

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ANALIZADOR DE ESPECTROS PORTÁTIL UTILIZANDO UN LCD GRÁFICO Y UN DSP56F807 DE FREESCALE



AUTOR

Omar Javier Tijaro Rojas.

MS (C) en Ingeniería, área Electrónica
Investigador del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS)
Universidad Industrial de Santander
oma_ti@lycos.com
COLOMBIA

AUTOR

Yair de Jesús Ruidíaz Palomino

Ingeniero Electrónico
Investigador Grupo CEMOS (Control Electrónico Modelado y Simulación)
Universidad Industrial de Santander
yair0414@hotmail.com
COLOMBIA

AUTOR

Jorge Eduardo Higuera Portilla.

Magíster en Ingeniería área Electrónica
Investigador del grupo CEMOS (Control Electrónico Modelado y Simulación)
Universidad Industrial de Santander
maepe3@uis.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

Jaime Guillermo Barrero Pérez.

Magíster en Potencia Eléctrica
Docente asociado Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander
jbarrero@uis.edu.co
COLOMBIA

Fecha de Recepción del Artículo marzo 24 de 2006
Artículo Tipo 1

Fecha de Aceptación del Artículo Abril 17 de 2006

RESUMEN.

En el presente artículo se hallan contenido los resultados de la investigación realizada para el diseño y construcción de un equipo analizador de espectros portátil utilizando el procesador de señales digitales DSP56F807 miembro de la familia 56F800 de Freescale Semiconductor y una pantalla LCD gráfica. Se resalta este diseño como un ejemplo de aplicación en hardware de la teoría de tratamiento digital de señales y el diseño de filtros analógicos, teniendo en cuenta la anterior teoría, para la adecuación de las señales de entrada a dispositivos digitales; además se resalta también la implementación de diferentes circuitos integrados que permitieron la portabilidad del equipo y el uso de fuentes no polarizadas. De la misma manera, se observó en el transcurso de la investigación que los dispositivos programables permiten la mejora del código después de realizado este tipo de equipos, lo cual presenta mucha utilidad en futuros proyectos cuando se necesita agregar simplemente más funciones para aplicaciones de comunicaciones o de control por software o hardware. Se observa finalmente que los errores obtenidos en los resultados arrojados con la implementación del algoritmo radix-2 para el cálculo de la Transformada Rápida de Fourier de diversas formas de onda son menores al 1%, relación que se tomó gracias a la utilización del software Matlab 6.5.

PALABRAS CLAVES

DSP.
FFT.
Aliasing.
FIR.
Enventanado.
LCD.

ABSTRACT

This article summary the results for design and construction a portable spectrum analyzer equipment using the digital signal processor DSP56F807, member of the family 56F80X of Freescale Semiconductor and LCD graphic. This design is an example of direct hardware application in digital processing of signals and analog filter design (using previous theory), in

addition show the implementation of integrated circuit for a big portability and don't power supply polarized. In the same way, it was observed at course of the investigation that the programmable devices allow the improvement of code after made east type of equipment, which presents much utility in future projects when it is needed to simply add more functions for applications of communications or control by software or hardware. It is observed finally that the obtained errors are smaller to 1% when implementing the radix-2 algorithm to calculate the Fast Fourier Transform FFT with diverse waveforms. This relation was taked with support of Matlab 6.5.

KEYWORDS

DSP.
FFT.
Aliasing.
FIR.
Windowing.
LCD.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo vertiginoso de la Electrónica en el mundo actual, ejerce una amplia influencia en todas las esferas de la vida moderna. Los avances recientes de la Microelectrónica en el desarrollo de nuevos procesadores digitales de señales (DSP) mas versátiles, con el volumen de procesar simultáneamente millones de operaciones por segundo y con capacidades matemáticas acordes para implementar algoritmos matemáticos complejos, proporcionan la plataforma para efectuar aplicaciones de la teoría del tratamiento de señales tanto en el dominio del tiempo como la frecuencia. Estos nuevos avances están siendo aprovechados ampliamente en aplicaciones de telecomunicaciones, la robótica y el control de procesos en tiempo real.

