5: Características de operación relé de sobreintensidad: (a) con número 50, 51 y (b) diagrama fasorial del relevador 67 direccional a 30°

El ajuste de relés de sobreintensidad de disco de inducción. El par ejercido en el disco del relé depende del flujo magnético que incide en él, y este es directamente proporcional a (NI) amperios-vuelta, esto es, si se aumenta el número de vueltas N, la intensidad necesaria para hacer operar el relé disminuye y viceversa. Para que se produzca el mismo par se necesitan los mismos amperios-vuelta (NI); esa condición es la que permite variar la intensidad mínima de operación,  $I_{pickup}$  intensidad de arranque, es decir al variar el tap, se varía el número de espiras, y por lo tanto la intensidad mínima de operación  $I_{pickup}$ , en la figura (6) se muestra el efecto de cambio del tap donde las características de operación se desplazan con el cambio de la intensidad  $I_{pickup}$ .

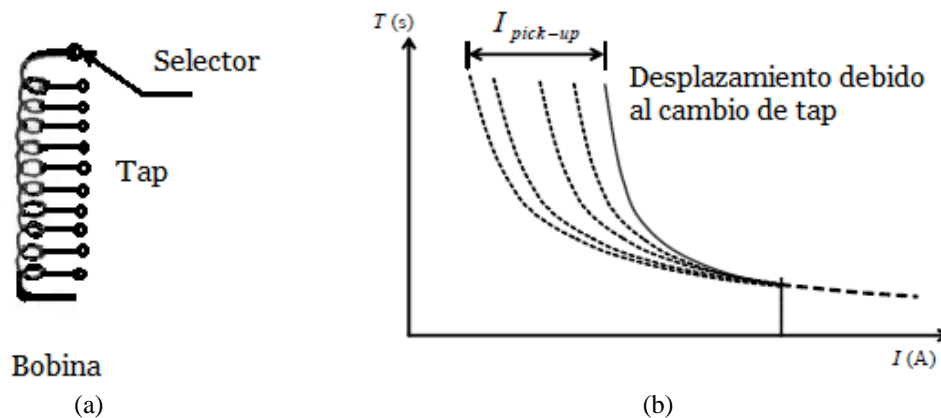


Fig. 6: Ajuste relé de sobreintensidad a) cambio de tap en la bobina y b) desplazamiento de la característica de tiempo inverso.

El tiempo de operación, a su vez depende de la posición de arranque del disco, si el disco arranca de una posición más alejada, se demora más en llegar a la posición de cierre de contactos para la misma intensidad. Esta circunstancia se aprovecha para cambiar el tiempo de operación del relé a través del ajuste de la palanca (dial) en la figura (7) se muestra el efecto de cambio de tiempo de operación con la misma intensidad de arranque  $I_{pickup}$ . La fijación del relé significa fijar su tap y su dial.

