CAPÍTULO VII

VERSIÓN VIRTUAL Y PRUEBAS DE LABORATORIO DE UN RELEVADOR ADAPTIVO DE SOBRECORRIENTE

7.1 Introducción

El proceso de diseño de un equipo o sistema digital destinado a operar en tiempo real, consta de dos etapas básicas. La primera incluye la investigación y desarrollo de los algoritmos y su evaluación por simulación digital. La segunda consiste en el desarrollo de un prototipo del equipo o sistema y su prueba en condiciones de laboratorio y, posteriormente, en condiciones reales de operación.

La única infraestructura requerida para la primera etapa es el equipo de cómputo, dotado del "software" apropiado para la aplicación. En la segunda etapa se requiere contar con un laboratorio que permita simular físicamente el sistema real al que está destinado el equipo, y tener facilidades para el diseño y construcción del prototipo. El simulador físico puede ser sustituido o complementado por un simulador digital en algunas aplicaciones, pero la construcción del prototipo es inevitable.

Cuando el equipo a diseñar es un relevador digital de protección de sistemas eléctricos de potencia, la construcción del prototipo es una labor muy especializada, que no siempre está al alcance de las instituciones de investigación. Es recomendable, por tanto, buscar vías para hacer pruebas de laboratorio al relevador en proceso de desarrollo, sin que se cuente inicialmente con su prototipo.

Una alternativa en esta dirección es crear una versión virtual del relevador en una computadora personal equipada con una tarjeta de adquisición de datos. Los algoritmos del relevador son programados en la computadora, lo que da gran facilidad para realizar y probar las modificaciones que resulten del propio proceso de pruebas de laboratorio.

Existen programas de computadora diseñados para este tipo de aplicaciones. Uno de esos programas es Labview® **[60]**, que permite crear los denominados instrumentos virtuales. Se exploraron las posibilidades de Labview® para crear un relevador virtual, se aprovecharon las funciones de adquisición de señales en tiempo real del programa para realizar el proceso de programación y pruebas del "prototipo" virtual del relevador, antes de pasar a la fase de construcción del prototipo verdadero. Otra posible aplicación es en la enseñanza.

En el presente capítulo se presenta el desarrollo y las consideraciones realizadas para la aplicación de un relevador de sobrecorriente adaptivo en un ambiente virtual. Se describe la estructura general del relevador virtual y su programación en Labview®. Se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas para tres tipos de señales de prueba: adquisición real de señales, generación interna y archivo de señales. Finalmente se discuten y analizan los resultados de las pruebas realizadas.

7.2 Estructura de aplicación del relevador virtual

La estructura general de aplicación de un relevador virtual consta de un módulo de conexión, para concentrar las señales de entrada y salida, una tarjeta de adquisición de datos, y una computadora personal, donde residen los programas de operación del relevador virtual. El relevador virtual de la Fig. 7.1 aparece conectado a un modelo del sistema eléctrico de potencia; recibe la información proveniente de los transformadores de corriente, y actúa para provocar el disparo de un interruptor del sistema en caso de falla. A continuación se describe en detalle cada uno de los componentes utilizados en el relevador virtual.

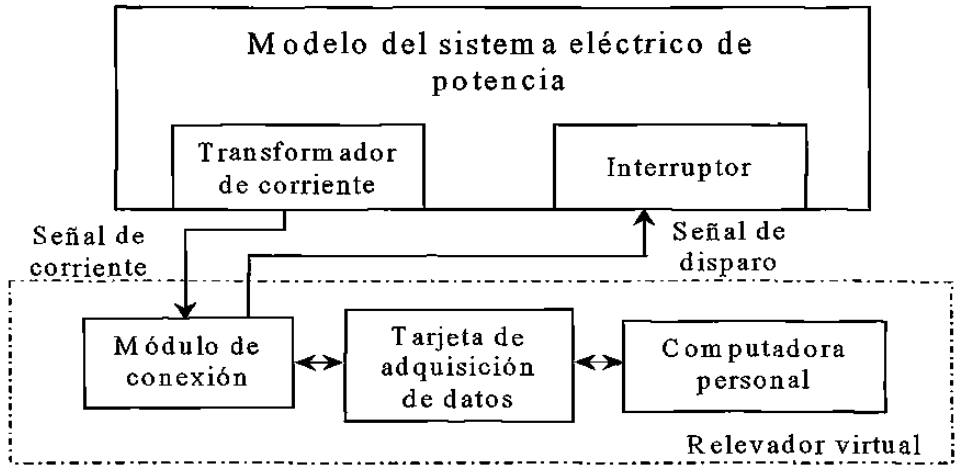

Fig. 7.1. Estructura general de un relevador virtual.

Módulo de conexión. El relevador virtual (Fig. 7.1) cuenta con un módulo de conexión National Instruments® modelo TBX-68, con 68 terminales de tornillo para la conexión de señales de entrada/salida. Incluye un conector SCSI macho para la conexión directa con cables SH6868, R6868, SH1006868, PSHR68-68 y PR68-68F.

Tarjeta de adquisición. La adquisición de datos se realiza mediante una tarjeta National Instruments® modelo PCI-MIO-16E-1. Las características de la tarjeta son: 16 entradas analógicas sin referencia u 8 entradas diferenciales, resolución de 12 bits, frecuencia máxima de muestreo de 1.25 MHz, intervalo de ±10 V para entradas bipolares, y ancho de banda de 1.6 MHz. Cuenta con 2 canales de salida analógicos con voltaje de ±10V, y con 8 entradas/salidas digitales; la resolución del temporizador es de 24 bits.

Computadora personal. Los algoritmos del relevador virtual están residentes en una computadora personal con procesador Intel® Pentium II a 133 Mhz y 64 Mb de memoria RAM. Se utilizó la versión 4.0 de Labview® en Windows 95.

Modelo del sistema eléctrico de potencia. La representación del sistema eléctrico de potencia se realizó en tres variantes dependiendo del origen de las señales de entrada al relevador virtual: a) señal adquirida en tiempo real de un modelo físico del sistema eléctrico de potencia (Fig. 7.2), b) lectura de un archivo de datos con el registro de eventos generados o reales y, c) generación interna de la señal con controles virtuales.

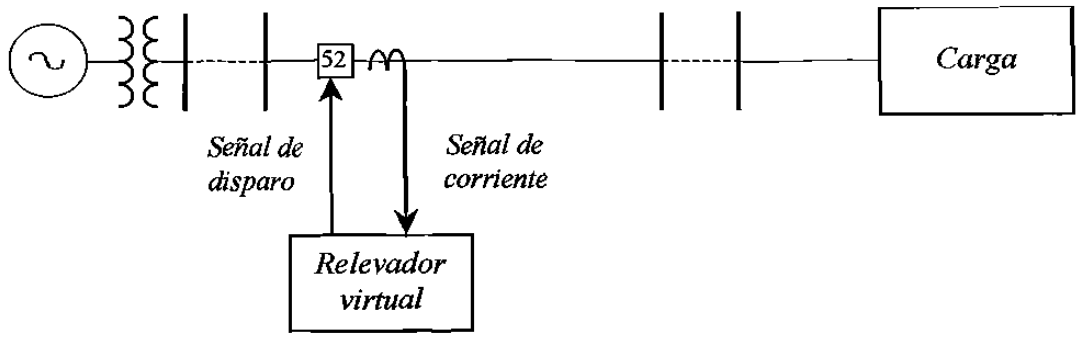

Fig. 7.2. Conexión del relevador virtual a un sistema radial.

En la Fig. 7.3 se presenta la estructura digital del relevador virtual. La señal de corriente del modelo del sistema eléctrico es obtenida a través de transformadores de corriente en el caso de adquisición real de la señal, a través de lectura de datos de archivo o generación interna mediante manipulación de controles internos. La adquisición de la señal es realizada por la tarjeta de adquisición a través de un proceso de multiplexión para tomar la lectura de los canales de adquisición definidos, posteriormente se realiza la conversión A/D de la señal. Para evitar el efecto del alliasing, la señal de corriente puede ser filtrada analógicamente o se puede aprovechar la alta frecuencia de muestreo disponible en la tarjeta de adquisición de datos para efectuar un sobremuestreo de la señal. Para la lectura de archivo de señal y generación interna se incluye un módulo opcional que emula el proceso de filtrado analógico. Dentro del ambiente

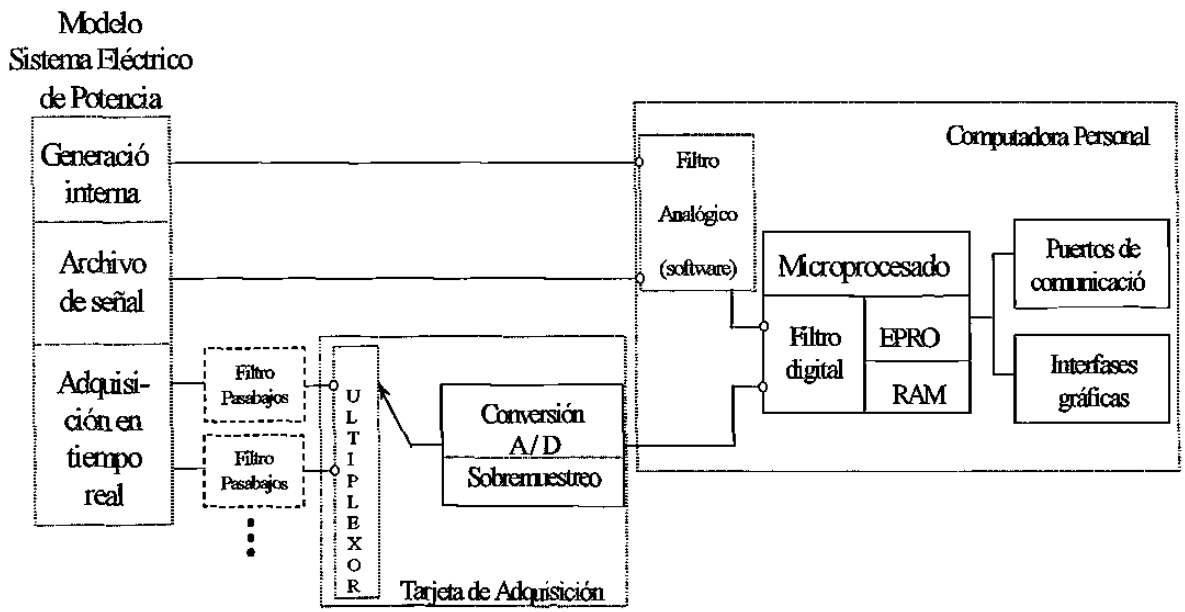

Fig. 7.3. Estructura digital del relevador virtual.

de programación del relevador virtual se realiza un proceso de filtrado digital de la señal muestreada para obtener su componente fundamental; se establecen los algoritmos del relevador virtual (memoria EPROM) y la capacidad de procesamiento de la información de entrada (microprocesador, memoria RAM); se disponen de las interfaces gráficas y los puertos de comunicación de la computadora como elementos de salida del relevador virtual. La señal de disparo del interruptor es efectuado a través de los canales de salida analógicos o digitales de la tarjeta de adquisición.

7.3 Programación del relevador

La programación del relevador fue realizada en Labview®. Este programa de desarrollo de aplicaciones utiliza un lenguaje de programación gráfico (lenguaje G) para crear programas en forma de diagramas de bloques. Los programas de Labview® son llamados *VI* (Instrumentos Virtuales), porque por su apariencia y operación pueden imitar instrumentos reales. Labview® incluye librerías de funciones de adquisición de datos, análisis de señales digitales, filtros, aproximación de curvas, probabilidad y estadística, álgebra lineal, operación con arreglos, métodos numéricos y funciones de comunicación entre otras. Estas cualidades resultan muy atractivas desde el punto de vista del análisis, diseño y prueba de algoritmos en tiempo real.

Las características mencionadas anteriormente hacen recomendable realizar la programación del relevador adaptivo de sobrecorriente en este ambiente computacional. La ventaja principal de la utilización de este programa es la posibilidad de manejar la adquisición en tiempo real señales de entrada y efectuar acciones de control.

7.4. Desarrollo del relevador virtual

El desarrollo del relevador adaptivo de sobrecorriente se realizó considerando la primera alternativa de adaptación descrita en la Sección 6.3.1. Se incluyeron los algoritmos descritos en los Capítulos IV y V para la adaptación de la corriente de arranque y el tiempo de operación respectivamente. También se incluyeron los algoritmos para la adaptación del elemento instantáneo del relevador y tolerancia a la carga de restablecimiento.

El diagrama de bloques del programa del relevador virtual se muestra en la Fig. 7.4. Consta de subrutinas de adquisición o generación de señales de entrada, de acondicionamiento y filtrado digital de señales, así como de protección y de salida.