El objetivo del presente trabajo fue el de llevar a cabo un equipo analizador de espectros portátil, aprovechando las ventajas de los procesadores de señales digitales (DSP) de la familia 56F80X de Freescale para el uso en la industria eléctrica y la automatización en la industria automotriz. Este equipo comparado con los ofrecidos comercialmente tiene un costo menor a la mitad, ya que se usa para análisis de frecuencias bajas. Generalmente los analizadores de espectros digitales existentes en el mercado tienen escalas variables para cerca de 30 MHz.

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO

Las características técnicas obtenidas del equipo observado en la Figura 1 están dadas a continuación.

Tamaño

- El tamaño del equipo es de 17 (ancho) x 14 (largo) x 6 (espesor) cms.

Conexiones eléctricas

- Alimentación con una fuente de 9 V DC y 500mA
- Corriente de consumo del sistema 238,5 mA.
- Baterías recargables de 5 V.

- Corriente de consumo del sistema 238,5 mA.

Frecuencia máxima y resolución

- Ancho de banda de 20 kHz.
- Spam de 2343,75 Hz.
- Resolución en frecuencia de 585,9375 Hz.

Impedancia

- Impedancia de entrada de la señal 56kΩ.

Procesado digital

- Dos canales de ADC con resolución de 12 "bits" de adquisición de la señal.
- Procesado de la señal con 16 "bits".

Presentación de datos

- Despliegue de la FFT en una pantalla LCD de 320 x 240 píxeles.
- Interfaz gráfica de fácil entendimiento para el usuario.

Otros

- Puerto JTAG para actualización del firmware.
- Expansión de memoria y conexiones al PC por puerto USB 2.0

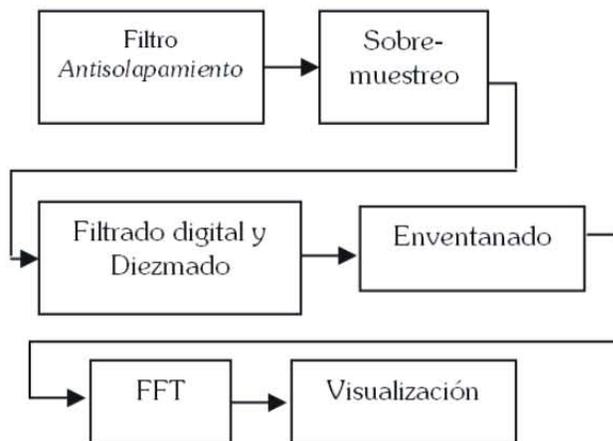
Figura 1. Equipo analizador de espectros.



2. HARDWARE IMPLEMENTADO

Para el diseño de un equipo electrónico se deben tener en cuenta varias etapas, dentro de las cuales está la adecuación de la señal analógica para el debido procesamiento digital o analógico. Por tal razón, para la implementación del equipo se planteó una etapa de filtrado antisolapamiento por hardware y una por software, que se encarga de evitar errores en la adquisición de datos debidos al ruido presentado en el ambiente y a la alimentación de los diferentes circuitos integrados; además se construyó una etapa de acondicionamiento de señales para luego desarrollar el algoritmo de la transformada de Fourier. En la Figura 2 se observa el diagrama de bloques referente a la implementación física del analizador de espectros.

Figura 2. Diagrama de bloques general de un sistema de tratamiento digital de señales.



Filtro antisolapamiento. Cuando se muestrea una señal continua en el dominio del tiempo, existe la posibilidad de encontrar solapamiento (Aliasing: Fenómeno que se presenta cuando se muestrea una señal a una frecuencia menor que la mitad de ella. En éste, las frecuencias altas se pueden observar como bajas) de frecuencias. Para evitar este problema, se debe implementar un filtro analógico pasabajas que evite el muestreo de señales que no correspondan a las componentes de la frecuencia de la señal de entrada. [1].

Se diseñó para esta etapa en "hardware" un filtro Butterworth pasabajas, ya que la respuesta es máximamente plana en amplitud en el ancho de banda deseado (23 kHz). El cálculo de los parámetros de éste filtro se calculó utilizando el "software" FilterPro de Texas Instruments. Esta herramienta permite diseñar el circuito esquemático del filtro y la respuesta en frecuencia (magnitud y fase).

