



SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS PARA SIMULACION EN TIEMPO REAL DE PROTECCIONES DIGITALES

Dr. Carlos de la Incera
MSc.Roger Llamo
Ing.Lazaro GuerraDr,
Antonio A. Martínez
MSc.Rolando Almeida

Resumen / Abstract.

En el presente trabajo se explica el desarrollo de un sistema de adquisición de datos y el software relacionado que permite mode en tiempo real, a nivel de laboratorio decente de protecciones, el trabajo de diferentes protecciones digitales. Se relacionan l resultados del caso de la protección de sobrecorriente tiempo inverso.

Palabras claves: Protecciones digitales, tiempo real.

The present paper describes an algorithm used in the location of faults in high voltage power lines, when only measurements one local end are presented. A discussion of the results and accuracy are also presented.

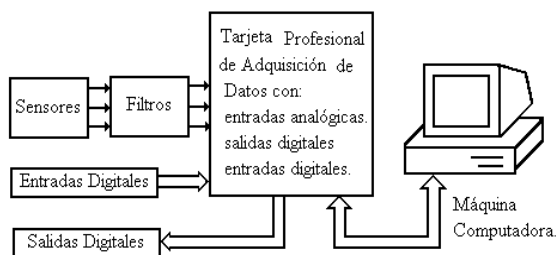
Keywords, digital protections, real time.

1.-INTRODUCCION.

El rápido desarrollo de las tecnologías relacionadas con la producción de computadoras hizo posible a partir de la década de los 70 su utilización en la construcción e introducción de protecciones digitales en los Sistemas Eléctricos de Potencia. (SEP). La necesidad de buscar una solución económica de adiestrar a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica en estas técnicas crearon las condiciones para el presente trabajo, cuyo objetivo es el desarrollo de un sistema de adquisición de datos y el software correspondiente para la modelación en tiempo real de diferentes protecciones para su uso en laboratorios docentes.

2.-DESARROLLO

La necesidad de desarrollar un laboratorio que permita impartir este novedoso tema en la asignatura Protecciones Eléctricas, las posibilidades económicas y la búsqueda de flexibilidad, para que con un hardware único se pudiera modelar en tiempo real el trabajo de diferentes protecciones digitales a nivel de laboratorio docente, constituyen las necesidades que se tuvieron en cuenta para el presente trabajo



que se basa en una arquitectura como la indicada en la figura 1.

Figura 1 Esquema simplificado de la arquitectura.

Sensores.- Los sensores deben medir señales analógicas de voltaje y corriente y entregarlas a los niveles de trabajo de los convertidores, pudiendo emplearse en el caso de las señales de corrientes esquemas como los indicados en la figura 2. Se optó por la variante b pues se logra el aislamiento completo con el circuito de

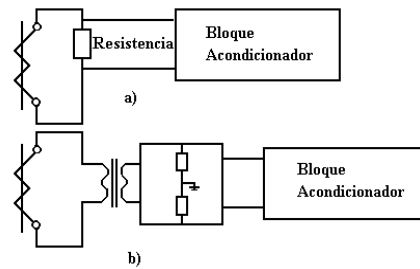


Figura 2 Obtención señales de corriente.

fuerza lo que representa una protección adicional para la tarjeta de adquisición de datos. Como transformadores adicionales se utilizaron transformadores de gancho de instrumentos, aprovechando así las excelentes características de los mismos cuando trabajan en la zona de no saturación.

