



Conciencia Tecnológica

ISSN: 1405-5597

contec@mail.ita.mx

Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
México

López Rivas, José Valentín; Esparza González, Mario Salvador  
Analizador de redes eléctricas  
Conciencia Tecnológica, núm. 22, 2003  
Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
Aguascalientes, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94402202>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Analizador de redes eléctricas

Ing. José Valentín López Rivas, M.C. Mario Salvador Esparza González  
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica.  
Av. López Mateos No. 1801 Ote. Fracc. Balcones de Ojocaliente. Aguascalientes, Ags.  
Tel: (014)-9-10-50-02, Fax (014)-9-70-04-23 [msepa@hotmail.com](mailto:msepa@hotmail.com)

*Resumen* - El proyecto Analizador de redes eléctricas se encarga de medir la mayoría de los parámetros de la potencia eléctrica, como son: armónicas de voltaje, corriente, potencia aparente, factor de potencia, potencia activa y distorsión armónica. Cuenta con un microcontrolador de la familia Microchip, el cual ya tiene integrado un convertidor análogo digital de 10 bits. La programación se hace en lenguaje ensamblador para el muestreo del voltaje y la corriente y se envía en forma serial a una computadora en donde se realizan todos los cálculos de los parámetros de la energía eléctrica, el programa desarrollado es en lenguaje delphi.

### ***I. Introducción.***

Tanto las empresas suministradoras de energía eléctrica como los usuarios finales (empresas) han estado insistiendo cada vez más en el concepto de **calidad de la energía**. Las principales razones por las que es necesario estudiar los conceptos relacionados con la calidad de la energía son los siguientes:

- Las cargas cada día son más sensibles a las variaciones de ciertos parámetros o variaciones en los sistemas del suministro de energía eléctrica.
- Se ha incrementado el concepto de mayor eficiencia en los sistemas eléctricos, lo cual ha traído como consecuencia que las cargas más eficientes incrementen los niveles de armónicas principalmente.
- Una mayor atención de los usuarios finales a la calidad de energía eléctrica como son interrupciones de servicio, transitorios por

maniobras, bajas o elevaciones de voltaje, etc.

Lo anterior, plantea la necesidad de identificar estos problemas entre los suministradores y usuarios de energía eléctrica en forma grupal, ya que anteriormente el suministrador, usualmente atribuye los problemas a anomalías en la instalación del usuario, mientras que el usuario, normalmente asocia los problemas a deficiencias en las redes de suministro. Por lo anterior, el conocimiento de la características de la calidad de la energía eléctrica de los sistemas eléctricos del suministrador y del usuario es esencial para establecer acciones económicas, tanto por parte del suministrador como del usuario, que permitan el control de los efectos no deseables.

El analizador de redes eléctricas va enfocado principalmente para que pueda servir como una herramienta para el estudio de los problemas de calidad de la energía en sistemas eléctricos, para esto es necesario conocer los elementos relacionados con la calidad de la energía eléctrica, como son conceptos básicos, efectos de las variaciones de voltaje en los equipos sensibles, el estudio de las armónicas y sus efectos, los problemas de los transitorios de voltaje, la aplicación de capacitores en los sistemas eléctricos, relacionados con las redes de tierra y la conexión a tierra de equipos sensibles. El presente trabajo tiene como finalidad la medición de los parámetros más significativos de la red eléctrica, principalmente debido a cuando se tienen cargas no lineales.

### ***II. Fundamento teórico.***

El incremento acelerado del uso de cargas no lineales

en los sistemas eléctricos, ha permitido un uso más eficiente de la energía eléctrica y aumentos considerables en la productividad de los procesos industriales pero, por otra parte, ha provocado una situación problemática, a veces grave, donde las corrientes armónicas generadas por los propios equipos electrónicos distorsionan la onda de corriente senoidal original y perturban la operación de estos mismos equipos. El problema no sólo puede sufrirlo el propio usuario, sino que a través de las líneas de distribución y transmisión puede propagarlo a otros usuarios de la red eléctrica, creando así una responsabilidad para sí mismo y para la compañía suministradora. Las armónicas son corrientes y voltajes senoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la línea eléctrica, que es de 60 Hz. Las armónicas distorsionan la forma de onda de 60 Hz suministrada de su forma senoidal normal y cada armónica se expresa en términos de su orden, conforme se incrementa el orden, la frecuencia de las armónicas y su magnitud normalmente disminuye. Por eso, las armónicas de orden inferior, usualmente la quinta y la séptima, tienen mayor efecto en el sistema de potencia. La norma IEEE-519 (USA) que es la que tiende a implantar la Comisión Federal de Electricidad y el responsable de esto es el IEEE (Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica).