El orden del filtro para lograr las atenuaciones adecuadas fue de orden cuarto, cuya frecuencia de paso (-3dB) fue de 20kHz, y la frecuencia de corte (-80dB) de 280kHz. En un diseño de detección de armónicos de la señal eléctrica existe el criterio de -98dB de atenuación, pero la razón por la que se escogió la atenuación de -80dB y no la de -98dB (que corresponde a una ganancia de 12,5 uV/V), se debe a que el nivel de cuantificación del convertor A/D del DSP es de 806 uV aproximadamente, es decir cualquier señal de menor valor a este valor se pierde y por lo tanto el filtro no tiene que ser tan estricto. Este cálculo se puede observar claramente en la ecuación (1). [3]

$$\Delta = \frac{V_{ref}}{4096} = \frac{3.3}{4096} = 805,6640 \text{ uV}$$

$$\Rightarrow \Delta_{dB} = -61.8769 \text{ dB} \quad (1)$$

Sobremuestreo. En esta etapa se adquiere la señal por medio del convertor A/D del DSP a una frecuencia de muestreo de 600kHz 12kHz, tomando aproximadamente 29 muestras en

un periodo de la señal de más alta frecuencia (20kHz). Además se toman 1442 muestras para tener una mejor resolución en frecuencia.

Filtrado digital. Teniendo las muestras almacenadas en la memoria RAM del DSP, se procede a realizar un filtrado. El filtrado tiene como objetivo atenuar de forma más selectiva las frecuencias que deja pasar el filtro analógico. Este filtro se escogió FIR ya que estos presentan fase lineal, y se obtuvo utilizando los comandos de Matlab 6.5 fir2 y buttord. El comando buttord se utilizó para encontrar el orden del filtro a partir de los argumentos: frecuencia de paso, frecuencia de corte, atenuación frecuencia de paso y de frecuencia de corte. El resultado se utilizó como argumento de la función fir2 para hallar los coeficientes del filtro digital.

El orden del filtro obtenido fue de $N=417$, dándole al comando buttord los siguientes argumentos: frecuencia de paso 20 kHz y frecuencia de corte de 20,5kHz, atenuación de -3db y 90 dB respectivamente, estos últimos parámetros se utilizaron para darle más selectividad al filtro. [1]

Diezmado. En este sistema, el diezmado tiene como fin eliminar muestras de la señal para que la resolución en frecuencia se visualice mejor. El resultado obtenido de esta operación es un vector más pequeño, en donde se encuentra distribuido de una mejor manera el ancho especificado.

El diezmado realizado es por 8, teniéndose como vector final un arreglo 128 elementos para calcular la FFT.

Enventanado. Esta técnica se utiliza para obtener una mejor respuesta en la amplitud de los espectros de las muestras. Se implementó la ventana de Hanning, ya que permitió la mejor adaptación al sistema para la visualización de los resultados en la pantalla LCD gráfica en comparación con la ventana rectangular, es decir, permitía diferenciar dos componentes espectrales en regiones cercanas, y además su ecuación fue de fácil ejecución ya que realiza menos operaciones que ventanas como la Blackman que tienen una respuesta similar con mayor carga computacional.

La respuesta al impulso de la ventana de hanning se observa en (2) [6].

$$h[n] = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{N+1}\right) \quad (2)$$

N: número de muestras.

n: variable independiente.

Transformada de Fourier. Para realizar un análisis en frecuencia se necesita conocer la teoría básica de señales y por ende la Transformada Discreta de Fourier (DFT del inglés Discrete Fourier Transform), que es el equivalente discreto de las Series de Fourier. La Transformada de Fourier $X(\omega)$ de una señal analógica $x(t)$ es la vista en (3).

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

La Transformada Discreta de Fourier (4) es un método muy eficiente para determinar el espectro en frecuencia de una señal. Esta, permite convertir una secuencia de valores en el dominio del tiempo a una secuencia de valores equivalente en el dominio de la frecuencia. La Inversa de la Transformada Discreta de Fourier (IDFT) realiza el proceso contrario (5).

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

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot W^{-nk} \quad (5) \quad n=0,1,\dots,N-1$$

La constante "W" es conocida como factor de Fourier y definida en (6)

$$W = e^{-j2\pi/N} \quad (6)$$

Se observa que 'W' es una función que depende de N, por ello, también suele expresarse como WN.

