



## Sistema experimental para el monitoreo de instalaciones de potencia haciendo uso de la Web

Yoel R. Rosales  
Mercedes Canasí  
Wolf Rayner

Aprobado: octubre del 2005  
Recibido: diciembre del 2005

### Resumen / Abstract

El artículo que se presenta describe una alternativa económica de sistema de adquisición de datos para el monitoreo de una instalación de potencia eléctrica trifásica. El sistema experimental está basado en un microcontrolador de Intel StrongARM SA-1110 de 32 bits con CPU RISC, una memoria flash de 16 Mbyte, una memoria SDRAM de 32 Mbyte y un controlador LAN Ethernet de 10/100 Mbps entre otros elementos. El mismo tiene instalado un sistema operativo Linux (kernel versión 2.4) y un servidor web thttpd. A través de un programa CGI se logra el muestreo, procesamiento y transmisión de la información recibida desde un sistema trifásico de potencia y a partir de un protocolo HTTP se envía toda esta información a un grupo de clientes conectados a una red convencional de computadoras.

Palabras clave: sistema operativo Linux, sistema eléctrico trifásico, procesamiento de señales digitales

*This work focuses on an economic alternative for developing a data acquisition system which monitors a three-phase power installation. This experimental system is made up of an Intel StrongARM SA-1110 32-bit RISC microcontroller, a 16-Mbyte flash memory chip, a 32-Mbyte SDRAM chip, a 10/100 Mbps Ethernet LAN controller with 10BASE-T, as well as other hardware elements. The system has an embedded Linux operating system (kernel version 2.4), and a thttpd embedded web server. A CGI program was designed in order to enable the sampling, processing and transmission of information received from the three-phase power installation. To achieve this, a HTTP protocol was used in order to send all this information to a group of clients connected to a conventional PC network.*

Key words: embedded Linux operating system, three-phase power, digital signals processing

### INTRODUCCIÓN

Monitorear el comportamiento eléctrico de costosos equipos como los transformadores de potencia de una subestación eléctrica, constituye una tarea esencial e imprescindible para poder llevar a cabo actividades como el diagnóstico o el pronóstico de cargas a corto plazo. El trabajo que se presenta, propone una económica alternativa de un sistema de adquisición de datos, para el monitoreo de equipos eléctricos de potencia. El desarrollo de tal aplicación, forma parte

de un proyecto de investigación de automatización de las subestaciones eléctricas, en el cual participan la Universidad Alemana de Ciencias Aplicadas Giessen-Friedberg y el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas de Cuba.

Para esta primera fase de la investigación, se diseñó una aplicación que es capaz de sensor, procesar y transmitir a través de una red convencional de computadoras, los datos básicos que caracterizan el

estado eléctrico en un punto de medición trifásico. Para ello, se utilizó un sistema de desarrollo que posee un microcontrolador ARM de 32 Bits,<sup>1</sup> memoria RAM, flash, un controlador Ethernet y otros elementos. En la memoria flash se almacena un sistema operativo propio Linux, con el cual corren todos los programas que ejecuta el microcontrolador. Resulta importante señalar que la posibilidad de código abierto que brinda el sistema operativo instalado, aporta a la experimentación una gran flexibilidad para el manejo de los recursos de hardware y muchas potencialidades de optimización, aspectos estos, que con otros sistemas operativos es muy difícil de lograr.

## DESCRIPCIÓN Y ALCANCE DE LA APLICACIÓN

### Concepción general del sistema

El desarrollo de la aplicación se orienta en dos direcciones o tareas fundamentales a resolver.

**1. Hardware:** Diseño, montaje y puesta a punto de los requerimientos necesarios de hardware para censar, muestrear y digitalizar las señales de corriente y tensión.

**2. Software:** Diseño y puesta a punto de los programas necesarios para llevar a cabo el procesamiento digital de las señales, así como el tratamiento de ficheros de los datos colectados y la transmisión segura de la información por la red.

