

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

Obregón Valencia Juan Carlos, Ing.
Sotomayor Orozco Nelson, MSc.

Escuela Politécnica Nacional

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un sistema basado en un controlador digital de señales (DSC) dsPIC para realizar el análisis y presentación de armónicos contenidos en la línea de alimentación eléctrica. Se pueden medir los diferentes niveles de voltajes y corrientes armónicos, por lo que primero se tomarán las mediciones en la línea, se las aislará del circuito analizador de armónicos y se las acondicionará a los niveles adecuados para digitalizarlas mediante el conversor A/D del dsPIC.

Las señales digitalizadas muestreadas se almacenan en una tabla en la memoria del dsPIC para que se pueda aplicar la transformada discreta de Fourier (DFT).

Obtenida la transformada discreta de Fourier (DFT), en un LCD gráfico de pantalla táctil se visualiza mediante un gráfico de barras el espectro de frecuencias de las señales analizadas, es decir, los niveles de voltajes y corrientes armónicas presentes en la línea de alimentación eléctrica bajo estudio, obteniéndose una presentación similar a la observada en cualquier analizador de armónicos comercial, así como también los valores del contenido armónico total (THD) tanto de voltaje como de corriente, lo cual se podrá seleccionar mediante el teclado táctil de la pantalla del LCD gráfico.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los inconvenientes que se afronta al analizar los sistemas eléctricos de potencia se relaciona con el hecho de tomar los datos necesarios que permitan verificar la eficiencia en la transmisión y distribución de la energía eléctrica, además de requerir una confiable medición del consumo de energía tanto para instalaciones industriales, comerciales y residenciales.

Con el transcurrir de los años y la creciente utilización de sistemas electrónicos basados en convertidores estáticos de estado sólido en instalaciones industriales, comerciales y residenciales, se enfrentó el reto de hacer el monitoreo de los sistemas de distribución tomando en cuenta la distorsión presente en las formas de onda de las señales de voltaje y corriente debido a las conmutaciones que los elementos semiconductores generaban; pues se necesitaban hacer esfuerzos para controlar los armónicos de corriente dentro de los límites permitidos en la industria mediante equipo capaz de monitorear esta distorsión en las subestaciones de distribución.

Uno de los problemas que se presenta cuando un consumidor genera una considerable distorsión armónica es que ésta puede afectar a los consumidores adyacentes a esa fuente, puesto que todo ese grupo de clientes pueden considerarse como contribuyentes a la contaminación de armónicos en la red, lo cual dificulta la correcta localización de la fuente de armónicos especialmente cuando se encuentran presentes redes resonantes.

Todo esto demanda poseer un aparato de medición que sea capaz de identificar la fuente de armónicos para poder establecer las medidas pertinentes que permitan remediar el problema, como la implementación y diseño de filtros de armónicos u otros esquemas de corrección.

Aspectos que deben tomarse en cuenta para hacer el correcto análisis de un sistema de potencia que contenga contaminación de armónicos serán entonces el realizar mediciones periódicas, usar adecuados transductores y contar con un buen equipo de medición, lo cual será discutido a continuación tomando en cuenta los aspectos más importantes dentro del campo de la medición de los niveles armónicos presentes en la red eléctrica.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

El proceso de medición de armónicos demanda que tanto el instrumento de medición, como los transductores de voltaje y corriente cumplan con ciertas características para asegurar que se obtengan muestras significativas de las señales bajo estudio, lo cual se relaciona con aspectos generales que deben tener los analizadores de armónicos.

El ancho de banda de la entrada analógica de un analizador de armónicos se relaciona con el límite de la frecuencia alrededor de la cual la señal es atenuada por más de 3 dB (29.2%), recomendándose un ancho de banda de 3 ± 0.5 Hz entre los puntos de -3 dB con una atenuación mínima de 40 dB a la frecuencia de $f_h + 15$ Hz (siendo f_h la frecuencia del armónico de orden h).

Tomando en cuenta esta consideración, una entrada analógica con un ancho de banda de 1.5 KHz. permite limitar la medición de armónicos hasta el armónico de orden 25 en un sistema de 60 Hz y hasta el armónico de orden 30 para sistemas de 50 Hz; lo cual permite cubrir la mayoría de frecuencias de interés en aplicaciones prácticas.

Sin embargo, considerando el criterio de Nyquist, si la señal de entrada contiene frecuencias mayores a la mitad de la frecuencia de muestreo, la señal no podrá ser interpretada adecuadamente y se requerirá que el ancho de banda de la entrada analógica sea mayor a los 3 KHz.; ya que para las corrientes armónicas menores a las de orden 65 (3.9 KHz. para 60 Hz o 3.25 KHz. para 50 Hz) la frecuencia de muestreo debe ser de al menos el doble que el ancho de banda de entrada, o una tasa de muestreo de 8 Ksps (K muestras por segundo) para cubrir sistemas de 60 Hz y 50 Hz.

