

***Implementación de una Toolbox para señales digitales utilizando  
una plataforma de desarrollo con DSP***

OSCAR LEONARDO CORZO  
LUIS FELIPE ROJAS MUÑOZ



Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas  
Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
Bucaramanga  
2015

# **Implementación de una *Toolbox* para señales digitales utilizando una plataforma de desarrollo con DSP**

OSCAR LEONARDO CORZO

LUIS FELIPE ROJAS MUÑOZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director

Msc. Jaime Guillermo Barrero Pérez

Codirector

Msc. Carlos Andrés Niño Niño

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2015

Dedico y agradezco esta meta a Dios, a mi hermana y familiares;  
principalmente entrego el fruto de mis esfuerzos a *Erma Rocio Corzo*,  
madre dedicada, quien con sus incesantes esfuerzos ha sido un  
apoyo incondicional para mi crecimiento personal y profesional.

Oscar Leonardo Corzo

Dedicado a Isabel Muñoz Uribe, por su fuerza y fe que acompañan y guían mi vida;  
a mis hermanos, por su cariño y entrega siempre presentes;  
a mi familia pastoral, por el apoyo sincero en todo momento;  
a cada uno de ustedes doy las gracias por ser presencia de Dios en este camino.

Luis Felipe Rojas Muñoz

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>14</b>
INTRODUCCION GENERAL .....	14
ANTECEDENTES .....	15
<b>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>17</b>
1.1 CONVERSION A/D Y CONVERSION D/A .....	17
1.1.1 CONVERSION ANALOGICO-DIGITAL .....	18
1.1.2 CONVERSION DIGITAL-ANALÓGICO .....	20
1.2 TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER (FFT) .....	21
1.3 FILTRO PASA BAJOS .....	23
1.4 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SERIAL SPI .....	26
1.5 SISTEMA DE DESARROLLO (HARDWARE) .....	27
1.5.1 Mikromedia for dspic33 .....	27
1.5.2 Microcontrolador dsPic33FJ256GP710A .....	28
1.6 SISTEMA DE DESARROLLO (SOFTWARE) .....	28
1.6.1 Visual TFT .....	28
1.6.2 Mikroc Pro for dsPic .....	30
1.6.3 Mikroprog <sup>TM</sup> .....	31
<b>2. TOOLBOX PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES</b> .....	<b>33</b>
2.1 HARDWARE PARA ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL .....	33
2.1.1 Etapa de entrada .....	34
2.1.2 Etapa de salida .....	37
2.2 VISUALIZACIÓN DE SEÑALES .....	39
2.2.1 OSCILOSCOPIO .....	40
2.2.2 Transformada rápida de Fourier (FFT) .....	46
2.3 GENERACIÓN DE SEÑALES .....	50
2.3.1 Señales convencionales .....	50
2.3.2 Señal sintética .....	53

<b>3. PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	<b>56</b>
3.1 PRUEBAS DEL OSCILOSCOPIO .....	57
3.1.1 <i>Osciloscopio, pantalla principal</i> .....	57
3.1.2 <i>Osciloscopio, pantalla secundaria</i> .....	65
3.2 PRUEBAS DEL GENERADOR.....	68
3.2.1 <i>Señales convencionales</i> .....	68
3.2.2 <i>Señal sintética</i> .....	74
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	<b>76</b>
<b>5. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>77</b>
<b>CITAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>80</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>83</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - PROCESO DE CONVERSIÓN DE UNA SEÑAL ANALÓGICA. ....	18
<b>FIGURA 2</b> - CONVERSIÓN A/D.....	18
<b>FIGURA 3</b> - PARÁMETROS DE UN FILTRO PASA BAJAS. ....	24
<b>FIGURA 4</b> - TOPOLOGÍA FILTRO ACTIVO SALLEN KEY.....	25
<b>FIGURA 5</b> - MIKROMEDIA FOR DSPIC33.....	27
<b>FIGURA 6</b> - INTERFAZ VISUAL TFT. ....	29
<b>FIGURA 7</b> - INTERFAZ MIKRO C PRO FOR DSPIC.....	30
<b>FIGURA 8</b> – PROGRAMADOR MIKROPROG™.....	31
<b>FIGURA 9</b> - INTERFAZ MIKROPROG SUITE.....	32
<b>FIGURA 10</b> - ETAPA DE ENTRADA. FUENTE:.....	36
<b>FIGURA 11</b> - SIMULACIÓN - ETAPA DE ENTRADA - ATENUADOR.....	36
<b>FIGURA 12</b> - SIMULACIÓN - ETAPA DE ENTRADA - FILTRO SALLEN-KEY - RESPUESTA EN FRECUENCIA. ....	37
<b>FIGURA 13</b> - ETAPA DE SALIDA.....	39
<b>FIGURA 14</b> - SIMULACIÓN - ETAPA DE SALIDA - AMPLIFICADOR .....	39
<b>FIGURA 15</b> - DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA VISUALIZACIÓN EN PANTALLA DE LA FORMA DE ONDA.....	40
<b>FIGURA 16</b> - DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA VISUALIZACIÓN EN PANTALLA DEL ESPECTRO.....	47
<b>FIGURA 17</b> - DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA GENERACIÓN DE UNA SEÑAL.....	50
<b>FIGURA 18</b> - DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA GENERACIÓN DE UNA SEÑAL SINTÉTICA. ....	54
<b>FIGURA 19</b> - SEÑAL SINTÉTICA AL DOBLE DE FRECUENCIA ESTABLECIDA.....	55
<b>FIGURA 20</b> – ZONA DE DIBUJO DE LA SEÑAL ARTIFICIAL. ....	55
<b>FIGURA 21</b> - PINES DE ENTRADA Y SALIDA.....	56
<b>FIGURA 22</b> - GW INSTEK GDS-1062. [13], BK PRECISION 4040A. [14].....	57
<b>FIGURA 23</b> - FRECUENCIA DE 50 [Hz].....	58
<b>FIGURA 24</b> - FRECUENCIA DE 60 [Hz].....	59
<b>FIGURA 25</b> - FRECUENCIA 4920 [Hz]. ....	59
<b>FIGURA 26</b> - FRECUENCIA 10280 [Hz]. ....	61

<b>FIGURA 27</b> - SEÑAL CUADRADA FRECUENCIA 1789 [Hz].....	61
<b>FIGURA 28</b> - SEÑAL TRIANGULAR FRECUENCIA 4921 [Hz]. .....	62
<b>FIGURA 29</b> - CONTROL VERTICAL.....	64
<b>FIGURA 30</b> - SEÑAL CON OFFSET. ....	64
<b>FIGURA 31</b> - ESPECTRO DE UNA SEÑAL SENOIDAL. ....	66
<b>FIGURA 32</b> - ESPECTRO DE UNA SEÑAL CUADRADA.....	66
<b>FIGURA 33</b> - ESPECTRO DE UNA SEÑAL TRIANGULAR. ....	67
<b>FIGURA 34</b> - SEÑAL SENOIDAL A 2500 [Hz].....	68
<b>FIGURA 35</b> - SEÑAL SENOIDAL A 5000 [Hz].....	69
<b>FIGURA 36</b> - SEÑAL CUADRADA A 2500 [Hz]. ....	70
<b>FIGURA 37</b> - SEÑAL CUADRADA A 5000 [Hz]. ....	70
<b>FIGURA 38</b> - SEÑAL TRIANGULAR A 2500 [Hz].....	71
<b>FIGURA 39</b> - SEÑAL TRIANGULAR A 5000 [Hz].....	72
<b>FIGURA 40</b> - SEÑAL SENOIDAL CON OFFSET. ....	73
<b>FIGURA 41</b> - SEÑAL CONTINÚA DE 5 [V]. ....	73
<b>FIGURA 42</b> - SEÑAL SINTÉTICA CON PERIODO DE 627 [MS]. ....	75
<b>FIGURA 43</b> - SEÑAL SINTÉTICA CON PERIODO DE 0.2 [MS]. ....	75

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1</b> - HERRAMIENTAS DE LA TOOLBOX .....	16
<b>TABLA 2</b> - PARÁMETROS DE DISEÑO DEL <i>HARDWARE</i> DE ACONDICIONAMIENTO.....	34
<b>TABLA 3</b> - CORRESPONDENCIAS DE VOLTAJES DE ENTRADA.....	35
<b>TABLA 4</b> - CORRESPONDENCIAS DE VALORES DE SALIDA.....	38
<b>TABLA 5</b> - TABLA DE CONVERSIÓN ADC .....	41
<b>TABLA 6</b> - TABLA DE CONVERSIÓN DIGITAL-ANÁLOGO. ....	53
<b>TABLA 7</b> - RELACIÓN ENTRE FRECUENCIA DE MUESTREO Y RESOLUCIÓN. ....	58
<b>TABLA 8</b> - ERRORES PARA LOS PARÁMETROS DEL OSCILOSCOPIO - SEÑAL SENOIDAL MÁS DE 40 [Hz]. ....	60
<b>TABLA 9</b> - ERRORES PARA LOS PARÁMETROS DEL OSCILOSCOPIO - SEÑAL CUADRADA. .	62
<b>TABLA 10</b> - ERRORES PARA LOS PARÁMETROS DEL OSCILOSCOPIO - SEÑAL TRIANGULAR. ....	63
<b>TABLA 11</b> - ERROR DE MEDICIÓN THD - SEÑAL SENOIDAL.....	67
<b>TABLA 12</b> - ERROR DE MEDICIÓN THD - SEÑAL CUADRADA.....	67
<b>TABLA 13</b> - ERROR DE MEDICIÓN THD - SEÑAL TRIANGULAR.....	68
<b>TABLA 14</b> - ERRORES PARA LOS PARÁMETROS DEL GENERADOR - SEÑAL SENOIDAL.....	69
<b>TABLA 15</b> - ERRORES PARA LOS PARÁMETROS DEL GENERADOR- SEÑAL CUADRADA.....	71
<b>TABLA 16</b> - ERRORES PARA LOS PARÁMETROS DEL GENERADOR- SEÑAL TRIANGULAR..	72
<b>TABLA 17</b> - ERRORES PARA LOS VOLTAJES DE <i>OFFSET</i> DEL GENERADOR – 4 Vpp.....	74

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: CREACIÓN DE UN PROYECTO EN VISUAL TFT .....	83
ANEXO B: MANUAL DE USUARIO.....	88

## RESUMEN

### TÍTULO:

Implementación de una Toolbox para señales digitales utilizando una plataforma de desarrollo con DSP<sup>1</sup>

### AUTORES:

Oscar Leonardo Corzo  
Luis Felipe Rojas Muñoz<sup>2</sup>

### PALABRAS CLAVE:

*Toolbox*, ADC, DAC, FFT, osciloscopio, espectrómetro, generador de señales.

### DESCRIPCIÓN:

Se planteó la implementación de una *Toolbox* básica para el análisis de señales y generación de las mismas, teniendo como base una plataforma de desarrollo con DSP (Procesador digital de señales), la cual posee una pantalla táctil TFT que permitirá configurar el equipo y visualizar las señales medidas y sus respectivas características.

Una vez adquirido el hardware y software necesario, se desarrolló el software correspondiente para la lectura (osciloscopio y espectrómetro) y generación de señales que incluye las señales básicas como las formas de onda senoidal, triangular y cuadrada además de una función adicional que permite representar en la pantalla táctil TFT cualquier forma de onda en una ventana de tiempo deseada, esto le permiten al usuario disponer de un rango de voltaje de  $\pm 10$  [V] y un ancho de banda de 5 [KHz] en ambas funciones a través del diseño de la tarjeta para el acondicionamiento de las señales de entrada y salida, dentro de los valores característicos de las señales que la *TOOLBOX* permite visualizar se encuentran: Voltaje *RMS* (raíz media cuadrática), Voltaje pico a pico, Voltaje máximo, Voltaje mínimo y componente frecuencial máxima. Después de realizar la implementación del prototipo, se realizaron pruebas y se verificó el funcionamiento correcto del mismo para, finalmente, documentar los resultados y generar las conclusiones.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado

<sup>2</sup> Director: Msc. Jaime Guillermo Barrero – Codirector: Msc. Carlos Andrés Niño Niño

## ABSTRACT

**TITLE:**

Implementation of a Toolbox for digital signals over a DSP platform<sup>3</sup>

**AUTHORS:**

Oscar Leonardo Corzo

Luis Felipe Rojas Muñoz<sup>4</sup>

**KEY WORDS:** *Toolbox, DAC, ADC, FFT, oscilloscope, espectrumeter, signal generator.*

**DESCRIPTION:**

On this proposal is presented the implementation of a basic *TOOLBOX* for signal analysis and the generation of different signals waveforms; it will be implemented on a DPS platform (digital signal processor), which has a TFT touch panel to improve the interaction with the users because of the ability to show the results of any process and their respective characteristics.