Según el diseño realizado para la aplicación, el usuario, desde cualquier ordenador conectado a la red local y con cualquier sistema operativo instalado en el mismo, puede observar los valores de tensión y corriente efectiva de la componente fundamental, tanto para cada una de las fases como totales. Además, se le ofrecen los valores de potencia activa, reactiva, aparente, factor de potencia por fase y total. Toda esa información la recibe mediante una página Web, que se refresca cada un segundo. El usuario tiene la posibilidad de escoger qué variables quiere monitorear y cuáles no, aunque el sistema siempre registrará todas las variables, las almacenará en ficheros binarios y de textos, quedando listas para ser graficadas cuando cualquier usuario lo solicite.

### Esquema de la aplicación

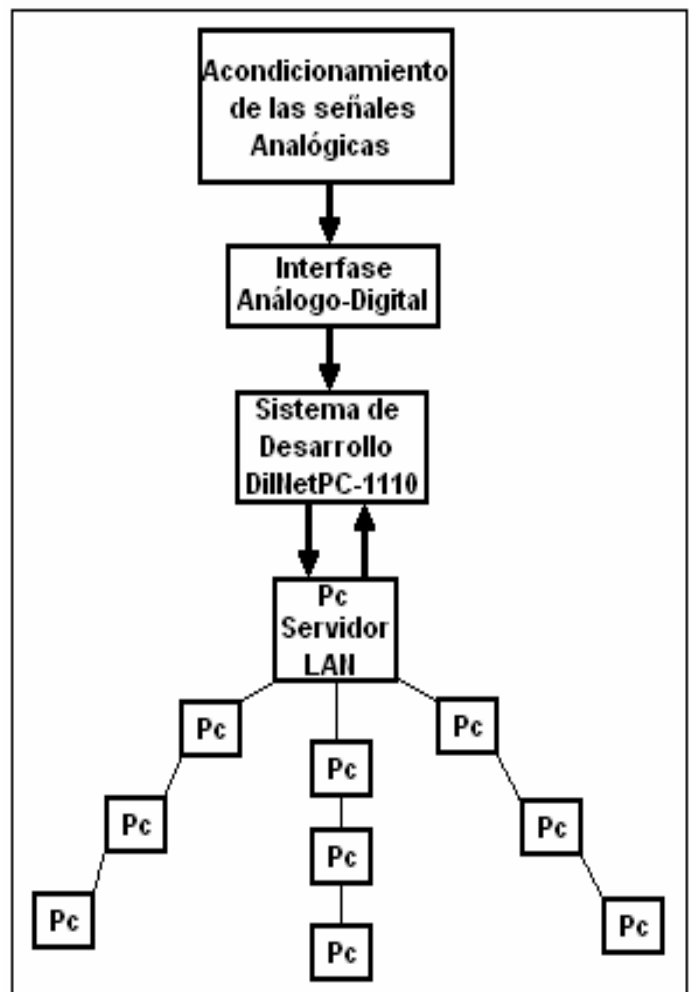
Como se aprecia en la figura 1, la aplicación consta de tres etapas: **Interfase análogo-digital**, **Sistema de desarrollo DiINetPC-1110**, y **la red local de computadoras**.

El bloque análogo-digital se dedica al muestreo y la digitalización de seis señales, tres de corriente y tres

de tensión. La información colectada pasa al sistema de desarrollo DiINetPC-1110, donde es procesada por el microcontrolador. Cada cierto intervalo de tiempo, el sistema de desarrollo envía la información procesada en forma de ficheros a una PC, donde funciona un programa servidor que recibe toda la información.

Los clientes de la red, cuando necesitan observar el estado de las variables medidas, realizan su solicitud al programa servidor que corre en la PC, y este les devuelve una página Web con la información solicitada. Aunque no exista ninguna encuesta al servidor, el sistema de desarrollo siempre enviará la información al servidor y este realiza la gestión de almacenamiento.