En cuanto a los transductores que utilizan los analizadores de armónicos, estos elementos son capaces de convertir los parámetros a medirse en señales de una adecuada amplitud para que puedan ser procesadas por el equipo de medición. Sin embargo, no solo es importante la amplitud de dichas señales, ya que es esencial que la respuesta en frecuencia de estos transductores tenga un apropiado ancho de banda para no producir distorsión en las señales bajo análisis, con lo que se pueden tener dos tipos de transductores a utilizarse:

- Transformadores de voltaje
- Transformadores de corriente

Dependiendo del sistema de voltaje, la configuración de la red y el tipo de carga, la señal de voltaje puede ser medida directamente mediante un transformador de voltaje. Cuando se

utiliza un transformador de voltaje la medición se hace en el lado de bajo voltaje, sin embargo se deben realizar pruebas de la respuesta en frecuencia de dicho transductor para determinar si el ancho de banda que posee es adecuado para llevar a cabo las mediciones de armónicos.

Para el caso de la medición de corriente generalmente se utilizan transductores de corriente (como los usados en contadores de energía y medidores de potencia en subestaciones), puesto que poseen un ancho de banda de 20 KHz. con errores menores al 3%, como se muestra en la Figura 1.

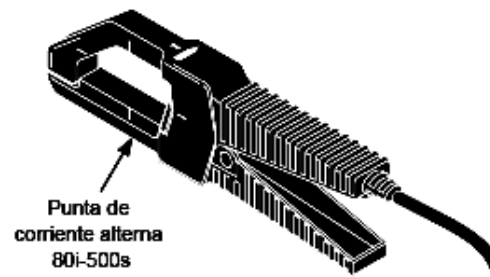


Figura 1 Transductor de corriente 80i-500s del Fluke 39/41B, tomado de [2]

En cuanto se refiere al tipo de cable utilizado para construir las puntas, para medición de voltaje se ocupa cable coaxial blindado cuando el punto de medición se encuentra cerca al equipo, o fibra óptica para el caso de tener distancias de decenas de metros, pues esto permite tener un adecuado aislamiento de cualquier interferencia que pueda provocar pequeños picos de amplitud en las señales bajo análisis.

En la Figura 2 se puede apreciar un esquema en bloques de los elementos componentes de un analizador de armónicos.

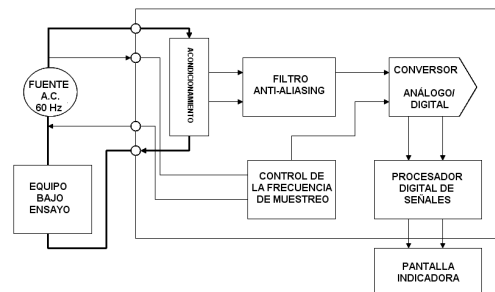


Figura 2 Esquema en bloques de un analizador de armónicos

3. LA TRANSFORMADA DE FOURIER

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

La Transformada de Fourier es una herramienta matemática que permite efectuar la descomposición de cualquier tipo de señal representada en el dominio del tiempo (periódica o aperiódica) en función de componentes sinusoidales que proporcionan la representación en el dominio de la frecuencia de dicha señal, lo cual resulta útil en numerosas aplicaciones de procesamiento digital de señales y para el análisis y diseño de sistemas lineales invariantes en el tiempo (LTI).

Cuando se trabaja con señales periódicas, la descomposición de dicha señal se conoce como serie de Fourier; mientras que cuando se tienen señales de energía finita, la descomposición de dicha señal se conoce como transformada de Fourier.

Dentro del presente proyecto se ocupará evidentemente la transformada de Fourier, pues la señal de entrada al analizador de armónicos no puede ser considerada periódica debido a que es una señal muestreada que presenta variaciones infinitesimales de una muestra respecto a otra, debido al tiempo de conversión entre muestra y muestra requerido por el conversor A/D, con lo que es conveniente asumir que no se trabaja con una señal periódica, sino más bien con una señal de energía finita, a pesar de que la frecuencia fundamental de la señal de entrada sea siempre la frecuencia de la red (60 Hz para este caso).

Por esta razón, se tratará tanto el desarrollo matemático como la implementación computacional de la transformada discreta de Fourier que es la que se utilizará en este proyecto, pues al muestrear la señal de entrada al analizador de armónicos se está discretizando dicha señal, ya que las muestras se toman a intervalos de tiempo constantes definidos por la tasa de conversión a la que trabaja el conversor A/D.

4. LA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT)

La transformada discreta de Fourier (DFT) es simplemente una aplicación particular de la transformada de Fourier para cuando se trabaja con señales muestreadas a iguales intervalos de tiempo, pues la DFT se calcula sobre secuencias de longitud finita que se encuentran comprendidas dentro del intervalo temporal $0 < n < N - 1$, siendo N el número total de muestras de las que se compone la secuencia de longitud finita bajo análisis.

La DFT tiene varias aplicaciones importantes, dentro de las cuales cabe mencionar las siguientes:

- Estimación espectral de las frecuencias contenidas en señales muestreadas
- Estimación espectral y filtrado de señales contaminadas por ruido o interferencia
- Desenmascarado de tramas de datos en comunicación digital
- Identificación de la función de transferencia de sistemas lineales e invariantes en el tiempo a partir de su respuesta frecuencial

El desarrollo matemático de la transformada discreta de Fourier parte de la transformada de Fourier para señales discretas que permite describir el espectro de señales discretas de longitud infinita. La deducción de la DFT se consigue a partir de la definición de la convolución discreta entre dos señales cualesquiera $x[n]$ y $h[n]$ para un intervalo de muestreo $t_s = 1$, definida como:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_s[k] h_s[n - k]$$

Donde n y k son números enteros.