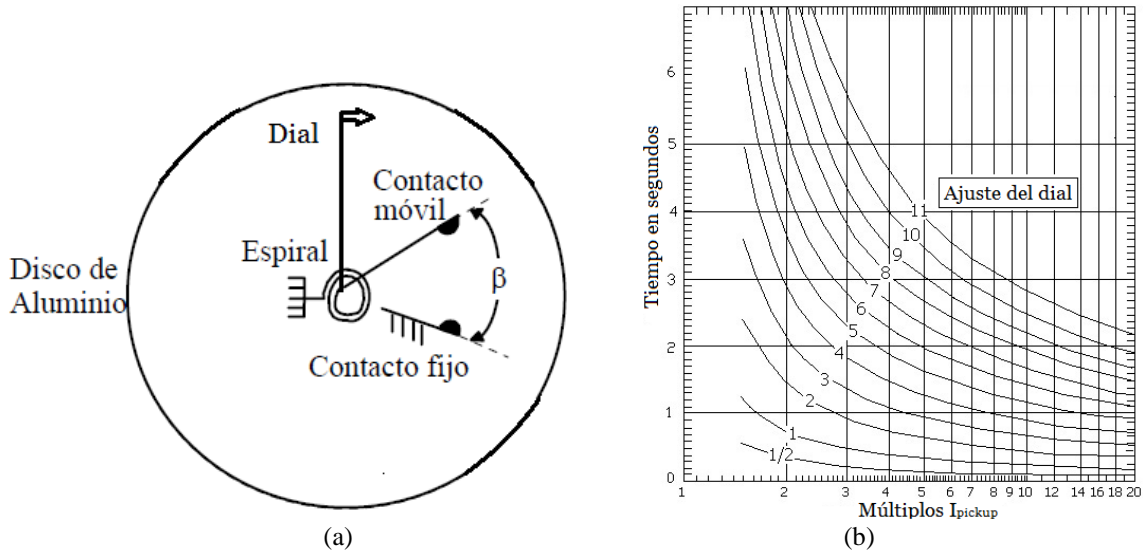


Fig. 7: Relé de sobreintensidad a) Fijación de palanca del disco y b) características de operación con cambio dial.

Dentro de las funciones de protección programadas están, además del modelo dinámico del relé de sobreintensidad [14], el relé instantáneo, la función de carga fría y, un módulo para la edición y evaluación de curvas de tiempo Fig. (8). La activación de la función de carga fría desactiva la función 50 hasta el término de su temporizador. El diagrama lógico de la implementación es presentado en la Fig. (8).

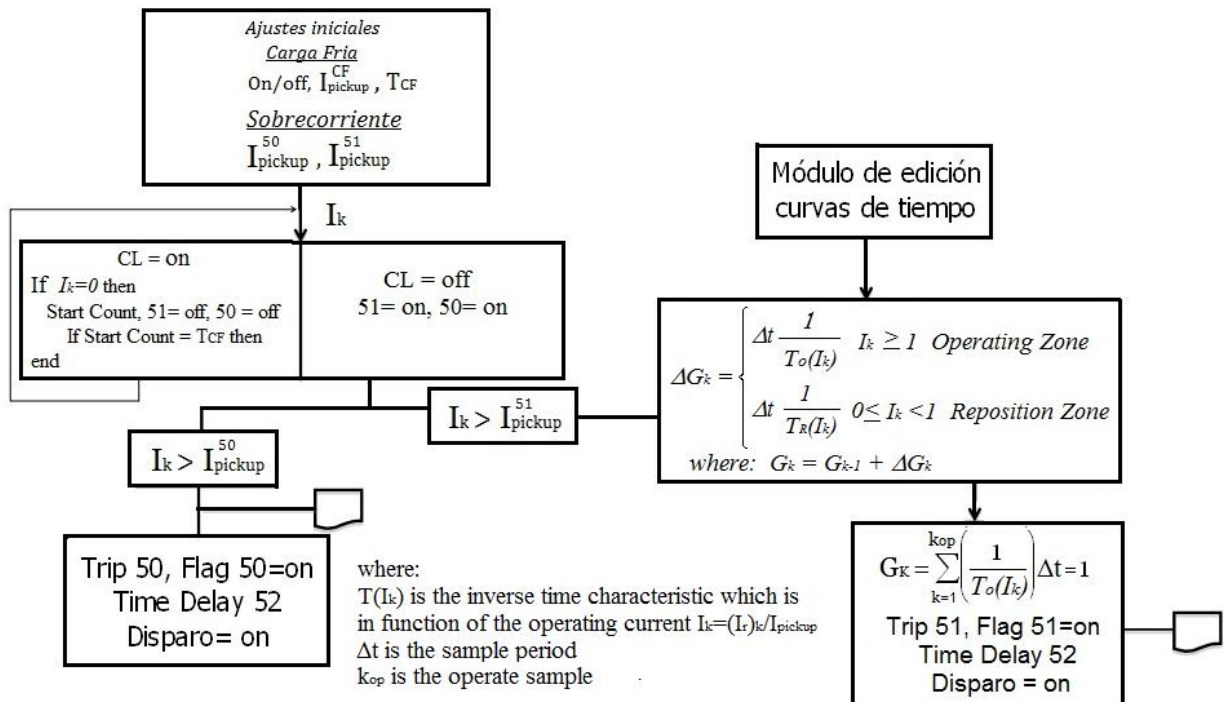


Fig. 8: Estructura funcional de las funciones de protección.