De esta forma el cliente siempre tendrá la posibilidad de ver resúmenes históricos de las variables muestreadas.



Esquema general de la instalación desarrollada para el monitoreo de las señales de potencia.

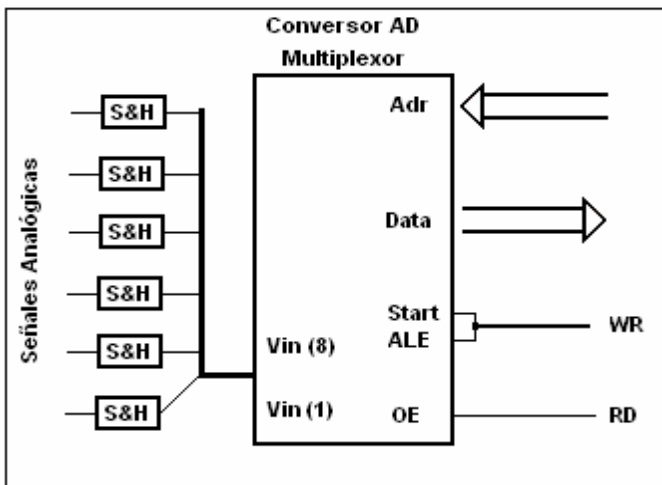
### Interfase análogo-digital

Se diseñó una interfase análogo-digital muy económica, pero que cumple con los requerimientos técnicos mínimos para esta fase experimental del proyecto. Cuenta con un convertor de 8 Bits de resolución y un multiplexor incorporado para manejar 8 canales analógicos. Además, incluye a 6 circuitos integrados *sample&hold*, que se encargan del muestreo y de colocar los valores en las entradas analógicas del convertor AD. Los valores digitales obtenidos son entregados al bus de expansión del microcontrolador.

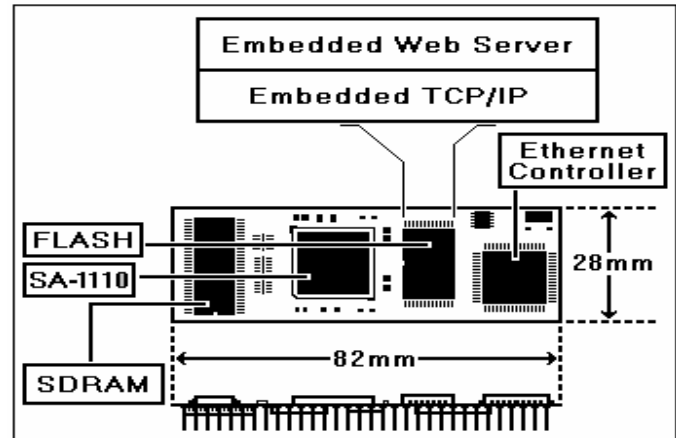
La figura 2 muestra la configuración general de la etapa descrita.

### Sistema de desarrollo DiINetPC-1110

El sistema de desarrollo DiINetPC-1110<sup>2</sup>, contiene un compacto microcontrolador INTEL a 206 MHz, con muy bajo consumo de energía. Los otros elementos externos más importantes alrededor del microcontrolador son: Un chip de memoria flash de 16 MBytes, un chip SDRAM de 32 MBytes y un controlador Ethernet de 10/100 Mbps. El microcontrolador maneja dos puertos series, dos puertos paralelos programables I/O, un bus de expansión de 8 Bits, además de varios temporizadores, interrupciones, etc. El DiINetPC-1110 incluye un sistema operativo Linux propio (Kernel 2.4), además servidores propios Web, FTP y Telnet. Tales prestaciones han proporcionado el desarrollo de la aplicación a muy bajo costo y con un ahorro sustancial de tiempo de ejecución (figura 3).



Principales elementos que conforman la etapa análogo-digital.



Configuración física del sistema de desarrollo DiINetPC-1110.