Entonces, si se tiene una señal de entrada armónica $x[n] = \exp(j2 kft_s)$, la respuesta ante una entrada $h[n]$ será la siguiente:

$$\begin{aligned} y[n] &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp[(j2 (n-k)ft_s)] \cdot h[k] \\ &= \exp[(j2 kft_s)] \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(-j2 nft_s) \cdot h[k] \\ &= x[n] \cdot H(f) \end{aligned}$$

Donde, $H(f)$ es la transformada de Fourier de la señal discreta $h[n]$. Hay que tener en cuenta que la función $H(f)$ es periódica debido a que $h[n]$ es una señal muestreada a intervalos iguales de tiempo.

De lo anterior se define a la transformada de Fourier de una señal discreta $x[n]$ como:

$$X(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \exp(-j2 nft_s)$$

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Se puede observar que en la ecuación se tiene el problema de trabajar con series de datos de longitud infinita, lo cual dificulta la implementación de la DFT, pues la electrónica requiere que se manejen únicamente un número finito de datos discretos que además sean de una magnitud finita y cuantificable.

Debido a lo expuesto anteriormente se trata de discretizar las variables continuas y de limitar el número de muestras que se toman de las mismas mediante un conversor A/D para obtener señales digitalizadas que pueden ingresar a un procesador para su tratamiento, lo cual conlleva a la necesidad de definir a la transformada discreta de Fourier para trabajar con series de longitud finita.

Para las series de Fourier se cumple la siguiente expresión para cuando se tiene una frecuencia $f_o = 1/T$:

$$x_p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Xs[k] \cdot \exp(j2 k f_o t)$$

Donde:

$$Xs(k) = \frac{1}{T} \int x_p(t) \cdot \exp(-j2 k f_o t) dt$$

En la ecuación anterior de $x_p(t)$ se deben tomar N muestras de la señal durante un período a intervalos de tiempo t_s para poder limitar la señal, de manera que el período se defina como $T = N t_s$ para calcular los coeficientes de la señal $X[k]$ (la serie de Fourier discreta de la señal periódica muestreada $x_p[n]$) con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} X[k] &= \frac{1}{N t_s} \sum_{n=0}^{N-1} x_p[n] \cdot \exp(-j2 k f_o n t_s) \cdot t_s \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_p[n] \cdot \exp(-j2 kn/N) \end{aligned}$$

Para $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$

Por lo tanto, si se tiene una señal $x[n]$ limitada a N muestras tomadas con un intervalo de muestreo constante t_s , la transformada de Fourier para esta señal discreta se define como:

$$Xp(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \exp(-j2 n f t_s)$$

Donde $Xp(f)$ es una señal conformada de N número de muestras tomadas periódicamente a una frecuencia de $1/t_s$, ante lo cual, para obtener la señal $X_T(k)$ se debe sustituir f por k/Nt_s , obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} X_T(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \exp[-j2 n k t_s / (N t_s)] \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \exp[-j2 nk / N] \end{aligned}$$

La ecuación resultante de $X_T(k)$ es la definición de la transformada discreta de Fourier de una señal $x[n]$. Cabe notar que esta expresión es idéntica a la de la serie discreta de Fourier excepto por el término $1/N$ fuera del sumatorio.

5. DIAGRAMA EN BLOQUES DEL ANALIZADOR DE ARMÓNICOS CONSTRUIDO

En la construcción del analizador de armónicos se deben considerar varias etapas previas al tratamiento digital de la señal a ser analizada, pues se debe en primer lugar reducir el nivel de voltaje de la señal de entrada al dispositivo hasta niveles que puedan ser manejados de manera digital, además de acondicionar la señal de entrada para que se encuentre dentro del rango de 0 a 4V que se ingresan al conversor A/D del dsPIC30F4013 para digitalizar la señal y analizarla mediante la transformada discreta de Fourier implementada mediante software en el dsPIC, la cual permitirá tratar la señal en el dominio de la frecuencia y de esa manera presentar datos del espectro de frecuencias componentes de dicha señal de entrada.

La Figura 3 muestra un diagrama en bloques simplificado del tratamiento de la señal de entrada previo al procesamiento digital que será necesario para su análisis frecuencial.

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

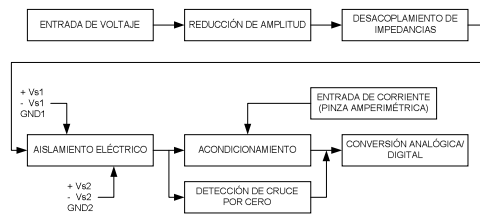


Figura 3 Diagrama en bloques del analizador de armónicos construido

Se debe tener en cuenta que las etapas de reducción de amplitud de la señal de entrada, desacoplamiento de impedancias y aislamiento eléctrico se utilizan únicamente para las señales de entrada de voltaje (120Vrms o 220Vrms), puesto que la señal de corriente proviene de una pinza amperimétrica que funciona en base al principio del campo magnético inducido en conductores para medir las señales de corriente y entregar una salida de 100mV/A que se ingresa directamente a una etapa de acondicionamiento de señal.

6. PANTALLA TÁCTIL RESISTIVA

Una pantalla táctil resistiva está formada por un panel de vidrio o acrílico revestido por varias capas de material conductor y resistivo hechos de óxido de indio (ITO), entre las cuales existe una pequeña separación, como se observa en la Figura 4.