La subrutina de diseño de curvas permite la generación de curvas de operación introduciendo la expresión analítica, de esta forma es posible reproducir y evaluar en forma dinámica nuevas características de operación o curvas de fusibles y restauradores; la rutina genera el vector de intensidad acotado por los ajustes de la intensidad de coordinación y el ajuste de la intensidad de arranque definidos en el panel, el vector de tiempo es calculado de la expresión analítica introducida. En la Fig. (9) se observa la subrutina en el panel de la herramienta computacional descrita, que está hecho en LabView, sin embargo, puede ser ejecutado independientemente como Build application ejecutable, los requerimientos son un procesador Intel Core Duo E6700 2.66GHz con una memoria RAM 1GB para Windows XP o 2GB para Windows Vista 7 y disco duro de 4.5 GB.

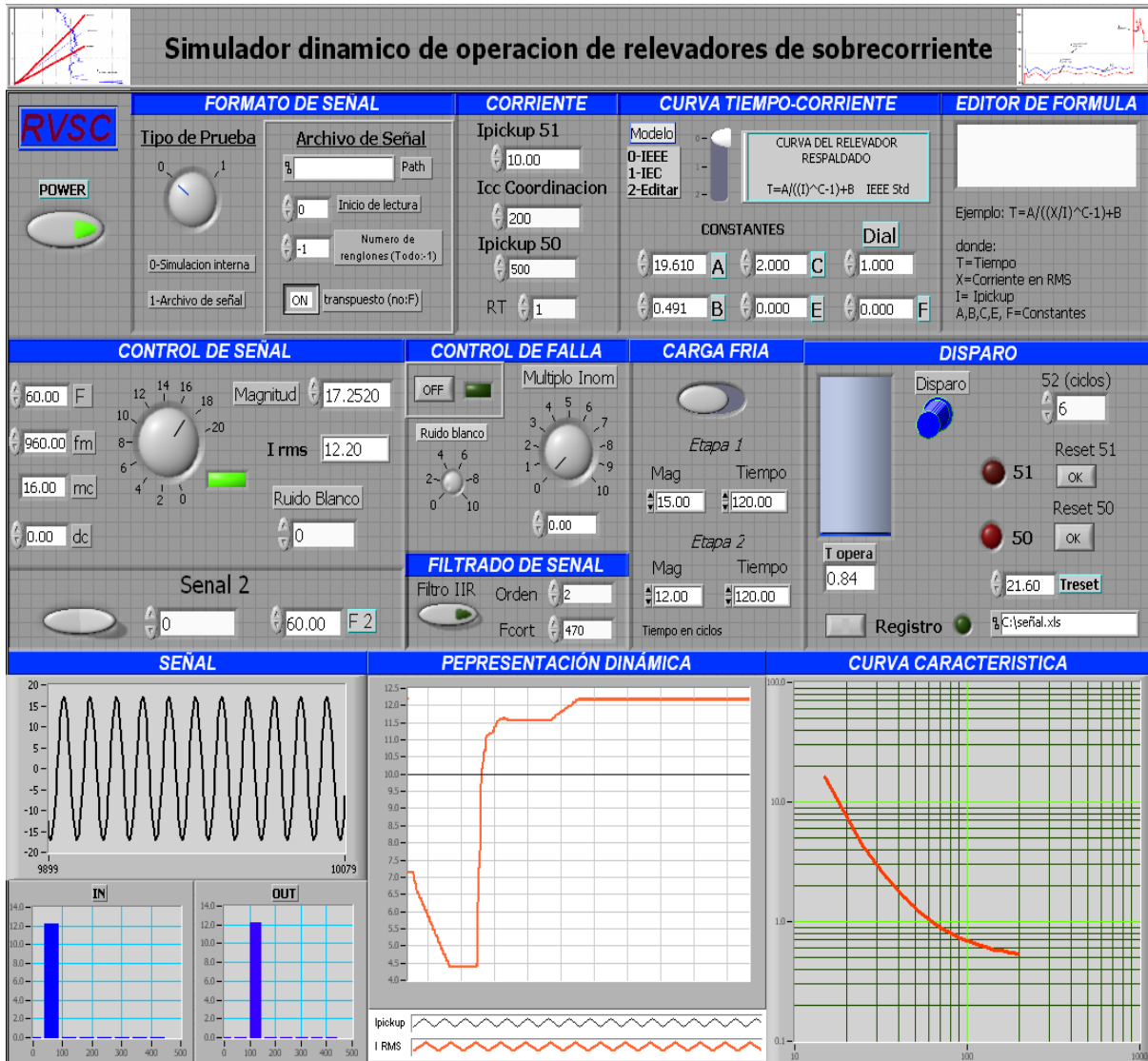


Fig. 9: Panel frontal de la herramienta computación.