Los límites de distorsión armónica establecidos en esta norma son para establecer la máxima distorsión de corriente permisible para un usuario, éstas recomendaciones son relacionadas con los siguientes índices:

**THD I:** Distorsión de la demanda total en corriente. Es la distorsión de corriente armónica en % de la demanda máxima de la corriente de carga (15 ó 30 minutos de

demanda).

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2$$

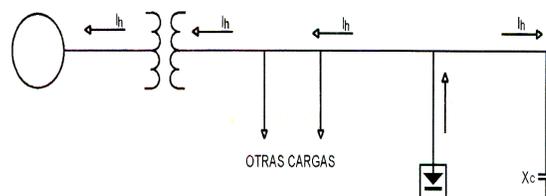
El THD I esta definido por: **THD I** =  $\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1}$

**THD V:** Distorsión de voltaje armónico total en porciento del voltaje de frecuencia fundamental nominal.

$$\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2$$

El THD V está definido por: **THD V** =  $\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1}$

Las corrientes armónicas tienden a fluir desde las cargas no lineales (fuentes de armónicas) hacia la impedancia más pequeña, usualmente, la fuente de la compañía eléctrica (figura 1).



**Figura 1** Flujos normales de las corrientes armónicas en la red

La mayor parte de las señales se pueden descomponer en la suma de componentes senoidales (o exponenciales complejas). Para la clase de señales periódicas, esta descomposición se denomina una serie de Fourier. El análisis frecuencial de una señal conlleva la separación de la señal en sus componentes (senoidales) frecuenciales, y la suma de estas componentes resulta en la forma de onda original. Una señal en tiempo discreto de periodo fundamental  $N$  puede tener componentes en frecuencias separadas  $2\pi/N$  radianes ó  $f = 1/N$  ciclos. Supongamos que nos dan una secuencia periódica  $x(n)$  de periodo  $N$ , es decir,  $x(n)=x(n+N)$  para todo  $n$ .

La representación de series de Fourier de  $x(n)$  consta de  $N$  funciones exponenciales armónicamente relacionadas

$$e^{-j2\pi kn/N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

y se expresa como

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

donde  $\{c_k\}$  son los coeficientes de la representación en serie.

Para obtener la expresión de los coeficientes de Fourier usamos la siguiente fórmula:

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (2)$$

La ecuación (1) se denomina normalmente serie de Fourier en tiempo discreto. Los coeficientes de Fourier  $\{c_k\}$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$  proporcionan la descripción de  $x(n)$  en el dominio de la frecuencia, en el sentido de  $c_k$  que representa la amplitud y la fase asociada a la componente de frecuencia.

Una secuencia de duración finita  $x(n)$  de longitud  $N$ , es decir,  $x(n)=0$  para  $n < 0$  y  $n \geq N$ . tiene la transformada de Fourier

$$X(k) \equiv \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

La ecuación (4) se denomina transformada discreta de Fourier (DFT) de  $x(n)$ .

La fórmula para la DFT se puede expresar como

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

donde,

$$W_N = e^{-j2\pi/N} \quad (5)$$

que es una raíz  $n$ -ésima de la unidad.

El cálculo directo de la DFT es básicamente ineficiente debido, fundamentalmente, a que no

explota las propiedades de simetría y periodicidad del factor de fase  $W_N$ . En particular estas propiedades son:

- Propiedad de simetría:

$$W_N^{k+N/2} = -W_N^k \quad (6)$$

- Propiedad de periodicidad:

$$W_N^{k+N} = W_N^k \quad (7)$$

Los algoritmos computacionales eficientes son conocidos como algoritmos FFT (transformada rápida de Fourier), usan estas dos propiedades básicas del factor base.