Un algoritmo que realiza eficientemente la DFT es la Transformada Rápida de Fourier (FFT del inglés Fast Fourier Transform). Con la FFT se obtienen los mismos resultados que la DFT pero más rápidamente debido a que reduce el número de cálculos requeridos.

En la ecuación de la Transformada Discreta de Fourier, obtener X(k) para un 'k' determinado requiere aproximadamente N sumas complejas y N productos complejos (7).

$$X(k) = x(0) + x(1) \cdot W^k + \dots + x(N-1) \cdot W^{(N-1)k} \quad (7)$$

Para k = 0, 1, ..., N-1.

Si lo que se desea es obtener X(0), X(1), ..., X(N-1) entonces se necesitarían un total de aproximadamente N² sumas complejas y N² productos complejos. Esto quiere decir que los requerimientos computacionales de la DFT pueden ser excesivos especialmente si el tamaño de N es grande.

La FFT aprovecha la periodicidad y simetría del factor de Fourier 'W' para el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier. La periodicidad de 'W' implica (8) y su simetría implica (9).

$$W^k = W^{k+N} \quad (8)$$

$$W^k = -W^{k+N/2} \quad (9)$$

La FFT descompone la DFT de N puntos en transformadas más pequeñas. Una DFT de N puntos es descompuesta en dos DFT's de (N/2) puntos. Cada DFT de (N/2) puntos se descompone a su vez en dos DFT's de (N/4) puntos y así sucesivamente. Al final de la descomposición se obtienen (N/2) DFT's de 2 puntos cada una. La transformada más pequeña viene determinada por la base de la FFT. Para una FFT de base 2, N debe ser una potencia de 2 y la transformada

más pequeña es la DFT de 2 puntos. Para implementar la FFT existen dos procedimientos: diezmado en frecuencia (DIF del inglés Decimation In Frequency) y diezmado en el tiempo (DIT del inglés Decimation In Time). [5].

Visualización. Para la visualización de los resultados se utilizó una pantalla gráfica de cristal líquido fabricada por Powertip Technology Corporation [9], cuya resolución fue de 320x240 píxeles. La interfaz (gráfica y carácter) de la pantalla fue controlada con el DSP, en donde se diseñaron funciones para facilitar la programación y optimizar el algoritmo.

En esta pantalla se mostró la FFT con una resolución en frecuencia de 585,93 Hz $\left(\frac{6000}{1024}\right)$, y un SPAM de 2343,75 Hz (585,93 x 4). Para garantizar que se pueda observar la componente espectral de mayor potencia, el vector de la FFT fue normalizado con el elemento de mayor valor absoluto, siendo el valor de la unidad 160 píxeles.

Procesador digital de señales (DSP). Los Procesadores de Señales Digitales (DSP-Sigla en Inglés) son dispositivos que se caracterizan por su alto throughput (Cantidad de datos procesados en un tiempo determinado), bajo consumo de potencia y bajo costo, en comparación con los microcontroladores; por estas razones estos procesadores se convierten en una de las mejores herramientas para el procesamiento digital de señales, tales como las vistas en las siguientes aplicaciones: Implementación de sistemas telefónicos, aplicaciones de reducción de ruidos, filtros digitales, etc. [3]

Un ejemplo de procesadores de señales digitales los presenta Motorola en la familia DSP56800. Esta tiene tecnología CMOS de 16 "bits", presenta una CPU de propósito general diseñada para el eficiente procesamiento digital de una señal y el control de operaciones. El repertorio de instrucciones que presenta es amplio facilitando la programación al usuario. El dispositivo que se utilizó para implementar este equipo en hardware fue el DSP56F807. [2]

A continuación se mencionarán algunas características generales de la familia DSP56800:

- Es capaz de procesar hasta 35 millones de instrucciones por segundo (MIPS).
- Requiere solo una fuente de alimentación entre 2,7 a 3,6 volt.
- Presenta dos registros acumuladores de 36 "bits", incluyendo extensión de "bits".
- Dos pines de interrupciones externas.
- Tres buses de 16 "bits" de datos.
- Tres buses de 16 "bits" de direcciones.
- Repertorio de instrucciones que dan soporte al procesamiento digital de la señal y control de funciones.
- Soporta compilador en C (Codewarrior).

Los DSP56F800 son un pequeño sistema encapsulado conformado por subsistemas principales. Estos módulos son: memoria, Phase Lock Loop (PLL), Unidad Central de Procesos (CPU), periféricos, puerto de entrada salida, "bus" de interfaz externa [2].