La subrutina de adquisición de señales de entrada controla la adquisición de señales en tiempo real, realiza la conversión A/D a 960 Hz (16 muestras por ciclo) con un "buffer" de 40000 muestras. Se incluye también un módulo de pruebas con dos alternativas: a) Adquisición por medio de lectura de señales de archivos; esta opción permite extraer datos de archivos

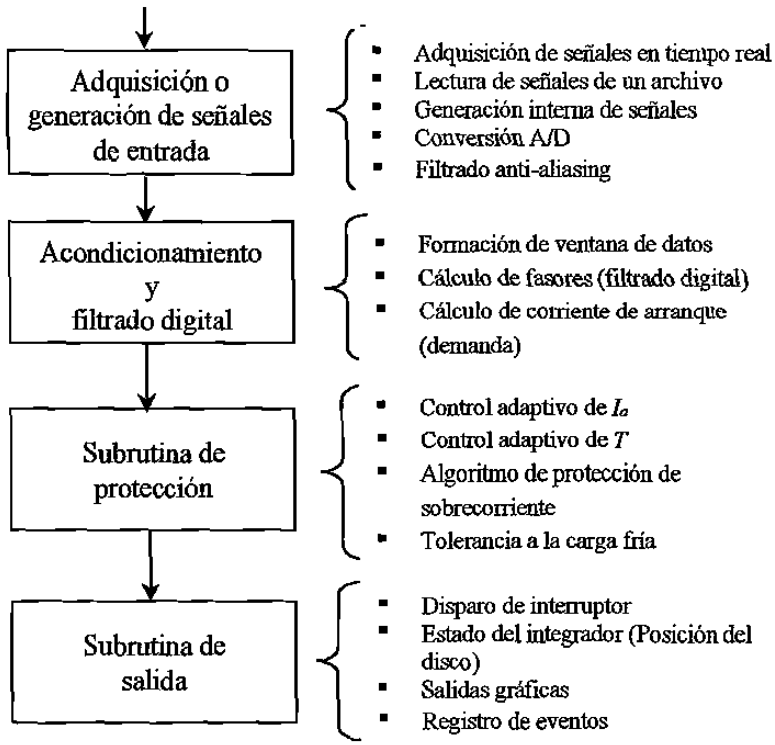

Fig. 7.4. Diagrama de bloques del programa.

externos en formato ASCII generados en programas de simulación (como el EMTP), o de archivos de datos de registros de fallas reales; b) Generación de señales internas; esta variante ofrece gran versatilidad para la simulación de diferentes estados operativos, variación de parámetros, procesamiento digital y contaminación de la señal con ruido. Se programó un filtro Butterworth con orden y frecuencia de corte ajustable para emular opcionalmente el efecto de un prefiltrado analógico de la señal.

En la subrutina de acondicionamiento y filtrado digital se realiza la formación de la ventana rectangular de datos de un ciclo de longitud, con 16 muestras por ciclo. Se realiza un filtrado digital de la señal para obtener el fasor correspondiente de la componente fundamental; este fasor representa el valor eficaz fundamental de la corriente que es suministrado al relevador digital. Esta consideración se establece debido a que durante el proceso electromagnético que se origina en un relevador se realiza un filtrado pasabajos de la señal, es decir, la señal de accionamiento del relevador electromecánico es predominantemente debido a la componente fundamental de la señal. Se desconoce el efecto en la operación del fusible ante la presencia de armónicas de la señal, por tanto este efecto es ignorado y se considera que su operación es debida con mayor influencia a la componente fundamental. El comportamiento en los restauradores es de forma muy similar al de los relevadores. Por último en esta subrutina se realiza el cálculo de la corriente de arranque (demanda) del relevador.

La subrutina de protección es la encargada de realizar el control de la corriente de arranque (Capítulo IV) y del tiempo de operación (Capítulo V) de la protección adaptiva. Se realiza el proceso de actualización del ajuste conforme al valor calculado de corriente de arranque (4.1) y el proceso de integración de la función $H(I_k)$ para determinar el tiempo de operación del relevador. En el Capítulo V se concluyó que la alternativa de adaptación de la función $J(I_k)$ presenta desventajas algorítmicas claras y por tanto no se utilizó en el relevador. La subrutina de tolerancia a la carga fría realiza un cambio temporal en el ajuste del relevador, se utilizan dos pasos de ajuste tanto en la magnitud de la corriente de arranque como en el tiempo de duración del ajuste.

La subrutina de salida realiza la emisión de la señal de disparo del relevador a través de un canal analógico de la tarjeta de adquisición. Se representa en forma gráfica el estado del integrador. Esta función es de utilidad en pruebas de coordinación con restauradores. Se cuenta con dos salidas gráficas: la señal de entrada al relevador, y el ajuste del relevador junto con la corriente de carga del sistema. También es posible almacenar la corriente de arranque del relevador y la corriente de carga del sistema en un archivo de datos (EXCEL®).

7.4.1 Panel frontal del relevador virtual

En la Fig. 7.5 se muestra el panel frontal de adquisición en tiempo real del relevador virtual; se compone de los siguientes subpaneles: **Adquisición de Señal**, **Corriente de Arranque**, **Lógica de Operación**, **Integrador**, **Característica Tiempo-Corriente**, **Elemento Instantáneo**, **Carga Fría**, **Señalización de Operación**, **Filtro Pasabajos**, **Registro** y **Salidas Gráficas**.

En el subpanel de **Adquisición de Señal** están los elementos de control y supervisión de los parámetros de adquisición. Se define el dispositivo (*device*) y el canal de adquisición utilizados (*channels*); la frecuencia de muestreo (*scan rate*), que establece la cantidad de muestras adquiridas en un segundo; se define una opción requerida para la configuración de los módulos de adquisición (*muestras / ciclo*); el "buffer" de muestras (*muestras*); por último se selecciona el tipo de acoplamiento de la señal y el tipo de medición utilizado (*coupling & input config*).

En el subpanel **Corriente de Arranque** están los indicadores del ajuste del relevador (*Ia*) y valor eficaz de la señal de entrada (*Irms*).

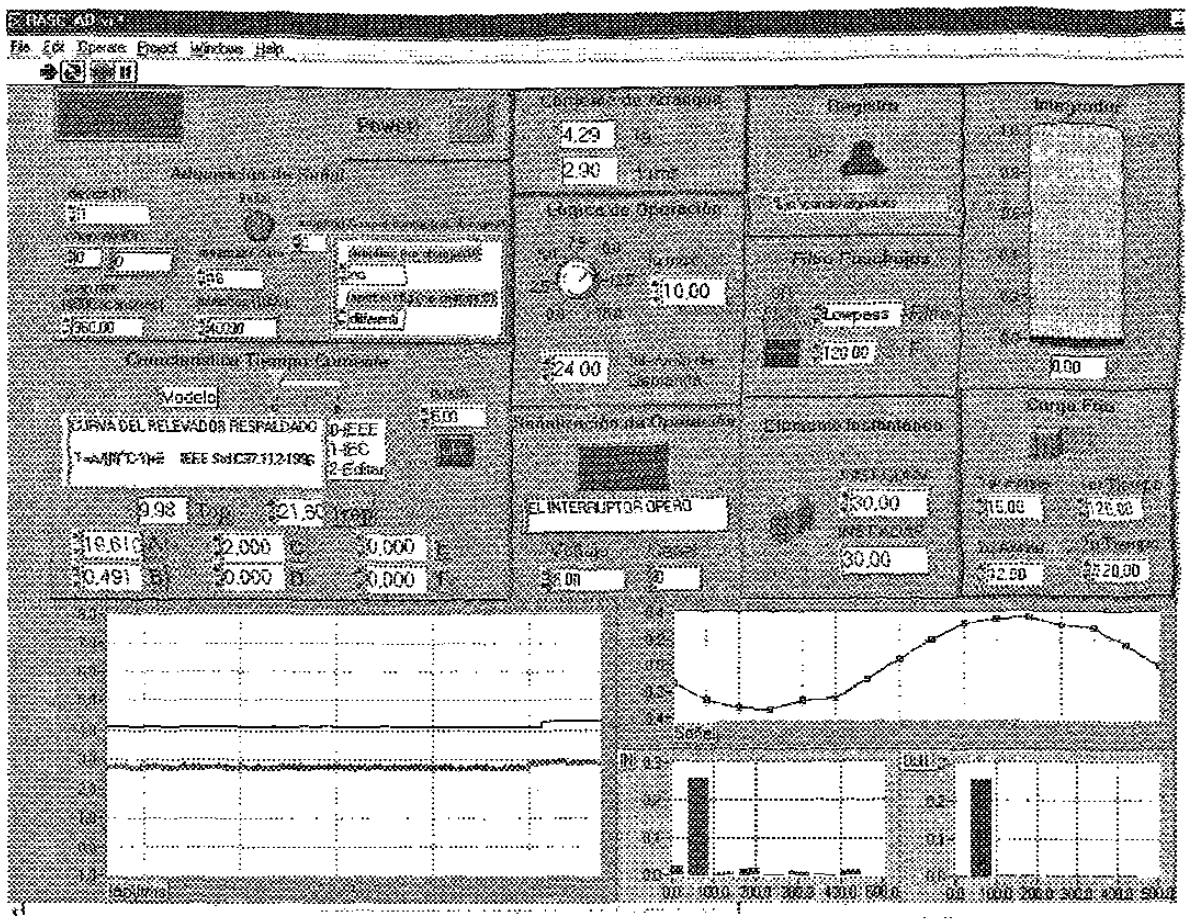

Fig. 7.5. Panel frontal de adquisición en tiempo real del relevador virtual.

En el subpanel **Lógica de Operación** se incluyen los controles para especificar el valor de arranque máximo permitido (*Ia max*) y el intervalo deseado para el cálculo de demanda (*Intervalo de Demanda*).

En el subpanel **Elemento Instantáneo** se ubica el control para la adaptación del elemento instantáneo del relevador adaptivo de sobrecorriente. Este incluye el control para el ajuste del elemento instantáneo del relevador convencional (*INST CONV*) y el indicador del valor de ajuste adaptivo (*INST ADAP*) dado por lógica de adaptación descrita en la Sección 4.7.

En el subpanel **Característica Tiempo-Corriente** se define la curva del dispositivo respaldado (*Modelo*). Se presentan tres alternativas: 1) curva según la norma IEEE [**13**]; 2) curva según la norma IEC [**20**]; 3) edición de cualquier característica de operación de

relevador, fusible o restaurador. Se incluyen seis controles para definir los coeficientes del modelo de ajuste seleccionado. Se tienen indicadores de tiempo de operación (*Top*) y tiempo de reposición (*Trep*). *Ia resp* define el ajuste de la corriente de arranque del dispositivo respaldado; este valor es utilizado para calcular el tiempo de operación del dispositivo de protección respaldado y determinar el tiempo de operación del relevador adaptivo. Si la corriente de cortocircuito es menor al valor definido en *Ia resp*, se incluye un botón de control para definir si se quiere que el relevador adaptivo (en dependencia de las condiciones del sistema) sea más sensible que el dispositivo respaldado (*on*) o no (*off*), según lo descrito en la Sección 6.6.4.

El subpanel de **Carga Fría** activa en forma temporal dos niveles de ajuste para la tolerancia al restablecimiento de carga, tanto en la magnitud de la corriente de ajuste (*Ajuste*) como en el tiempo de vigencia de este ajuste transitorio (*Tiempo*). La lógica solo permite la activación de estos ajustes después de un estado desenergizado de la línea, durante un estado normal de carga o estado de falla, la lógica de carga fría es deshabilitada automáticamente.

En el indicador de nivel del subpanel **Integrador** se simula el recorrido del disco de inducción de un relevador electromecánico; el valor de integración es normalizado a la unidad e incluye tanto la zona de operación como la zona de reposición.

En el subpanel **Filtro Pasabajos** se define el tipo de filtro Butterworth (*Filtro*), y la frecuencia de corte (*Fc*). Este filtro emula el efecto de un filtro analógico en la señal adquirida.

En el subpanel **Señalización de Operación** se tienen indicadores luminosos y textuales alusivos a la operación del relevador, también se indica el *Canal* y el *Voltaje* de salida de la tarjeta de adquisición hacia el circuito de disparo del interruptor.

El subpanel **Registro** activa un modo de registro de las señales de entrada y salida. Los valores registrados son el valor eficaz de la corriente de carga del sistema y el valor de ajuste

de la corriente de arranque del relevador obtenida de la lógica adaptiva descrita en el Capítulo IV. Los archivos son generados en formato de EXCEL®.

En el subpanel **Salidas Gráficas** se incluyen las siguientes salidas gráficas; la corriente de arranque del relevador (*Iap*) y el fasor fundamental de la corriente de entrada al relevador (*Irms*). La forma de onda de la señal (*Señal*) anterior al filtrado de la señal, el espectro de frecuencias en la etapa de prefiltrado (*IN*) y postfiltrado (*OUT*).

En la Fig. 7.6 se muestra el panel frontal de lectura y simulación interna del relevador virtual; se compone de los siguientes subpaneles: **Tipo de Prueba**, **Archivo de Señal**, **Corriente de Arranque**, **Lógica de Operación**, **Integrador**, **Característica Tiempo-Corriente**, **Elemento Instantáneo**, **Carga Fría**, **Control de Señal**, **Control de Falla**, **Registro** y **Salida Gráfica**.

En el subpanel **Tipo de Prueba** se realiza la selección entre la simulación interna de la señal o archivo de señal; para este último caso las especificaciones están incluidas en el subpanel **Archivo de Señal**. En este subpanel se especifican las características del vector de señal de archivo de entrada, se especifica la muestra de *inicio de lectura* y el *número de renglones* en caso de que la señal de entrada sea una matriz. Para la alternativa de generación interna de la señal, se cuenta con el subpanel **Control de Señal**, que incluye los controles para modificar la frecuencia fundamental (*F Hz*), el número de muestras por ciclo (*muestras/ciclo*), la frecuencia de muestreo (*F muestreo*), y agregar componentes de *CD* y *Ruido Blanco* a la señal (Fig. 7.6).

En el subpanel **Control de Falla** se controla la magnitud de la corriente de falla como múltiplo del valor nominal de la corriente en estado estable (*Múltiplo Inom*). Se pueden agregar dos tipos de ruido a la señal, *ruido blanco* y *ruido periódico*.