Los algoritmos de base 2, que son los más usados por los algoritmos para la FFT. Consideremos el cálculo de la DTF de  $N = 2^v$  donde la secuencia es de  $N$  puntos la dividimos en dos secuencias de  $N/2$  puntos,  $f_1(n)$  y  $f_2(n)$ , correspondientes a las muestras pares e impares de  $x(n)$ , respectivamente, esto es,

$$\begin{aligned} f_1(n) &= x(2n) \\ f_2(n) &= x(2n+1), \quad n=0, 1, \dots, N/2-1 \end{aligned} \quad (9)$$

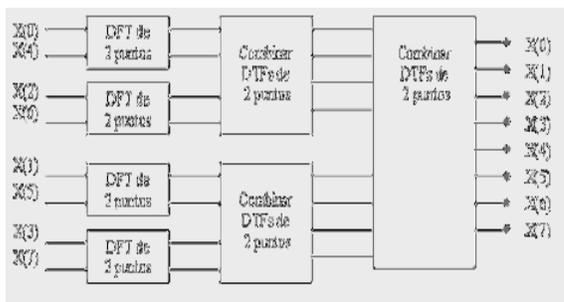
Por lo tanto  $f_1(n)$  y  $f_2(n)$  se obtienen diezmado  $x(n)$  por dos y, en consecuencia, el algoritmo para la FFT se denomina algoritmo diezmado en tiempo.

El diezmado de la secuencia de datos se puede repetir una y otra vez hasta que las secuencias resultantes sean secuencias de dos puntos. Para  $N = 2^v$ , el diezmado puede realizarse  $v = \log_2 N$  veces. Por lo tanto el número total de multiplicaciones complejas se reduce a  $(N/2) \log_2 N$ . El número de sumas complejas es  $N \log_2 N$ . La tabla 1 presenta una comparación entre el número de multiplicaciones complejas usando el algoritmo de FFT y el cálculo directo de la DFT. Para demostrar el funcionamiento del algoritmo se representa el cálculo de una DFT de  $N = 8$  puntos en la figura 2 Se observa que el

cálculo se realiza en tres etapas, primero el cálculo de cuatro DFTs de dos puntos, después dos de cuatro puntos, y finalmente, una de ocho puntos.

**TABLA 1 Comparación entre la complejidad computacional del cálculo directo de la DFT y la del algoritmo FFT**

Núm. de puntos, N	Cálculo directo de la DFT		Algoritmo FFT de base 2		Factor de mejora de la velocidad
	Multiplicaciones Complejas	Sumas Complejas	Multiplicaciones Complejas	Sumas Complejas	
32	1,024	992	80	160	12.8
64	4,096	4,032	192	384	21.3
128	16,384	16,156	448	896	36.6
256	65,536	65,280	1,024	2,048	64.0



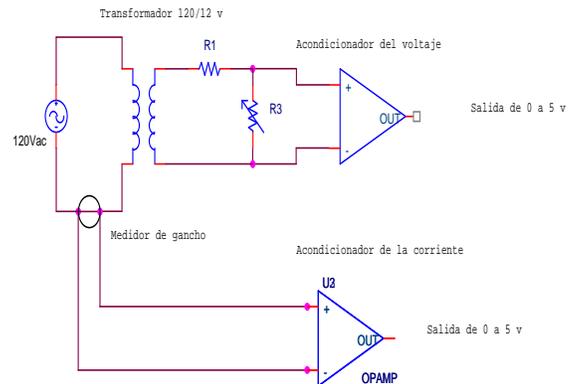
**Figura 2 Tres etapas en el cálculo de la DFT de N = 8 puntos**



**Figura 3 Mariposa básica del algoritmo para la FFT de diezrado en el tiempo**

Se observa que el cálculo básico que se realiza en cada etapa, como se muestra en la figura 3 consiste

en seleccionar dos números complejos, digamos (*a*, *b*), multiplicar *b* por  $W_N^r$ , y sumar y restar el producto obtenido de *a* para obtener los dos números complejos (*A*, *B*). A este cálculo básico que se realiza en cada etapa se denomina mariposa, dado que el diagrama de flujo recuerda una mariposa. Un segundo aspecto importante en el algoritmo es el orden de la secuencia de entrada, Este mezclado de la secuencia de entrada tiene un orden determinado, por lo tanto, la secuencia *x*(*n*) después del diezrado se almacena en orden binario invertido. Al almacenar de esta forma la entrada, al ejecutar el algoritmo la DFT resultante, *X*(*k*), se obtiene en orden natural.