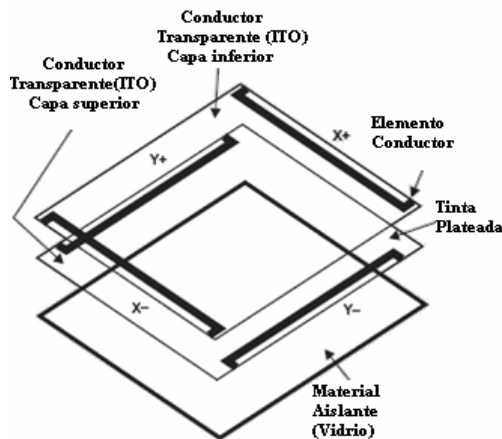


Figura 4 Estructura de una pantalla táctil con tecnología resistiva, tomado de [7]

Las arquitecturas más comunes presentes en las pantallas táctiles con tecnología resistiva usan configuraciones de cuatro y cinco hilos (usadas para medir la presión aplicada sobre el punto presionado) para la determinación de las

coordenadas X-Y donde se ha presionado la pantalla, como se indica en la Figura 5.

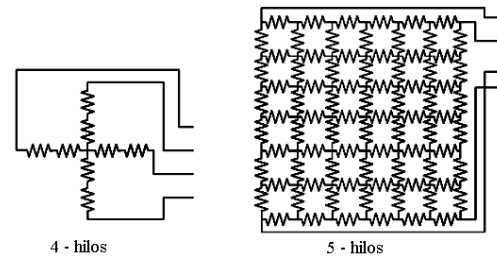


Figura 5 Configuraciones circuitales de pantallas táctiles resistivas de cuatro y cinco hilos

Cuando algún objeto toca la superficie de la capa exterior, las dos capas conductoras entran en contacto en un punto concreto, produciéndose un cambio en la corriente eléctrica que permite a un controlador calcular la posición del punto en el que se ha tocado la pantalla midiendo la resistencia.

Algunas pantallas pueden medir, aparte de las coordenadas del contacto, la presión que se ha ejercido sobre la misma.

En la determinación de las coordenadas X-Y de un punto presionado, lo cual pone en contacto las capas resistivas, sobre una pantalla táctil con arquitectura de cuatro hilos se aplica un voltaje a través de los terminales de la dirección Y de la pantalla táctil mientras se lee el voltaje presente en uno de los puntos correspondientes a la capa X.

El contacto entre capas que se produce como resultado del toque de la pantalla crea un divisor de voltaje en ese punto de presión, de manera que se puede determinar la coordenada Y del punto de contacto. Este proceso puede ser repetido aplicando voltaje en los terminales de la dirección X mientras se lee el voltaje en uno de los puntos de la capa Y para determinar la coordenada X del punto presionado.

De esta manera se puede deducir que el controlador para una pantalla táctil es un dispositivo que permite tanto aplicar voltaje a los terminales de la pantalla, como leer sus terminales mediante un conversor A/D, lo cual se implementa de manera fácil haciendo uso de los pines de entrada/salida tanto digital como analógica del dsPIC.

Las pantallas táctiles resistivas son por norma general más asequibles que las desarrolladas con otras tecnologías, pero tienen una pérdida de

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

aproximadamente el 25% del brillo debido a las múltiples capas necesarias. Otro inconveniente que tienen es que pueden ser dañadas por objetos afilados, aunque no se ven afectadas por elementos externos como polvo o agua, razón por la que son el tipo de pantallas táctiles más usado en la actualidad.

El circuito implementado en el presente proyecto para conectar el LCD gráfico al dsPIC se muestra en la Figura 6.

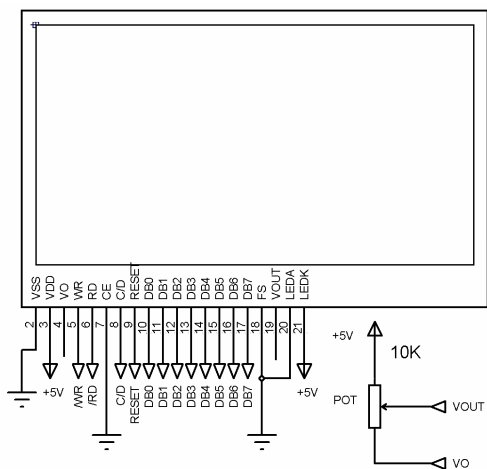
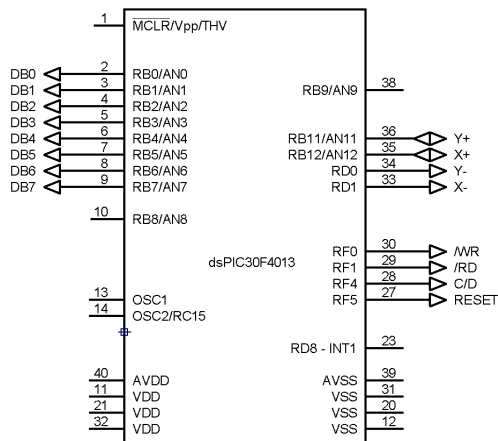


Figura 6 Circuito de conexión del LCD gráfico T6963C

7. SISTEMA MICROPROCESADO

La Figura 7 permite indicar las señales que le sirven de entrada al microcontrolador dsPIC30F4013, como las señales de voltaje acondicionadas en un rango de 0 a 5V (tanto para las entradas de 120V o 220V @ 60 Hz) y la señal

de corriente proveniente de la pinza amperimétrica capaz de proporcionar una relación de 100mV/A, lo cual necesita una etapa de amplificación.