3

### Aplicaciones informáticas desarrolladas

Se desarrollaron varios programas que realizan las siguientes funciones:

**1. Tratamiento digital:** Corre en el microcontrolador y se ocupa de manejar todas las operaciones de la interfase análogo-digital. También realiza un procesamiento digital de la información captada y por último, se crean ficheros binarios con los resultados de procesamiento. Más adelante se profundizará en el método empleado para el tratamiento digital. El programa está hecho en código ANSI C, se compila y queda almacenado en la memoria flash del DiINetPC-1110.

**2. Transmisión de los ficheros binarios:** Son dos programas sockets que establecen el flujo de transmisión de los ficheros binarios desde el microcontrolador a la PC encargada de la gestión de los mismos. El socket cliente corre en el microcontrolador y el socket servidor corre en la PC.

**3. Interfase Web:** Es un script CGI-C que corre en la PC servidor y su función fundamental es mostrar, al usuario de la red local, el estado de las variables eléctricas del punto de medición. En la figura 4 se muestra una de las pantallas que ofrece el sistema al usuario.

### PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS SEÑALES

Para lograr obtener los valores de potencias activas, reactivas, etc., es necesario, a partir de los valores instantáneos muestreados en las señales de corriente y tensión, calcular los valores efectivos de sus componentes fundamentales y de sus defasajes.

Uno de los aspectos más importantes para llevar a cabo un efectivo procesamiento de las señales, es

decidir el número de muestras por ciclos que se toman. Se deben tener en cuenta los tiempos necesarios de operación del microcontrolador, del conversor AD y de los *Sample&Holds* empleados y además del nivel de armónicos superiores que contiene la señal monitoreada.

Se asume que los valores de los armónicos superiores al séptimo, en el punto de medición, son despreciables. En cuanto a la rapidez de respuesta de la instalación, el tiempo que tarda el microcontrolador en ejecutar cada una de las instrucciones programadas, es alrededor de un microsegundo o menos. El tiempo de conversión del AD es 100 microsegundos y el tiempo de muestreo de los *Sample&Holds* es de 20 microsegundos. Además, es importante señalar que el algoritmo maneja seis señales y esto provoca que se introduzca un mayor retardo de tiempo entre las muestras consecutivas por cada señal.

Finalmente, a pesar del retardo que se introduce por el conversor AD, que es el más significativo, los resultados experimentales demostraron que es perfectamente posible tomar hasta 14 muestras por ciclo en cada señal y de esta manera, es posible realizar el filtrado para evitar el fenómeno de Aliasing hasta el séptimo armónico.

El fenómeno de Aliasing<sup>3</sup> pudiese ser contrarrestado con la construcción de un filtro antiAliasing, pero dada la alta velocidad de procesamiento del microcontrolador usado, es factible lograr el mismo efecto por software, sin poner en riesgo el tiempo de procesamiento.

El algoritmo seleccionado para el procesamiento, es el de la transformada discreta de Fourier,<sup>4</sup> aplicando su variante recursiva. El método empleado, que a continuación se describe, tiene la ventaja que es muy fácil de programar y su forma recursiva demanda muy poco tiempo de cálculo.

Al llenarse la ventana con los primeros 14 valores muestreados, se aplican las siguientes ecuaciones para el cálculo de los coeficientes rectangulares de la componente fundamental.<sup>5</sup>

$$Y_c = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \cos(k\theta) \quad \dots(1)$$

$$Y_s = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \sen(k\theta) \quad \dots(2)$$

**Sistema de adquisición de datos sobre Web**

Visualización de parámetros medidos

Corriente por fase		Voltaje por fase	
I fase A = 3.287	A	U fase A = 237.100	V
I fase B = 3.710	A	U fase B = 237.100	V
I fase C = 3.207	A	U fase C = 237.100	V

Potencia Activa		Potencia Reactiva	
P fase A = 701.392	W	Q fase A = 339.732	var
P fase B = 703.091	W	Q fase B = 528.612	var
P fase C = 701.287	W	Q fase C = 293.770	var

Terminado

Imagen de una de las pantallas que recibe el cliente de la red al solicitar información de las mediciones.

donde:

$m$ : Número de muestras que contiene la ventana, en este caso  $m = 14$ .