Once acquired the necessary hardware and software, the corresponding software for reading (oscilloscope and spectrometer) and generating signals was developed, that includes the basic signals like sine, triangular and square wave forms plus an additional function that can represent any waveform in the TFT touch panel on a desired window time, this allows the user to have a voltage range of  $\pm 10$  [V] and a bandwidth of 5 [kHz] in both functions through the design card for signal conditioning input and output, within the characteristic values of the signals that are used to display on the *TOOLBOX* there are: Voltage RMS (root mean square), peak to peak voltage, maximum voltage, minimum voltage and maximum frequency component. After making the implementation of the prototype, tests were conducted and the proper functioning of the same was verified to finally document the results and generate conclusions.

---

<sup>3</sup> Bachelor Thesis

<sup>4</sup> Director: Msc. Jaime Guillermo Barrero – Codirector: Msc. Carlos Andrés Niño Niño

# INTRODUCCIÓN

## ***INTRODUCCION GENERAL***

La necesidad humana de medir y cuantificar los diferentes fenómenos físicos que se presentan en nuestro entorno, ha generado como resultado que investigaciones y avances tecnológicos jueguen un papel cada vez más importante dentro de la vida cotidiana; así, poco a poco, esa vida exige que se hagan necesarios equipos de medición que nos permitan analizar estos fenómenos de una forma más eficaz y de fácil acceso en casi cualquier campo de trabajo.

Entendiendo esto, se particularizó dicha necesidad al darle un enfoque de carácter electrónico planteando el desarrollo de una *toolbox* para señales digitales basada en un dsPIC, que permite la visualización de los parámetros básicos de las señales analógicas al igual que la generación de las mismas; ambos procesos a partir de un tratamiento digital programado.

Los parámetros que permite visualizar este proyecto corresponden a los valores de voltaje RMS (*root mean square*), voltaje pico-pico, voltaje máximo, voltaje mínimo, frecuencia y THD (*total harmonic distortion*) de una señal junto con la representación gráfica de su forma de onda y espectral; por otro lado también es posible generar una señal senoidal, cuadrada, triangular o sintética definiendo los parámetros que corresponden a los valores de voltaje pico-pico, frecuencia y nivel de offset.

Los procesos de visualización y generación son posibles gracias al acondicionamiento de las señales de entrada por medio de un hardware que permite ampliar el rango de operación propio del dsPIC.

El procesamiento de estas señales se realiza en forma digital y por lo tanto se ven involucradas tanto la conversión analógica-digital como la conversión digital-analógica que permiten la interacción entre estos dos dominios.

Algunos factores que forman parte importante de la elección de los equipos de medición como el osciloscopio o el generador comerciales son el tamaño y el peso de los mismos puesto que un tamaño reducido y un bajo peso los harían compatibles casi con cualquier campo de trabajo, permitiendo así la expansión de las áreas de investigación y agilizando el procesamiento de los datos y analizando la información adquirida en el mismo punto de adquisición; por lo anterior, este proyecto presenta un prototipo de *TOOLBOX* que, adicional a las características previamente mencionadas, apuesta por un tamaño mínimo.

### ***ANTECEDENTES***

En la naturaleza se encuentran muchos eventos que se presentan en formas de ondas, que son patrones que podrían repetirse en el tiempo, los cuales pueden ser convertidos en señales eléctricas por medio de sensores o transductores; debido a esto, se requiere de equipos que permitan observar y estudiar estas señales.

Dentro del mercado existe una gran variedad de dispositivos que permiten visualizar las principales características de dichas señales eléctricas, por lo tanto el prototipo fue enfocado en mantener la visualización de los parámetros básicos que presenta un dispositivo comercial al igual que la generación de las señales, y mejorar todos aquellos aspectos que faciliten su accesibilidad como el peso, el tamaño y el precio.

Para el desarrollo de las herramientas de la *TOOLBOX* se tomaron como base algunas funciones propias de los dispositivos disponibles en los laboratorios de la universidad, y se adicionaron funciones novedosas así:

**Tabla 1 - Herramientas de la TOOLBOX**

	Básicas	Nuevas
OSCILOSCOPIO (Instek GDS - 1062)	Voltaje RMS Voltaje pico-pico Voltaje máximo Voltaje mínimo Frecuencia	THD (total harmonic distortion)
GENERADOR DE SEÑALES (BK PRECISION Modelo 4040A)	Señal seno Señal triangular Señal cuadrada Establecimiento de frecuencia Establecimiento de voltaje pico-pico Establecimiento de nivel de offset	Señal artificial

Estas herramientas “nuevas” dentro de la TOOLBOX permiten mejorar el estudio de las señales eléctricas y ampliar sus campos de aplicaciones.

## 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Dentro del procesamiento de señales es común implementar conceptos fundamentales como: muestreo de señales, caracterización en frecuencia y filtrado. Por esto se hace necesario contar con un sistema de propósito específico que permita la implementación de estos conceptos junto con la posterior visualización de los resultados de estos procesos.

Teniendo en cuenta el fenómeno físico a estudiar, se requieren unas características óptimas del hardware y del software que garanticen que no hay pérdida de información y que el procesamiento de la señal se hace correctamente.

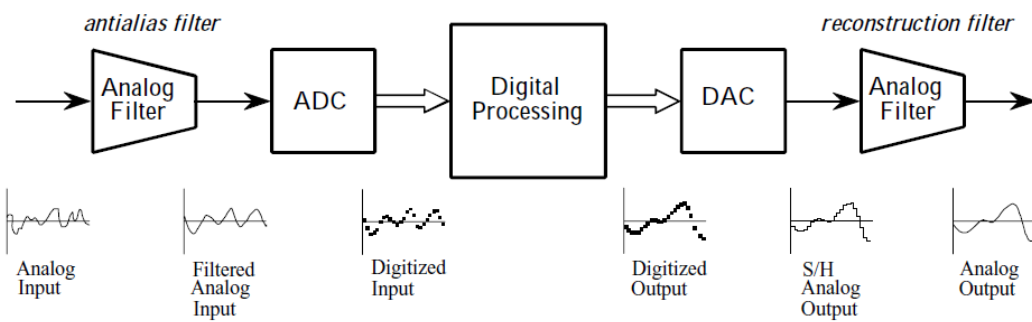
El sistema de desarrollo dsPIC integra una pantalla TFT por medio de la cual se visualizarán los resultados de las diferentes herramientas matemáticas que procesarán las señales adquiridas por medio de dos canales individuales tales como su representación espectral (espectrómetro), visualización de parámetros (osciloscopio) y generación de las mismas, desarrollando adicionalmente un *Hardware* específico para su acondicionamiento.

### 1.1 CONVERSION A/D Y CONVERSION D/A

Haciendo evidente la realidad analógica de las señales que forman parte de nuestro entorno como la voz, las reacciones químicas o las señales eléctricas, a nivel de ingeniería se genera la necesidad de permitir que los procesadores digitales de nuestros equipos de cómputo interactúen de alguna forma con este tipo de señales; un punto que permite el inicio de dicha interacción con los procesadores digitales son los dispositivos que realizan una transformación directa desde el escenario analógico hacia el escenario digital manteniendo las características propias de las señales, dando paso a un procesamiento adecuado de las mismas, a estos dispositivos se les conoce comúnmente como 'convertidores

analógicos-digitales' o ADC; por otro lado, una vez se ha realizado el procesamiento de la señal en el dominio digital, debe presentarse de forma analógica el resultado de dicho procesamiento para finalizar así la interacción entre estos dos escenarios, para esto son necesarios dispositivos 'convertidores digitales-analógicos' que transmiten las nuevas características de la señal hacia el escenario analógico desde el procesador. [1]

**Figura 1** - Proceso de conversión de una señal analógica.

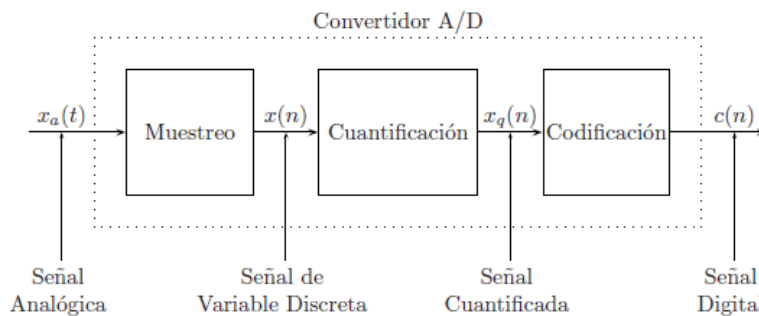


Fuente: D. J. P. A. Moya, Procesamiento Digital de Señales, Cartago, 2011.

### 1.1.1 CONVERTOR ANALOGICO-DIGITAL

Un convertor analógico-digital comprende básicamente tres etapas como se observa en la figura no. 2, donde intervienen: muestreo, cuantificación y codificación.

**Figura 2** - Conversión A/D.



Fuente: D. J. P. A. Moya, Procesamiento Digital de Señales, Cartago, 2011.

**Muestreo-retención:** Se entiende por muestreo al hecho de tomar “muestras” de una señal de variable continua en determinados instantes de tiempo para convertirla a una señal de variable discreta generando una señal analógica conformada por impulsos de amplitud correspondiente a la amplitud de la señal de entrada en los respectivos instantes de tiempo  $n \cdot T$ , donde  $T$  corresponde al periodo de muestreo y  $n=0,1,2,3,\dots$  [2]

Posterior a la etapa de muestreo, la señal analógica pasa por una etapa de ‘retención’ en donde cada intervalo  $(n \cdot T, (n+1) \cdot T)$  que tiene valor de cero como resultado del muestreo, pasa a tener valores en función de cada impulso ubicado en  $n \cdot T$ , los retenedores más típicos son [3]:

- Retenedor de orden cero: Los valores de cada intervalo  $(n \cdot T, (n + 1) \cdot T)$  van a tener el valor del impulso ubicado en  $n \cdot T$ .
- Retenedor de primero orden: Los valores de cada intervalo  $(n \cdot T, (n + 1) \cdot T)$  corresponden a rectas que están en función de las amplitudes de los impulsos ubicados en  $n \cdot T$  y  $(n + 1) \cdot T$ .

**Cuantificación:** una vez se ha obtenido la secuencia que conforma la señal discreta, se entiende como cuantificación al proceso de asignarle a cada muestra un valor dentro de un conjunto finito, esto indica que una o mas muestras pueden corresponder al mismo valor de dicho conjunto. En esta etapa de conversión analógica-digital se genera un efecto causado por dicha asignación de un mismo valor a diferentes muestras y se conoce como “error de cuantificación” [2].

**Codificación:** puesto que en la cuantificación existe un conjunto finito de valores, la codificación consiste en la representación binaria de cada una de las muestras cuantificadas; ahora, esta operación se realiza teniendo en cuenta que, si asumimos ‘F’ como la cantidad de elementos en el conjunto finito de cuantificación, la cantidad necesaria de bits ‘N’ para la codificación estará dada por la fórmula [2]:

$$N = \lceil \log_2(F) \rceil \quad (2.1)$$

Esta operación de codificación se puede realizar en formatos diferentes:

- Coma fija
  - Enteros sin signo:  $x = \sum_{n=0}^{N-1} b_n 2^n$
  - Enteros con signo:  $x = -2b_{N-1} + \sum_{n=0}^{N-1} b_n 2^{n-N+1}$
  - Complemento a dos:  $x = -b_{N-1} 2^N + \sum_{n=0}^{N-1} b_n 2^n$
  
- Coma flotante
  - Precisión simple
    - 32 bits
    - 23 bits para la mantisa
    - 8 bits para el exponente
    - 1 bit para e signo
  
  - Precisión doble
    - 64 bits
    - 52 bits para la mantisa
    - 11 bits para el exponente
    - 1 bit para e signo

### 1.1.2 CONVERTOR DIGITAL-ANALÓGICO

La conversión digital-analógica complementa el proceso de interacción entre los dos escenarios y su objetivo es reconstruir una señal digital de la forma más eficiente; dentro de la literatura es posible encontrar que el mejor interpolador se describe por la siguiente función:

$$f(t) = \frac{\sin(\pi t)}{\pi t} \quad (2.2)$$

En la práctica no se puede implementar, por lo cual se recurre a interpoladores más simples como el interpolador de orden cero ya mencionado.

Adicional al interpolador, existe un bloque que se encarga de crear la señal analógica antes de ser interpolada.

A continuación se resumen los circuitos de decodificación más comunes [2]:

**Fuentes de tensión conmutadas:** Se basa en una red de  $2^n$  resistencias iguales conmutadas por un decodificador que utilizan una señal de referencia  $V_{ref}$  para entregar la señal equivalente.

**Resistencias conmutadas:** A diferencia de las fuentes de tensión conmutadas, la conmutación aquí se presenta en la corriente de la red de resistencias conectadas a la entrada inversora de un amplificador operacional, donde la corriente del bit  $b_i$  es el doble de la corriente del bit anterior, y se usa una señal de referencia para obtener la señal equivalente en la salida del amplificador operacional.