### 3.- CASOS DE APLICACIÓN

#### 3.1 GENERACIÓN DE NUEVAS CARACTERÍSTICAS

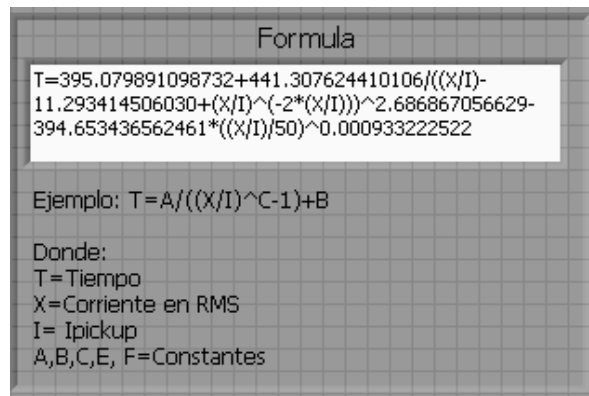
Un aspecto de interés es la evaluación del desempeño de los relés utilizando curvas de tiempo no convencionales, aun cuando algunos de los paquetes de coordinación comerciales ofrecen la posibilidad de diseñar curvas específicas no se puede realizar la evaluación de la operación en condiciones dinámicas. La herramienta propuesta cuenta con un editor

de ecuaciones donde es posible representar curvas de relés, fusibles o restauradores, esta opción es útil para la evaluación de nuevas curvas o de curvas ajustadas obtenidas de los modelos propuestos en [17, 18].

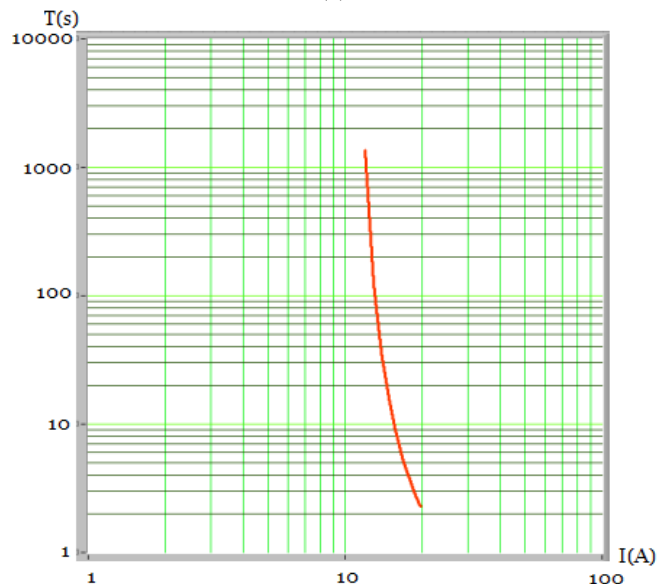
Se presenta un ejemplo de ajuste de curvas de un fusible Tipo K de 240 V 6A. Se evalúa la curva de máximo tiempo de liberación. Las curvas de tiempo de los fusibles no están definidas en forma analítica. Los valores se obtuvieron de la información proporcionada por los fabricantes. Para la obtención de la expresión analítica se utilizan criterios similares a los de los relés [17] utilizando parejas de valores tiempo intensidad igualmente espaciados pero en el doble de número que el de los relés (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 más diversidad que en los relés.

La rutina de ajuste fue programada en *Matlab* evaluando los modelos matemáticos propuestos en [17, 18]. El resultado es el modelo que tenga mejor ajuste. Para este ejemplo el modelo matemático descrito en [12] fue el mejor de las rutinas exponenciales. El módulo de edición de ecuaciones es mostrado en la Fig. (10a). La Fig. (10b) muestra los resultados gráficos.

Las ecuaciones exponenciales tienen, en general, pobres resultados, debido a que estas fueron establecidas para curvas de relés [19]. De otra forma, las ecuaciones polinomiales tienen errores de ajuste menores que las ecuaciones exponenciales. Sin embargo, los resultados obtenidos tienen polinomios de orden elevado y parámetros de valores a potencias elevadas. Estas expresiones son difíciles de implementar.