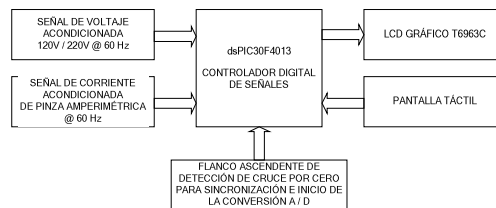


Figura 7 Arquitectura básica del sistema

A más de las señales de voltaje y corriente, el microcontrolador requiere una señal de flanco ascendente proporcionada por un detector de cruce por cero para iniciar el proceso de conversión A/D de las señales de entrada y de esta manera sincronizar la adquisición de datos con la red eléctrica para tener una referencia constante durante el procesamiento digital de señales y la aplicación de la FFT.

Una vez realizado el análisis de las señales de entrada, se despliegan estos datos en el LCD gráfico T6963C que permite implementar la interfaz gráfica de usuario para el manejo del sistema analizador de armónicos, puesto que este dispositivo posee una pantalla táctil (Touchscreen) con la que el usuario puede acceder a todas las funciones del sistema de manera simple y rápida con tan solo un toque sobre la pantalla.

En la Tabla 1 se muestran los recursos utilizados del Controlador Digital de Señales dsPIC30F4013 y en la Figura 8 se muestra al dsPIC con los elementos básicos para su funcionamiento, así como los pines empleados para colocar los periféricos.

El dsPIC30F4013 recibe una señal de detección de cruce por cero en el pin 23 que es capaz de detectar flancos ascendentes o descendentes para realizar la sincronización de la adquisición de las señales de entrada de voltaje y corriente con la red de energía eléctrica, tomando como referencia la señal de voltaje.

Las señales de entrada de voltaje y corriente acondicionadas ingresan a los canales correspondientes de entrada analógicos del dsPIC ubicados en los pines 10 y 38 respectivamente para su posterior digitalización.

Los pines 2 al 9 correspondientes al puerto B del dsPIC conforman el bus para el envío de datos

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

hacia el LCD gráfico, mientras que los pines 27, 28, 29 y 30 se encargan del control del LCD gráfico.

Los pines 33, 34, 35 y 36 se encargan de realizar la lectura de las coordenadas XY de los puntos de presión sobre la pantalla táctil resistiva superpuesta al LCD gráfico para el manejo de las opciones del usuario.

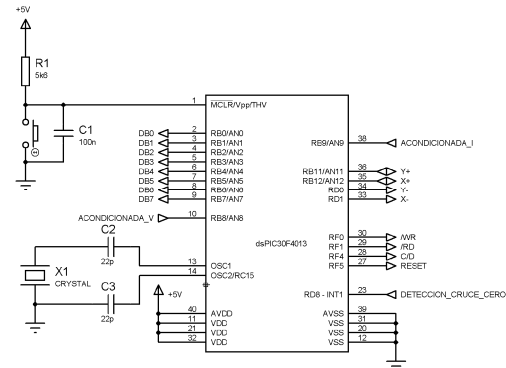


Figura 8 Conexiones del dsPIC30F4013

8. PROGRAMA DE CONTROL DEL dsPIC30F4013

Las señales de voltaje y corriente acondicionadas previo a su ingreso al convertidor análogo/digital de 12 bits del dsPIC30F4013 son digitalizadas a una tasa de aproximadamente 21.595ksp/s (mil muestras por segundo) para poder obtener un arreglo de 360 muestras durante cada período de 16.67ms (correspondientes a los 60 Hz de frecuencia de la red eléctrica).

Este arreglo de 360 muestras contiene la información suficiente de las señales de entrada como para poder analizarlas mediante la transformada discreta de Fourier y obtener el diagrama frecuencial de las componentes armónicas presentes.

Las formas de onda adquiridas por el microcontrolador son mostradas de diferentes maneras en el LCD gráfico, puesto que el sistema posee opciones en las que se dibuja completamente la forma de onda de la señal adquirida, otra en la que se indica el valor de las componentes armónicas de la señal con un gráfico de barras (análisis espectral) y otra opción en la que se indica el valor correspondiente a cada una de las componentes armónicas en valor porcentual.

9. FUNCIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (FFT)

Esta función es llamada por las opciones del usuario donde se realiza el análisis de las señales de entrada mediante la técnica de la Transformada Discreta de Fourier (FFT), las opciones que llaman a la función FFT son aquellas donde se grafica el espectro de frecuencias de la señal de entrada mediante un gráfico de barras, en la opción donde se escribe el valor porcentual de las