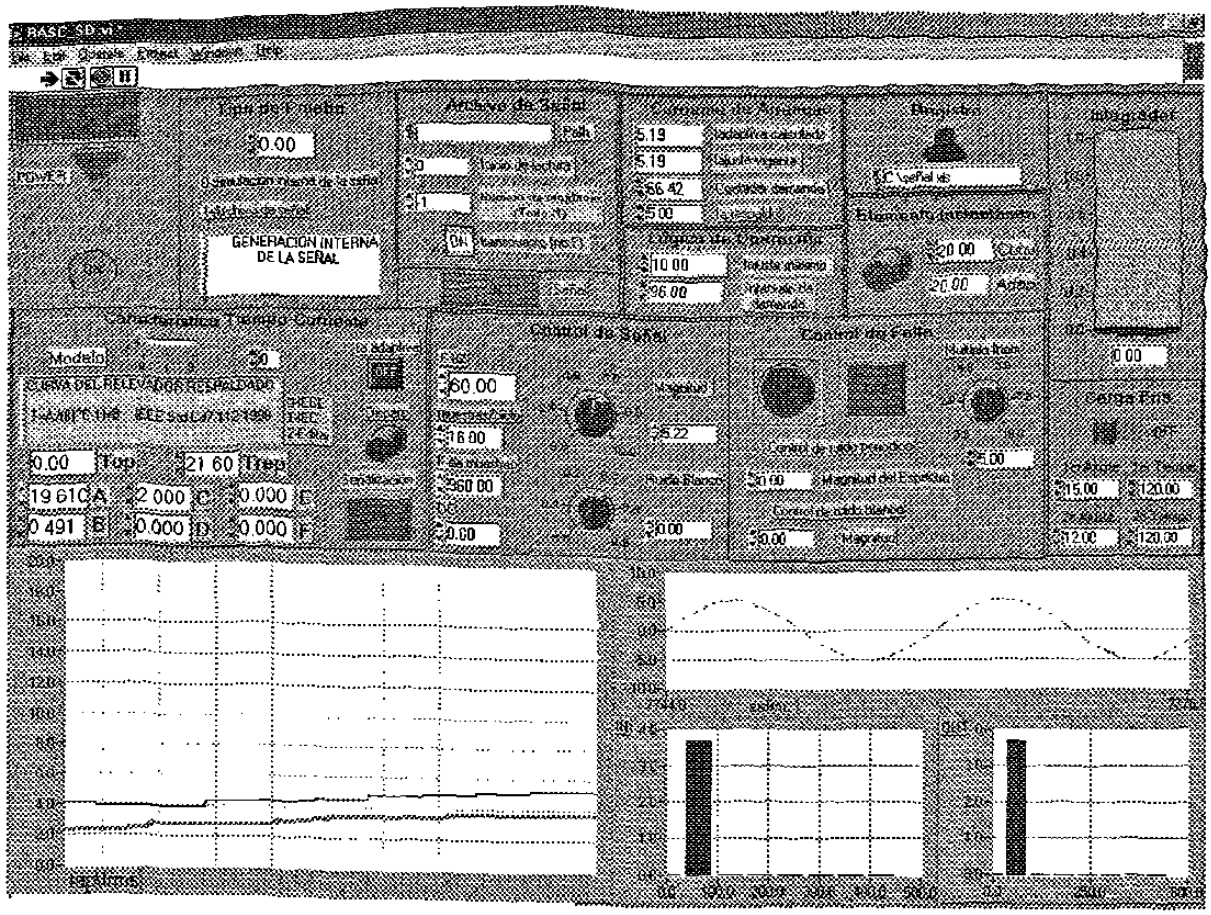

Fig. 7.6. Panel frontal de lectura y simulación interna del relevador virtual..

En el subpanel de **Corriente de Arranque** están los indicadores de los valores de la corriente de arranque calculada por el relevador virtual (*Iadaptiva calculada*), el valor vigente de la corriente de arranque (*Iajuste vigente*) diferente al valor calculado cuando se activa alguna restricción, así como los controles del contador de demanda y el ajuste del dispositivo respaldado (*Ia respaldo*).

En el subpanel **Lógica de Operación** se incluyen los controles del valor de ajuste máximo permitido *Iajuste máximo* y el *intervalo de demanda* deseado; estos valores son programados por omisión y no son definidos por el usuario en primera instancia.

El subpanel de **Característica Tiempo-Corriente** tiene las mismas funciones que el panel de adquisición de señal (Fig. 7.5). Se adiciona un control de *Disparo* para simular la apertura del interruptor de potencia (los valores de señal se reducen a cero).

En el subpanel **Registro** se tiene un control que permite iniciar el proceso de grabación de la corriente de entrada y de la corriente de ajuste del relevador. Estos valores son también presentados en forma gráfica. Las salidas gráficas son las mismas descritas en la Fig. 7.5.

Aunque en esta versión de prueba del relevador virtual se muestran controles para definir parámetros de ajuste, estos valores se programaron por omisión. En el panel de adquisición mostrado en la Fig. 7.5 el usuario no requiere definir ningún parámetro de ajuste a menos que así lo requiera. En el panel de simulación mostrado en la Fig. 7.6 el usuario define únicamente los parámetros relacionados con la prueba que se establezca. Para la versión final en *hardware* el relevador adaptivo no requerirá de ningún ajuste. Será factible realizar cambios en la configuración por omisión del relevador a criterio del usuario. Para las alternativas de diseño presentadas en este trabajo, así como para la versión final en hardware, la adaptación del relevador ante operaciones cambiantes en estado estable (por ejemplo: incremento de carga, cambios en la topología del sistema eléctrico) es automática.

7.5 Pruebas de laboratorio

El objetivo de las pruebas de laboratorio fue la evaluación de los algoritmos de protección para el control adaptivo de la corriente de arranque (Capítulo IV) y para la adaptación del tiempo de operación (Capítulo V) del relevador de sobrecorriente. Las pruebas efectuadas se enfocaron únicamente a la evaluación y validación de los algoritmos adaptivos de protección propuestos. Dada la plataforma disponible no se pretende evaluar al relevador virtual para ejecutar acciones de disparo sobre el sistema eléctrico de potencia. Por limitaciones del equipo de laboratorio las pruebas se realizaron únicamente con relevadores de sobrecorriente. Se utilizaron relevadores de sobrecorriente electromecánicos y digitales para pruebas de coordinación (corriente y tiempo) con el relevador adaptivo.

Se evaluó el algoritmo del relevador adaptivo ante tres tipos de señales de entrada, la primera con señales adquiridas en tiempo real del módulo físico del sistema eléctrico de

potencia, la segunda con datos de señales en archivo generadas en Matlab® y EMTP, y por último se realizaron las pruebas con señales generadas internamente.

7.6 Adquisición de señales en tiempo real (tiempo de operación)

La adquisición de señales fue realizada en un modelo físico de un sistema eléctrico de potencia. El objetivo de las pruebas fue evaluar el comportamiento de los algoritmos del relevador ante señales reales adquiridas.

Para la representación física del sistema eléctrico de potencia se utilizó una fuente equivalente monofásica de voltaje de Labvolt® con 120/240V y 30A máximos. Se utilizaron dos segmentos de cables 10 AWG para simular las líneas de distribución e interconectar la fuente equivalente y la carga (Fig. 7.7). La carga del sistema se representó con una resistencia monofásica variable GE con capacidad de 0-20 amp y 100 V de alimentación. Los parámetros del sistema se indican en el diagrama unifilar mostrado en la Fig. 7.7.

La corriente en estado estable y de falla se obtuvo variando la resistencia de carga. Todas las fallas se consideran en C. En todos los casos se consideró un perfil plano de voltaje. No se dispuso de transductores de corriente con la capacidad suficiente requerida para las pruebas; en lugar de transductores de corriente se utilizó la diferencia de potencial presente en un segmento de cable, como indicativo lineal del nivel de corriente circulante en el circuito. Las pruebas se realizaron considerando el relevador adaptivo de sobrecorriente

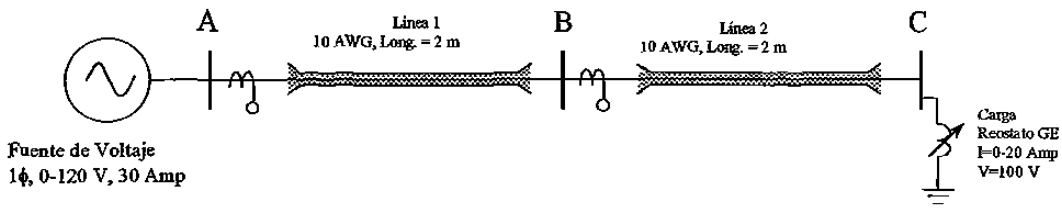

Fig. 7.7. Modelo físico del sistema eléctrico de potencia.

ubicado en A de la Fig. 7.7 efectuando funciones de respaldo a un relevador electromecánico y un relevador digital ubicado en B.

En estas pruebas se evalúa todo el proceso de adquisición y conversión análogo-digital de la señal de entrada al relevador, así como la lógica de control de I_a y la adaptación del tiempo de operación del relevador. Para validar la adaptación del tiempo de operación del relevador adaptivo se consideran corrientes de falla constante, y se verifica el intervalo de coordinación entre el relevador adaptivo y los relevadores convencionales. Los resultados se presentan en forma gráfica en una escala bilogarítmica tiempo - corriente. Debido al retardo en el procesamiento de las señales adquiridas en tiempo real no se presentan las pruebas con corriente de falla variable. La validación de la lógica de control de la corriente de arranque se verifica simulando una secuencia de eventos de la corriente de carga. Se establecen las diferencias cuantitativas de las corrientes de arranque de los tres tipos de relevadores analizados en el Capítulo VI.

7.6.1 Corrientes de falla constante (verificación del tiempo de operación)

Las pruebas para corriente de falla constante consisten en la comparación del tiempo de operación de cada relevador de sobrecorriente (adaptivo, electromecánico y digital) para un valor constante de corriente de falla. El relevador adaptivo cumple funciones de respaldo según la Fig. 7.7, cuando tiene un tiempo de operación ΔT (0.3 segundos) mayor que los otros relevadores para cualquier valor de corriente de falla, esto garantiza una coordinación automática entre estos relevadores para cada valor constante de corriente de falla.

La primer prueba se realizó entre un relevador electromecánico de sobrecorriente respaldado por el relevador adaptivo. En la Fig. 7.8 se presenta la curva del relevador electromecánico dada por el fabricante [61]. Se tomaron 10 parejas de valores tiempo-corriente de la curva con palanca de tiempo 5; los valores de corriente se definieron con espaciamiento uniforme según se propone en [56]. Un intervalo de 2.7 fue establecido del múltiplo 2 hasta el 20.

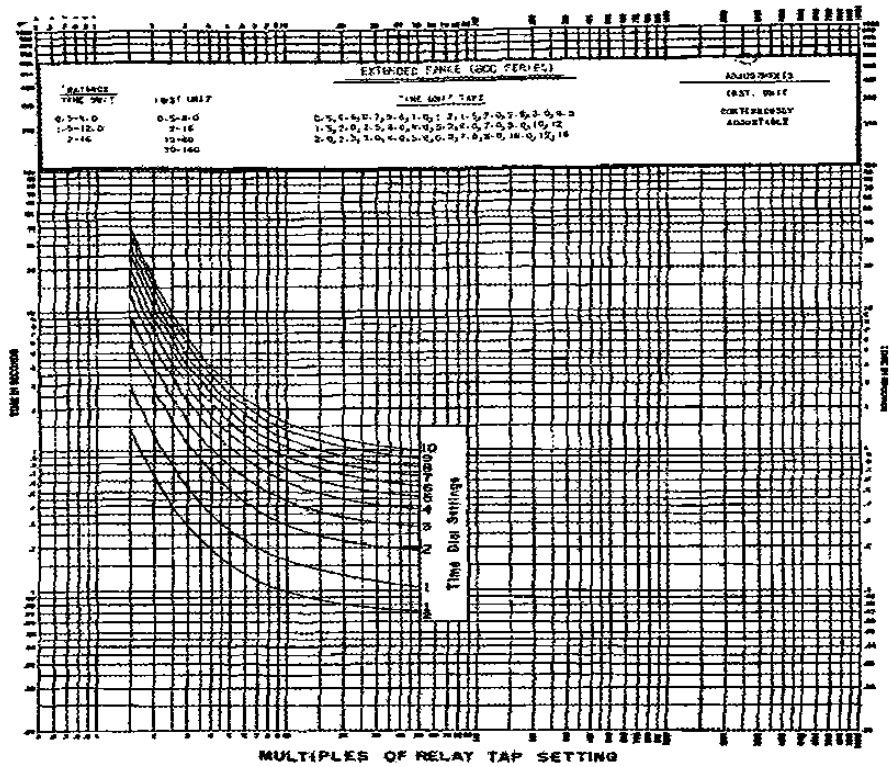

Fig. 7.8. Curva tiempo-corriente para relevadores tipo IAC con característica muy inversa.

Se utilizó el programa de ajuste de curvas propuesto en el Capítulo V para la obtención de la expresión analítica de la característica de operación del relevador. Las parejas de valores introducidos al programa fueron tomados directamente de la Fig. 7.8. En la Tabla 7.1 se muestran los valores tiempo – corriente seleccionados.

Tabla 7.1. Valores introducidos al programa de ajuste, curva palanca 5 (Fig. 7.8).

	I	T		I	T
1)	2.15	16.3	7)	16.5	0.68
2)	3	6.36	8)	19.2	0.64
3)	5.7	1.86	9)	21.9	0.6
4)	8.4	1.14	10)	24.6	0.57
5)	11.1	0.9	11)	27.3	0.55
6)	13.8	0.75	12)	30	0.54

La expresión analítica obtenida del programa con menor error fue la ecuación polinomial de la forma [44]:

$$T = A_0 + \frac{A_1}{(I-1)} + \frac{A_2}{(I-1)^2} + \frac{A_3}{(I-1)^3} + \frac{A_4}{(I-1)^4} + \cdots$$

Y los coeficientes fueron:

A_0= 0.39825200918131 A_2= 11.04277679324150 A_4= -52.60081458091736
A_1= 3.60116781108081 A_3= 30.11577248573303 A_5= 29.55377423763275

Se validaron los tiempos resultantes obtenidos por la expresión analítica y físicamente del relevador. El tiempo de operación del relevador electromecánico fue tomado directamente con cronómetro en mano, se tomaron cuatro muestras para cada valor de corriente de falla. Los tiempos de operación no fueron similares (Tabla 7.2) debido probablemente a un problema de calibración del relevador electromecánico ya que este fue tomado de bodega con un tiempo largo sin servicio.

Tabla 7.2. Comparación de tiempos de operación para el relevador electromecánico.