En las maquetas de laboratorio los máximos valores de corrientes instantáneas de cortocircuito son de 60 A por lo que hay que acondicionar las señales para que bajo estas condiciones el máximo voltaje de entrada a los convertidores no exceda 10V, eso es lo que se indica en el bloque acondicionador de la figura 2. En la figura 3

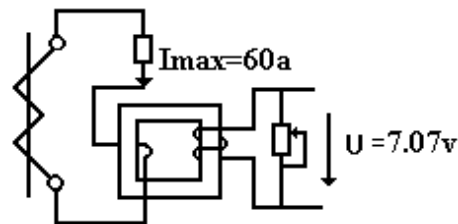


Figura 3 Acondicionamiento de la señal.

se indica la forma en que se ajusta lo anterior, se hace pasar por el primario del sensor 42.42 A efectivos de una señal sinusoidal y se ajusta en el potenciómetro de salida 7.07V efectivos. En el caso de sensores de voltaje el procedimiento es similar, en este caso se utilizaron sensores en el secundario de los transformadores de potencial de la maqueta de laboratorio de relaciones de transformación 115/5 Volts.

Filtrado de la componente de directa.- En el caso en que se utilizaron ventanas de un ciclo y un número par de muestras por ciclo el algoritmo de ajuste tiene un efecto natural de filtrado de la componente de directa, en los casos en que se utilizaron ventanas mas cortas, medio ciclo fue necesario filtrar la componente de directa por software mediante un algoritmo elaborado por los autores [1].

Filtrado de altas frecuencias.- Se utilizaron filtros pasivos como se muestra en la figura 4, de

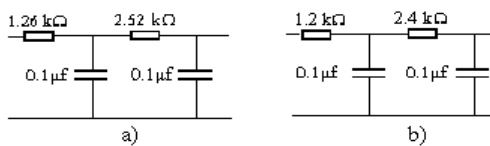
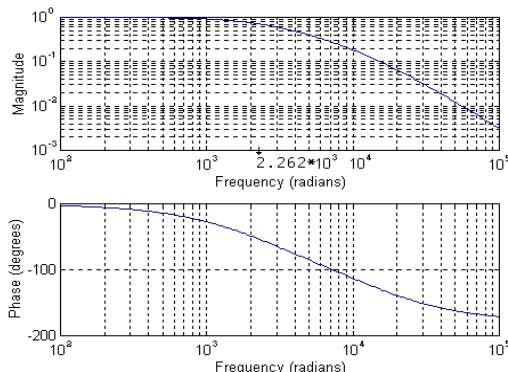


Figura 4 Filtros antialiasing.

frecuencias de corte 360 Hz, basados en que en el caso de la modelación de la protección diferencial de transformadores con restricciones armónicas es necesario ajustar el quinto armónico (300Hz). Este diseño tiene retardos de tiempo del orden de 1 ms, menor que el tiempo de muestreo correspondiente a ventanas de 12 muestras por ciclo cumpliéndose con las restricciones recomendadas en [2]. Las características del filtro en el rango de frecuencias de trabajo se muestran en la figura 5.



Requerimientos de tarjeta de interface y micro computadora.- Las protecciones mas simples a

modelar necesitan sean muestreadas tres señales analógicas de corriente, mientras que las mas complicadas necesitan medir y ajustar tres señales de corriente y tres de voltaje, mientras que para que los cálculos recursivos de ajuste de las señales sean rápidos y sencillos se necesita utilizar ventanas de un ciclo y medio ciclo, existe también necesidad de ajustar hasta el quinto armónico en un caso ya visto, por lo que tanto la tarjeta de interface como la micro computadora que se emplee debe de satisfacer estos requerimientos para el trabajo en tiempo real. Lo antes señalado hace que la tarjeta lleve incorporado la posibilidad de DMA (Acceso directo a la memoria de la computadora) cuando se efectúa el muestreo, para garantizar máxima velocidad y que sea posible efectuar las funciones de ajuste de las señales de entrada y los algoritmos de protección en tiempos menores de 1.38 ms que es el tiempo entre muestras cuando se utilizan algoritmos con ventanas de 12 muestras por ciclo. Es importante también que se disponga de salidas digitales para utilizar como relés auxiliares en los circuitos de disparo de los interruptores de las protecciones del laboratorio.