La memoria de los DSP56F800 utiliza dos espacios de

memorias independientes, los espacios de datos y los de programación.

3. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

PRUEBAS DEL DSP.

En esta sección se comprueba el funcionamiento de los diferentes módulos del DSP que se necesitarán en el desarrollo del proyecto.

Pruebas del conversor analógico-digital. Los conversores analógico a digital presentan errores tanto en la cuantificación de las muestras como en la frecuencia de muestreo. En la cuantificación del ADC del DSP el fabricante proporciona un error que está dado por el número de bits que utiliza para la adquisición de las señales analógicas al sistema (12 en este caso). Así la tensión de referencia (o tensión máxima) se calcula para normalización en el sistema digital: $V_{ref}/4096$, donde $4096=2^{12}$.

Para verificar que la frecuencia de muestreo era la especificada por el fabricante, se configuró el puerto ADC de tal forma que tuviese la máxima frecuencia de reloj. Luego se tomaron 1442 muestras de una señal cuadrada de la cual se conocía previamente su frecuencia y su amplitud, ya que éstas se midieron con el generador de señales y un osciloscopio marca Fluke de 80MHz. Se realizaron varias pruebas que se visualizaron en Codewarrior 6.1, y algunos de los resultados fueron los siguientes: [8]

- Onda cuadrada de 4kHz: Tuvo su primer cambio de signo en la muestra 20 y su tercer cambio de signo en la muestra 169, al hacer la resta se obtiene el número de muestras existentes en un periodo, y por lo tanto como se sabe la frecuencia de la señal, el cálculo de la frecuencia de muestreo está dada a continuación (10).

$$f_s = (N + 1) * f_m \quad (10)$$

Donde f_s es la frecuencia de muestreo, $N+1$ el número de muestras y f_m la frecuencia de la señal de entrada.

Aplicando la ecuación (10) se obtiene que la frecuencia de muestreo del ADC es 600kHz.

- Onda cuadrada de 4,6kHz: Con esta onda se procedió igual que la anterior, donde el número de muestras contenidas en un periodo fue de 128. Reemplazando nuevamente en (10), $f_s=588$ kHz.
- Onda cuadrada de 5kHz: Se realizó el mismo procedimiento, $N+1=122$, por lo tanto $f_s=610$ kHz.

Para comprobar el error de cuantificación del ADC del DSP se tomaron muchas pruebas de las cuales se obtuvieron los resultados en donde el error en porcentaje se calculó utilizando el error promedio, el cual arrojó un resultado del 9,84 %. Este resultado se obtuvo de la siguiente manera: .

$$\left(\frac{0,325}{3,3} \right) * 100\%$$

Pruebas de los algoritmos. En esta sección se realizaron pruebas a los códigos implementados en el DSP (Codewarrior) contrastándose con funciones ya implementadas en el "software" Matlab 6.5. Las funciones probadas en esta sección son las correspondientes al filtrado digital de la señal, enventanado y FFT.

1.El filtrado digital se realizó como se mencionó anteriormente. El resultado arrojado se puede visualizar con la función `freqz` (respuesta en frecuencia de filtro digital) de Matlab. Este comando permite observar gráficas donde la frecuencia está normalizada de 0 a (0 a 300 kHz en este caso).

2.Para el enventanado también se probó la respuesta en frecuencia. La Figura 3 ilustra la respuesta en frecuencia del enventanado rectangular y la Figura 4 el enventanado de Hanning (implementados en el DSP). En el equipo se utilizó la ventana de Hanning, ya que en los resultados arrojados por la respuesta en frecuencia es mucho mejor que la ventana rectangular, teniendo en cuenta que se visualizaba mejor el resultado con la ventana Hanning, ya que presenta mayor atenuación de pequeñas componentes no deseadas en todo el ancho de banda que aparecen en la ventana rectangular por no tener un periodo entero de la señal al calcular la FFT; otra característica de la ventana de Hanning es que representa menor carga computacional en el DSP comparándola con la Blackman. El lóbulo principal en la ventana rectangular es muy angosto comparado con la ventana de Hanning, lo cual es bueno en la rectangular pero la amplitud de sus lóbulos laterales son muy grandes comparados con la ventana de Hanning generándose entonces discontinuidades en cada cruce por cero.