Tabla 1 Recursos utilizados

RECURSOS UTILIZADOS DEL dsPIC		
Pin del dsPIC	Nombre del pin	Función
1	MCLR	Reset
2	RB0 - AN0	DB0 - I/O dato del LCD Gráfico
3	RB1 - AN1	DB1 - I/O dato del LCD Gráfico
4	RB2 - AN2	DB2 - I/O dato del LCD Gráfico
5	RB3 - AN3	DB3 - I/O dato del LCD Gráfico
6	RB4 - AN4	DB4 - I/O dato del LCD Gráfico
7	RB5 - AN5	DB5 - I/O dato del LCD Gráfico
8	RB6 - AN6	DB6 - I/O dato del LCD Gráfico
9	RB7 - AN7	DB7 - I/O dato del LCD Gráfico
10	RB8 - AN8	Entrada analógica de voltaje
11	VDD	Alimentación de 5V
12	VSS	Tierra 0V
13	OSC1	Oscilador
14	OSC2 - RC15	Oscilador
20	VSS	Tierra 0V
21	VDD	Alimentación de 5V
23	RD8 - INT1	Entrada de detección de cruce por cero mediante flanco ascendente
27	RF5	Reset del LCD Gráfico
28	RF4	C/D del LCD Gráfico
29	RF1	/RD del LCD Gráfico
30	RF0	/WR del LCD Gráfico
31	VSS	Tierra 0V
32	VDD	Alimentación de 5V
33	RD1	Salida digital de 0V para leer pantalla táctil (X-)
34	RD0	Salida digital de 0V para leer pantalla táctil (Y-)
35	RB12 - AN12	Entrada analógica para leer pantalla táctil (X+)
36	RB11 - AN11	Entrada analógica para leer pantalla táctil (Y+)
38	RB9 - AN9	Entrada analógica de corriente
39	AVSS	Referencia de 0V para conversión A/D
40	AVDD	Referencia de 5V para conversión A/D

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

componentes armónicas de la señal, o cuando se analiza la señal para calcular la distorsión armónica total en porcentaje (THD%).

La implementación matemática de la FFT implica aplicar la fórmula de cálculo de la FFT que viene dada por la siguiente ecuación:

$$x_k = \sum_{i=1}^N X[i-1] * \exp\left(\frac{-j * 2 * \pi * k * (i-1)}{N}\right)$$

Donde: k = orden del armónico a calcularse
 N = número total de muestras de la señal de entrada
 i = número de elemento del arreglo de muestras de la señal de entrada
 j = factor de multiplicación imaginario

Cabe notar que la ecuación anterior puede ser simplificada mediante el teorema de Euler que indica la siguiente relación para una exponencial compleja:

$$\exp(-j * x) = \cos(x) - j * \sin(x)$$

Por lo tanto, la ecuación de la FFT puede escribirse de la siguiente manera:

$$x_k = \sum_{i=1}^N X[i-1] * \left[\cos\left(\frac{2 * \pi * k * (i-1)}{N}\right) - j * \sin\left(\frac{2 * \pi * k * (i-1)}{N}\right) \right]$$

De la ecuación anterior puede deducirse que el módulo de cada armónico, es decir $|x_k|$, puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$|x_k|^2 = \left[\sum_{i=1}^N X[i-1] * \cos\left(\frac{2 * \pi * k * (i-1)}{N}\right) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N X[i-1] * \sin\left(\frac{2 * \pi * k * (i-1)}{N}\right) \right]^2$$

La ecuación anterior puede reducirse de la siguiente manera:

$$|x_k| = \sqrt{(A_k)^2 + (B_k)^2}$$

Donde:

$$A_k = \sum_{i=1}^N X[i-1] * \cos\left(\frac{2 * \pi * k * (i-1)}{N}\right)$$

$$B_k = \sum_{i=1}^N X[i-1] * \sin\left(\frac{2 * \pi * k * (i-1)}{N}\right)$$

La ecuación anterior será implementada en el dsPIC mediante el mikroC_dsPIC que permite programar funciones sinusoidales y cosenoidales. El sumatorio requerido para determinar tanto los términos A_k como B_k se implementa fácilmente mediante un lazo de recursividad do...while en el

cual se varía el número del elemento del arreglo de muestras de la señal de entrada ($i = 1, 2, \dots, 360$).

El único parámetro que debe darse a la función FFT antes de llamarla es el orden del armónico a calcularse ($k = 0, 1, 2, \dots, 31$), puesto que el arreglo de los datos muestreados de la señal de entrada ($N = 360$ muestras) ya es conformado antes de llamar a la función FFT mediante una función de adquisición de datos.

En cada llamada, la función FFT devuelve el valor x_k de acuerdo al orden del armónico que se requiera calcular.

La función que llama a la función FFT debe encargarse de ir almacenando en un arreglo cada valor de x_k resultante de la llamada a la función FFT, ya que éste valor de x_k es el que va a graficarse como un espectro de frecuencias, puede usarse para hallar el valor porcentual correspondiente a cada armónico, o analizar la señal de entrada para calcular el THD% de la misma.

10. MEDICIÓN DE CORRIENTE, NIVELES DE ARMÓNICOS Y THD% PRODUCIDOS POR UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE 6 PULSOS EN LA RED DE 220V

Para realizar esta prueba se utiliza el canal C del prototipo construido que permite adquirir señales de corriente provenientes de la pinza amperimétrica 80i-110s Fluke que proporciona una salida de 100mV/A.

Figura 4.7 Análisis de la señal de 120V de la red de 60Hz: a) Forma de onda de la señal, La Figura 9 muestra la forma de onda de la señal adquirida por el prototipo construido.