I_{cc}	Tiempo de operación		
	Medido		Expresión analítica
3.18	6.26	6.25	5.55
	6.28	6.28	
4.12	3.69	3.69	3.22
	3.73	3.70	
5.10	2.47	2.58	2.20
	2.55	2.60	
6.44	1.71	1.80	1.56
	1.74	1.78	
8.23	1.32	1.34	1.16
	1.28	1.30	
10	1.05	1.08	0.96
	1.08	1.09	
11.9	0.99	1.00	0.84
	0.97	1.01	
13.9	0.88	0.91	0.75
	0.94	0.89	
14.7	0.90	0.89	0.72
	0.88	0.85	
15.7	0.79	0.89	0.695
	0.77	0.83	

Se tomaron los valores de tiempo de operación directamente del relevador para realizar el ajuste de curvas. Se toma como válido el valor promedio de la muestra obtenida, se descarta el valor mayor y menor, y se promedian los dos valores restantes. Con estos valores se realiza el ajuste de curvas para obtener la expresión analítica que corresponda a estos valores (Tabla 7.3).

Tabla 7.3. Valores corregidos introducidos al programa de ajuste.

	I	T		I	T
1)	3.18	6.26	6)	10	1.08
2)	4.12	3.69	7)	11.9	1.0
3)	5.10	2.56	8)	13.9	0.9
4)	6.44	1.75	9)	14.7	0.88
5)	8.23	1.31	10)	16.4	0.81

La expresión analítica obtenida del programa con menor error fue la ecuación polinomial de la forma:

$$T = A_0 + \frac{A_1}{(\log I)} + \frac{A_2}{(\log I)^2} + \frac{A_3}{(\log I)^3} + \frac{A_4}{(\log I)^4} + \cdots$$

Y los coeficientes fueron:

$A_0 =$ -37.60884046555 $A_2 =$ -1342.03836321831 $A_4 =$ -2098.37408494949
$A_1 =$ 362.41678184271 $A_3 =$ 2418.57128095627 $A_5 =$ 710.27802491188

El resultado gráfico del ajuste se presenta en la Fig. 7.9.

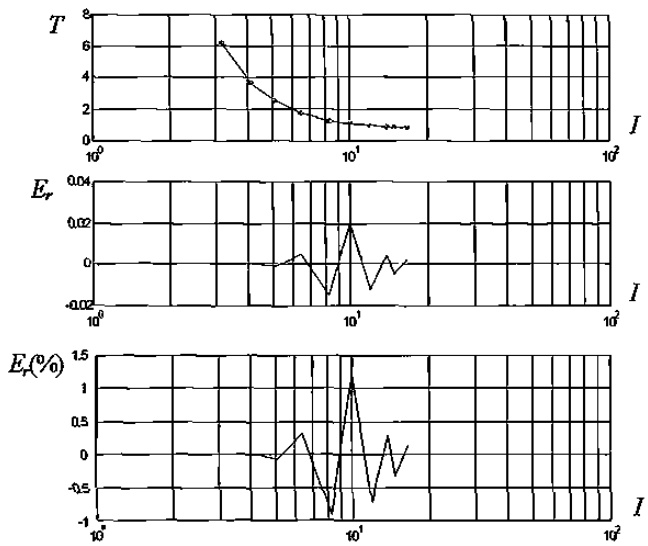

Fig. 7.9. Resultado gráfico del mejor ajuste.

En la Tabla 7.4 se presenta la validación de la expresión obtenida para los valores de entrada; se obtiene la desviación para los valores exactos de los coeficientes, así como los valores redondeados a tres y un decimal de exactitud. Se observa que el error debido al redondeo de los valores de los coeficientes a tres decimales es mínimo, no así para el redondeo a un decimal. Por tanto, para estas pruebas se utilizan coeficientes con tres decimales de exactitud.

Tabla 7.4. Validación de expresión analítica con redondeo en los coeficientes.

Datos de entrada		Validación de la expresión analítica		
I	T	Sin Redondeo	Redondeo a tres decimales	Redondeo a un decimal
3.18	6.26	6.259	6.260	6.297
4.12	3.69	3.690	3.690	3.713
5.10	2.56	2.558	2.559	2.576
6.44	1.75	1.755	1.755	1.769
8.23	1.31	1.295	1.295	1.306
10.00	1.08	1.100	1.100	1.110
11.9	1.00	0.988	0.988	0.997
13.9	0.90	0.904	0.905	0.914
14.7	0.88	0.874	0.875	0.883
16.4	0.81	0.812	0.813	0.821

Considerando el redondeo a tres decimales la expresión analítica queda de la forma:

$$T = -37.608 + \frac{362.416}{(\log I)} - \frac{1342.038}{(\log I)^2} + \frac{2418.571}{(\log I)^3} - \frac{2098.374}{(\log I)^4} + \frac{710.278}{(\log I)^5}$$

En la Fig. 7.10 se ilustra una muestra de la señal adquirida en el laboratorio. El ruido en la señal es aleatorio y presente en la toma de energía ubicado en el laboratorio de pruebas. En el espectro de frecuencias mostrado en la Fig. 7.5, en la gráfica *IN* se observa el contenido frecuencial presente en la señal adquirida, además del contenido armónico de la señal, su amplitud es variable y aleatoria.

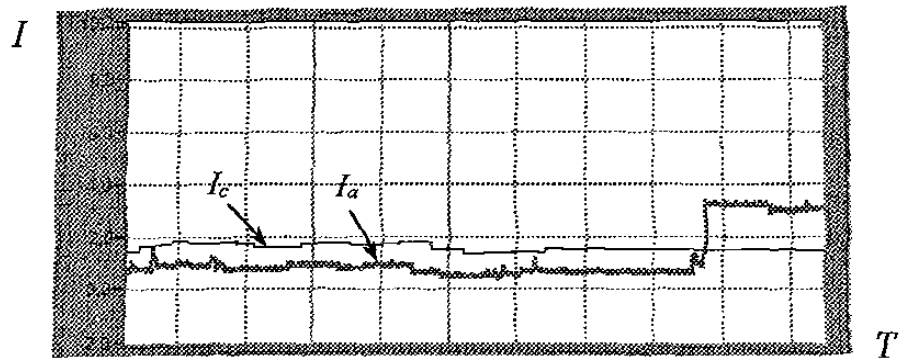

Fig. 7.10. Forma de la señal de prueba.

Debido a lo anterior se tomaron cuatro muestras para cada valor de corriente de falla, y se realizó el mismo procedimiento que en el relevador electromecánico para determinar el valor promedio. En la Tabla 7.5 se muestran los valores registrados en el relevador virtual. Para efectos de comparación se muestran los tiempos calculados del relevador electromecánico (Tabla 7.2) y los tiempos calculados por la expresión analítica resultante. Se observa que a pesar del ruido presente en la señal de prueba, el tiempo resultante de la solución de la expresión analítica es muy similar al tiempo medido en el relevador electromecánico. Este resultado valida la expresión analítica obtenida del programa de ajuste propuesto en la presente tesis; la integración de esta expresión emula la operación del relevador electromecánico para corriente de falla constante y variable. Debido a la naturaleza aleatoria de la señal adquirida, el tiempo de operación del relevadores electromecánico y la expresión analítica tienen un pequeño margen de variación.

Los tiempos de operación promedio del relevador virtual y el relevador electromecánico, así como el intervalo de tiempo son mostrados en la Tabla 7.6. El intervalo de tiempo es muy cercano al tiempo definido como intervalo de coordinación (0.3 segundos). Las variaciones observadas son debidas al ruido presente en la señal de prueba. Aunque la prueba es considerada como corriente constante, realmente presenta un dinámica limitada debida al ruido presente en la señal; los relevadores realizan la integración de esta señal variable para determinar el tiempo de operación real. Se observa que para valores bajos de corriente, el carácter aleatorio afecta en mayor medida que para valores de corriente mayores donde el intervalo es muy cercano a 0.30 segundos.

Tabla 7.5. Tiempos de operación medidos del relevador electromecánico, relevador virtual y expresión analítica de ajuste.

I_{cc}	Tiempo de operación				
	Relevador Virtual		Relevador* Electromecánico		Expresión analítica
3.18	6.45	6.60	6.26	6.25	6.259
	6.68	6.67	6.28	6.28	
4.12	4.0	3.91	3.69	3.69	3.690
	4.10	3.98	3.73	3.70	
5.10	2.93	2.93	2.47	2.58	2.558
	2.95	2.88	2.55	2.60	
6.44	2.08	2.15	1.71	1.80	1.755
	2.15	2.12	1.74	1.78	
8.23	1.62	1.62	1.32	1.34	1.295
	1.60	1.58	1.28	1.30	
10	1.42	1.40	1.05	1.08	1.100
	1.40	1.43	1.08	1.09	
11.9	1.32	1.33	0.99	1.00	0.988
	1.30	1.30	0.97	1.01	
13.9	1.22	1.22	0.88	0.91	0.904
	1.22	1.22	0.94	0.89	
14.7	1.18	1.18	0.90	0.89	0.874
	1.20	1.18	0.88	0.85	
15.7	1.15	1.15	0.79	0.89	0.838
	1.13	1.13	0.77	0.83	

*Valores mostrados en Tabla 7.2.

Tabla 7.6. Tiempos de operación promedio e intervalo de coordinación.

I_{cc}	Tiempo de operación		
	Relevador Virtual	Relevador Electromecánico	Δt
3.18	6.63	6.26	0.37
4.12	3.99	3.69	0.30
5.10	2.93	2.56	0.37
6.44	2.13	1.75	0.38
8.23	1.61	1.31	0.30
10.0	1.41	1.08	0.33
11.9	1.31	1.00	0.31
13.9	1.22	0.9	0.32
14.7	1.18	0.88	0.30
15.7	1.14	0.81	0.33

En la Fig. 7.11 se representa en forma gráfica los resultados mostrados en la Tabla 7.6. Se presentan los valores tiempo-corriente obtenidos en un plano bilogarítmico del relevador electromecánico y del relevador adaptivo. Se observa que el intervalo de coordinación es conservado, garantizando así una coordinación automática entre estos dos relevadores.

La prueba anterior también se realizó entre un relevador digital de sobrecorriente y el relevador adaptivo. La curva definida en el relevador digital fue **[62]**:

$$T = \frac{0.052}{I^{0.02} - 1} + 0.113$$

En la Fig. 7.12 se presenta la familia de curvas definida por el fabricante **[62]**, se utilizó la palanca de tiempo 5. Para esta prueba no fue necesario realizar el ajuste de curvas ya que la expresión analítica del relevador digital es introducida como dato en el relevador adaptivo. En la Fig. 7.13 se muestra la programación de ajustes definida en el relevador digital.

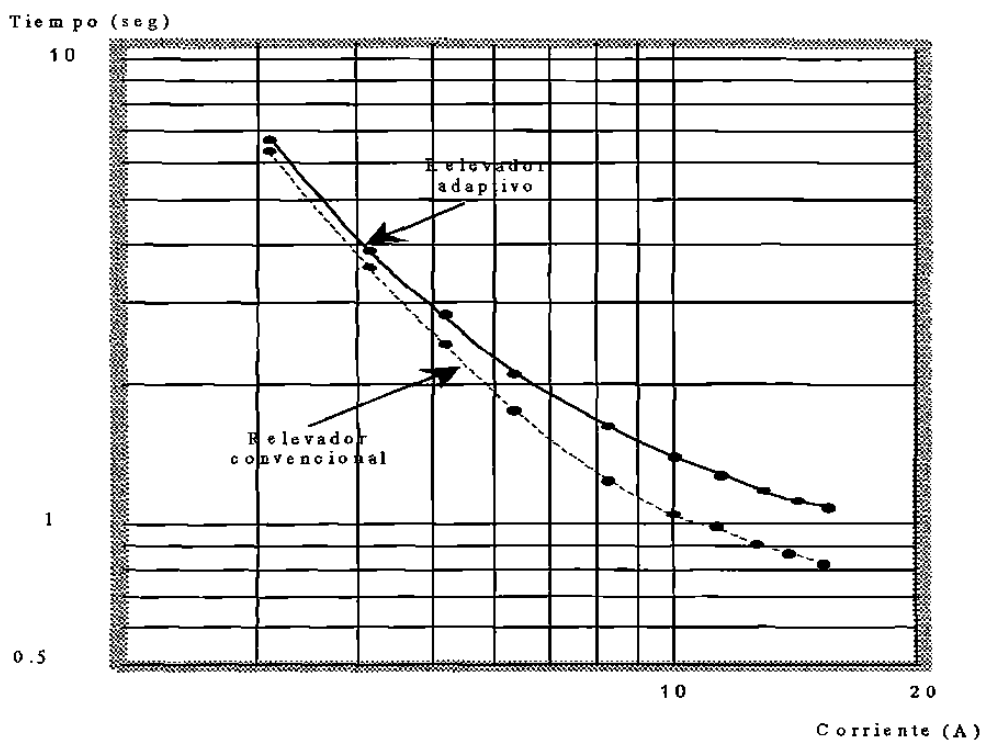

Fig. 7.11. Características de operación de los relevadores electromecánico y virtual obtenidas en pruebas de laboratorio (resultados de la Tabla 7.6).

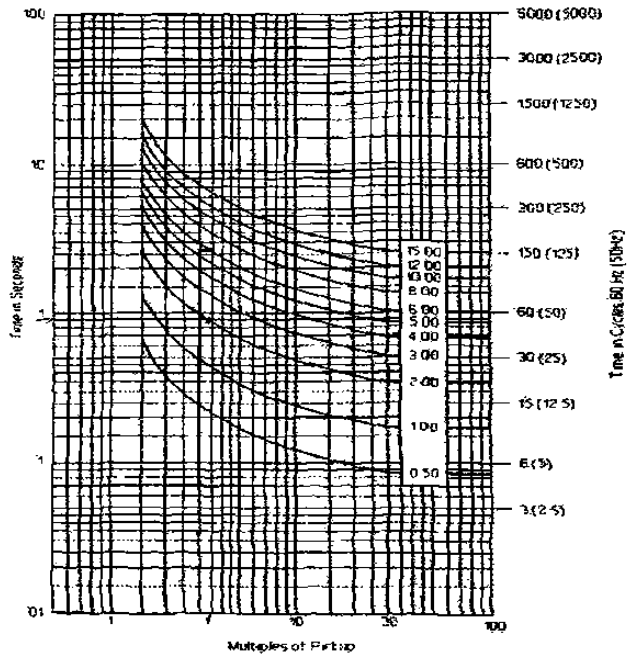

Fig. 7.12. Familia de curvas tiempo corriente del relevador digital, curva moderadamente inversa U1.