Figura 3. Respuesta en frecuencia del enventanado rectangular.

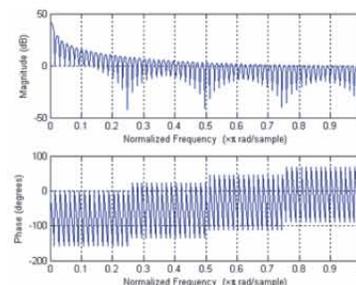
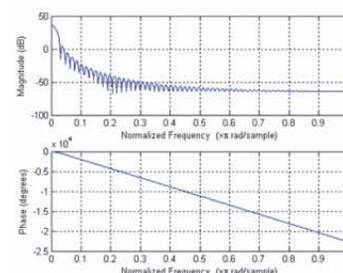


Figura 4. Respuesta en frecuencia del enventanado de Hanning.



3. Para la prueba de la FFT se simularon varias señales, de las cuales se tomaron 128 muestras en un periodo. De éstas se obtuvo que su magnitud presentó las siguientes características.

- Onda senoidal $[100*\text{sen}(2*\pi/128)]$:
 - Matlab: En la posición 2 y en la 128 del vector aparecía una magnitud de 64.
 - Codewarrior: En la posición 2 y en la 128 del vector aparecía una magnitud de 63,619.

El error de esta prueba fue de 0,595%

- Onda DC [Amplitud 10].
 - Matlab: En la posición 1 del vector aparecía una magnitud de 16384.
 - Codewarrior: En la posición 1 del vector aparecía una magnitud de 16384.

El error en DC fue de 0%.

- Onda cuadrada [Amplitud 10, T=64muestras].
 - Matlab: En la posición 2 y en la 128 del vector aparecía una magnitud de 814,955
 - Codewarrior: En la posición 2 y en la 128 del vector aparecía una magnitud de 810,246

El error de esta prueba fue de 0,5%.

- Matlab: En la posición 4 y en la 126 del vector aparecía una magnitud de 271,87
- Codewarrior: En la posición 4 y en la 126 del vector aparecía una magnitud de 271,73.

El error de esta prueba fue de 0,04%

- Matlab: En la posición 64 del vector aparecía una magnitud de 20,006.
- Codewarrior: En la posición 4 y en la 126 del vector aparecía una magnitud de 20.

El error de esta prueba fue de 0,03%

Comparación de Desempeño: Para el desarrollo de estas pruebas se diseñó un algoritmo utilizando la técnica de Decimación en Tiempo la cual divide la secuencia de datos de entrada $x[n]$ en dos grupos, uno de índices par y el otro de índices impar. Con estas sub-secuencias se realiza el DFT de $N/2$ puntos y sus resultados se combinan para formar el DFT de N puntos.

Para estas pruebas se usaron algunos macros predefinidos (Beans) que ofrece el software de programación para el cálculo de las funciones trigonométricas Seno y Coseno. El Bean a incluir es: TFR1:DSP_Func_TFR.

Cabe resaltar que el uso de estos macros obliga el manejo de un formato de variable llamado Frac16, el cual restringe el manejo de números entre 1 y 1.

A continuación se describen las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento del algoritmo implementado y evaluar la eficiencia de cálculo de la FFT con respecto al predefinido que ofrece Code Warrior.

En primera instancia para validar el funcionamiento del algoritmo se presentan los errores relativos y porcentuales de los valores obtenidos con el procesador (Tablas 1, 2 y 3), comparados con los valores teóricos calculados con Matlab y los resultados gráficos de la FFT (Figura 5).