**Redes resistivas R-2R:** Presenta un esquema similar al circuito de resistencias conmutadas, pero difiere en que solo se necesitan dos valores de resistencia a lo largo de la red y estos dos valores deben presentar una relación 2:1.

## **1.2 TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER (FFT)**

Hay diferentes maneras de calcular la transformada de Fourier discreta (DFT), por ejemplo, resolviendo ecuaciones lineales simultáneas. La FFT corresponde a algoritmos para el cómputo o procesamiento digital de la transformada discreta de Fourier de forma eficiente, ya que no requiere de tiempo de procesamiento muy alto y de carga computacional.

Esta transformada se usa para pasar una señal que está representada en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, también se puede realizar de forma inversa pero se debe tener en cuenta que las dos representaciones deben estar en forma discreta, ya que se tienen limitaciones de memoria y de capacidad de computo.

Para el cálculo de la DFT, esta se expresa como dos sumas en las que se procesan las muestras pares y las impares:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2k} W_N^{2nk} + \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2k+1} W_N^{(2k+1)n} \quad \text{Donde: } W_N^{(2k+1)n} = W_N^n W_N^{2kn} \quad (2.3)$$

Se llega a la base de los algoritmos de la FFT como la suma de dos DFTs de longitud N/2.

$$X(n) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2k} W_N^{2nk} + W_N^n \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2k+1} W_N^{2kn} \quad (2.4)$$

De la ecuación de la DFT:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(k) W_N^{nk}, \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.5)$$

Donde  $X_0(k)$  es una secuencia de N puntos y  $W_N = e^{-\frac{j2\pi}{N}}$

Para obtener una muestra de  $X(n)$  se necesitan N multiplicaciones complejas y N-1 sumas complejas. Por lo tanto para la obtención de un conjunto completo de coeficientes de la DFT se necesitan  $N^2$  multiplicaciones complejas y  $N(N-1) \simeq N^2$  sumas complejas. [4]

El número de cálculos de la DFT para una secuencia de N puntos depende de N:

$$C_N = o(N^2) \quad (2.6)$$

Para un N muy grande,  $o(N^2)$  es inaceptable en la práctica.

Escogiendo como caso particular  $N=4$

$$X(n) = \sum_{k=0}^3 x_0(k)W_4^{nk}, 0 \leq n \leq 3; W_4 = e^{-\frac{j2\pi}{4}} = -j \quad (2.7)$$

El sistema de desarrollo dsPIC tiene la ventaja de brindar una función que ejecuta un algoritmo de la FFT con 128, 256 o 512 puntos, por lo tanto la aplicación de la misma se hizo ejecutando la función ya desarrollada dentro del sistema adquirido con 256 puntos. [5]

### 1.3 FILTRO PASA BAJOS

En la práctica se acostumbra que la frecuencia de corte sea de 10 a 20 veces menor que la frecuencia de muestreo, todo esto para conseguir una atenuación suficiente antes de muestrear. Pero debido al muestreo inevitable del aporte del ruido en la señal, la frecuencia de corte será mayor que máxima frecuencia a muestrear.

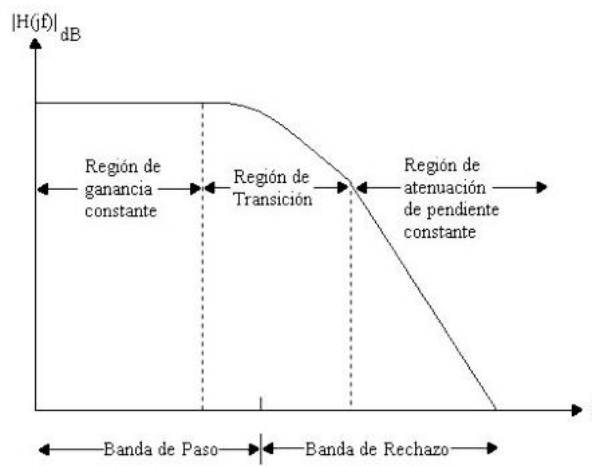
Un filtro pasa bajos es un circuito que transmite todas las frecuencias de una señal por debajo de una cierta frecuencia denominada de corte.

Típicamente un filtro pasa bajas organiza su respuesta en frecuencia en regiones así: una “región de ganancia constante” en donde las señales cuya frecuencia corresponda a esta región escalarán su amplitud de acuerdo al valor de la constante de dicha región; posteriormente inicia una “región de transición” que culmina cuando la curva encuentra una pendiente de atenuación constante propia de cada filtro; prosigue una “región de atenuación” que culmina cuando la curva

encuentra el fin de la pendiente; finalmente aparece la “región de rechazo” donde las señales que correspondan a esta región tendrán una amplitud despreciable. Ver figura No. 3.

Otra organización que se presenta en este tipo de filtro se presenta en el eje de la frecuencia, donde existen principalmente dos bandas conocidas como la “banda de paso” y la “banda de rechazo”, la primera hace referencia a una atenuación mínima de las señales que correspondan a esta banda, y la segunda hace referencia a la atenuación máxima de todas las señales que no estén en la banda de paso.

**Figura 3 -** Parámetros de un filtro pasa bajas.



Fuente: Dibujes Salgado y Torres Morales, Diseño e implementación de un osciloscopio con un dsPIC, Quito, 2008.

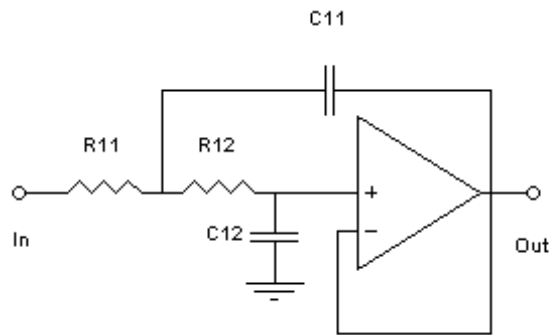
Por otro lado, los filtros se pueden clasificar en un orden de acuerdo al nivel de caída de la pendiente así:

- Filtro de primer orden: atenuación 20[dB/dec]
- Filtro de segundo orden: atenuación 40[dB/dec]
- Filtro de tercer orden: atenuación 60[dB/dec]...

Dentro de los filtros más populares que se pueden encontrar en la literatura se encuentra el **Sallen Key**, particularmente valioso por su simplicidad.

Este filtro activo es de segundo orden y sus dos polos pueden ser ubicados a partir de la selección de las resistencias y condensadores adecuados dentro de su topología.

**Figura 4** - Topología Filtro Activo Sallen Key.



Fuente: Dibujes Salgado y Torres Morales, Diseño e implementación de un osciloscopio con un dsPIC, Quito, 2008.

Este filtro presenta una frecuencia de corte  $F_c$  que puede ser calculada por la siguiente expresión:

$$F_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_{11}C_{11}R_{12}C_{12}}} \quad (2.8)$$

En figura No. 4 se observa un filtro formado por una única etapa Sallen Key pero es una práctica habitual ubicar varias etapas en cascada para aumentar el orden de un filtro.

Si se analiza detenidamente el circuito y recordando que para frecuencias muy altas los condensadores funcionarán como cortocircuitos, se observa que para

estas frecuencias el terminal positivo del amplificador operacional estará a tierra. Al tener realimentación negativa, el terminal negativo, y por tanto la salida, tendrán la misma tensión que el terminal positivo. Por el contrario, a bajas frecuencias o tensión continua, los condensadores serán como un circuito abierto, por tanto las dos resistencias estarán en serie y, al no circular corriente por ellas, la tensión de entrada también estará presente en el terminal positivo del operacional y a su salida. Por lo que la tensión de salida a muy altas frecuencias será cero y a frecuencias muy bajas la tensión de salida será igual que la entrada. [6]

#### **1.4 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SERIAL SPI.**

##### **Interfaz serial DAC8830.**

La interfaz digital es una conexión de 3 líneas estándar compatible con las interfaces SPI, QSPI™, Microwire™ y TI DSP, que pueden operar a velocidades de hasta 50 M-bits/seg. La transferencia de datos se encuentra enmarcada por el seleccionador de señal del chip  $\overline{CS}$ . El DAC trabaja como un bus esclavo. El bus maestro genera el reloj de sincronización, SCLK, e inicia la transmisión. Cuando el  $\overline{CS}$  está en alto, no se accede al DAC y el reloj SCLK y los datos de entrada serie SDI son ignorados. El bus maestro accede al DAC haciendo al pin  $\overline{CS}$  como bajo. Inmediatamente después de la transición de alto a bajo del  $\overline{CS}$ , los datos de entrada serial en el pin SDI son desplazados desde el bus maestro de forma sincrónica en el flanco de caída del SCLK, y trabada en el flanco ascendente de SCLK en el registro de desplazamiento de entrada, los bits más significativos (MSB) primero. La transición de bajo a alto del  $\overline{CS}$  transfiere el contenido del registro de desplazamiento de entrada al registro de entrada. Todos los registros de datos son de 16 bits.

Lleva 16 ciclos de reloj de SCLK para transferir una palabra de datos. Para completar una palabra de datos completa, el  $\overline{CS}$  debe ir a alto inmediatamente después de que los 16 ciclos están sincronizados. Si se aplican más de 16 ciclos durante el estado bajo del  $\overline{CS}$ , los últimos 16 bits se transfieren al registro de

entrada en el flanco ascendente del  $\overline{CS}$ . Sin embargo, si el  $\overline{CS}$  no se mantiene en bajo durante todo los 16 ciclos del SCLK, los datos se dañan. En este caso, se debe volver a cargar le DAC con un nuevo código de 16 bits. [7]

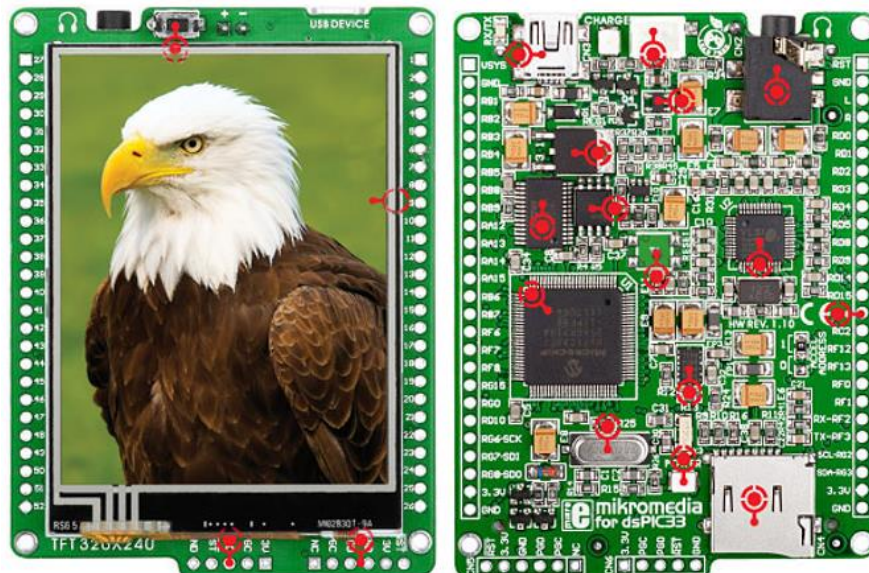
## 1.5 SISTEMA DE DESARROLLO (HARDWARE).

Para el desarrollo de la *Toolbox* se cuenta con la siguiente tarjeta de desarrollo DSP:

### 1.5.1 Mikromedia for dspic33

Es un sistema de desarrollo compacto con varios periféricos en la tarjeta que permiten desarrollar dispositivos con contenidos multimedia. La parte central del sistema es un microcontrolador dsPic33FJ256GP710A de 16 bits. La tarjeta mikromedia (MMB) para dsPIC33 tiene módulos integrados como códec estéreo MP3, pantalla táctil TFT de 320x240, acelerómetro, conector USB, conector de audio, espacio para tarjeta MMC/SD, memoria flash de 8 Mbit y otros. [8]

**Figura 5 - Mikromedia for dsPIC33.**



Fuente: Manual de Mikromedia for dsPIC33.

### **1.5.2 Microcontrolador dsPic33FJ256GP710A**

Este es el microcontrolador que posee la tarjeta de desarrollo, emplea una arquitectura de 16 bit que integra características de un microcontrolador (MCU) con la capacidad computacional de un procesador de señal digital (DSP). La funcionalidad resultante es ideal para aplicaciones que dependen de alta velocidad, cálculos repetitivos y control. [9]

#### **CARACTERÍSTICAS GENERALES**

- Arquitectura de 16bits.
- Memoria para programar de 256KB.
- Memoria RAM de 30720 Bytes
- 85 pines I/O.
- Oscilador interno de 7.37 MHz, 512kHz
- Velocidad del CPU (MIPS) de 40
- Rango de voltaje de operación de 3 a 3.6 V
- Periféricos de comunicación digital: 2-UART, 2-SPI, 2-I2C.
- Periféricos análogos: 2-A/D (análogo/digital) 32x12-bit @500 (ksps, kilo samples per second).