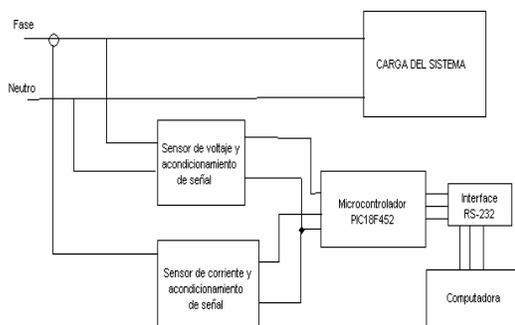


**Figura 4. Circuito de acondicionamiento para la medición de voltaje y corriente**

### III. Desarrollo del prototipo.

La medición del voltaje se realiza utilizando un transformador el cual tiene una relación de 120V/12V. Como se quiere que el voltaje a la entrada de ADC sea de 5 Volts para cuando en el primario del transformador halla  $V_{max}=150$  Volts. Por lo tanto en el secundario se tendrá una variación de voltaje máxima de  $\pm 21.213$  v. Esto significa que para obtener 5 Volts a la salida se acondiciona la

señal para que cuando existan  $-21.213$  v, debe de haber a la entrada del ADC  $0v$  y cuando sea de  $+21.213$  v sea de  $+5$  v (figura 4). La resolución del ADC es de 10 bits por lo tanto la resolución es de  $2 \cdot 150 \cdot 1.412V / 1024$  bits =  $0.4143$  V/bit. La medición de corriente se toma de un transformador de corriente tipo gancho, que tiene una relación de  $100mV/A$  de tal forma que cuando en el primario circulan 3 Amperes, en el secundario se tendrán 3 Volts. Es necesario amplificar el voltaje que proporciona el gancho por lo que se utilizará un amplificador de instrumentación (figura 4). La máxima corriente a medir será de 10 A, con lo cual nos da una resolución de  $10A / 1024$  bits =  $0.0097$  A/bit.