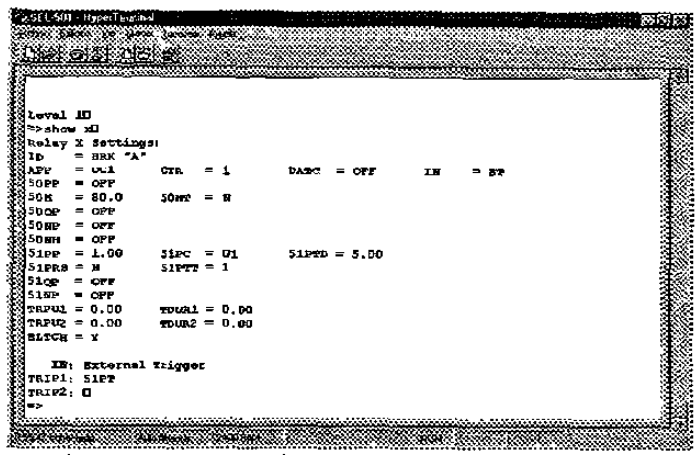

Fig. 7.13. Programación de ajustes del relevador digital.

En la Tabla 7.7 se muestran los resultados obtenidos de los tiempos de operación del relevador virtual y digital. La señal de prueba presento las mismas características de la señal mostrada en la Fig. 7.10, por lo que el tiempo dado por la solución de la expresión analítica no coincide con el tiempo de operación obtenido. Similar a los resultados de las pruebas con el relevador electromecánico, el carácter aleatorio de la señal afecta en mayor medida para magnitudes reducidas de corriente. En la Fig. 7.14 se presenta los resultados en forma gráfica.

Tabla 7.7. Tiempos de operación promedio e intervalo de coordinación.

I_{cc}	Tiempo de operación			
	Relevador Virtual	Relevador Digital		Δt
		medido	analítico	
3.1	2.63	2.25	2.38	0.38
4.1	2.20	1.87	1.92	0.33
5.1	2.0	1.65	1.68	0.35
6.4	1.80	1.45	1.48	0.35
8.2	1.65	1.29	1.32	0.36
10.0	1.52	1.19	1.21	0.33
11.9	1.45	1.11	1.13	0.34
13.6	1.40	1.05	1.08	0.35
14.5	1.37	1.04	1.05	0.33
15.5	1.35	1.02	1.03	0.33

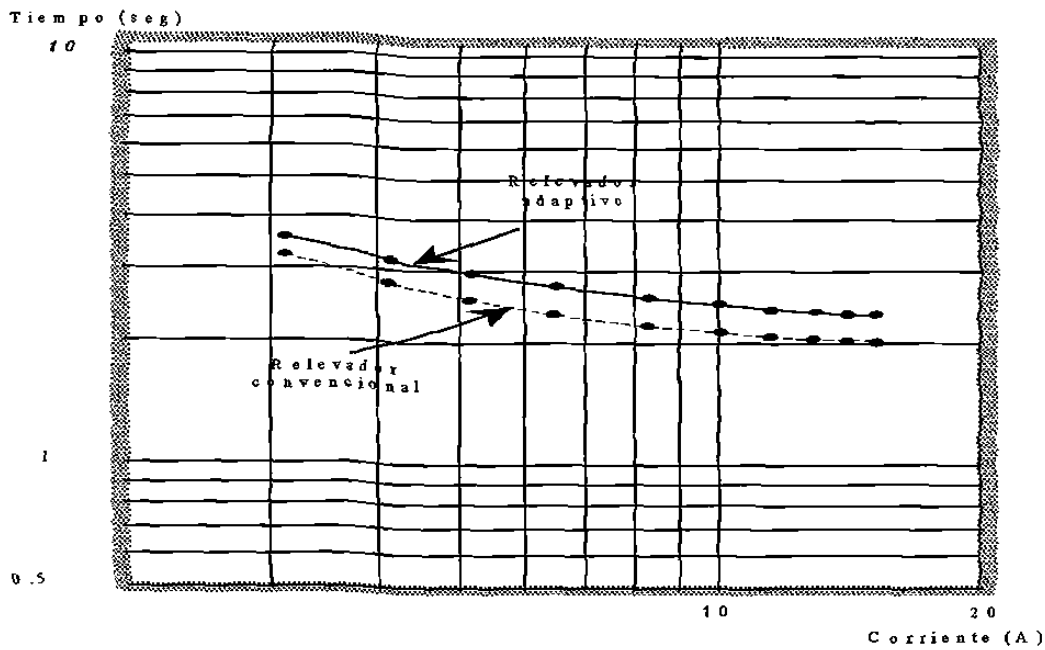

Fig. 7.14. Características de operación de los relevadores digital y virtual obtenidas en pruebas de laboratorio (resultados de la Tabla 7.7).

7.6.2 Secuencias de operación (verificación de sensibilidad)

El objetivo de la prueba de sensibilidad es realizar una comparación cuantitativa entre los ajustes de corriente de arranque para relevadores convencionales, de secuencia negativa y adaptivos. La sensibilidad de los relevadores se verifica efectuando funciones de respaldo a otro relevador. El modelo físico del sistema eléctrico utilizado para las pruebas de sensibilidad es el mismo descrito en la Fig. 7.7. Se agregó una carga en B para emular la

contribución del sistema a otros alimentadores. Las condiciones operativas del sistema son mostradas en la Fig. 7.15. Se muestran los ajustes del relevador respaldado n-1 y las magnitudes máximas de corriente en líneas y cargas.

Los ajustes de los relevadores convencional y de secuencia negativa ubicados en el bus A (relevador n) son:

Relevador Convencional	Relevador de secuencia negativa
$I^{n}_{a_c} = 1.5\, I_{c\,máx}$	$I^{n}_{a_{(-)}} = 1.2\, I^{n-1}_{a}$
=(1.5)(8.33)=12.5 A	= (1.2)(7.5)= 9 A

El ajuste mínimo del relevador convencional de sobrecorriente ubicado en el bus A dadas las condiciones de carga es constante e igual a 12.5A. Durante toda la secuencia del evento los relevadores convencionales ubicados en el bus A y B no tendrán la sensibilidad suficiente para detectar corrientes de falla menores a este valor; el relevador B para protección primaria y el relevador A como protección de respaldo. El ajuste de un relevador de secuencia negativa según [**59**], tendrá los mismos problemas de sensibilidad para la detección de fallas de magnitud de corriente menores a 9 A. Estos problemas de sensibilidad son originados por los compromisos de coordinación al evitar que el relevador de secuencia negativa sea más sensible que el relevador convencional, provocando un cruce de curvas y la pérdida de coordinación.

Se realizaron pruebas de adquisición ante señales con secuencias de operación de energización, falla y disparo. En la Fig. 7.16 puede observarse que inicialmente la línea está

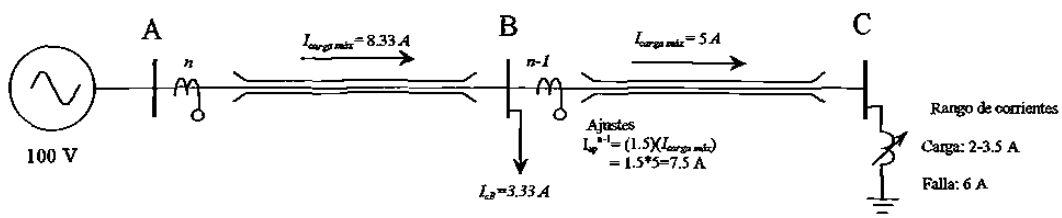

Fig. 7.15. Modelo físico del sistema eléctrico de potencia.

abierta (I_c=0), y la corriente de arranque I_a está fija en su valor máximo (I_a=$I_{a\ máx}$), que en este caso es 12.5 A. Al cerrarse el interruptor, aparece una valor variable de I_c, y se inicia la flotación de I_a sobre I_c. Después ocurre un cortocircuito bifásico de 6 A, a través de impedancia de falla entre fases. Este cortocircuito de acuerdo con los valores de ajuste de la corriente de carga calculados, no es detectado por la protección primaria (relevador n-1), ni por los relevadores de respaldo en n (relevador convencionales y relevador de secuencia negativa). Este cortocircuito es detectado y eliminado por el relevador adaptivo n. El valor de I_a es el correspondiente al período anterior de cálculo de demanda, permaneciendo constante; posteriormente, al reducirse la corriente de cortocircuito el valor de I_a es ajustado a su valor máximo de 12.5 A.

El incremento de I_a está limitado al valor de $I_{a\ máx}$ por la lógica del relevador. Este valor es igual a la intensidad de arranque de un relevador convencional. Esto implica que lo más que se va a insensibilizar el relevador durante el intervalo de demanda siguiente a la falta es al nivel de sensibilidad de un relevador convencional. El relevador adaptivo para este evento tendrá una corriente de arranque más sensible que el relevador convencional n-1, de acuerdo con lo descrito en la Sección 6.6.4 es conveniente permitir la pérdida de selectividad para que el relevador adaptivo opere para la falla en el bus C. El relevador adaptivo operará con la característica de operación igual a la asignada al relevador n-1, pero con la I_a calculada por el propio relevador adaptivo, permitiendo así la operación del relevador para la falla en C.

En la gráfica mostrada en la Fig. 7.17a se muestra porcentaje del incremento de sensibilidad del relevador adaptivo y de secuencia negativa con respecto al relevador convencional. Para el estado desenergizado el relevador convencional y el adaptivo tienen la misma sensibilidad, cuando se energiza la línea la sensibilidad del relevador adaptivo es claramente superior al relevador convencional y al relevador de secuencia negativa, presentando la máxima sensibilidad durante la falla para el ejemplo analizado. El relevador de secuencia negativa tiene 25% de sensibilidad respecto al relevador convencional. En la Fig. 7.17b se muestra el porcentaje de incremento de sensibilidad del elemento instantáneo respecto al ajuste constante del relevador convencional.

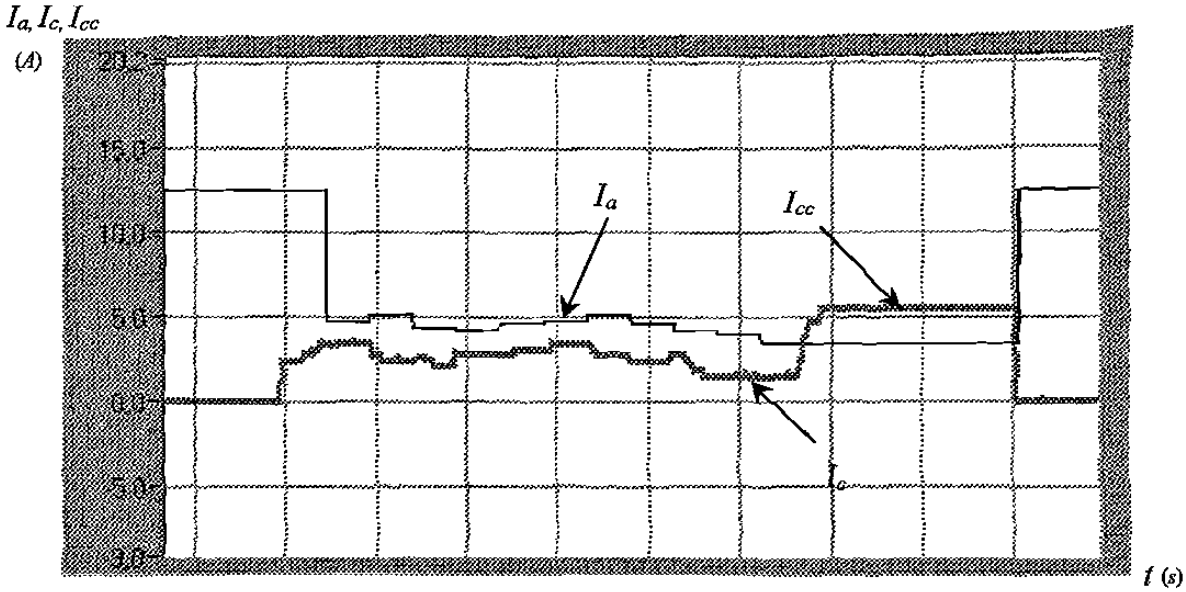

Fig. 7.16. Prueba con adquisición de la señal en tiempo real.

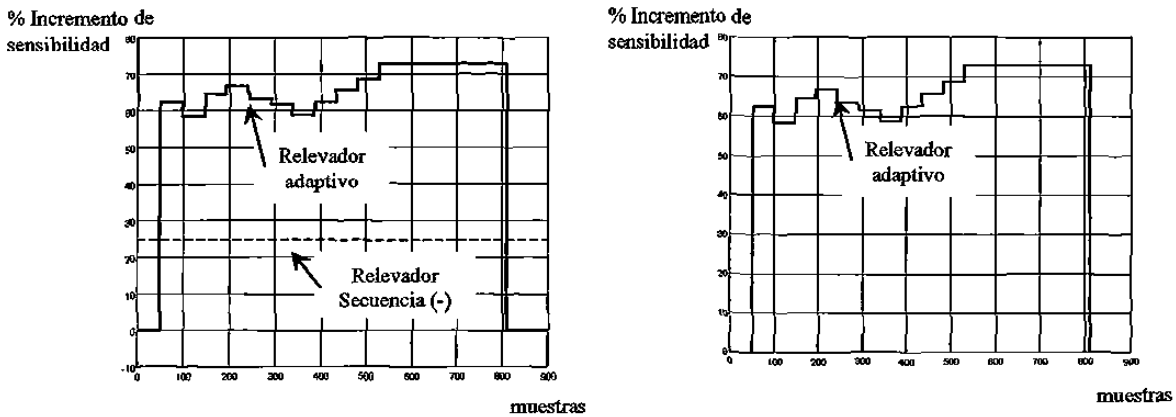

Fig. 7.17: Porcentaje de sensibilidad entre los tres tipos de relevadores, a)elemento de tiempo inverso, b)elemento instantáneo.