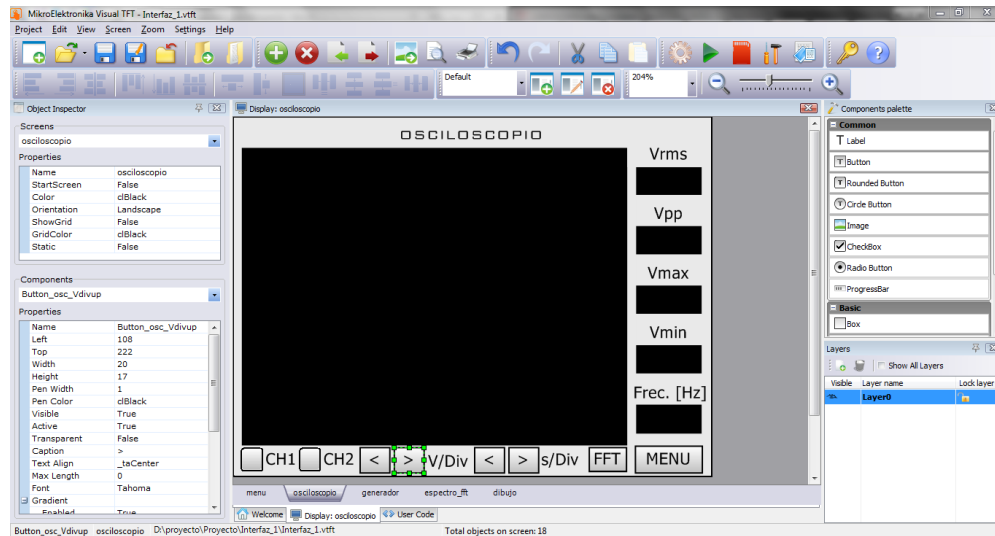
### **1.6 SISTEMA DE DESARROLLO (SOFTWARE).**

Para el desarrollo del conjunto de herramientas de la *TOOLBOX* se utilizaron los siguientes programas y hardware para su programación:

#### **1.6.1 Visual TFT**

Visual TFT es una herramienta de desarrollo usada para crear una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés), para varios tipos de pantallas TFT (thin film transistor) presentes en las tarjetas MikroMedia (MMB) y que además es compatible con los compiladores de MikroElektronika.

**Figura 6 - Interfaz Visual TFT.**



Visual TFT ayuda al usuario a crear el contenido para la pantalla TFT para interactuar con el sistema, puede ser cualquier componente presente en un panel táctil como botones, íconos, texto, gráficos y todo lo que el usuario necesite visualizar y que el dispositivo soporte.

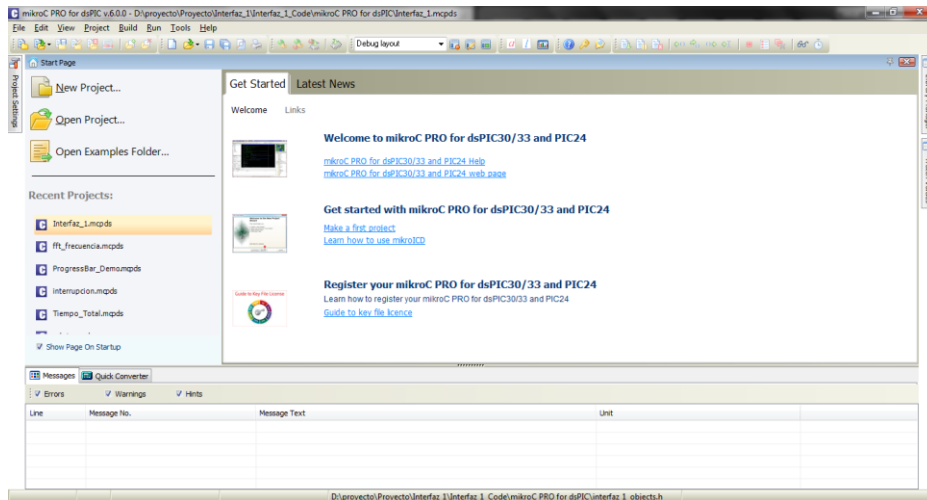
Luego de que el usuario complete el diseño de la interfaz gráfica, el programa generará los archivos de código en el lenguaje y configuración que el usuario previamente especificó en la creación del proyecto. Estos archivos poseen la inicialización de los elementos de la tarjeta como la pantalla TFT, el conversor análogo-digital, las características de los elementos de la interfaz gráfica, pines, entre otros.

Para la realización del proyecto se utilizó la versión 3.8.0 licenciada del Visual TFT, se configuró para trabajar con la tarjeta MikroMedia for dsPic3 y el compilador Mikroc Pro for dsPic de MikroElektronika. [10]

## 1.6.2 MikroC Pro for dsPIC

MikroC Pro for dsPIC es un compilador con muchas funciones para diferentes microcontroladores de Microchip. Está diseñado para permitir el desarrollo, construcción y depuración de aplicaciones de la forma más fácil posible sin comprometer el rendimiento.

**Figura 7 - Interfaz MikroC Pro for dsPIC.**



MikroC PRO permite desarrollar e implementar aplicaciones complejas de forma rápida:

- Escribir código fuente utilizando el editor de código (Asistentes de código y parámetros, plegado de código, resaltado de sintaxis, autocorrección, plantillas de código, y más.)
- Utilización de bibliotecas incluidas para acelerar el desarrollo de aplicaciones: adquisición de datos, memoria, pantallas, conversiones, comunicación, etc.
- Control de la estructura del programa, variables y funciones en el explorador de Código.
- Generar HEX estándar compatible con todos los programadores.

- Utilización de la herramienta integrada de depuración mikroICD (depurador en circuito) en tiempo real para supervisar la ejecución del programa en el nivel de hardware.
- Comentarios le permiten hacer sus comentarios vivo e interactivo.
- MikroC PRO proporciona ejemplos para desarrollar y utilizar como base en los proyectos.

Se utilizó la versión 6.0.0 licenciada del MikroC PRO de MikroElektronika. [11]

### 1.6.3 Mikroprog™

El mikroProg es un programador USB 2.0 rápido, que soporta una gran cantidad de microcontroladores de Microchip y es de alto rendimiento y fácil de operar. También permite alimentar la tarjeta utilizada teniendo en cuenta el voltaje soportado por la misma, proporcionando más de 150mA de corriente para el rango de voltaje de 1.8 a 5V.

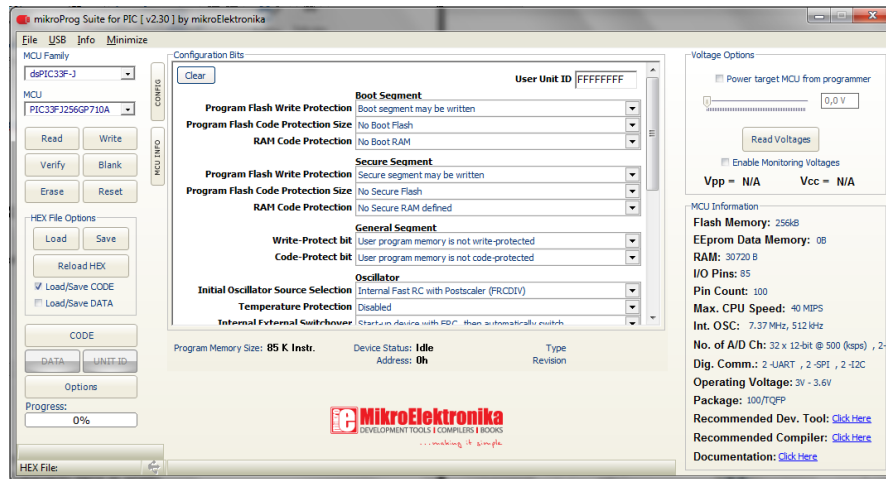
**Figura No. 8** – Programador MikroProg™.



Fuente: Manual de Mikromedia for dsPIC33, p. 18.

El programador requiere un programa especial intuitivo y fácil llamado mikroProg Suite for Pic que permite programar todas las familias de microcontroladores de Microchip. [12]

Figura 9 - Interfaz MikroProg Suite.



Fuente: Manual de Mikromedia for dsPIC33, p. 19.

## 2. TOOLBOX PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES.

La *TOOLBOX* desarrolla su procesamiento digital de señales en base a 2 aspectos principales:

- Tratamiento analógico de señales.
- Tratamiento digital de señales.

Con el fin de obtener las diferentes herramientas que caracterizan los dispositivos comerciales de procesamiento de señales eléctricas como el osciloscopio y el generador, se produce como resultado una relación entre dichos aspectos, de tal manera que un tratamiento analógico inicial de las señales permita el acondicionamiento de las mismas y su interacción posterior con el tratamiento digital.

El diseño e implementación de un *hardware* específico para el acondicionamiento de las señales teniendo en cuenta las restricciones eléctricas propias de la tarjeta de desarrollo *Mikromedia for dsPic33* produjo como resultado un **hardware para el acoplamiento de señal** que realiza el tratamiento analógico deseado y amplía el rango de operación de la misma; por otro lado, la programación de funciones propias de la *TOOLBOX* que permiten emular algunos aspectos del comportamiento de un osciloscopio y un generador de señales produjo como resultado una interfaz gráfica que permite la **visualización y generación de las señales**.

### 2.1 HARDWARE PARA ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL.

La tarjeta de desarrollo *Mikromedia for dsPic33* presenta dentro de sus especificaciones limitaciones para nuestros objetivos, por lo cual se hizo necesario el diseño e implementación de un *hardware* específico que permitió adaptar las señales analógicas de entrada y salida al igual que la conversión digital-analógica de estas últimas. Se tuvieron en cuenta las siguientes especificaciones:

**Tabla 2** - Parámetros de diseño del *hardware* de acondicionamiento.

	Especificación	Rango		Unidades
		Min	Max	
Visualización y Generación.	Voltaje de los periféricos.	0	3.3	[V]
	Voltaje de entrada y salida deseado.	-10	10	[V]
	Voltaje de alimentación.	-12	5 y 12	[V]
	Ancho de Banda.	0	5	[kHz]

El rango de las especificaciones ‘Voltaje de los periféricos’, ‘Voltaje de entrada y salida deseado’ y ‘Ancho de banda’ se encuentran indicados en los objetivos, pero el rango de la especificación ‘Voltaje de alimentación’ se establece principalmente para evitar el fenómeno de saturación y energizar los dispositivos incluidos en la *TOOLBOX*.

A partir de estas características y teniendo en cuenta las tareas propias de la *TOOLBOX*, el *hardware* de acondicionamiento se diseña en dos etapas funcionales independientes.

### 2.1.1 Etapa de entrada.

Uno de los objetivos de la *TOOLBOX* es visualizar señales cuya amplitud se encuentre en un rango de  $\pm 10$  [V], pero los periféricos de la tarjeta de desarrollo *Mikromedia for dsPic33* solo permite indexar señales analógicas en un rango de 0-3.3 [V] (ver Tabla No. 2), por lo cual esta etapa contempla el diseño e implementación de un circuito capaz de atenuar las señales en un factor de 0.15 para generar un nuevo rango de  $\pm 1.5$ [v], y adicionar un nivel de *offset* de 1.5[V] con lo cual el rango de salida de dicho circuito será correspondiente al rango de entrada que soporta la tarjeta de desarrollo.

**Tabla 3** - Correspondencias de voltajes de entrada.

<b>Voltaje de entrada[V]</b>	<b>Voltaje adaptado[V]</b>
10	3
5	2.25
0	1.5
-5	0.75
-10	0

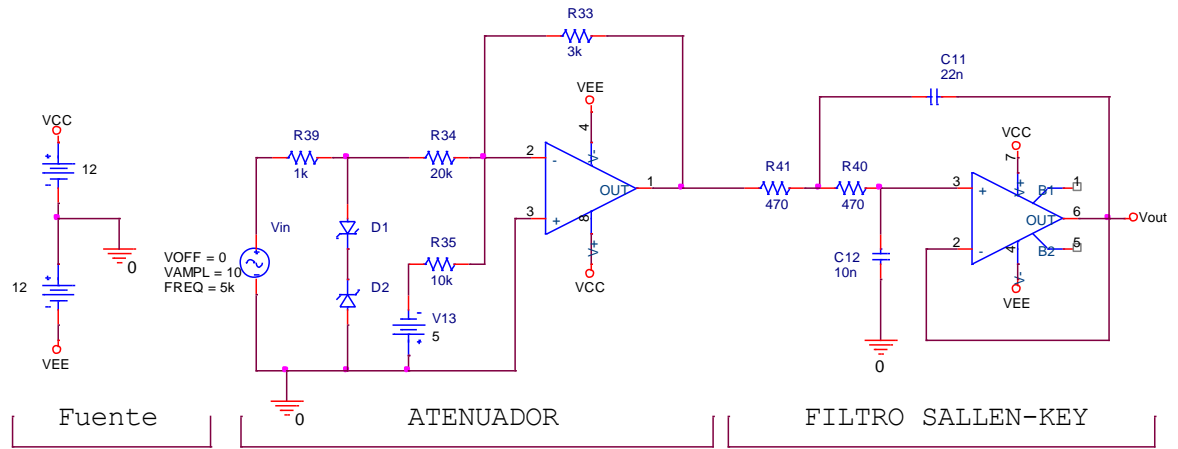
Dentro de la literatura se encuentra que la topología del circuito **sumador inversor** nos permite realizar la atenuación y el adicionamiento del nivel de *offset* requerido con un arreglo específico de resistencias.