(a)



(b)

Fig. 10: Resultados de la edición de curvas no convencionales. a) Módulo de edición de ecuaciones, b) Ajuste de curva de un fusible.

### 3.2 CARGA FRÍA E INTENSIDAD INRUSH

La condición de carga fría se presenta durante la re-energización de un circuito de distribución, manifestándose como un incremento temporal de corriente pudiendo provocar el disparo incorrecto de los relés de sobreenfriamiento [20]. La función de carga fría debe deshabilitar temporalmente las funciones de protección, permitiendo la evolución del transitorio. Aun cuando se define un tiempo para establecer la duración del bloqueo de las funciones de protección, se mantiene una supervisión continua de la magnitud de la intensidad de fase y la intensidad de arranque de los relés para habilitar las funciones de protección antes del término del tiempo de espera. En la Fig. (11) se muestra el diagrama funcional de la lógica descrita.

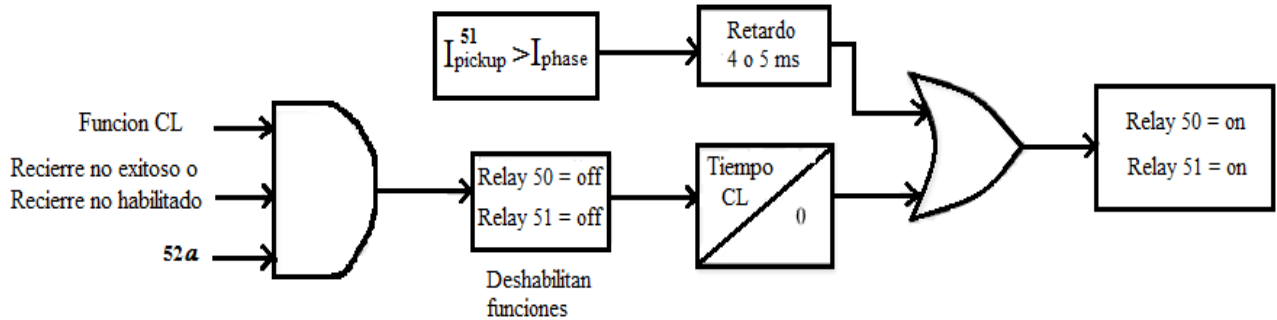


Fig. 11: Diagrama funcional de la lógica de carga fría.

En la Fig. (12) se muestra el comportamiento de la función de la subrutina de carga fría en la herramienta computacional presentada ante un arranque del motor trifásico de 2 kW a 120/208 V obtenido en laboratorio físico. Se realizó la adquisición a una frecuencia de muestreo de 960 hz. La función de carga fría fue programada como un relé de tiempo definido, para permitir flexibilidad computacional para una exploración detallada en el análisis del evento. La función es realizada definiendo dos etapas de ajuste de la lógica, con un ajuste mayor de la intensidad del arranque que el del pico de intensidad de *inrush* y con el temporizador ajustado para permitir la dinámica del evento. Las funciones 50 y 51 son deshabilitadas durante su operación. En base al valor esperado del pico de la intensidad de *inrush* para el motor en particular, se asignaron dos pasos de ajuste, primero de 250 A a 1.56 s o 1497.6 muestras y segundo con 50A a 0.2 s.