7.7 Archivo de señales

Los archivos fueron generados en estado estable en Matlab® y en estado de falla mediante una simulación utilizando el Programa de Transitorios Electromagnéticos (EMTP). El sistema eléctrico utilizado en EMTP es el indicado en [**26**]. El objetivo de estas pruebas es evaluar la lógica de operación del relevador adaptivo ante señales generadas en archivo.

Debido a que no se cuenta con otro relevador, las pruebas estuvieron orientadas a establecer secuencias de eventos por medio de archivos de señales generados en paquetes profesionales.

La configuración del panel de control para los archivos insertados al relevador fue la mostrada en el panel de la Fig. 7.18. Se selecciona el tipo de prueba **1** para la prueba de archivo de señal. En el subpanel de archivo de señal se indica la ruta del archivo de prueba en *Path*, si este control esta en blanco se abre una ventana de Windows® para seleccionar el archivo de forma manual. En *inicio de lectura* se especifica el elemento dentro del arreglo de datos en el cual se desea iniciar la lectura, en este caso las pruebas iniciaron desde el primer elemento por tanto se indico **0**. El programa admite datos dispuestos en arreglos vector-renglón o matriciales, en el *número de renglones* se especifica de cuantos renglones consta la matriz, con **–1** se indica que la lectura se realiza en todos los renglones del arreglo, no se hace distinción entre matriz o vector. Si el arreglo esta dispuesto en vector columna es posible realizar una transposición para acomodar los datos, como fue el caso de este ejemplo.

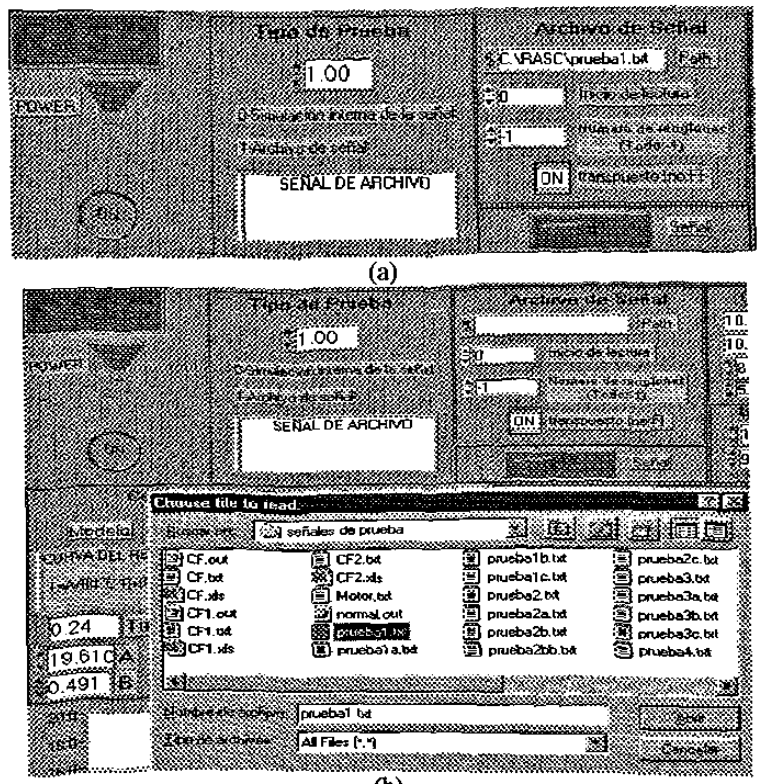

Fig. 7.18. Panel de control de archivo de señal.

Los archivos de señales fueron grabados con formato ASCII y con extensión *.txt. Estos archivos de señales fueron los mismos utilizados en la Sección 4.3.4. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

En la Fig. 7.19 la línea está inicialmente desenergizada, y el relevador tiene el valor máximo de I_a (10 A en este caso). Al energizar la línea comienza el régimen de flotación de I_a sobre I_c. Cuando ocurre la falla el valor de I_a se mantiene fijo, y posteriormente toma el valor máximo (10 A) cuando la falla desaparece. Finalmente, la línea es recerrada con éxito y la corriente de arranque I_a comienza a flotar de nuevo sobre I_c.

En la Fig. 7.20 se muestra la secuencia anterior pero con el disparo de otra protección. En la Fig. 7.21 se muestra una falla evolutiva con la apertura del interruptor local y su consecuente recierre. En la Fig. 7.22 se muestra la falla evolutiva liberada por otra protección.

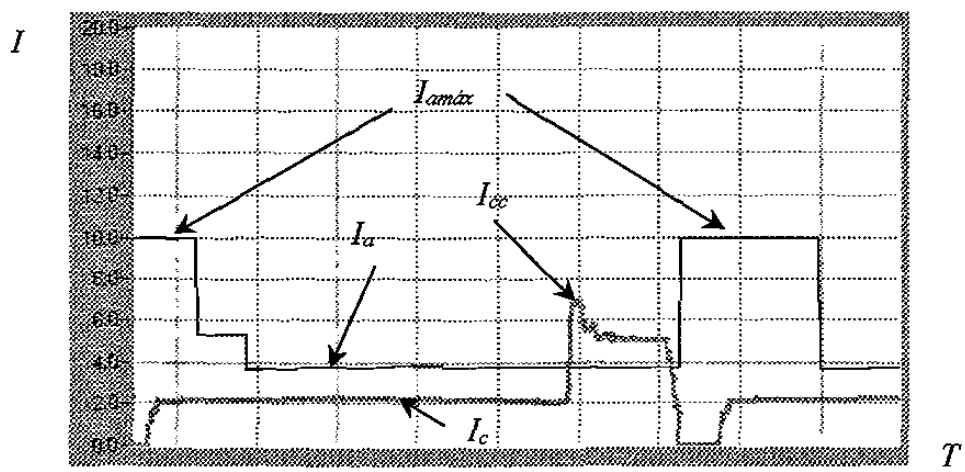

Fig. 7.19. Secuencia de apertura de la línea, energización e inserción de falla (corriente de demanda).

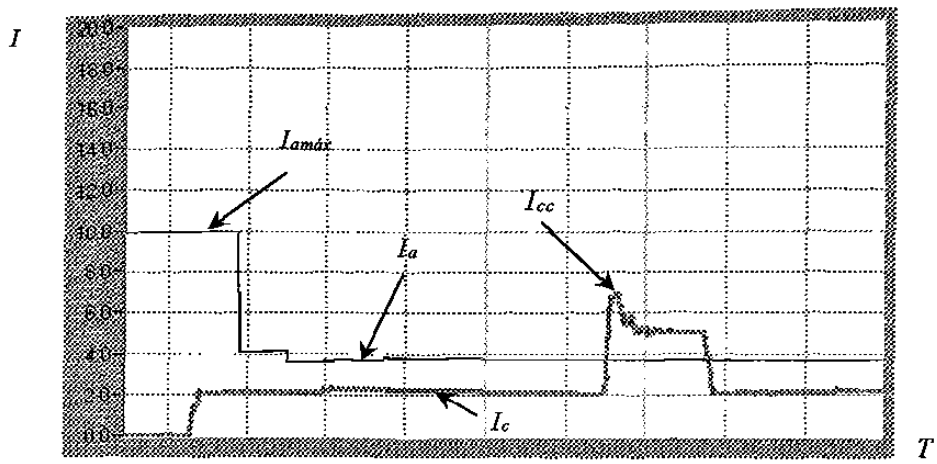

Fig. 7.20. Operación de protección respaldada.

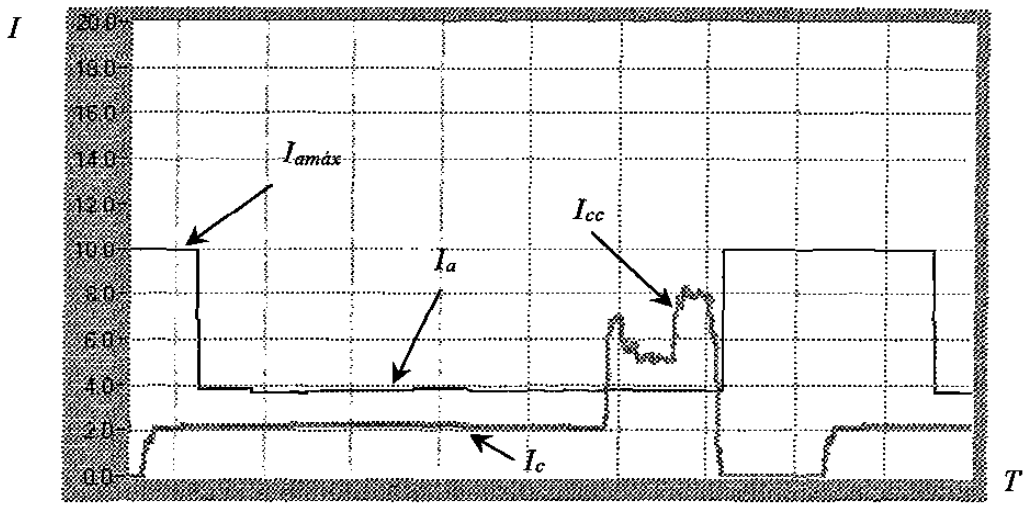

Fig. 7.21. Falla evolutiva. Operación de la propia protección.

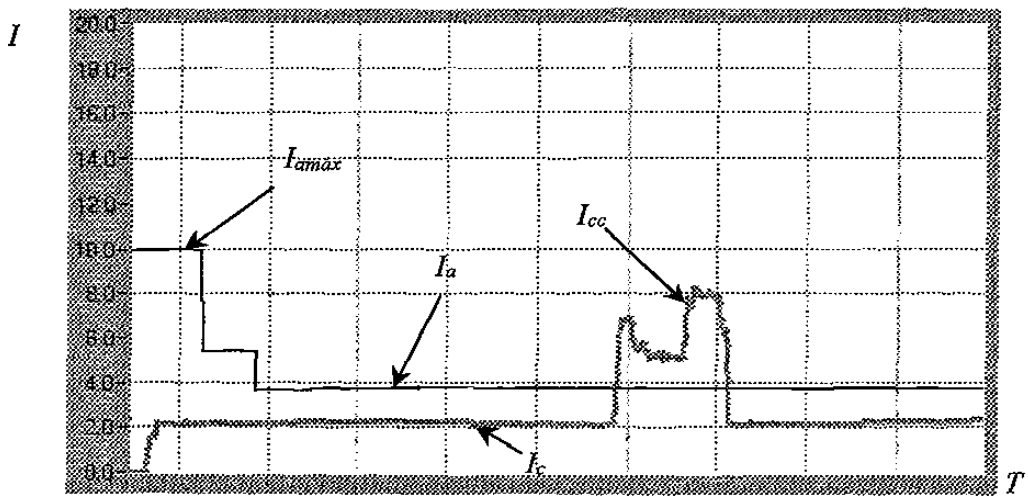

Fig. 7.22. Falla evolutiva. Operación de protección respaldada.

En la Fig. 7.23 se muestra la activación de la subrutina de carga fría ante el arranque del motor mostrado en la Fig. 4.10. Se asignaron dos pasos de ajuste, el primero de 18 A y el segundo con 12 A. De los resultados obtenidos se observa un comportamiento aceptable del relevador ante las señales estudiadas.

7.8 Generación interna de señales

En el modo de prueba de generación interna de la señal se evaluó el comportamiento del relevador virtual ante señales manipuladas con los controles internos del relevador adaptivo, se probaron secuencias de operación, señales contaminadas con ruido tanto en estado estable como en la corriente de falla, y por último se evaluó la estabilidad algorítmica del relevador ante pulsos de corriente.

En la Fig. 7.24 se muestra el panel de control utilizado para la generación interna de las señales. En este panel se definen los valores de Frecuencia (*F*), *muestras/ciclo*, *F muestreo* y *DC*. La variación de la corriente en estado estable se realizo variando el control manual de *Magnitud*. El ruido en la señal fue introducido con el control *Ruido Blanco*. Los controles para el estado de falla son: *Múltiplo Inom*, que esta definido como veces de la corriente nominal; el ruido de la señal es insertado en forma periódico o aleatorio con los controles de ruido periódico y ruido blanco respectivamente.

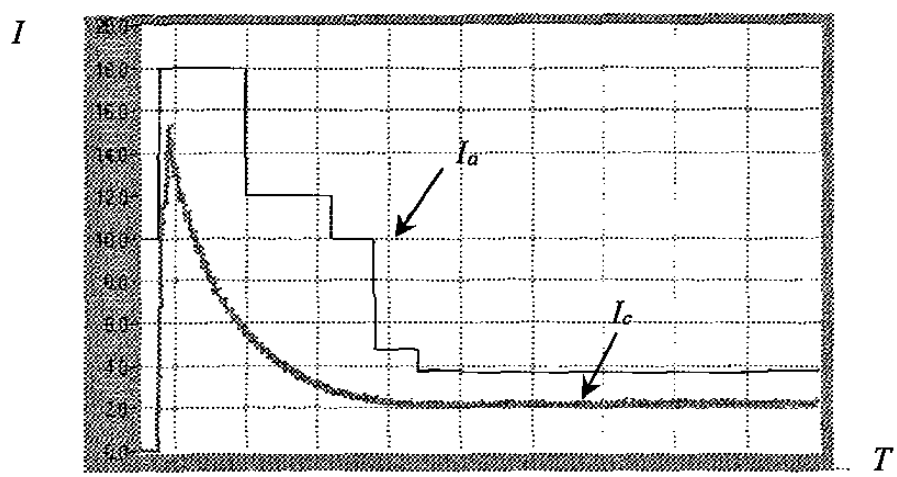

Fig. 7.23. Corriente de carga fría.