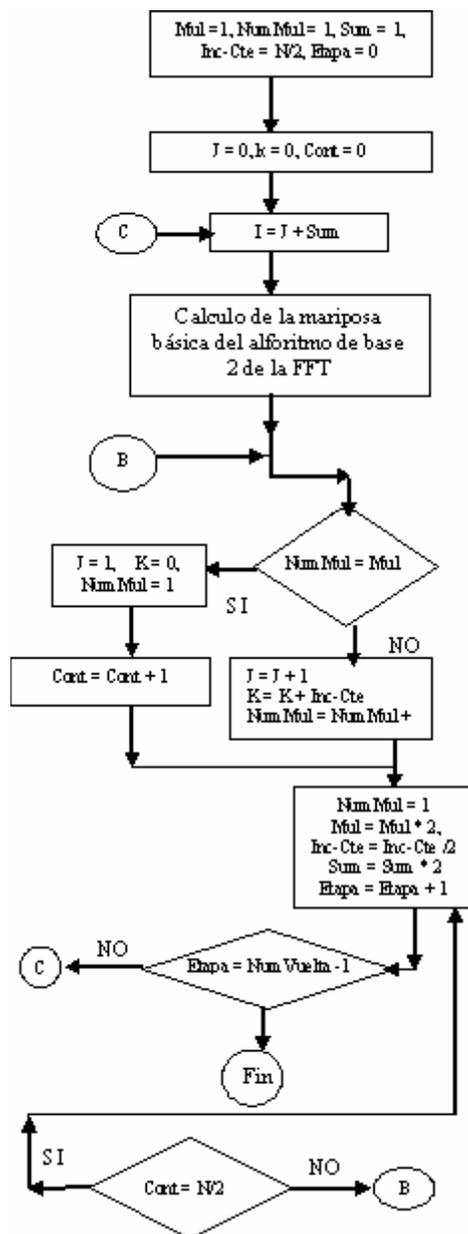


**Figura 5. Diagrama a bloques de analizador de redes eléctricas**

El muestreo de la señal será de 64 muestras por periodo con lo cual se puede obtener hasta la armónica 31, lo cual es suficiente para el propósito del medidor.

El microcontrolador PIC18F452 es el encargado de leer las señales de voltaje y corriente, mandarlas a la computadora por medio del puerto serial a una velocidad de 9600 Baud. El diagrama completo a bloques se muestra en la figura 5. En la computadora se utiliza el algoritmo de la FFT base 2 explicado

anteriormente para el calculo de las armónicas y se implementa en lenguaje Delphi, además se calculan los valores RMS, potencia, distorsión armónica y factor de potencia. En la figura 6 se muestra el diagrama de flujo en forma simplificada del algoritmo de la FFT.



**Figura 6. Algoritmo de la FFT de base 2**

#### IV Resultados



Figura 7. Forma de onda de la corriente analizada

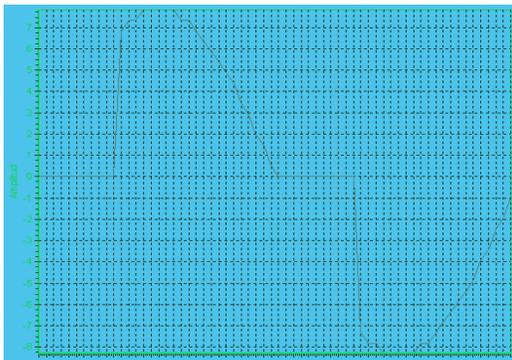


Figura 8. Forma de onda capturada por el prototipo

El analizador de redes eléctricas se podrá conectar a cualquier computadora que tenga puerto serie para realizar un análisis de la alimentación. Los resultados obtenidos se compararon con cálculos teóricos y mediciones realizadas con un analizador de calidad de energía (Power Quality Analyzer) de marca Fluke, después de analizar los resultados obtenidos se observó que las mediciones realizadas con el analizador construido eran aceptables ya que solo se tuvo una diferencia máxima del 3% con los resultados obtenidos con el analizador Fluke y con los teóricos. Estos resultados se muestran en la tabla

1, la forma de onda de corriente es la que indica la figura 7, el voltaje se supone que no está distorsionado. En la figura 8 se observa la forma de onda capturada por el prototipo.

Tabla 1. Resultados obtenidos.

No. De Armónica	Fourier Compleja	Fourier Discreta	Prototipo	Medidor Fluke
1°	100.00	100.0	100.00	100.00
3°	28.413	27.787	27.925	28.261
5°	16.419	16.480	16.654	16.405
7°	8.210	8.296	8.007	8.206
9°	7.515	7.501	7.708	7.476
11°	6.568	6.868	6.696	6.578
$I_{RMS}$	5.704	5.090	5.139	5.064
THDI	36.589	36.948	38.839	37.992

#### V Conclusiones.

Se lograron cumplir los objetivos planteados al inicio de la investigación contando finalmente con un prototipo, aunque se observa que la forma de onda se distorsiona debido a la resolución del ADC, se lograron realizar todas las mediciones que se plantearon con una buena precisión y para realizar otras mediciones que se necesite es muy fácil ya que solo hay que cambiar la programación del microcontrolador ó del programa desarrollado en Delphi.

#### VI Referencias.

- [1] Jhon G. Proakis. Tratamiento digital de señales Principios, algoritmos y aplicaciones, 3a Edición Prentice Hall, 1998
- [2] Ramón Pallás Areny, Sensores y condicionadores de señal, 3a Edición. Alfaomega marcombo, 2000

[4] Lander Cyril W. Power Electronics, 2a Edition  
Mc. Graw- Hill.