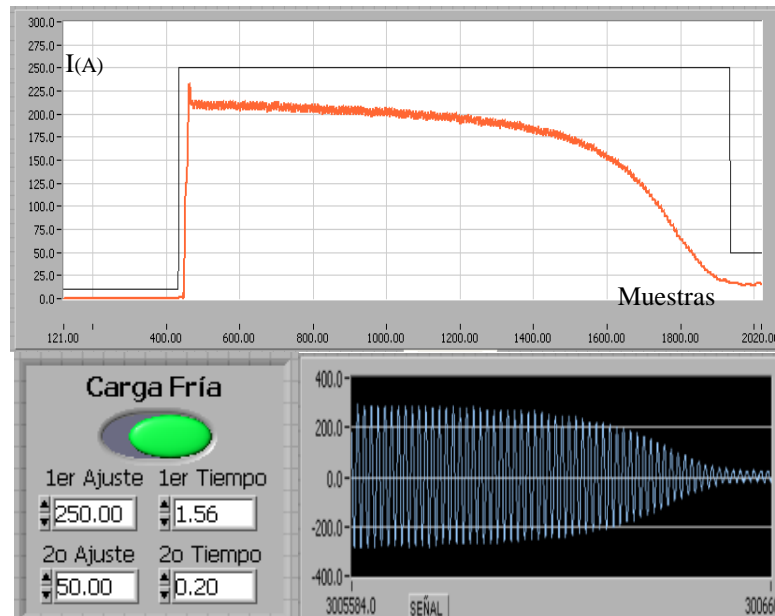


Fig. 12: Resultados de la función de carga fría para una señal de prueba.

### 3.3 COORDINACIÓN RELÉ RESTAURADOR

En la Fig. (13) se presenta la verificación de coordinación en zona de reposición entre Relé-Restaurador. Este ejemplo es para comprobar la función de reposición de la herramienta propuesta. Es común desactivar esta función en relés digitales en el caso de protección principal de ramal, sin embargo esta función es requerida por muchos usuarios y esta considerada dentro de [16].

En la herramienta propuesta es posible activar o desactivar esta función. Este ejemplo se presenta en [21], la prueba se realiza verificando que el relé no opere para toda la secuencia de operación del restaurador. La señal es generada internamente utilizando los controles internos. El relé registra la dinámica de las operaciones del restaurador. Para esta prueba se utilizó una curva de un relé con característica muy inversa y una curva de reposición definida según [21].

En la Fig. (13) se muestra el estado del integrador para cada cambio de estado de la señal, cuando inicia la falta el integrador aumenta posición (1), viene un primer intervalo de apertura del restaurador de 1 segundo y el integrador decrece posición (2), después viene un intervalo de re-cierre y el integrador aumenta nuevamente posición (3), luego el restaurador abre contactos un segundo intervalo por 1 segundo y el integrador decrece sin llegar a reponerse totalmente posición (4), viene una segunda intervalo de re-cierre de 0.25 segundo y el integrador vuelve a aumentar sin alcanzar la condición de operación del relé posición (5), con este se demuestra que hay una coordinación correcta relé-restaurador.