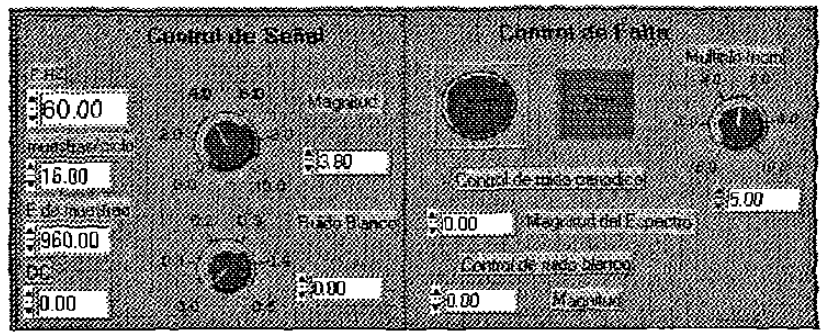

Fig. 7.24. Panel de control para la generación de corriente de carga y falla.

En la Fig. 7.25 se observa una secuencia de operación con variación de carga, falla y disparo de la protección. La variación de la carga se realizó mediante la manipulación directa del control de corriente, para la inserción de la falla se definió el incremento de corriente como veces de la corriente de prefalla y se insertó con el control correspondiente, por último se simuló el disparo activando la función de disparo dentro del módulo de característica tiempo-corriente.

En la Fig. 7.26 se ilustra la característica del relevador virtual cuando se permite que su I_a sea menor que la del dispositivo respaldado. Cuando el valor de corriente de cortocircuito es mayor a la I_a del dispositivo respaldado el intervalo de coordinación se conserva según se observa en la Tabla 7.8. Para valores menores la coordinación no es posible; el relevador virtual operará para su valor de I_a y la característica de tiempo de operación definida.

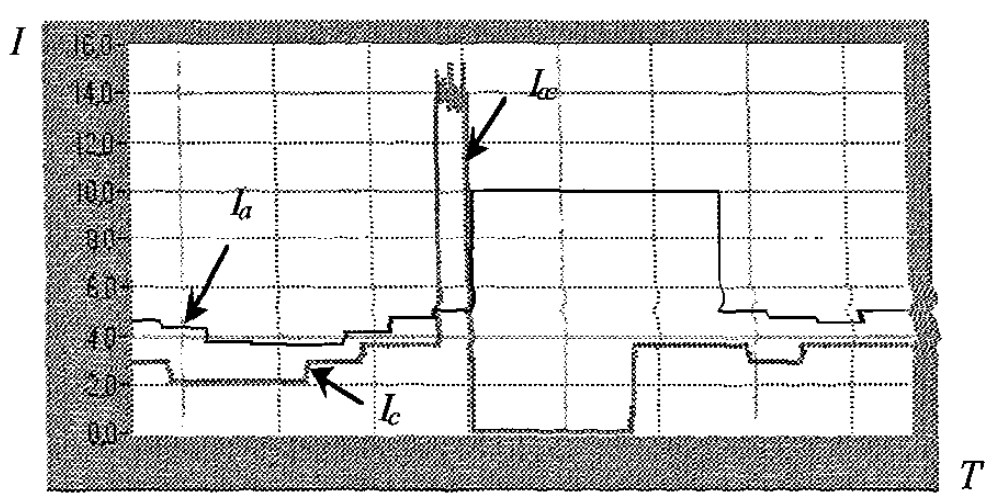

Fig. 7.25. Prueba para un caso de generación interna de la señal.

Tabla 7.8. Ajuste del relevador virtual, ante I_{cc} menores a la I_a del dispositivo respaldado.

Icc	I	Tadap	Tconv
35.35	5.05	1.6	1.29
31.82	4.54	1.79	1.488
28.28	4.04	2.08	1.77
24.74	3.53	2.5	2.197
22.98	3.28	2.8	2.496
21.21	3.03	3.19	2.88
19.79	2.82	3.6	3.29
18.38	2.62	4.12	3.81
16.97	2.42	4.82	4.51
15.55	2.22	5.78	5.47
14.14	2.02	7.16	6.85
13.43	1.91	8.10	7.80
12.72	1.81	9.3	9.00
12.02	1.71	10.86	10.55
11.31	1.61	12.96	12.66
10.60	1.51	15.93	15.65
9.89	1.41	20.4	20.176
9.19	1.31	27.86	27.56
6.78	1.56	13.93	13.94
6.22	1.43	18.88	18.93
5.65	1.30	28.19	28.19

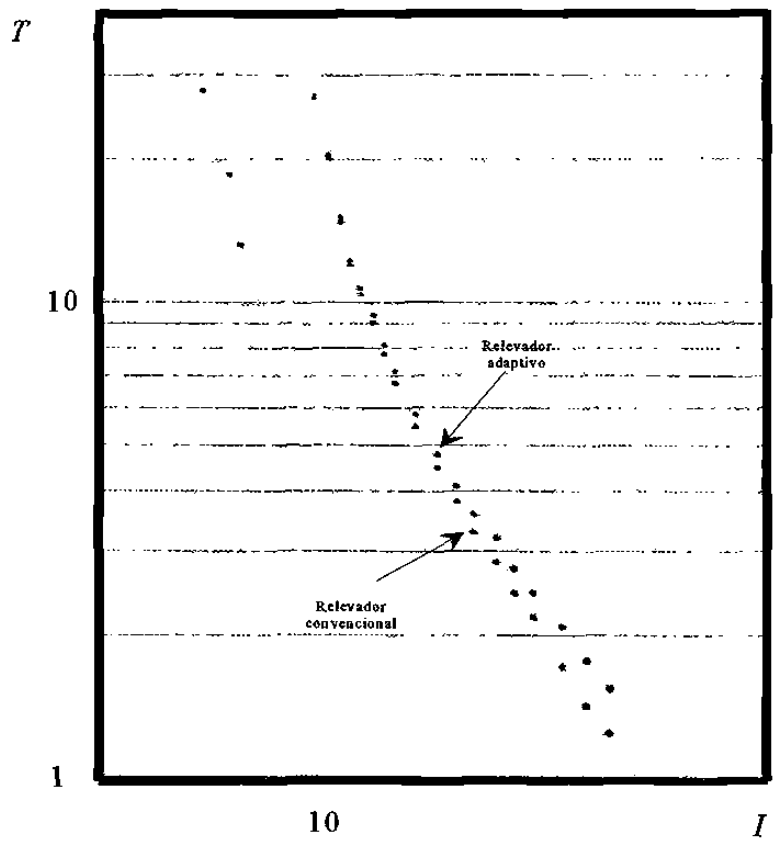

Fig. 7.26. Característica tiempo-corriente del relevador adaptivo.

En la Fig. 7.27 se presenta la verificación de coordinación en zona de reposición entre Relevador-Restaurador mostrada en la Sección 2.8.3. Este ejemplo se presenta en [15], la prueba se realiza verificando que el relevador no opere para toda la secuencia de operación

del restaurador. Para la definición de la secuencia de operación del restaurador se utiliza los controles de la Fig. 7.28. El relevador adaptivo registra la dinámica del relevador ante las operaciones del restaurador. Para esta prueba se utilizo un relevador IAC con característica muy inversa, se realizó el ajuste de curvas obteniéndose la expresión analítica del relevador, esta expresión se introdujo en el relevador virtual. La zona de reposición fue según se recomienda en [**13**].

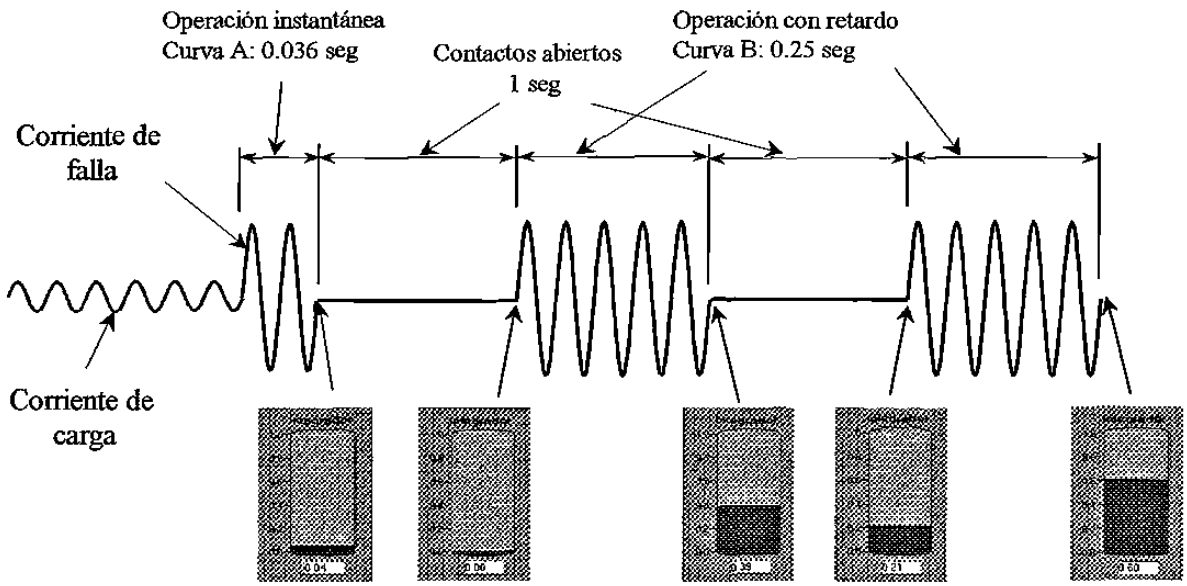

Fig. 7.27. Registro del integrador del relevador virtual ante la secuencia de operación de un restaurador.

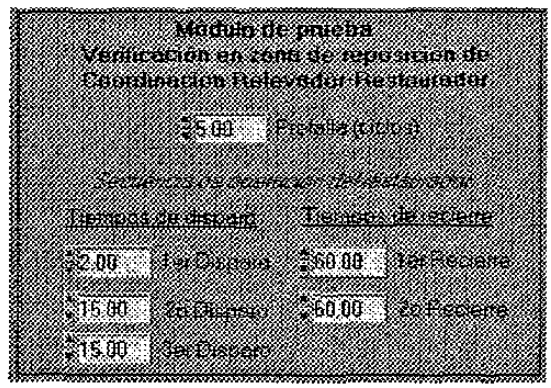

Fig. 7.28. Módulo de prueba Coordinación en zona de reposición Relevador-Restaurador.

7.9. Conclusiones

- En la adquisición de señales en tiempo real con relevadores electromecánicos y digitales se obtiene el cumplimiento del criterio de coordinación para cualquier valor de corriente de falla. Esto demuestra el cumplimiento de la adaptación automática de tiempo de operación.

- Para el modelo de prueba utilizado para la adaptación de la corriente de arranque se observó que los relevadores electromecánico y de secuencia negativa son insensibles a la corriente de falla establecida en la prueba, el relevador adaptivo sí detecta la corriente de falla y es más sensible incluso que el relevador respaldado.

- Para todos los casos estudiados utilizando archivo de señales el comportamiento del relevador adaptivo fue satisfactorio.

- Para todos los casos estudiados la respuesta del relevador adaptivo utilizando el modo de prueba de generación interna de la señal fue satisfactoria.

- Se realizó la prueba cuando se permite que la I_a del relevador virtual sea menor que la del dispositivo respaldado. Los resultados obtenidos demuestran las factibilidad de esta consideración.

- También se presenta la verificación de coordinación en zona de reposición entre Relevador-Restaurador. La prueba se realiza verificando que el relevador no opere para toda la secuencia de operación del restaurador. Esta herramienta es útil en el proceso de coordinación con restauradores.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Introducción

En este trabajo de tesis se establecen los principios funcionales de un relevador adaptivo de sobrecorriente, el cual a diferencia de los relevadores convencionales tiene nuevos criterios de protección que permiten un incremento sustancial en la sensibilidad, y una reducción considerable en el tiempo de operación del relevador sobre todo en regímenes de carga reducidos. Se propone la estructura funcional de un relevador adaptivo de sobrecorriente, tanto para el elemento instantáneo como para el elemento de tiempo inverso. Se obtiene la representación matemática del relevador adaptivo. Se establecen las consideraciones de diseño y funcionales para generar el valor adaptivo de la corriente de arranque del relevador y la adaptabilidad de su tiempo de operación, a fin de obtener un relevador que automáticamente modifique sus parámetros de ajuste acorde al estado vigente del sistema eléctrico de potencia.

Se establecen los criterios necesarios para el diseño del relevador de sobrecorriente adaptivo propuesto el cual no requiere de ningún ajuste por parte del usuario, la adaptabilidad de su corriente de arranque y el tiempo de operación las obtiene de forma automática.

8.2 Conclusiones

- La introducción de conceptos adaptivos en la protección de sobrecorriente permite resolver las limitaciones de la protección de sobrecorriente, sin perder la compatibilidad con las protecciones de sobrecorriente convencionales.

- Los criterios adaptivos propuestos, adaptación de la corriente de arranque y la adaptación del tiempo de operación, resuelven los problemas de falta de sensibilidad y los elevados tiempos de operación del relevador de sobrecorriente para la protección de fase.

- La adaptación propuesta de la corriente de arranque del relevador de tiempo inverso se obtiene variando la corriente de arranque en función de la corriente de carga. Para el cálculo de la corriente de arranque de un relevador de tiempo inverso se concluye que el método basado en el concepto de demanda de corriente es el más adecuado por tener una sensibilidad adecuada y menor requerimiento computacional.

- La adaptación del tiempo de operación consiste en establecer el cumplimiento del criterio de coordinación para cualquier valor de corriente de falla. Para tal fin, es necesario obtener la expresión analítica del dispositivo respaldado.

- No se ha encontrado en la literatura una expresión que proporcione el mejor ajuste para todos los dispositivos de protección estudiados. Esto confirma la importancia de tener varios modelos de características en los programas de ajuste de curvas de dispositivos de sobrecorriente.

- La adaptación del elemento instantáneo del relevador de sobrecorriente es posible cuando la relación de impedancia de la fuente de generación respecto la impedancia total al punto de falla es alta, como es el caso de redes con cogeneración. El criterio adaptivo para el elemento instantáneo mantiene una cobertura de protección instantánea constante de la línea protegida ante variaciones en la magnitud de la corriente de cortocircuito.