La tarjeta de interface utilizada (AX5611C) tiene las siguientes características generales:

- Posibilidad de leer 8 señales analógicas de entrada y 8 salidas digitales..
- Se puede seleccionar transferencia de datos por acceso directo a memoria de la computadora.
- Conversores de 12 bits.
- Tiempo de conversión de 8 microsegundos.
- Rango de entrada, bipolar $\pm (0.5, 1, 2.5 \text{ y } 10)$ unipolar $\pm (0, 1, 2.5 \text{ y } 10)$
- Posee circuitos de muestreos y retención .
- Conector compatible con el bus IBM, XT, AT, es decir se puede conectar en el interior de la computadora.
- Los datos se transfieren en bloques de 8 bits.
- Permite seleccionar el nivel de interrupción. Se pueden seleccionar los niveles 2,3,4,5,6 ó 7 del 8259 de la micro computadora.
- Las fuentes que generan interrupción en la máquina son: el conversor y la combinación de la conversión con el acceso directo a memoria.
- El acceso directo a memoria se puede realizar a través de los canales 1 y 3 del controlador de DMA 8237 de la micro computadora

En la figura 6 se muestra un diagrama en bloques simplificado de la tarjeta.

Programación de la tarjeta AX5611C.- Todo producto de este tipo adquirido en el mercado se vende con limi-

taciones en la información, de forma que, el cliente esta obligado a utilizar el

software que ofrece el fabricante. Los programas que brinda el fabricante utilizan lenguajes C, Basic y Pascal. Es importante decir que en cualquiera de las tres versiones, no es posible llegar al programa fuente para conocer como se diseñaron las diferentes funciones que se ofertan.

Se trabajó utilizando Pascal en todas las aplicaciones desarrolladas. El fabricante brinda 36 funciones, que sirven de drivers de la tarjeta AX5611C. Las que fueron mas utilizadas en las aplicaciones fueron:

INIT- Esta función permite iniciar el trabajo de la tarjeta, es decir, verifica la dirección base de la tarjeta, seleccionada en el selector correspondiente. Chequea la presencia del hardware en el equipo; verifica el canal de DMA que se utilizará y le informa al usuario cualquier anomalía en el trabajo del dispositivo.

SET CH- Permite que el conversor se informe de los canales de entrada que serán sensados, siguiendo un orden que depende del canal seleccionado para comenzar la conversión.

SET TIMER- Con este segmento se programa el temporizador formado por la cascada de los timers 1 y 2 del 8254 de la tarjeta, con el objetivo de suministrar el tren de pulsos al conversor A/D. Si se observa la figura 6 se podrá verificar la conexión entre los bloques.

DMA- Realiza N conversiones y transfiere los datos a la memoria de la micro computadora por acceso directo. En esta función se sugiere que la frecuencia del tren de pulsos a la salida de la cascada no supere los 60 kHz, esto constituye una limitante cuando se quieren sensar 6 variables, 12 veces en un ciclo.

DIS ID- Permite deshabilitar una interrupción o el DMA.
TRAN DAT- Permite transferir los datos que se leen de la memoria a una variable tipo arreglo, donde se almacenan los datos para realizar los cálculos.

Características de la micro computadora.- Para que se cumplan los requerimientos de velocidad necesarios para el trabajo en tiempo real la micro computadora debe tener un procesador 586 y trabajar a una frecuencia superior a 133 MHz, pues con procesadores inferiores y frecuencias menores no fue posible programar el trabajo

de algoritmos de protección de ventanas de doce muestras por ciclo.

Descripción del algoritmo de trabajo del relé digital.- La actividad más importante y la que más tiempo ocupa en el trabajo de la protección digital, es el algoritmo para obtener la componente fundamental a partir de las muestras que se toman de la señal que se procesa. Existen diferentes métodos de procesamiento de las señales, por lo que es determinante para seleccionar uno de ellos, analizar el comportamiento ante los armónicos presentes