El circuito sumador inversor de la **Figura No. 10** presenta dos entradas que corresponden a la señal analógica que será procesada y el nivel de *offset* que será adicionado con ganancias de 0.15[V/V] y 0.3[V/V] respectivamente al asignarle valores a las resistencias así:  $R_2=20[\text{K}\Omega]$ ;  $R_3=3[\text{K}\Omega]$ ;  $R_4=10[\text{K}\Omega]$ . A la topología del circuito sumador inversor se acopla un regulador de tensión con diodos zener de 10[V] cuya función es limitar el rango de operación de la *TOOLBOX*.

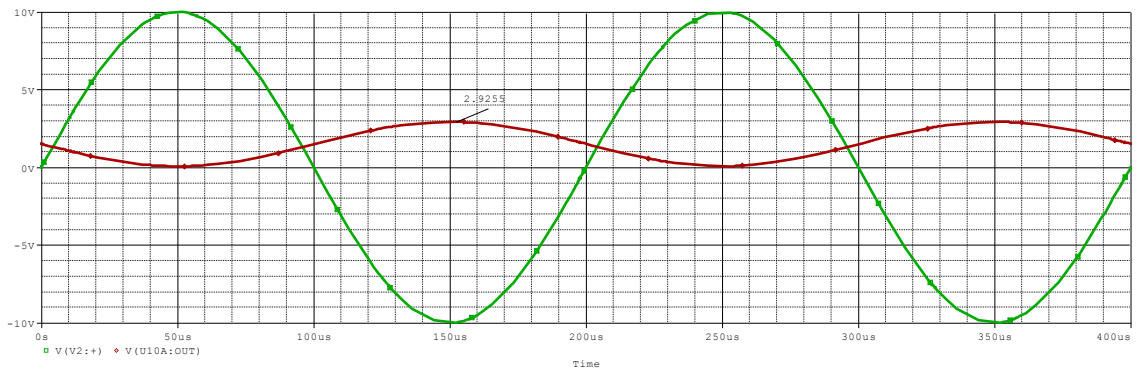
Adicionalmente la etapa de entrada también contempla el diseño e implementación de un filtro que restringe la frecuencia de operación de 0-30[KHz].

El filtro Sallen-Key que se observa en la **Figura No. 10** permite una caída de 40[dB/década] con una frecuencia de corte de 30[KHz] sí se implementa con un arreglo de resistencias y condensadores con los siguientes valores:  $R_{f1}=470[\Omega]$ ;  $R_{f2}=470[\Omega]$ ;  $C_{f1}=22[\text{nF}]$ ;  $C_{f2}=10[\text{nF}]$ .

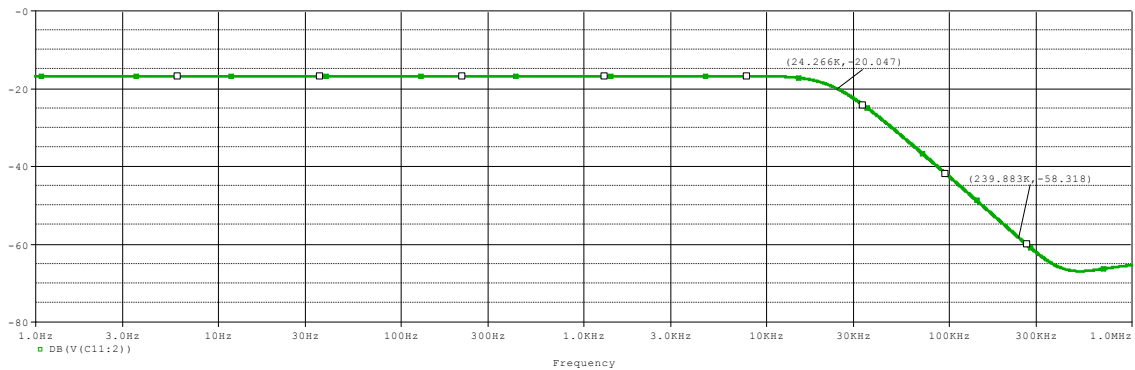
**Figura 10 - Etapa de entrada.**



**Figura 11 - Simulación - Etapa de Entrada - Atenuador - Vin(verde) y Vout(roja).**



**Figura 12 - Simulación - Etapa de entrada - Filtro Sallen-Key - Respuesta en frecuencia.**



### 2.1.2 Etapa de salida.

Otro de los objetivos del a *TOOLBOX* es la generación de señales con rangos de amplitud de  $\pm 10$  [V], para ello se requirió el uso de un convertidor digital-análogo externo ya que la tarjeta de desarrollo no tiene uno incorporado. Para este proyecto se seleccionó el DAC8830 por su simplicidad, eficiencia, disponibilidad en el mercado y correspondencia con el protocolo de comunicación SPI soportado por la tarjeta de desarrollo.

### Convertidor Digital – Análogo DAC8830.

El DAC8830 es un convertidor digital-análogo de 16-bits con entrada serial que opera con una fuente de alimentación de 3V a 5V. Este convertidor tiene una excelente linealidad, bajo ruido y rápido establecimiento, presenta una salida unipolar de 0V a  $V_{REF}$ . [7]

#### Características:

- Resolución de 16-Bits.
- Alimentación unipolar de 3V a 5V.
- Bajo ruido.

- Rápido establecimiento.
- Interfaz de comunicación SPI rápida de 50MHz.
- Precisión alta.
- Bajo consumo de potencia 25uW a 5V (8.33uA).

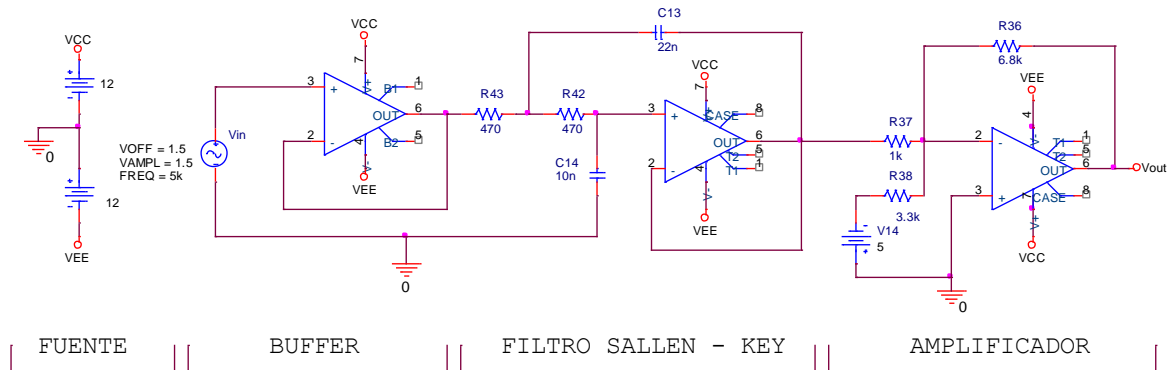
Los valores de voltaje de salida del DAC se encuentran en el rango de 0 [V] a 3 [V], por lo tanto de manera análoga a la etapa de entrada se realizó el diseño e implementación de un circuito sumador inversor que amplifica las señales en un factor de 6.8 y adiciona un valor de *offset* de 10 [V] haciendo el rango de salida del circuito de  $\pm 10$  [V].

**Tabla 4-** correspondencias de valores de salida.

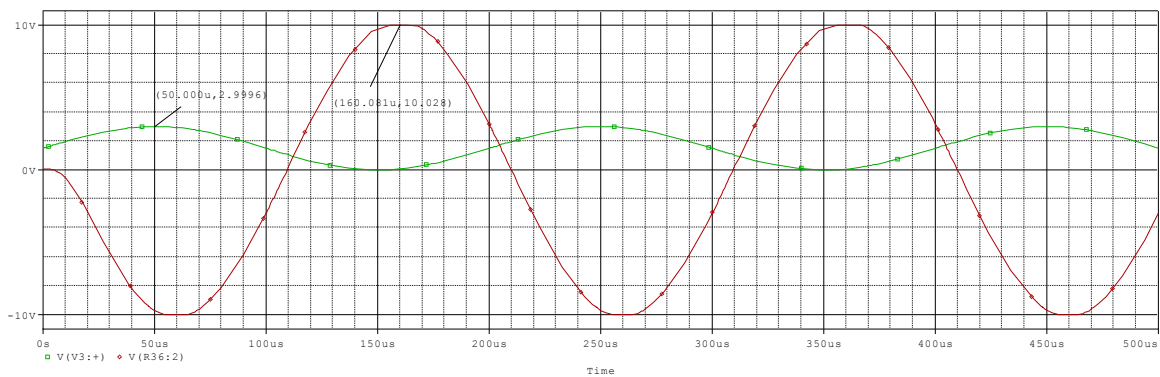
Voltaje de entrada[V]	Voltaje adaptado[V]
3	10
2.25	5
1.5	0
0.75	-5
0	-10

El circuito de la **Figura No. 13** presenta la señal analógica que será filtrada y amplificada con ganancia de 6.8 [V/V] y el nivel de *offset* que será adicionado con ganancia de 2 [V/V] al asignarle valores a las resistencias así: R37=1 [K $\Omega$ ]; R38=3.3 [K $\Omega$ ]; R36=6.8 [K $\Omega$ ].

**Figura 13 - Etapa de salida.** Fuente: Autores.



**Figura14 - Simulación - Etapa de salida - Amplificador - Vin(verde) y Vout(roja).**



## 2.2 VISUALIZACIÓN DE SEÑALES

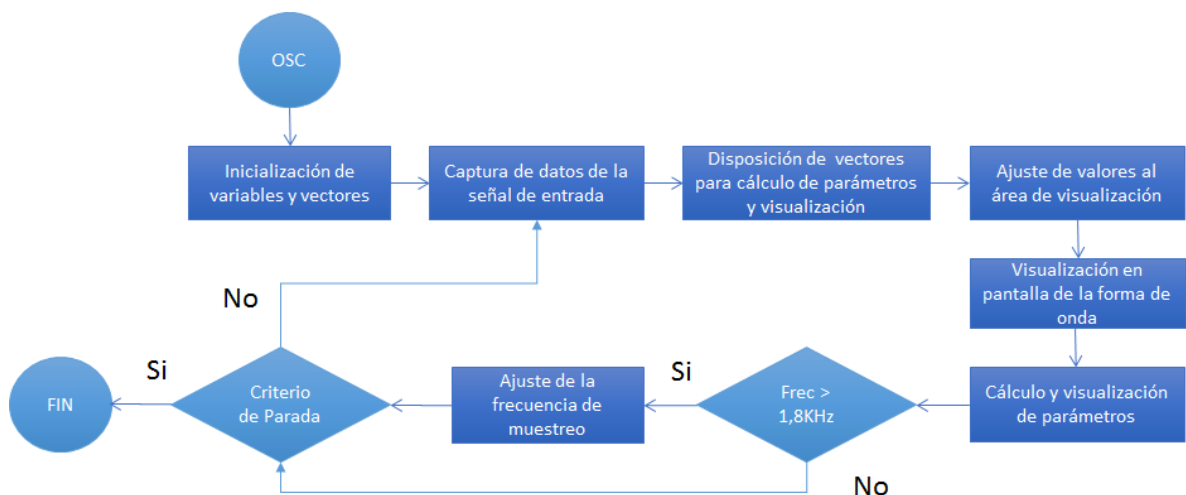
La TOOLBOX ofrece dentro de sus funciones la opción de visualizar en pantalla dos tipos de representaciones gráficas, una inicial (*osciloscopio*) que corresponde a la forma de onda de la señal adquirida y opcionalmente otra (*fft*) que ilustra el espectro de la misma.

## 2.2.1 OSCILOSCOPIO

Para graficar en pantalla la forma de onda de cada señal adquirida, la TOOLBOX realiza un ciclo de ejecuciones contenidas en una función principal que procesa los datos secuencialmente de acuerdo a los objetivos del proyecto, dando también como resultado la presentación de los parámetros básicos de la señal.