**Tabla 1. Valores de la señal de entrada.
SEÑAL DE ENTRADA**

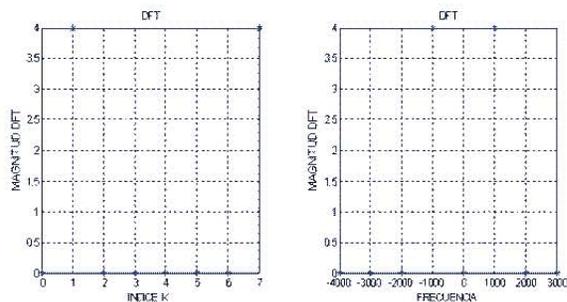
| SEÑAL DE ENTRADA | | | | |
|------------------|----------------|----------------|------------|---------------|
| REF | DSP | MATLAB | %E | E. RELATIVO |
| 0 | 0,0000915 5 | 0 | | -9,155273E-05 |
| 1 | 0,7070097 | 0,7071067 | 0,0137293 | 9,708119E-05 |
| 2 | 0,9996779 | 1 | 0,01221 | 1,221000E-04 |
| 3 | 0,7060092 | 0,7071067 | 0,15522142 | 1,097581E-03 |
| 4 | 0,0000915 5 | -2,068E-13 | | 9,155272E-05 |
| 5 | -0,7070312 | 0,7071067 8 | 0,0106887 | -7,558119E-05 |
| 6 | -1 | -1 | 0 | 0 |
| 7 | -0,7069397 | 0,7071067 8 | 0,0236288 | -1,670812E-04 |

**Tabla 2. Valores de la parte real de la FFT.
PARTE REAL DE LA FFT**

| PARTE REAL DE LA FFT | | | |
|----------------------|---------------|--------|---------------|
| REF | DSP | MATLAB | E. RELATIVO |
| 0 | -0,0000610115 | 0 | 6,101145E-05 |
| 1 | -0,0008670222 | 0 | 8,670222E-04 |
| 2 | 0,0001220144 | 0 | -1,220144E-04 |
| 3 | -0,0003726091 | 0 | 3,726091E-04 |
| 4 | -0,0001831292 | 0 | 1,831292E-04 |
| 5 | 0,0002640355 | 0 | -2,640355E-04 |
| 6 | 0,0001221262 | 0 | -1,221262E-04 |
| 7 | 0,0019235110 | 0 | -1,923511E-03 |

**Tabla 3. Valores de la parte imaginaria de la FFT.
PARTE IMAGINARIA DE LA FFT**

| PARTE IMAGINARIA DE LA FFT | | | | |
|----------------------------|---------------|--------|----------|---------------|
| REF | DSP | MATLAB | %E | E. RELATIVO |
| 0 | 0 | 0 | | 0 |
| 1 | -3,9989070000 | -4 | 0,027325 | -1,093000E-03 |
| 2 | -0,0001221167 | 0 | | 1,221167E-04 |
| 3 | 0,0002138615 | 0 | | -2,138615E-04 |
| 4 | 0,0000000447 | 0 | | -4,471804E-08 |
| 5 | -0,0003535748 | 0 | | 3,535748E-04 |
| 6 | 0,0001220720 | 0 | | -1,220720E-04 |
| 7 | 3,9990890000 | 4 | 0,022775 | 9,110000E-04 |

Figura 5. Magnitud de la FFT con Matlab

En segunda instancia para evaluar la eficiencia del algoritmo se midieron con osciloscopio los tiempos de ejecución (Tabla 4) de la FFT, tanto del programa desarrollado como los del Bean predefinido DFR1:DSP_Func_DFR que contiene la función FFTC_Init. Para ello se hace uso de un puerto de salida del DSP a través del Bean Bit1:BitIO que maneja uno de los Leds de la tarjeta de desarrollo. De igual forma se presentan los tamaños de los respectivos códigos (Tabla 5) a evaluar con el fin de mirar el espacio de memoria de programa utilizado.

Tabla 4. Tiempo de ejecución de la FFT.

| # MUESTRAS | TIEMPO DE EJECUCIÓN | |
|------------|---------------------|----------|
| | ALGORITMO | BEAN |
| 8 | 428 [nS] | 332 [nS] |

Tabla 5. Espacio en memoria.

| # MUESTRAS | TAMAÑO DEL CÓDIGO | |
|------------|-------------------|--------------|
| | ALGORITMO | BEAN |
| 8 | 7860 [Bytes] | 9622 [Bytes] |

4. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Algo que es importante resaltar del equipo analizador de espectro portátil, es que este tendrá el puerto JTAG habilitado en la tarjeta, para ser programado de nuevo si así se desea, también incluye los puertos para expansión de memoria externa (bytes de dirección y datos) y dos canales de ADC.
- Por medio de dispositivos como los DSP se pueden elaborar aplicaciones en donde se necesiten una considerable carga computacional para realizar algoritmos de procesamiento de señal sin la necesidad de una máquina tan potente como un computador, permitiendo así a partir de una debida programación, construir equipos con visualización de eventos en pantalla LCD gráfica.