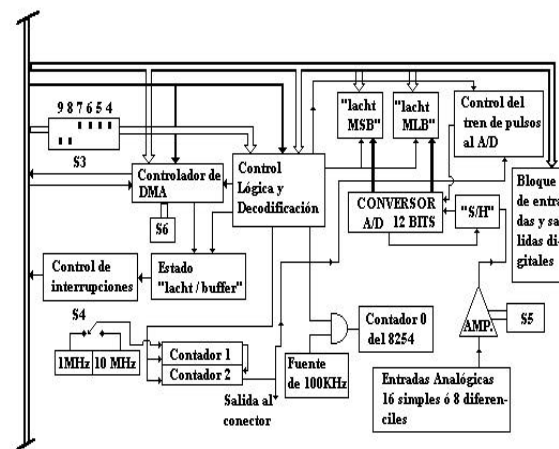


Figura 6: Esquema en bloque de tarjeta de adquisición de datos.

en la variable que se analiza cuando ocurre una falla. Para la mayoría de estos algoritmos cualquier frecuencia diferente de la fundamental constituye un error.

A continuación se relacionan algunos métodos de cálculos que se utilizan en las Protecciones Digitales para protección de línea

- Los que se basan en el modelo R-L de las líneas de transmisión, y resuelven la ecuación diferencial del circuito..

- La evaluación constante de las variables eléctricas que se sensan, constituye el principio fundamental de otros métodos de cálculos, entre los que se mencionan: .Mínimos Cuadrados.

- .Fourier.

La forma de cálculo que a continuación aparece, se enmarca dentro de los algoritmos que evalúan constantemente el comportamiento de las señales y que

fueron los que se utilizaron en el presente trabajo. Para la realización del algoritmo se partió de la representación de una onda sinusoidal generalizada de la forma:

$$y(t) = A \sin(\omega t + j)$$

donde:

A: valor máximo de la señal.

ϕ : ángulo de fase inicial.

en forma de seno y coseno.

$$y(t) = Y_c \cos(\omega t) + Y_s \sin(\omega t) \quad (1)$$

donde:

$y(t)$: valor instantáneo de la señal.

ω : frecuencia fundamental de la línea.

Y_c, Y_s : amplitudes de la señal en forma de seno y coseno.

Con el conocimiento previo de los coeficientes Y_c y Y_s puede conocerse el valor eficaz de la variable que se sensa, precisamente cualquiera de estos algoritmos calculan estos coeficientes

$$A = \sqrt{(Y_c)^2 + (Y_s)^2}$$

$$j = \arctan \frac{Y_c}{Y_s}$$

donde:

$$Y_{ef} = \frac{A}{\sqrt{2}} : \text{valor efectivo de la señal.}$$

Para hallar el valor eficaz de la variable es necesario tener varias muestras de la misma, o sea, esperar un tiempo equivalente al que ocupa el número total de muestras que se tomen en una ventana de cálculos. La ventana de datos funciona de forma tal que al moverse se hace válida una nueva muestra y el valor de la muestra más vieja, correspondiente a la posición anterior de la ventana, es desechado. De esta forma cuando ocurre una falla, en una misma ventana se tendrán datos de prefalla y de falla, por lo tanto se obtienen resultados errados al procesar la señal debido a que difiere de una senoide pura. Lo expresado anteriormente permite concluir; que las ventanas de cálculo deben tener datos de un sólo tipo para que los resultados sean correctos, y mientras más grandes sean éstas, habrá que esperar más tiempo para tomar decisiones, lo que implicará una protección más lenta pero más precisa. Por otro lado existe una relación directa entre el ancho de la ventana y la habilidad para eliminar las frecuencias no fundamenta-

les, entonces existe un compromiso entre la precisión y la velocidad de respuesta de la protección.

Cuando se trabaja en sistemas eléctricos, debido a diferentes fuentes de errores es necesario representar la señal como:

$$y(t) = Y_c \cos \omega t + Y_s \sin \omega t + \epsilon(t) \quad (2)$$

Donde $\epsilon(t)$ es el error debido a que las formas de ondas de la corriente y el voltaje de falla dejan de ser sinusoides puras por múltiples factores de naturaleza aleatoria y no aleatoria.