Dicho ciclo se presenta en la figura No. 9 a través de un diagrama de flujo para posteriormente mencionar el desarrollo de cada uno de los numerales.

**Figura 15** - Diagrama de flujo para la visualización en pantalla de la forma de onda.



- Disposición de espacio de memoria: Se inicializan las variables y vectores globales que serán manipuladas a lo largo del ciclo de ejecuciones. Adicionalmente se configuran como pines analógicos los pines de entrada I/O del dsPIC33 para la lectura del ADC propio de la tarjeta.

- Adquisición de las muestras: Se realiza la captura de las muestras de la señal por medio de un pin analógico I/O, posteriormente cada muestra es digitalizada por el ADC que maneja un bus de datos de 10 bits, realizando una correspondencia de valores según la siguiente tabla de conversión:

**Tabla 5** - Tabla de conversión ADC

Voltaje[V]	Digitalización [bits]
3,0	1023
2,25	766
1,5	511
0,75	255
0	0

Cada muestra se almacena en un vector de 256 espacios.

- Normalización: Una vez el vector dispuesto para las muestras ha sido llenado, se procede a organizar los datos de 3 formas diferentes en nuevos vectores así:
  - FFT:** En este caso se almacenan nuevamente las mismas muestras en un nuevo vector con una cantidad doble espacios (512) para disponerlos de la forma muestra, cero, muestra, cero, muestra... esta disposición se realiza como requisito para la implementación de la función FFT.
  - Gráfica:** En este caso las muestras son escaladas para realizar la correspondencia de la digitalización de la forma de onda con el espacio dispuesto en pantalla para graficar; puesto que la conversión se realiza sobre un bus de 10 bits, y el espacio dispuesto en pantalla es de 200

pixeles, la fórmula que permite ubicar la forma de onda dentro de dicho espacio es:

$$\text{pixel} = \frac{200}{1024} * \text{muestra} + 20 \quad (3.1)$$

**c. Parámetros:** En este caso las muestras son escaladas para recuperar el valor original que fue transformado por el hardware; la fórmula que permite restaurar dicha transformación es:

$$\text{valor real} = 10 - 0.1 * (\text{muestra} - 20) \quad (3.2)$$

- Cálculo de FFT: Posterior a la normalización de los vectores, se procede a realizar el cálculo de la transformada rápida de Fourier ejecutando la función FFT propia de la tarjeta; dicha función dispone del vector almacenado de la forma muestra, cero, muestra, cero... Esta disposición se interpreta como el indexado de las partes real e imaginaria de la señal (siendo cada cero la parte imaginaria) y la función retorna, sobre el mismo vector, las muestras de la señal siendo ahora diferentes de cero las partes imaginarias.

Para que la función retorne las componentes complejas necesita que se le describan tres parámetros:

- a. F(n):** vector de muestras almacenadas de la forma: muestra, cero, muestra, cero...

- b. **WN:** “Twiddle factors” o factores de giro; son un conjunto de valores ya almacenados en memoria que, en cantidad, deben corresponder al número de muestras.
- c. **N:** Corresponde al logaritmo en base 2 del tamaño del vector de muestras.

Una vez el vector es sobre-escrito con las componentes real e imaginaria de cada muestra, se procede a calcular y almacenar la magnitud de cada número complejo dentro de un nuevo vector; la magnitud fue calculada de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$|F(k)| = \sqrt{Re(k)^2 + Im(k)^2} \quad (3.3)$$

Este nuevo vector de magnitudes se recorre con el fin de encontrar la frecuencia de la magnitud máxima y así poder almacenar este valor de frecuencia en su respectiva variable. En la sección siguiente (FFT) se describe este procedimiento con mayor detalle.

- Zoom y restricción vertical de pantalla: El vector dispuesto para graficar la forma de onda puede contener amplitudes pequeñas y se puede considerar sobre la práctica que un aumento de las mismas mejoraría la visualización de la forma de onda; se cuenta dentro de la interfaz con dos botones táctiles que controlan la escala del eje ordenado de la gráfica.

Utilizando dichos botones las muestras pueden ser visualizadas en factores x1, x2 y x4. Esta operación se realiza modificando el valor de una variable que multiplica todas las muestras del vector a graficar; una vez se modifica el valor de la variable, el resultado del escalamiento se visualizará en el siguiente ciclo de ejecuciones.

Una consecuencia de este escalamiento es que la forma de onda puede llegar a graficarse sobre la interfaz en sentido vertical, por lo tanto se desarrolló una restricción por software que limita los valores para que se mantengan en un rango entre 20 y 220 pixeles, para esto, a la par que se realiza el recorrido del vector para multiplicar sus valores por el factor de escalamiento, también se realiza la encuesta para determinar si cada valor traspasa alguno de los límites después de ser escalado y en caso de que la encuesta sea positiva, se re-assigna el valor límite correspondiente a dicha muestra.

- Gráfica y restricción horizontal de pantalla: Para realizar la gráfica de la forma de onda, la tarjeta nos permite hacer uso de una función que grafica una línea sobre la pantalla TFT después de que se le asignen dos puntos coordenados de la misma, entonces el vector procesado con las magnitudes corresponde a las coordenadas del eje y a este se le asigna un vector correspondiente a las coordenadas del eje de las abscisas con valores enteros desde 0 hasta 256 para visualizar como una secuencia de rectas las magnitudes de las muestras.

Puesto que la frecuencia de la señal puede llegar a ser alta y se puede considerar sobre la práctica que una cantidad menor de periodos mejoraría la visualización de la forma de onda, se cuenta dentro de la interfaz con dos botones táctiles que controlan la distancia en pixeles entre muestra y muestra, teniendo así control sobre el eje de las abscisas de la gráfica.

Utilizando dichos botones las muestras pueden ser visualizadas con espacios entre muestras desde 1 hasta 10 pixeles en pasos de 1 pixel. Esta operación se realiza modificando el valor de una variable que multiplica todos los enteros del vector correspondiente al eje de las abscisas; una vez se modifica el valor de la variable, el resultado del espaciado se visualizará en el siguiente ciclo de ejecuciones.

Debido a que la gráfica se realiza a través de la implementación de un bucle 'for', una consecuencia de este espaciado entre muestras es que la forma de onda puede llegar a graficarse sobre la interfaz en sentido horizontal porque el contador del bucle está directamente relacionado con la coordenada del eje de las abscisas, por lo tanto se desarrolló una restricción por software que trunca el recorrido de la secuencia de rectas al hacer corresponder el extremo derecho del espacio dispuesto para la gráfica con el punto que satisface la condición para salir del bucle.

- **Medidas:** Para obtener los valores de los principales parámetros mencionados, se recorre el vector dispuesto para dichos cálculos a través de un sólo bucle 'for' procesando las muestras así:
  - a. **Vrms:** El cálculo de este parámetro se realiza a través de la implementación de la versión discreta de su correspondiente fórmula matemática:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} F(n)^2} \quad (3.4)$$

Donde N es el número de muestras y F(n) es el vector que contiene las muestras normalizadas de la señal.

La sumatoria de los cuadrados de las muestras se genera como la acumulación en una variable a través del recorrido del vector por el bucle; posteriormente se realiza la división de la sumatoria por el número de muestras adquiridas y finalmente se obtiene el valor deseado al calcular la raíz cuadrada de esta división.

**b. Vmax y Vmin:** A través del mismo bucle, las respectivas variables dispuestas para estos parámetros se comparan con cada valor del vector, sobre-escribiendo en las respectivas variables el valor mayor y menor de dicha comparación.

**c. Vpp:** Es el resultado de realizar la resta entre el 'Vmax' y el 'Vmin'.

Finalmente, haciendo uso de la función TFT\_write\_text se presentan en pantalla todos los parámetros calculados.

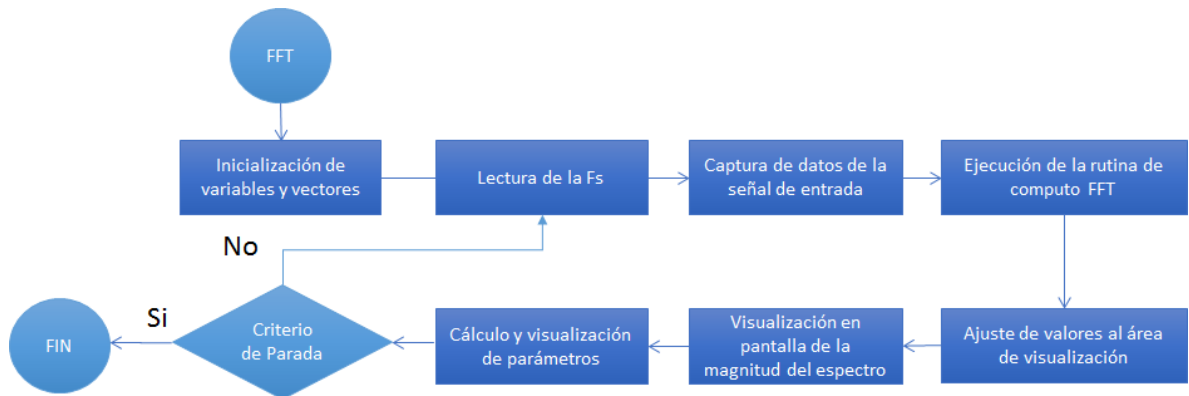
- Automatización de visualización: El periodo de muestreo influye directamente en la visualización de la forma de onda, por lo tanto se seleccionaron dos configuraciones del reloj derivado del sistema principal para poder muestrear cada señal de entrada en dos ventanas de frecuencia que permitieran una correcta visualización de la forma de onda; la configuración que por defecto establece la tarjeta, permite visualizar señales en un rango de 0-1.1 [KHz], mientras que una modificación de dicha configuración permite visualizar señales en un rango de 1.1-12 [KHz].

Debido a que la variable relacionada con la visualización es la frecuencia, se consideró necesario realizar el ajuste de la configuración del reloj derivado que controla el periodo de muestreo después de obtener el valor de la frecuencia de la señal, una vez que se finaliza la presentación en pantalla de cada captura de muestras se establece la respectiva configuración de dicho reloj en base a la frecuencia calculada.

### **2.2.2 Transformada rápida de Fourier (FFT).**

Para la presentación en pantalla del espectro de la señal, la TOOLBOX ejecuta el ciclo descrito en la figura No. 16.

**Figura 16 -** Diagrama de flujo para la visualización en pantalla del espectro.



- Disposición de espacio de memoria: Al igual que en la sección del osciloscopio, se inicializan las variables y vectores globales que serán manipulados a lo largo del ciclo de ejecuciones y se configuran como pines analógicos los pines de entrada I/O del dsPIC33 para la lectura del ADC propio de la tarjeta. Este proceso se repite puesto que es posible que en la práctica se visualice primero el espectro de la señal y no su forma de onda.
- Adquisición de muestras: También es necesario realizar nuevamente la captura de las muestras de la señal por medio de un pin analógico I/O, y cada muestra es digitalizada por el ADC asignando a cada valor su correspondiente digital según la tabla No. 4 en un formato de 10 bits.
- Cálculo de la FFT: En la sección anterior (osciloscopio) se mencionó en gran parte cómo se realiza el cálculo de la transformada rápida de Fourier, pero falta entrar en detalle acerca del algoritmo que se ejecuta al realizar el llamado de la función FFT.

Recordando los tres parámetros que solicita la función para realizar el algoritmo ( $F(n)$ ,  $WN$  y  $N$ ), podemos pasar a presentar directamente la fórmula que se ejecuta sobre ellos:

$$F(k) = \frac{1}{N} * \sum_{(n,k)=0}^{N-1} (f(n) * WN(kn)); \text{ donde } WN(kn) = e^{\frac{-j*2*\pi*i*k*n}{N}} \quad (3.5)$$

Esta ecuación entrega como resultado un vector del mismo tamaño del vector de muestras aumentado con ceros, pero ahora cada posición par del vector corresponde a una componente real de un número complejo y cada posición impar corresponde a la componente imaginaria de dicho número. Este vector de salida es simétrico, es decir, los números complejos de la primera mitad del vector son reflejados en la segunda mitad del mismo.

- Cálculo del vector de magnitud: la magnitud de cada valor complejo fue calculada de acuerdo a la fórmula:

$$|F(k)| = \sqrt{Re(k)^2 + Im(k)^2} \quad (3.6)$$

Cada magnitud es almacenada en un nuevo vector a partir del cual se generan todas las funciones disponibles en la visualización del espectro.

- Gráfica: Para realizar la gráfica del espectro de la señal se hace uso de una función de la tarjeta que permite graficar una línea vertical sobre la pantalla TFT a partir de dos puntos que comparten su coordenada en el eje de las abscisas, así es posible generar un gráfico de barras en donde cada barra se extenderá desde la posición  $y=0$  hasta la magnitud de cada complejo.