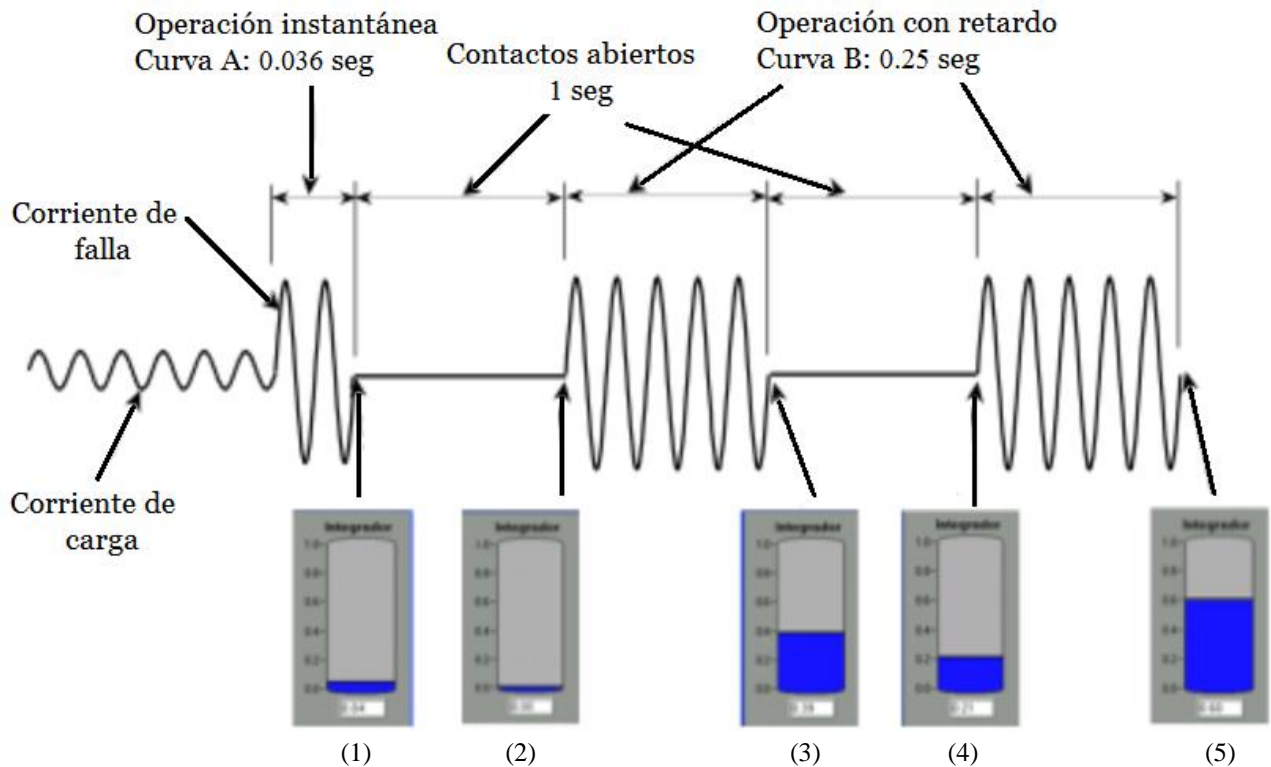


Fig. 13: Registro del integrador del relé virtual ante la secuencia de operación de un restaurador.

### 3.4 EFECTO DE ALIASING

Con la manipulación de las variables de generación de señales es posible reproducir una serie de fenómenos relacionados con el procesamiento digital de la señal. En la Fig. (14) se muestra a manera de ejemplo el efecto de *aliasing* de la señal debido a la presencia de una componente a un valor de frecuencia superior al establecido por la frecuencia de muestreo según Nyquist, la función señal 2 es definida a 600 Hz y la frecuencia de muestreo es establecida a 960 hz pudiendo entonces identificar hasta frecuencias de 480 hz; la señal 2 entonces es vista con una frecuencia de 360 hz. La señal de entrada no puede ser debidamente caracterizada.

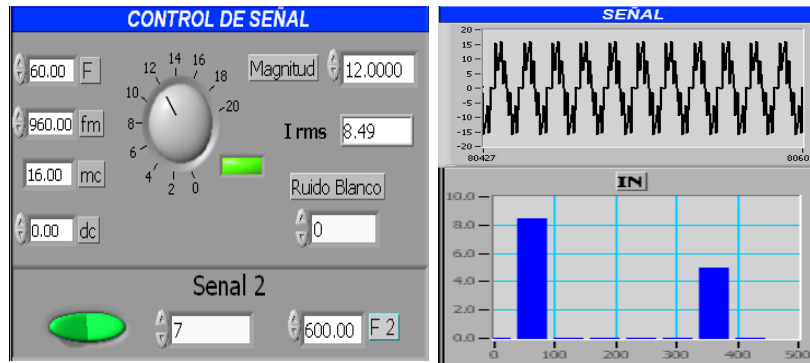


Fig. 14: Registro de los controles para reproducir el fenómeno de aliasing.

La medición del efecto de señales armónicas, inter-armónicas o sub-armónicas en relés de sobreintensidad [22] es posible con la herramienta propuesta. En la Fig. (15) se muestra la señal inyectada al relé de sobreintensidad. En la Tabla 2 se muestra la diferencia de tiempo. Este es un análisis cuantitativo usado para mostrar las ventajas de usar la herramienta propuesta para el análisis de operación de relés.



Fig. 15: Efecto de subarmónicas en la señal de entrada del relé.

T.operación con señal 60 hz:	0.18 s
T.operación con señal 60 hz+50hz:	0.17 s

Tabla 2. Diferencia de tiempo de operación

#### 4.- CONCLUSIONES

El uso de herramientas computacionales representa una alternativa viable para validar la operación de los relés de sobreintensidad ante efectos como carga fría, corriente *inrush*, *aliasing*, en generación de nuevas características y comprobar la coordinación relé-restaurador en los intervalos de re-cierre y apertura, además funge como un elemento didáctico que facilita el conocimiento de la operación de los relés en estado dinámico y el funcionamiento de los diferentes esquemas de protección. La programación de las funciones de protección en una herramienta computacional independiente permite una mejor interacción con *software* para análisis de sistemas eléctricos de potencia, incrementando la diversidad de condiciones operativas posibles de realizar.