La componente exponencial es la más predecible de los términos de las frecuencias no fundamentales que aparece con la ocurrencia de falla. Para algoritmos que trabajan con la transformada discreta de Fourier y ventanas de menos de un ciclo es necesario un filtraje de la componente de corriente directa.

Otros términos de las frecuencias no fundamentales son difíciles de eliminar debido a que no se pueden predecir fácilmente. La mayoría de estas señales tienen un elevado contenido de altas frecuencias y éstas pueden ser reducidas mediante la utilización de filtros *anti-aliasing*.

El conversor analógico digital aporta errores que vienen dados por el valor que toma el bit menos significativo cuando se realiza la conversión. Además el comportamiento lineal del mismo es indispensable en la precisión de la medición.

Procesamiento matemático de la señal.-Para cualquiera de los métodos mencionados de procesamiento de señales empleados en las Protecciones Digitales la señal muestreada puede ser representada por:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N Y_n S_n(t) + e(t) \quad \text{o como:}$$

$$y_k = \sum_{n=1}^N Y_n S_n(k\Delta t) + e(t)$$

donde las señales $S_n(t)$ son conocidas

$$\left. \begin{aligned} S_1(t) &= \cos \omega_o t \\ S_2(t) &= \sin \omega_o t \end{aligned} \right\} \text{armónico fundamental}$$

$$\left. \begin{aligned} S_3(t) &= \cos 2\omega_o t \\ S_4(t) &= \sin 2\omega_o t \end{aligned} \right\} \text{segundo armónico}$$

$\vdots$ } otros armónicos
 $S_N(t) = e^{-(R/L)t}$ } término exponencial.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1(\Delta t) & S_2(\Delta t) & \cdots & S_N(\Delta t) \\ S_1(2\Delta t) & S_2(2\Delta t) & \cdots & S_N(2\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_1(k\Delta t) & S_2(k\Delta t) & \cdots & S_N(k\Delta t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

Entre estos métodos se decidió analizar sólo el algoritmo de Fourier y el de mínimos cuadrados, pues son los que filtran un número mayor de armónicos. Las respuestas de frecuencia de estos algoritmos para ventanas de ciclo completo y medio ciclo [2], se muestran en las figuras 7 y 8, para un intervalo de muestreo de doce muestras por ciclo. Nótese que ambos algoritmos filtran componentes de todos los armónicos superiores a la fundamental. Además, en el de mínimos cuadrados aparece la componente de corriente directa, no siendo así en el algoritmo de Fourier; para este último una señal que contenga esta componente constituye un error, siendo necesario eliminarla con un filtro externo o con otro *software* antes de ajustar la señal por este método. En cambio con el método de mínimos cuadrados se puede eliminar la componente exponencial por *software* sin necesidad de recurrir a un filtro externo, con el inconveniente de que los cálculos son más complicados.

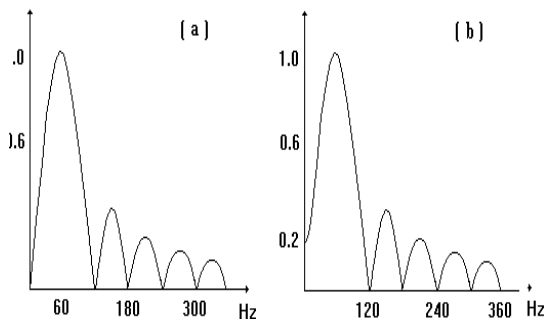


Figura 7: Respuesta de frecuencia de algoritmos de ventanas de un ciclo.

(a) Fourier. (b) Mínimos cuadrados.

Utilizando el método de mínimos cuadrados, si se considera que los errores de cada armónico no están correlacionados y son independientes para cada muestra, la solución por mínimos cuadrados de (3) tiene la forma:

$$\hat{Y} = (S^T S)^{-1} S^T y \quad (4) \quad (3.8)$$

donde:

y : matriz de las muestras (y_k).