- Las aplicaciones presentadas por Codewarrior a través de la herramienta Processor Expert y en específico los "Beans", sirven de mucha ayuda para aprender a utilizar el DSP como tal, es decir, con los debidos pasos para realizar una correcta configuración de un módulo y las funciones que emplea, además el entorno gráfico para la configuración de cada Bean, hacen ver fácil la programación del DSP.

- En este equipo se presentaron limitaciones de "hardware" tales como velocidad de conversión del ADC del DSP (600 kHz aproximadamente), alimentación de entrada al mismo (3,3 V); las cuales arrojaron características para el analizador de espectros como: la señal de entrada debe tener una frecuencia no mayor a 20kHz y su tensión no debe exceder de ± 1 V, para garantizar su correcto funcionamiento. Las limitaciones de "software" se dieron principalmente por la licencia entregada por Codewarrior para programación del dispositivo (16 KB).

- Los resultados obtenidos mediante el algoritmo desarrollado fueron satisfactorios. La desviación máxima mostró un error porcentual de 0.027%, obtenida en las componentes espectrales fuertes de la señal de entrada propuesta (Señal Senoidal), la cual se encontraba presente en la componente imaginaria del vector de salida; asimismo se establece una diferencia máxima o error relativo máximo de presente en los valores teóricamente cercanos al cero. En términos generales se logró obtener resultados aceptables y fiables para el cálculo de la FFT, donde los errores además de ser atribuidos a los problemas de cuantificación típicos de todo procesamiento digital con resolución finita, se debe sumar las desviaciones atribuidas a la solución planteada para evitar las incongruencias generadas en el cálculo de las funciones trigonométricas cuando el argumento era cero y/o cercano a 0.5, donde el Bean presentaba falencias, razón por la cual se optó por sumar al argumento el valor 1/32768, cantidad que representa la mínima cuantía posible en el formato Frac16.

- En términos generales no se puede resaltar una diferencia sobresaliente entre los tiempos de ejecución del algoritmo para diferentes números de muestras, los resultados muestran que se obtuvo un tiempo estándar de procesamiento de [556nS] con una desviación máxima del 0.9%.

- De las pruebas finales realizadas al algoritmo desarrollado se puede extraer que el Bean realiza de una forma más rápida el cálculo de la FFT, con seguridad se puede afirmar que el este es 1.29 veces más rápido comparado con el programa en evaluación, lo cual permite concluir que los macros propuestos para funciones específicas dentro del DSP se pueden considerar óptimos desde el punto de vista de desempeño y aprovechamiento de recursos del procesador.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece por la colaboración a los diferentes docentes de la Universidad Industrial de Santander que aportaron para la elaboración de este artículo. Ellos son el Dr. Jorge Luis Chacón de la escuela de Ingeniería Mecánica, y a los diferentes

docentes de la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

5. REFERENCIAS

- [1] Tíjaro O. Javier, Ruidíaz Yair. Analizador de espectros portátil utilizando la familia de DSPs 56F80X de Freescale, 2005. Escuela de Ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander UIS. Pág. 18-40.
- [2] Motorola digital dna, DSP56F800 16-Bit Digital Signal Processor (PDF), DSP56F800FM/D, 03, 2003.
- [3] Freescale semiconductor, DSP56F800 User Manual, 56800 Documentation(PDF), DSP56F801-7UM, 06, 2004. Pág.9-5.
- [4] Freescale Semiconductor, 56F807 16 bit Hybrid Processor. Technical Data, Data Sheets DSP56F807, DSP56F807, 12, 2004
- [5] POSADAS Juan Luis. Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Interpolación en Tiempo Real. Valencia, 1998. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de informática de sistemas y computadores. Pág. 4-11.
- [6] OPPENHEIM, Alan. SCHAFFER, Ronald. Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto. Prentice Hall. España 2000. Pág. 470.
- [7]http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=DSP56F807&nodeId=01624686366292 Fabricante DSP56F807.
- [8] <http://www.metrowerks.com/mw/download/> Proveedor de "software".
- [9] <http://www.powertipusa.com/>. Fabricantes pantalla gráfica.