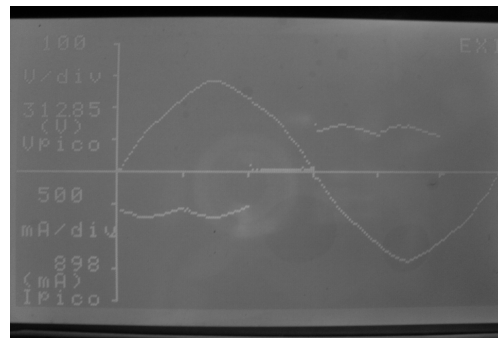


Figura 9 Forma de onda de la señal de corriente obtenida por el prototipo

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

La Tabla 2 presenta los valores de niveles de armónicos obtenidos con el analizador comercial Fluke 41B y el prototipo construido.

Tabla 2 Errores para una entrada de corriente de línea proveniente de un Rectificador Trifásico de 6 pulsos

Orden del armónico	Valor real		Valor medido		Error absoluto (A)	Error relativo (%)
	(A)	(% - F)	(A)	(% - F)		
DC	0.06	9.4	0.02	5.2	0.04	66.67
1	0.59	95.9	0.6	95.74	0.01	1.69
5	0.14	22.9	0.14	22.65	0.00	0.00
7	0.05	9.3	0.06	9.72	0.01	20.00
11	0.05	8.6	0.05	8.44	0.00	0.00
13	0.03	5.3	0.03	5.74	0.00	0.00
17	0.03	5.3	0.03	5.32	0.00	0.00
19	0.02	3.9	0.02	4.32	0.00	0.00
23	0.02	4.1	0.02	4.04	0.00	0.00
25	0.02	3.2	0.02	2.98	0.00	0.00
29	0.02	3.3	0.01	2.98	0.01	50.00
31	0.01	2.5	0.01	2.63	0.00	0.00
Parámetro	Valor real (A)	Valor medido (A)	Error absoluto (A)	Error relativo (%)		
I _{rms}	0.63	0.62	0.01	1.59		
IDC	0.06	0	0.06	100.00		
THD% - F	29.6	30.08	0.48	1.62		
I _{pico}	0.84	0.91	0.07	8.33		

La Figura 10 permite hacer una comparación gráfica entre los valores reales, tomando como patrón la medición realizada con el Fluke 41B, y los resultados obtenidos de la medición con el prototipo construido.

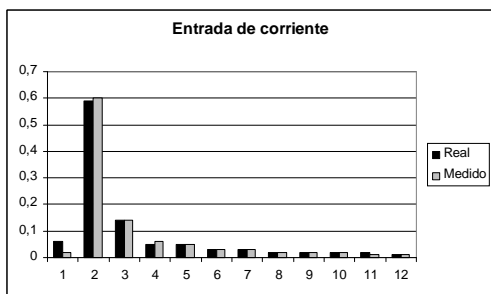


Figura 10 Gráfico de barras de los valores real y medido para una entrada de corriente de línea producida por un Rectificador Trifásico de 6 pulsos

En base a los resultados obtenidos se encuentra que el valor RMS de la señal en el Fluke 41B es de 0.63A, mientras que el prototipo indica 0.62A, lo cual representa una medida casi sin error, al igual que el THD% que en el caso del Fluke 41B es de 29.6% y en el prototipo es de 30.08%.

El valor de la componente fundamental es de 95.9% en el Fluke 41B, mientras que en el prototipo es de 95.74% manteniéndose una mínima diferencia entre ambas mediciones.

En cuanto a los niveles de armónicos se observa que tanto el Fluke 41B como el prototipo construido muestran niveles porcentuales representativos para los armónicos de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29 y 31. Es claro que los

valores porcentuales de los armónicos son muy similares entre ambos dispositivos.

También se puede notar que ambos dispositivos presentan una pequeña componente de DC en sus mediciones, teniendo un valor de 9.4% en el Fluke 41B y 5.2% en el prototipo.

La diferencia notable entre este valor de DC presente en ambos dispositivos se debe a la tolerancia del circuito de entrada de acondicionamiento de la pinza amperimétrica en el prototipo, además del hecho que dicha pinza presenta una señal con cierta cantidad de ruido en su salida de 100mV/A, lo cual puede provocar ciertas desviaciones en las mediciones tanto con el Fluke 41B como con el prototipo construido.

Sin embargo, observando los resultados del análisis de niveles de armónicos se observa que el Fluke 41B muestra valores representativos de los armónicos de al igual que los obtenidos con el prototipo, persistiendo una diferencia en cuanto a los armónicos que representan menos del 0.6% del valor RMS total.

11. CONCLUSIONES

Los objetivos planteados en este proyecto han sido cubiertos, obteniéndose un dispositivo analizador de los niveles de armónicos y distorsión armónica total presentes en la línea de alimentación eléctrica utilizando el Controlador Digital de Señales dsPIC30F4013 de Microchip, el cual permite implementar el procesamiento digital de señales necesario para el análisis de ondas distorsionadas usando la Transformada Rápida de Fourier.

El implementar el análisis de armónicos mediante la Transformada Rápida de Fourier implica el disponer de un dispositivo que permita realizar una gran cantidad de operaciones matemáticas con números complejos en el menor tiempo posible con el fin de obtener resultados en tiempo real, por lo que el dsPIC resulta una buena alternativa que cumple con estos requerimientos tanto de velocidad como de procesamiento de datos al tener un motor DSP capaz de soportar operaciones con números complejos en punto flotante al ser un microcontrolador de 16bits con un bus de 40bits para manejo de datos simultáneos al momento de realizar dichas operaciones.