$\hat{Y}$: matriz de las amplitudes [Y_C Y_s]

S : matriz [$\cos k\theta$ $\sin k\theta$] $k = 1, 2, 3, \dots$

m : número de muestras por ciclo.

θ : ángulo entre muestras. ($\theta = 2\pi/m$)

Si se realiza la misma consideración que para el algoritmo de mínimos cuadrados y la componente de directa es eliminada por medio de un filtro analógico o por *software*, entonces (4) se hace particularmente simple. Si sólo la fundamental y los armónicos se incluyen en el conjunto de señales $\{S_n(t)\}$ y se toman un número par de muestras en un ciclo, (4) se convierte en la forma rectangular de la transformada discreta de Fourier, calculándose los ajustes de forma sencilla como:

$$\hat{Y}_s = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \sin kq \quad (5)$$

$$\hat{Y}_c = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \cos kq \quad (6)$$

donde: $\theta = 2\pi/m$.

Comparando la expresión (4) con (5) y (6), se obtiene que la estimación del valor efectivo de la señal resulta más sencilla mediante el algoritmo de Fourier, y éste puede hacerse particularmente rápido si se hacen recursivos los cálculos para ventanas de medio y un ciclo. [2].

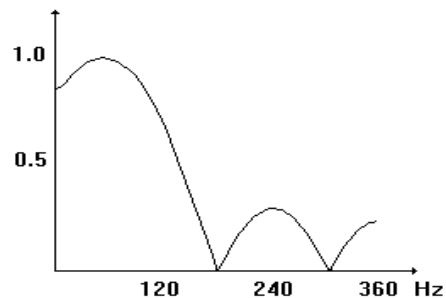


Figura 8 Respuesta de frecuencia para ventana de medio ciclo.

Algoritmos de diferentes protecciones.- Una vez efectuados los ajustes de las señales analógicas de corriente y voltaje se procede a ejecutar los algoritmos de las diferentes protecciones. En nuestro caso fueron programadas y comprobado el funcionamiento en tiempo real

en el laboratorio docente de protecciones del CIPEL las siguientes protecciones:

Sobrecorriente con tres escalones de tiempo.[3].

Sobrecorriente tiempo inverso.[4].

Sobrecorriente direccional tiempo definido y tiempo inverso.[5]

Diferencial de transformadores con restricciones armónicas.[6].

Bloques de programación.- En la figura 9 se muestra un diagrama en bloques de las principales funciones que desarrolla el programa principal en todas las protecciones simuladas.



Figura 9 Programa principal

La rutina de atención a la interrupción constituye la parte mas importante del programa pues en la misma se combinan las funciones de programación de la tarjeta, con el procesamiento de la señal y las funciones de protección y control, por lo que es necesario la confección de un subprograma de interrupción según se muestra en la figura 10. Los 4 primeros bloques permiten:

-La preparación del hardware y la conversión de datos analógicos a digitales, enviando estos últimos a la memoria de la computadora por DMA.

-Identificación de la dirección de la tarjeta.

-Reconocimiento del canal que se empleará para acceder directamente la memoria de la microcomputadora. En la

función INIT además se tiene en cuenta el nivel de interrupción que empleará el controlador de DMA 8237 al realizar la transferencia de datos..

-Programación del canal que inicia la conversión y el que finaliza.

-Programación de los timers que forman la cascada en el temporizador 8254 de la tarjeta encargados de suministrar el tren de pulsos al conversor análogo-digital.

-Con la función DMA se realizan las tres conversiones de los datos analógicos a digitales, equivalentes a las tres corrientes de línea y se transfieren directamente a la memoria. El quinto bloque efectúa el algoritmo de protección a partir de la información y el procesamiento de las entradas y los últimos tres bloques preparan el algoritmo para una nueva interrupción.