## 5.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Brahma S, De La Ree J, Gers, J, et al. "The Education and Training of Future Protection Engineers: Challenges, Opportunities, and Solutions". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, Vol. 24(2), p.538 – 544. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2014029>
- [2] Wei-Jen Lee, Jyh-Cherng Gu, Ren-Jun Li, et al. "A physical laboratory for protective relay education", *IEEE Transactions on Education*, 2002, Vol. 45(2), p.182 – 186. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TE.2002.1013885>
- [3] Ming-Tong Tsay and Shun-Yu Chan. "A personal computer graphical environment for industrial distribution system education, design, and analysis", *IEEE Transaction on Power System*, 2000, Vol. 15, p. 472-476. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/59.867127>
- [4] Huang J A, Galiana F D. "An integrated personal computer graphics environment for power system education, analysis and design", *IEEE Transactions on Power Systems*, 1991, Vol. 6(3), p.1279 – 1285. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/59.119278>
- [5] Tian You-wen Sun Guo-kai Li Zheng-ming. "The Web Development and Design About Quality Teaching Course "Power system protection", International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011, p. 7020-7023
- [6] Jian Yang, Anderson M D. "Teaching tool shows results through visualization [power systems education]", *Computer Applications in Power IEEE*, 1998, Vol. 11(1), p.37-42. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/67.648497>
- [7] Yujie Zhang; Bastos, J.L.; Schulz, N.N.; Patel, D. "Modeling and Testing of Protection Devices for SPS using MATLAB/Simulink and VTB", Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07. IEEE Digital Object Identifier: 10.1109/ESTS.2007.372071, Publication Year: 2007, Page(s): 103 - 108
- [8] Meliopoulos, A.P.S.; Cokkinides, G.J.A. "Virtual Environment for Protective Relaying Evaluation and Testing", *Power Systems, IEEE Transactions on* Volume: 19 , Issue: 1, Digital Object Identifier: 10.1109/TPWRS.2003.821008, Publication Year: 2004 , Page(s): 104 - 111
- [9] Ren, J.; Kezunovic, M. "Modeling and Simulation Tools for Teaching Protective Relaying Design and Application for the Smart Grid", Proceedings of the International Symposium Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010, p. 1– 6.
- [10] Yu D C, Chen S T, Bischke R F. "A pc oriented interactive and graphical simulation package for power system study", *IEEE Transactions on Power Systems*, 1989, Vol. 4(1), p.353-360. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/59.32499>
- [11] "Labview Q3", 2009 edition.
- [12] Schweitzer III E O, Daqing Hou. "Filtering for protective relays" *47<sup>th</sup> Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*, Atlanta, Georgia, April 28-30, 1993.
- [13] Proakis John G, Manolakis D G. "Tratamiento digital de señales", (1998) 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*, October 2009, Vol. 24(4), p.1864-1868. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2028802>
- [15] Benmouyal G. "Some aspects of the digital implementation of protection time functions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1990, Vol. 5(4), p.1705-1713. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/61.103665>
- [16] "IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays", IEEE Std. C37.112-1996.
- [17] Sachdev M S, Singh J, Fleming R J. "Mathematical models representing time-current characteristics of overcurrent relays for computer application", *IEEE Paper A78*, January 1978, Vol. 131(5).
- [18] Hieber J E. "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, p.1-11.
- [19] Conde A, Vazquez E. "Enhanced Time Overcurrent Coordination", *Electric Power Systems Research*, 2006, 76 Issues 6-7, p.457-465.
- [20] Friend F. "Cold Load Pickup Issues", *Protective Relay Engineers*, 2009 62nd Annual Conference for Austin, TX, March 30-April 2, 2009, p.176 - 187.
- [21] Burke J J. *Power Distribution Engineering: Fundamentals and Applications*, New York, Marcel Dekker, Inc., 1994, 374p. ISBN: 0-8247-9237-8.
- [22] Donohue Paul Martin, Syed Islam. "The Effect of Nonsinusoidal Current Waveforms on Electromechanical and Solid-State Overcurrent Relay Operation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, Vol. 46(6).
- [23] Orejas-Troncoso J, Martínez S. "Ingeniería de Control y Protección de Subestaciones Eléctricas" DYNA Ingeniería e Industria. Junio 2011. Vol. 86-3 p.273-280. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3966>