$\theta$  : Valor del ángulo entre cada muestra.

El cálculo del valor efectivo y la fase de la componente fundamental se realizan mediante las expresiones (3) y (4).

$$Y_{ef} = \frac{\sqrt{(y_c)^2 + (y_s)^2}}{\sqrt{2}} \quad \dots(3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_s}{y_c} \quad \dots(4)$$

Una vez realizado el cálculo inicial de la primera ventana, comienza el algoritmo recursivo. Ahora la ventana empieza a desplazarse eliminando el primer valor muestreado y tomando un nuevo valor.

$$Y_c = Y_{c(L-1)} + \frac{2}{m} (Y_{L(nuevo)} - Y_{(L-m)(viejo)}) \cos L\theta \quad \dots(5)$$

$$Y_s = Y_{s(L-1)} + \frac{2}{m} (Y_{L(nuevo)} - Y_{(L-m)(viejo)}) \sen L\theta \quad \dots(6)$$

donde:

$m$ : Cantidad de muestras que contiene la ventana.

$L$ : representa el número que identifica a la muestra dentro de la señal.

$\theta$  : Valor del ángulo entre cada muestra.

Empleando (3), se calcula el valor efectivo para la nueva posición de la ventana.

En el caso del valor de la fase, es necesario tener en cuenta que la incorporación de nuevas muestras provoca una rotación del ángulo y eso es necesario corregirlo. De esta forma la nueva expresión para el cálculo de la fase es:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_s}{y_c} - (L - m)\theta \quad \dots(7)$$

donde:

$m$ : Cantidad de muestras que contiene la ventana.

$L$ : Representa el número que identifica a la muestra dentro de la señal.

$\theta$  : Valor del ángulo entre cada muestra.

## CONCLUSIONES

Se logró desarrollar una aplicación experimental para el monitoreo de las variables de potencia de un punto de medición trifásico. El trabajo implicó la instrumentación y puesta a punto de algoritmos y elementos de hardware obteniéndose resultados muy positivos. De esta forma, se ofrece una variante económicamente factible para la experimentación y la búsqueda de innovadoras prestaciones en instalaciones de adquisición de datos para sistemas de potencia.

En el futuro se pretenden perfeccionar los algoritmos de cálculos para incluir el análisis y el procesamiento de las componentes de armónicas superiores, así como el tratamiento de los ruidos que se introducen en las mediciones.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo brindado en la investigación a la Universidad Alemana de Ciencias Aplicadas de Giessen-Friedberg, en especial, al personal técnico del Laboratorio de Electrotecnia.

## REFERENCIAS

1. **Phadke, A. G. and J. S. Thorp:** *Computer Relaying for Power Systems*, 2nd, pp. 56-88, John Wile & Sons Inc, 1988,
2. **Popoulis, A.:** *Signal Analysis*, McGraw-Hill, 1977.
3. **Smith, Steven W.:** *The Scientist and Engineer's, Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, 1997.
4. **Intel StrongARM\* SA-1110 Microprocessor Developer's Manual**, Intel Products Inc., USA, 2001.
5. **DIL/NetPC DNP/1110 Starter Kit User Manual**, SSV Embedded Systems, Germany, 2003.

## AUTORES

### Yoel R. Rosales Hernández

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:yoelraul@electrica.cujae.edu.cu

### Mercedes Canasí Piñeiro

Ingeniera Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, CIPEL, Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:mcanasí@electrica.cujae.edu.cu

### Wolf Rayner Novender

Ingeniero Electricista, Doctor en Ingeniería Eléctrica, Profesor Titular, Universidad de Ciencias Aplicadas Giessen-Friedberg, Alemania