Entonces, a través de un bucle 'for' se recorre el vector de magnitudes para realizar el gráfico de barras ubicando cada barra en el segundo pixel después del anterior. Puesto que el vector de magnitudes también es simétrico, solo se grafica la mitad del vector y por esto se ubica cada barra con un pixel intermedio.

- Cálculo de parámetros: principalmente son necesarios dos parámetros.
  - a. **Frecuencia:** Cabe mencionar que una de las características principales de la representación gráfica del espectro de una señal es que la magnitud mayor dentro del vector de magnitudes corresponde a la frecuencia fundamental, por lo tanto este parámetro se puede hallar ubicando la posición del vector en que se encuentra la mayor magnitud, luego se normaliza dicha posición y se obtiene una buena aproximación del valor de la frecuencia fundamental.

Inicialmente el vector se recorre a través de un bucle 'for' para almacenar en una variable la posición de la magnitud mayor, posteriormente se normaliza dicha posición teniendo en cuenta la expresión:

$$F = \frac{f}{f_s} \quad (3.7)$$

Donde 'F' es la frecuencia discreta, 'f' es la frecuencia fundamental y 'fs' es la frecuencia de muestreo; entonces, sabiendo que 'F' tendrá un valor de uno cuando la frecuencia fundamental sea igual a la frecuencia de muestreo, es posible normalizar la posición almacenada y obtener una aproximación de la frecuencia fundamental con la expresión:

$$f_{\text{aprox}} = f_s * F = f_s * \frac{x}{256} \quad (3.8)$$

Donde x es la posición de la magnitud mayor dentro del vector.

- b. **THD:** dentro del mismo recorrido que se hace para ubicar la magnitud mayor, se va almacenando un vector con las magnitudes de los armónicos que corresponden a los máximos locales, esto se hace porque la expresión de la distorsión armónica total nos dice que:

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^N V_i^2}{V_1^2}} \quad (3.9)$$

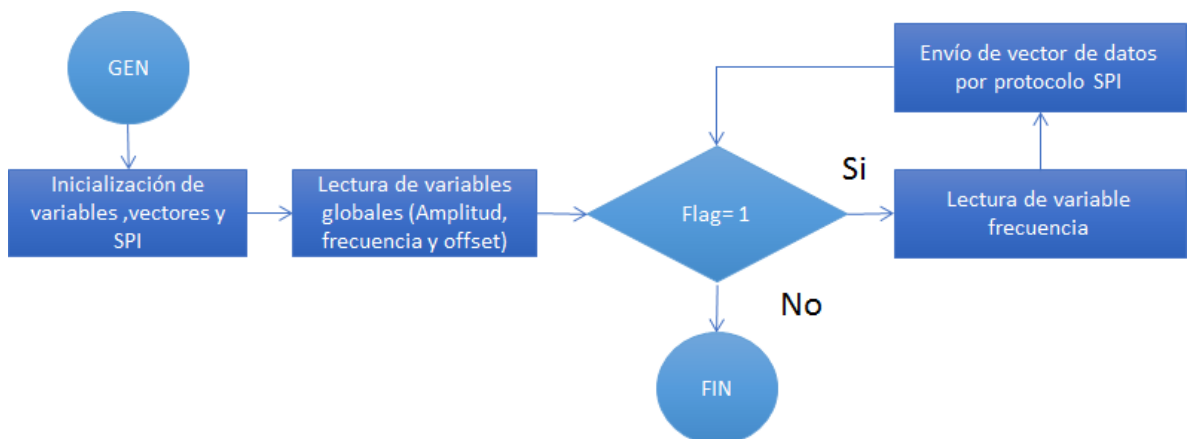
Una vez se tienen las amplitudes de los armónicos y del fundamental, se procede a evaluar la expresión y obtener el parámetro.

Finalmente, haciendo uso de la función TFT\_write\_text se presentan en pantalla todos los parámetros calculados.

## 2.3 GENERACIÓN DE SEÑALES

### 2.3.1 Señales convencionales

Figura 17 - Diagrama de flujo para la generación de una señal.



- **Inicialización SPI:** La tarjeta dispone de una función que inicializa este protocolo de comunicación, pero dentro de sus ejecuciones no contempla la configuración de un periférico que realice las funciones de “chip select” o seleccionador de señal (CS), por lo tanto, adicional a la configuración de la interfaz SPI es necesario configurar un periférico I/O como periférico de salida para que realice la función de habilitar y deshabilitar el DAC.

La función que inicializa el protocolo SPI requiere algunos parámetros para establecer la configuración del mismo, estos parámetros son:

- a. Maestro/esclavo:** Determina si la tarjeta actuará como receptor o emisor de información.
- b. Tamaño del paquete de envío:** Establece la longitud de la información; la transferencia se puede realizar en ocho (8) o dieciséis (16) bits.
- c. Divisor secundario del reloj principal:** Establece el valor secundario de escalamiento del reloj principal. Solo es válido su uso en modo Maestro.
- d. Divisor primario del reloj principal:** Establece el valor primario de escalamiento del reloj principal. Solo es válido su uso en modo Maestro.
- e. Selector esclavo:** Indica si este periférico de la tarjeta está activo durante la comunicación. Solo es válido su uso en modo Esclavo
- f. Momento de muestreo:** Indica en que momento del tiempo destinado para la salida de datos se realiza la lectura de memoria, puede ser al final o en la mitad del tiempo.
- g. Comportamiento del reloj:** Indica si el estado alto o bajo del reloj corresponde al estado activo.

**h. Flanco valido:** Determina en que flanco, subida o bajada, se realizarán las operaciones.

- Encuesta e interrupción: Cada vez que en la práctica se considere que es necesario detener el envío de datos, es posible generar una interrupción a través del cambio de nivel, alto a bajo, de un periférico de la tarjeta.

Antes de iniciar cada envío de datos a través de un bucle 'while', se realiza la encuesta del valor de este pin y así el software decide si se cumple la condición para la realización de la rutina de envío o para cierra el bucle.

Este cambio de nivel se genera manualmente a través de un pulsador.

- Delta: Por medio de este parámetro se hace posible obtener el rango de frecuencias de generación de 0-5[KHz] con una resolución de 0.1 [Hz]. El establecimiento de este parámetro hace referencia al intervalo de tiempo que existe entre el envío de cada muestra.
- Lectura de memoria: Una vez establecidos los parámetros previos, se realiza la lectura del respectivo valor de memoria según sea seleccionado en la interfaz (senoidal, cuadrada o triangular). Para cada una de las formas de onda se tiene almacenado un periodo con 256 muestras.
- Envío SPI: Finalmente, cada muestra expresada en una palabra de 16 bits es enviada a través del protocolo SPI compatible con el DAC seleccionado (DAC-8830).

Esta rutina corresponde al software necesario para generar de forma digital alguna de esas formas de onda, pero el proceso continúa cuando el DAC responde a la

sincronización del protocolo SPI y realiza la conversión de cada valor de acuerdo a la siguiente tabla de conversión:

**Tabla 6** - Tabla de conversión digital-análogo.

<b>Digitalización [bits]</b>	<b>Voltaje [V]</b>
59578	3.0
44684	2.25
29789	1.5
14894	0.75
0	0

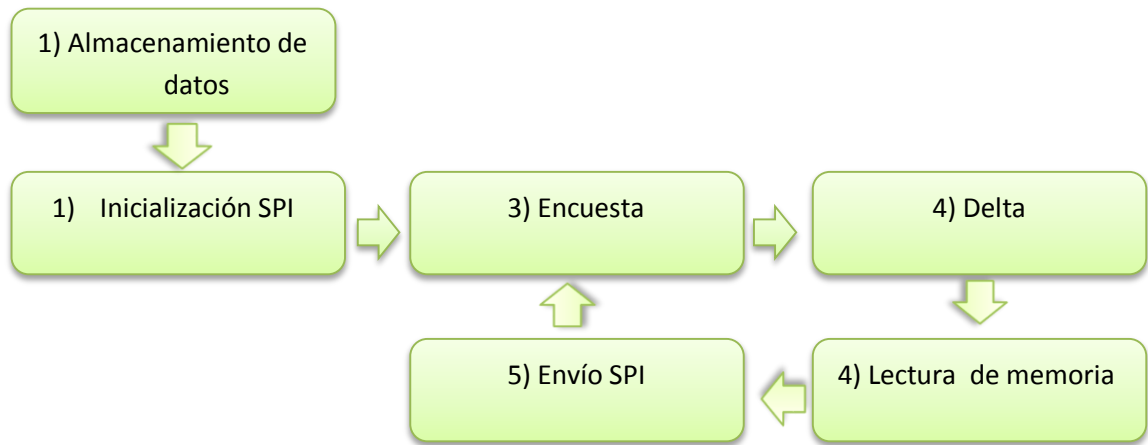
Entregando finalmente así el voltaje analógico.

### **2.3.2 Señal sintética.**

Una de las características más importantes del generador de señales es la capacidad de envío de los datos representados en formas de onda aleatorias creadas por el usuario haciendo uso de la capacidad táctil de la pantalla TFT que posee la tarjeta de desarrollo.

A diferencia de las formas de onda convencionales, las muestras de esta señal no están almacenadas en memoria; las muestras de esta señal se adquieren por medio de la lectura de las coordenadas de los pixeles pulsados por el usuario y se almacenan en memoria para posteriormente ser procesados de la misma forma que las señales convencionales.

**Figura 18** - Diagrama de flujo para la generación de una señal sintética.

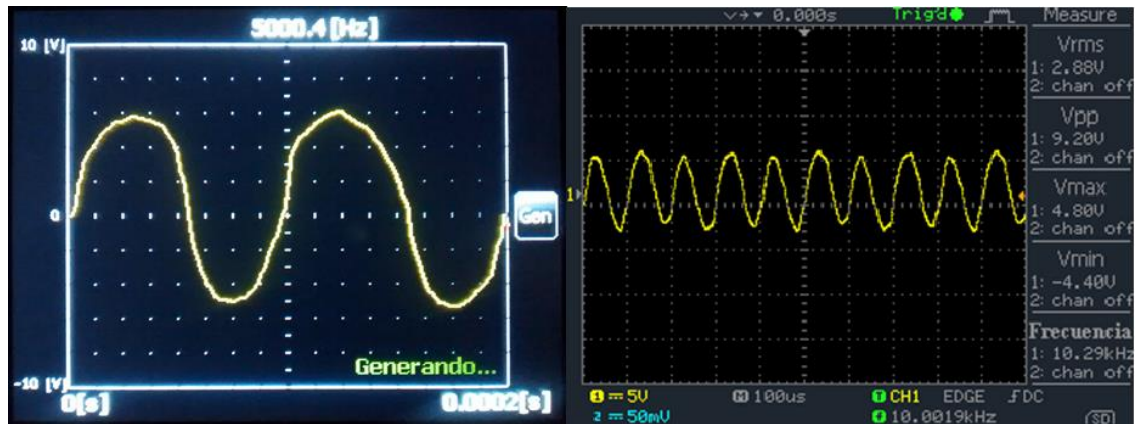


- **Características:**

- a. **Frecuencia:** Es posible definir la frecuencia de la señal a generar por medio de la interfaz gráfica, pero en el caso de la señal sintética dicha frecuencia preestablecida corresponde a una ventana de tiempo dentro de la cual sería posible graficar cambios de voltaje que representen una frecuencia mayor, por ejemplo, si se grafica un periodo de una señal senoidal y se verifica la frecuencia por medio de un osciloscopio, se hará evidente que la frecuencia corresponde a la indicada por el prototipo, pero si se grafican dos periodos de la misma forma de onda, la frecuencia medida por el osciloscopio sería el doble.

En el caso de establecer la frecuencia máxima de 5[KHz], la ventana de tiempo disponible para graficar sería de 200 [us]; ahora, el espacio dispuesto para graficar es de 256 pixeles en el eje de tiempo, lo cual indica que a la frecuencia máxima de generación el tiempo entre cada muestra representaría 781.25 [ns], por esto, en caso de tener la posibilidad física de graficar una señal con un periodo de 3 muestras consecutivas, la frecuencia máxima generable por el dispositivo, sin filtro, sería de 640[KHz].

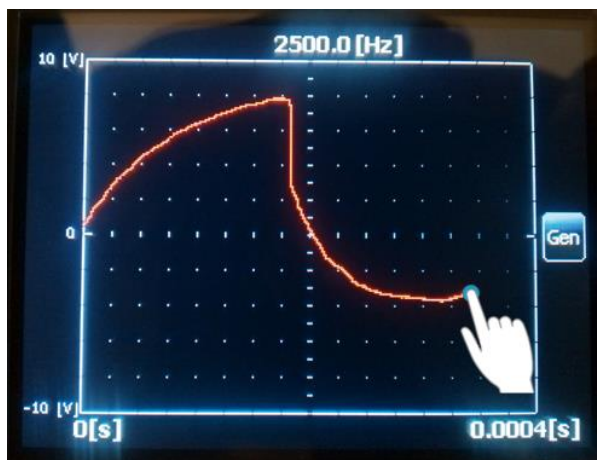
**Figura 19** - Señal sintética al doble de frecuencia establecida.