- Los bloques de control para la adaptación de la corriente de arranque y el tiempo de operación pueden ser realizados de forma independiente; ya que la información de entrada y salida de cada bloque no es compartida. La utilización de ambos bloques adaptivos permite una mayor sensibilidad y menor tiempo de operación de la protección.

- Se presentaron dos alternativas de diseño para el relevador adaptivo de sobrecorriente. La base del criterio de diseño fue la información requerida por el relevador adaptivo. La información de la corriente de arranque y la expresión analítica del dispositivo respaldado son necesarias para ambas alternativas. La corriente máxima en cambio, es un valor que puede ser introducido por el usuario (primera alternativa) o puede ser calculado por el propio relevador (segunda alternativa).

- Para evaluar a los algoritmos adaptivos propuestos fue importante la programación del relevador adaptivo de sobrecorriente en un ambiente virtual. El relevador virtual puede operar con señales de tiempo real y emitir señales de disparo a interruptores; puede también adquirir señales grabadas en un archivo de datos, o generar internamente sus propias señales de prueba. La combinación de estas alternativas da gran flexibilidad para la prueba de algoritmos de protección.

- La expresión analítica generalizada y el método gráfico propuestos en este trabajo para el relevador de sobrecorriente de tiempo inverso tanto para la zona de operación como de reposición, permite resolver en forma simple las tareas de análisis y diseño del relevador, aún en presencia de funciones no lineales.

- Se encontró útil la representación de la característica del relevador adaptivo de sobrecorriente de tiempo inverso en un plano tridimensional para definir la zona operativa del relevador.

8.3 Recomendaciones para trabajos futuros

- Realizar la prueba de los algoritmos y principios adaptivos propuestos en una plataforma de *hardware* para evaluar la operación del relevador adaptivo en un ambiente real.

- Crear una interfase de comunicación para suministrar en forma local o remota la expresión analítica de la característica de operación del dispositivo respaldado por el relevador adaptivo.

- Evaluar la aplicación del relevador adaptivo en esquemas de protección de transformadores tanto en el lado de alta como en el lado de baja.

- Evaluar la aplicación del relevador adaptivo para protección de motores en condiciones de arranque.

- Evaluar la aplicación del elemento instantáneo del relevador adaptivo de sobrecorriente ubicado a poca distancia eléctrica de centrales generadoras y cogeneradoras.

- Determinar nuevas aplicaciones de las técnicas adaptivas en otros tipos de protección.

8.4 Aportaciones

- Se proponen dos criterios adaptivos en el relevador de sobrecorriente como solución a problemas de sensibilidad y tiempos elevados de operación. Estos criterios adaptivos no han sido publicados anteriormente en la literatura. Los criterios adaptivos son funcionalmente independientes uno del otro. Los criterios adaptivos considerados son: adaptación de la corriente de arranque y adaptación del tiempo de operación del relevador.

- Los criterios adaptivos propuestos mejoran los índices de calidad del relevador de sobrecorriente, se obtiene una operación automática sin necesidad de ajustes por parte del usuario y se obtiene una adaptación continua a las condiciones operativas del sistema eléctrico de potencia.

- *Con los criterios adaptivos propuestos se simplifica la aplicación del relevador de* sobrecorriente, ya que el propio relevador realiza el proceso de coordinación.

- Los principios adaptivos propuestos no requieren de ningún enlace de comunicación; la adaptación se realiza con información local en la del relevador. La aplicación de este relevador adaptivo es altamente recomendada en circuitos de distribución rurales donde no es costeable realizar la inversión en sistemas integrados de comunicación.

- Se proponen dos variantes para el diseño del relevador adaptivo. Se establecen los criterios de coordinación para cada variante, y se realiza una análisis comparativo entre ellas.

- Se realizó la programación del relevador adaptivo en un ambiente virtual, se utilizaron señales reales provenientes de un laboratorio de pruebas.

- Se presentan resultados satisfactorios de los algoritmos adaptivos propuestos, incluyendo casos con señales reales de operación.

REFERENCIAS

[1] Dy Liacco T.E., "The Adaptive Reliability Control System," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 86, May 1967, pp. 517-531.

[2] A.G. Phadke, "Working Group 34.02 Final Report on Computer Based Protection and Digital Techniques in Substations," *Intl. Conf. on Large High Voltage Electrical Systems (CIGRE)*, Paris, SC 34, May 1984.

[3] S.L. Nilsson, et. al., "Pros and Cons of Integrating Protection and Control in Transmission Substations," 84 SM 638-3, *IEEE PES Summer Meeting*, Seattle, July 1984.

[4] S.H. Horowitz, A.G. Phadke, and J.S. Thorp, "Adaptive Transmission System Relaying," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, October 1988, pp. 1436-1445.

[5] G.D. Rockefeller, C.L. Wagner, and J.R. Linders, "Adaptive Transmission Relaying Concepts for Improved Performance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, October 1988, pp. 1446-1458.

[6] A.K. Jampala, S.S. Venkata, and M.J. Damborg, "Adaptive Transmission Protection: Concepts and Computational Issues," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, January 1989, pp. 177-185.

[7] K.R. Shah, E.D. Detjen and A.G. Phadke, "Feasibility of adaptive distribution protection system using computer overcurrent relaying concept," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 24, No. 5, September/October 1988, pp. 792-797.

[8] M.S. Sachdev, T.S. Sidhu, B. Chattopadhyay, et. al., "Design and evaluation of an adaptive proteccion system for a distribution network," *Cigré* Paper 34-202, París, 1995.

[9] B. Chattopadhyay, M.S. Sachdev and T.S. Sidhu, "Adaptive relaying for protecting a distribution system – a feasibility study," *IEEE Western Canada Conference on Computer, Power and Communications Systems in a Rural Environment*, May 1991 , pp. 20-25.

[10] B. Chattopadhyay, M.S. Sachdev and T.S. Sidhu, "An on-line coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, January 1996, pp. 165-173.

[11] J. Eisman, G. Gómez and J. Torres, "Applied adaptive protection practices based on data transmission between relays," *Cigré* Paper 34-207, París, 1995.

[12] M. Titarenko and I. Noskov-Dukelsky, *Protective relaying in electric power systems*, peace publishers, Moscow, U.R.S.S.

[13] IEEE Std C37.112-1996, *IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays,* September 1996.

[14] Line Material Company, *Distribution system protection and apparatus coordination,* McGraw Electric Company, Milwaukee, Wisconsin, USA,

[15] J.J. Burke, *Power Distribution Engineering,* Marcel Dekker, Inc., New York, 1994.

[16] IEEE Std 242, *IEEE Recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems,* IEEE Buff Book, IEEE, Inc., New York, NY, U.S.A. May 1990.

[17] National Electrical Manufacturers Association, NEMA.

[18] Subdirección de distribución, gerencia de distribución y subgerencia de operación y mantenimiento, *Manual de procedimientos. Procedimiento para coordinación de protecciones de sobrecorriente en sistemas de distribución,* Comisión Federal de Electricidad, clave: GOM-1520, Marzo 1997.

[19] *Professional Electrical Power System Design and Simulation Software EDSA,* ver. 2.95, EDSA San Diego, CAL., USA.

[20] IEC Standard 255-4, *Single Input Energizing Measuring Relays with Dependent Specified Time,* IEC Publication 255-4, First Edition, 1976.

[21] H.J. Altuve, y G.P. Kasianov, *"Simulación matemática de un relevador estático de corriente,"* Ingeniería Energética (Cuba), Vol. VI, no. 4, 1985, pp. 347-353.

[22] H.J. Altuve, *Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia,* Universidad Autónoma de Nuevo León y Comisión Federal de Electricidad, Monterrey, México, 1992.

[23] S.H. Horowitz and A.G. Phadke, *Power System Relaying,* Taunton, Somerset, England: Research Studies Press Ltd., 1992.

[24] J.L. Blackburn, *Protective Relaying: Principles and Applications,* New York and Bassel: Marcel Dekker Inc., 1987.

[25] A.G. Phadke, and J.S. Thorp, *Computer Relaying for Power Systems,* Taunton, Somerset, England: Research Studies Press Ltd., 1988.

[26] Altuve H.J., Vázquez E., Lorenzo J.V. y Martínez A., "Efecto de las funciones de ponderación de ventana sobre los filtros digitales para relevadores de distancia," *II Simposio Iberoamericano sobre Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia,* Monterrey, N.L., México. 14 al 19 de Noviembre de 1995.

[27] E.O. Schwietzer and Daqing Hou, "Filtering for Protective Relays," *19th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October 1992.

[28] M.S. Sachdev, and M.A. Baribeau, "A New Algorithm for Digital Impedance Relays," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 98, no. 6, Nov./Dec. 1979, pp. 2232-2240.

[29] M.S. Sachdev, and M. Nagpal, "A Recursive Least Error Squares Algorithm for Power System Relaying and Measurement Applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 3, July 1991, pp. 1008-1015.

[30] A. Conde, *Protección Adaptiva de Sobrecorriente*, Tesis de Maestría en Ciencias, FIME-UANL, Febrero de 1996.

[31] I. Díaz, *Estudio Comparativo de Algoritmos de Filtrado Digital para Protección de Líneas de Transmisión*, Tesis de Maestría en Ciencias, FIME-UANL, Diciembre de 1994.

[32] A. Guzmán, Comunicación personal.

[33] W.E. Glassburn, and W.K. Sonnermann, "Principles of induction-type relay design," AIEE Transactions, Part III, *Power Apparatus and Systems*, Vol. 72, No. 4, Feb. 1953, pp. 23-27.

[34] IEEE Committee Report, "Computer representation of overcurrent relay characteristics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 3, July 1989, pp. 1659-1667.

[35] S.E. Zocholl, "Testing dynamic characteristics of overcurrent relays," 20th Annual *Western Protective Relay Conference*, Spokane Washington, October 19-21,1993.

[36] G. Benmouyal, and S.E. Zocholl, "Time-current coordination concepts," 21st *Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October 18-20,1994.

[37] A.H. Knable, "Overcurrent relays characteristics in a simple form for use in digital computers," *AIEE Summer General Meeting*, Denver, Colorado, June 1961, Paper No. CP 62-1090, pp. 1-7.

[38] R.A. Wylie, G.G. Auer, and R.C. Ender, "Automatic selection of distribution system protective devices," *Proceedings of the IEEE 1965 PICA Conference*, May 1965, pp. 683-705.

[39] 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.

[40] G.E. Radke, "A method for calculating time-overcurrent relay settings by digital computer," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 82, Special Supplement, 1963, pp. 189-205.

[41] S.S. Begian, R.O. Bigelow, D.M. Lyle, G.E. Radke, W.F. Reinke, R.F. Silva, J.R. Truitt, H.Y. Tsien, and E.L. Worthington, "A computer approach to setting overcurrent relays in a network,". *Proceedings of the IEEE 1967 PICA Conference*, May 1967, pp. 447-457.

[42] R.E. Albrecht, M.J. Nisja, W.E. Feero, G.D. Rockefeller, and C.L. Wagner, "Digital computer protective device coordination program I- General program description," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 83, no. 4, 1964, pp.402-411.

[43] W.A. Lewis, "Computer applications of overcurrent devices- a concept whose time has come," *Twenty-Ninth Annual Conference for Protective Relay Engineers*, Texas A&M University, April 1976.

[44] M.S. Sachdev, J. Singh, and R.J. Fleming, "Mathematical models representing time-current characteristics of overcurrent relays for computer application," *IEEE Paper A*78 131-5, January 1978.

[45] R.P. Heller, and B. Russel, "Micropocesor algorithm for overcurrent protection of distribution systems," *IEEE Control of Power Systems Conference*," March 1978, pp. 80-83.

[46] E.O. Schweitzer, and A. Aliaga, "Digital programmable time-parameter relay offers versatility and accuracy," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No. 1, Jan/Feb 1980, pp. 152-157.

[47] G. Benmouyal, "A log-table based algorithm for implementing microprocessor time-overcurrent relays," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 9, September 1982, pp. 3563-3567.

[48] G. Benmouyal, "Design of a digital multi-curve time overcurrent relay," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1725-1731.

[49] 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.

[50] C.A. Kramer, and W.A. Elmore, "Flexible inverse overcurrent relaying using a microprocessor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, April 1990, pp. 915-923.

[51] E.O. Schweitzer, and S.E. Zocholl, "The universal overcurrent relay," *IEEE Industry Applications Magazine*, May/June 1996, pp. 28-34.

[52] A.R. van C. Warrington, *Protective Relays: Their Theory and Practice*, Vol. I, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1962.

[53] A.R. van C. Warrington, *Protective Relays: Their Theory and Practice*, Vol. II, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1969.

[54] J. Singh, M.S. Sachdev, R.J. Fleming, and A.E. Krause, "Digital IDMT directional overcurrent relays," *Second International Conference on Developments in Power System Protection*, IEE Publication No. 185, 1980, pp. 84-87.

[55] M.J. Damborg, R. Ramaswami, S.S. Venkata, and J.M. Postforoosh, "Computer aided transmission protection systems design," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 1, 1984, pp. 51-59.

[56] IEEE Committee Report, "Computer representation of overcurrent relay characteristics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 3, July 1989, pp. 1659-1667.

[57] S.C. Chapra and R.P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*, New York: McGraw-Hill, 1988.

[58] Advanced Systems for Power Engineering, Inc. Aspen OneLiner, v. 5.0, 1988.

[59] A.F. Elneweihi, E.O. Schweitzer, III, M.W. Feltis, "Negative-sequence overcurrent element application and coordination in distribution protection," *IEEE Power engineering society*, PES Summer Meeting, Seattle, WA, July 12-16, 1992.

[60] National Instruments, *Labview user guide ver.* 4.1, National Instruments Corporation, Austin, 1997.

[61] *Time overcurrent relays - Instruction manual GEH-1788L*, General electric Co, Power systems management business dept. Malverin, PA, 19355.

[62] *Instruction manual SEL-501 Dual universal overcurrent relay*, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, WA U.S.A. 1995.