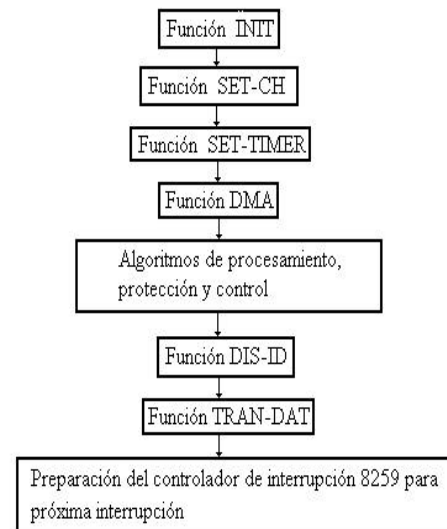


Figura 10 Subprograma de interrupción.

3.-CONCLUSIONES

El presente trabajo nos ha permitido contar con el hard y el software necesarios para modelar, de manera económica, el trabajo de diferentes protecciones digitales en tiempo real en los laboratorios docentes del CIPEL con buenos resultados.

El contar con las posibilidades antes expuestas hace más fácil la comprensión por parte de los estudiantes de estos dispositivos, cuya asimilación implica el conocimiento de temáticas muy variadas y de diferentes disciplinas, al mismo tiempo que permite su familiarización con estos dispositivos.

4.-BIBLIOGRAFÍA

- [1].-Colectivo de autores. Algoritmo para filtrar la componente de directa de la corriente de cortocircuito por software. Jornadas Luso Españolas de Ingeniería. Lisboa 1999.
- [2].-Phadke, A.G. y otros. Computing Relaying for Power Systems. Wiley and Sons 1988.
- [3].-Guerra Lázaro. Modelación en tiempo real de relé de Sobrecorriente con escalones de tiempo. Tesis de Graduación. ISPJAE. 2000.
- [4].-Almeida Rolando. Modelación en tiempo real de relé de sobrecorriente tiempo inverso. Tesis de maestría ISPJAE 1998.
- [5].-Peguero Leydy, La Barca Jeanette. Algoritmo de relé direccional de sobrecorriente. Tesis de Diploma . ISPJAE 1999.
- [6].-Duany Casate, Piloto C.- Algoritmo para protección diferencial de transformadores con restricciones armónicas. Tesis de Diploma ISPJAE. 1998.

DATOS DE LOS AUTORES

Dr. Antonio A- Martinez García.

Se gradúa de I. Eléctrico en 1970. Defiende Tesis de Doctorado en 1981 en Energético de Moscú. Actualmente es Jefe Depto. I. Eléctrica CIPEL.

Dr. Carlos de la Incera.

Se gradúa de I. Eléctrico en 1975. Defiende Tesis de Doctorado en 1990 en Cuba. Es en la actualidad profesor Adjunto del Depto. De I. Eléctrica del Cipel.

MSc. Roger Llamo Rodríguez.

Se gradúa de I. en Equipos y Componentes Electrónicos en 1992. Defiende tesis de maestría

en 1995 en el Cipel. Actualmente trabaja en Cia. Copextel S.A.

MSc. Rolando Almeida Castillo.-Se gradúa de I, Eléctrico en 1985 en La Habana Cuba. Defiende tesis de maeSoftware para la Planificación de la Operación del Sistema Eléctrico Nacional. stría en 1998 en el CIPEL. Actualmente trabaja en Abaguanex S.A. Es profesor adjunto del Depto. de I.. Eléctrica Cipel.

Ing. Lázaro Guerra Hernández.- Se gradúa en el 2000. Es docente del Depto de I. Eléctrica del Cipel.

Dr. Antonio A. Martínez García.
Depto. Ingeniería Eléctrica. CIPEL.
Email amg@cipel.ispjae.edu.cu
Dr. Carlos de la Incera Núñez
Depto. Ing. Eléctrica CIPEL.
MSc Roger Llamo Rodríguez
Depto. Ing. Eléctrica CIPEL
MSc. Rolando Almeida Castillo
Depto. Ing. Eléctrica CIPEL
Ing. Lázaro Guerra Hernández
Depto. Ing. Eléctrica CIPEL
Email lazaro@cipel.ispjae.edu.cu