El mayor problema que se tiene al realizar el tratamiento digital de señales es el acondicionamiento que debe hacerse previo a la digitalización de la señal para su análisis en el

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

microprocesador, puesto que el proceso de conversión Análogo-Digital ya introduce un error de cuantización en la señal debido al número de bits con el que se realiza la aproximación de un valor analógico a una representación digital, por lo que la etapa de acondicionamiento debe introducir el menor ruido posible en la señal de entrada para no aumentar de manera considerable los errores que surgen durante la etapa de digitalización, razón por la cual el uso de amplificadores operacionales con una elevada precisión mejoraría notablemente los resultados.

Al considerar que el prototipo construido se fundamenta en un Controlador Digital de Señales, se obtiene un sistema flexible capaz de adaptarse a otro algoritmo de procesamiento digital que permita realizar el análisis de armónicos, puesto que el prototipo posee todos los recursos de hardware necesarios para la adquisición de señales, por lo que el hacer uso de otro algoritmo sólo implicaría mejorar el programa de control implementado en el dsPIC.

Se debe tener en cuenta que los elementos utilizados sean capaces de trabajar en un adecuado ancho de banda que corresponda a la señal analógica bajo análisis, ya que de lo contrario no se obtendrá una adecuada respuesta del sistema en caso de ampliarse el uso del prototipo que funciona para señales de la línea de alimentación eléctrica de 60Hz.

12. RECOMENDACIONES

Considerando las pruebas realizadas hay que tomar en cuenta que para niveles de armónicos menores al 0.6% del valor RMS total de la señal, el prototipo pierde precisión debido principalmente a la atenuación que sufren estos componentes de pequeño valor durante la etapa de acondicionamiento, por lo que deberían usarse elementos de mayor precisión como amplificadores de instrumentación comerciales para mejorar la respuesta de esta etapa. El uso de este tipo de amplificadores no fue contemplado en el desarrollo del presente proyecto debido a que sería un factor de incremento en el costo del prototipo.

El desarrollo de este prototipo se realizó en base al dsPIC30F4013 debido a que es un dispositivo de uso común y fácil de encontrar, aunque no posea las mejores características en cuanto a la capacidad de memoria RAM que posee, lo cual fue una limitación de la cantidad de muestras que pueden tomarse de una señal analógica para su análisis mediante la FFT, puesto que debido a la capacidad de memoria RAM de éste dsPIC sólo

se pueden tomar 360 muestras de un período completo de 16.67ms (o 60Hz) de la señal, por lo que se debe considerar el utilizar un dsPIC de la familia dsPIC33F de Microchip que poseen una capacidad de memoria superior, y que no se consideró en el desarrollo del prototipo debido a que este microcontrolador no es comúnmente distribuido en nuestro medio.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] De la Rosa, F., "Harmonics and Power Systems", Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [2] FLUKE, "Manual de uso del Fluke 39/41B", Netherlands, 1995.
- [3] Kuo, S., "Real - Time Digital Signal Processing", England, Jhon Wiley & Sons Ltd, Second Edition, 2006.
- [4] Universidad de Navarra, "Transformada Discreta de Fourier", España, 1999.
<http://www.tecnun.com/asignaturas/tratamiento%20digital/tema6.pdf>
- [5] Castro, P., "Desarrollo de un módulo digital para el análisis espectral de señales de audio", Universidad Politécnica de Catalunya, España, 2005.
<http://upcommons.upc.edu/ocw/diposit/material/27359/27359.pdf>
- [6] MICROMEGA CORPORATION, "Fast Fourier Transforms using the FFT instruction", 2005.
<http://www.micromegacorp.com>
- [7] Holzinger, A., "Finger Instead of Mouse: Touch Screens as a means of enhancing Universal Access", Berlin, Heidelberg, 2003.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Touchscreen#Applications>
- [8] MIKROELEKTRONIKA, "MikroC dsPIC Manual", USA, 2007.
http://74.125.45.100/translate_c?hl=en&sl=en&tl=es&u=http://www.mikroe.com/pdf/mikroc_dspic/mikroc_dspic_manual.pdf&prev=hp&usg=ALkJrh0slvIJ14sxpOqBFcs8bfffhgsaIQ

14. BIOGRAFÍAS



JUAN CARLOS OBREGÓN

Nació en Quito el 28 de Noviembre de 1984, realizó sus estudios secundarios en el Colegio Municipal Sebastián de Benalcázar, donde obtuvo su título de Bachiller en Ciencias Básicas. Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional donde se graduó como Ingeniero en Electrónica y Control en Abril de 2009, posee conocimientos en dsPIC y PIC, programación en Visual C y ASM, además de suficiencia en el idioma inglés.

Áreas de interés: programación en lenguaje C de microcontroladores PIC y dsPIC, procesamiento digital de señales, electrónica de potencia, automatización y control industrial

NELSON G. SOTOMAYOR



Nació en Quito el 9 de Septiembre de 1971. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Nacional Mejía. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. Obtuvo su título de Magíster en Ingeniería industrial en junio del 2006. Actualmente desempeña el cargo de Profesor Principal T/C en el Departamento de Automatización y Control Industrial de la Escuela Politécnica Nacional. Además es miembro de la subcomisión académica permanente de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Control.

Áreas de interés: robótica móvil, informática y redes, microcontroladores, automatización y control industrial