- b. Amplitud:** Para este parámetro se indica en pantalla que es posible generar señales en un rango de  $\pm 10[V]$  en un espacio de 200 pixeles correspondientes al eje de la amplitud; en caso de tener la posibilidad física de graficar una variación de amplitud de un pixel, analógicamente dicha variación correspondería a  $0.1[V]$ .

Con esta herramienta el usuario puede dibujar señales con rango de amplitud de  $\pm 10 [V]$  los cuales esta indicados en la pantalla y a un periodo máximo de  $0.2 [ms]$  de la señal dibujada como se muestra en la figura 20.

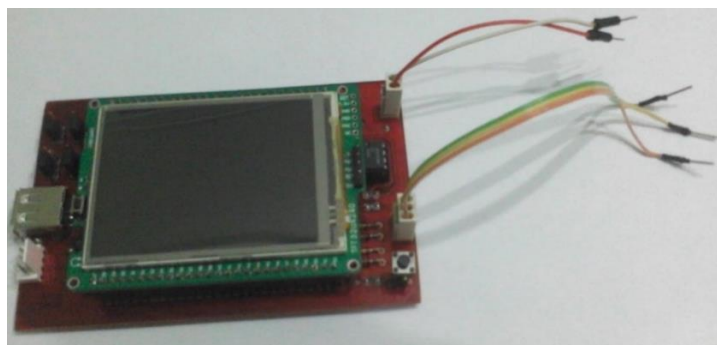
**Figura 20** – zona de dibujo de la señal Artificial



### 3. PRUEBAS Y RESULTADOS

La *TOOLBOX* cuenta con un hardware para el acondicionamiento de las señales, que le otorga un rango de operación de  $\pm 10$  [V] tanto para el osciloscopio en su entrada como para el generador en la salida. En la tarjeta del circuito se encuentran una serie de periféricos (pines) identificados en la figura No. 21, en los cuales se conectan los cables de prueba, en la parte superior derecha hay un par de pines pertenecientes al generador (rojo: salida; blanco: tierra), para el osciloscopio se asignaron 3 pines, uno para cada canal y tierra (verde: canal 1; amarillo: tierra; rojo: canal 2). La disposición que se les dio a estos pines facilita la conexión de diferentes tipos de cables o en caso de incorporar la *TOOLBOX* en una caja para su protección, poder hacer uso de conectores comerciales más grandes.

**Figura 21** - Pines de entrada y salida.



Las pruebas del dispositivo se realizaron con equipos que se encuentran en la industria; para este caso específicamente se utilizó el osciloscopio GW Instek GDS-1062 y el generador de señales BK Precision 4040<sup>a</sup>, cada uno con sus correspondientes accesorios.

**Figura 22** - GW Instek GDS-1062. [13], BK Presicion 4040a.



Es importante saber que la *TOOLBOX* solo puede tener en funcionamiento una de las dos herramientas, es decir, solo como osciloscopio o solo como generador debido a la secuencialidad de ejecución de las rutinas implementadas, por lo tanto las pruebas fueron realizadas por separado con su correspondiente dispositivo industrial.

### **3.1 Pruebas del Osciloscopio**

Cuando el prototipo es usado como osciloscopio cuenta con la visualización en pantalla de la forma de onda o del espectro de la señal entrante y de valores básicos característicos de la misma que son mostrados automáticamente.

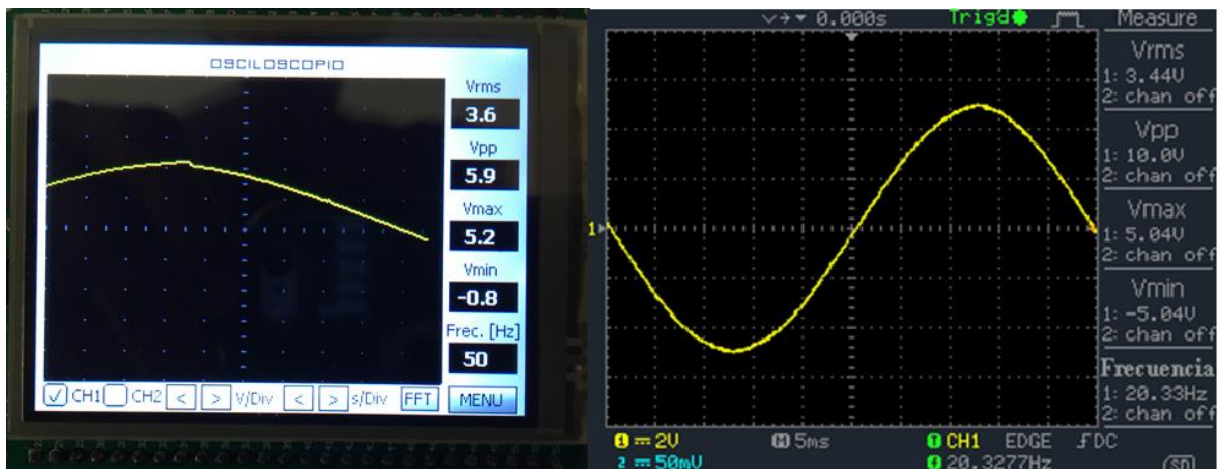
#### **3.1.1 Osciloscopio, pantalla principal**

Para las comparaciones que se realizaron y para verificar el correcto funcionamiento del prototipo, se utilizaron los equipos antes mencionados: el generador de señales BK Precision 4040A con el cual se generó la señal de prueba y el osciloscopio GW Instek GDS-1062 con el cual se hicieron las mediciones de comparación de datos y gráficas.

El prototipo, debido a la cantidad de muestras por ciclo de ejecución con las que se trabaja, muestra periodos completos de señales que estén por encima de los

40 [Hz] en frecuencia, por lo tanto, como se muestra en la figura No. 23, en caso de que sea posible visualizar un periodo completo, se mostrarán errores aleatorios en las mediciones que dependen del desfase de la señal.

**Figura 23** - Frecuencia de 50 [Hz].



Como consecuencia de la normalización de los valores utilizados para el cálculo de la frecuencia y a la cantidad de puntos usados para el cálculo de la FFT (512), se tiene un paso variable de 0.2 [Hz] a 20 [Hz] en función de la frecuencia de muestreo, como se muestra en la tabla No. 7:

**Tabla 7** - Relación entre frecuencia de muestreo y resolución.

FFT puntos	Fs [Hz]	Resolución [Hz]	Fo [Hz]	%Error
512	10k	20	5k	0.4
			2k	1
			20	100
	1k	1.95	500	0.39
			60	0.65
	200	0.39	20	1.95
400	0.78	60	1.3	

En las siguientes figuras se muestran ejemplos de visualización de la señal de entrada, para este caso una señal senoidal a 60 [Hz] y a 4920 [Hz]:

Figura 24 - Frecuencia de 60 [Hz].

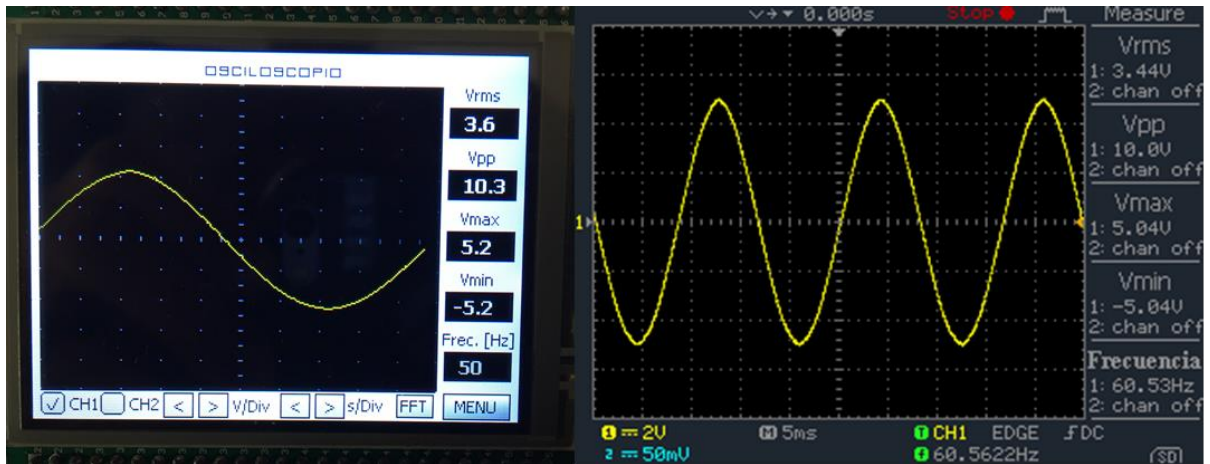
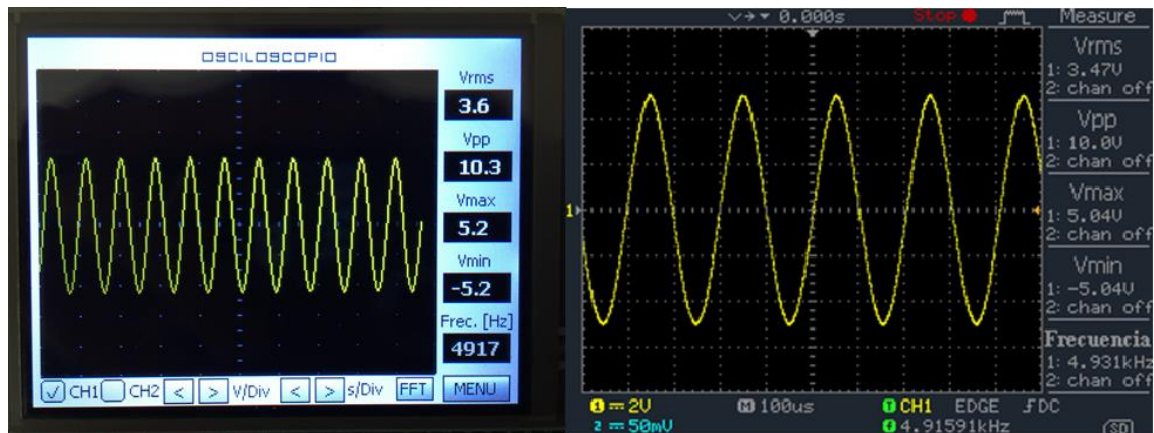


Figura 25 - Frecuencia 4920 [Hz].



En las siguientes tablas se presentan los errores de las mediciones calculadas por el prototipo para una señal senoidal con frecuencia constante de 2.5 [kHz]:

**Tabla 8** - Errores para los parámetros del Osciloscopio - señal senoidal más de 40 [Hz].

Voltaje RMS		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
1.37	1.5	9,5%
2.74	2.8	2,2%
4.13	4.2	1,7%
5.47	5.5	0,5%
6.86	6.9	0,6%
	Promedio	2,9%

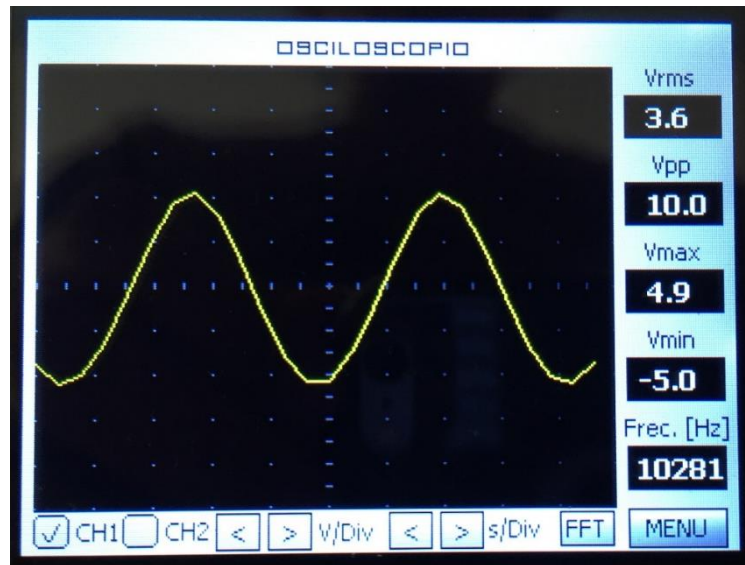
Voltaje Pico a Pico		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
4.08	4.1	0,5%
8	8	0,0%
12	12.2	1,7%
16	16	0,0%
20	20.2	1,0%
	Promedio	0,6%

Voltaje Máximo		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
2	2	0,0%
4	4	0,0%
6	6.1	1,7%
8.2	8.1	1,2%
10.2	10	2,0%
	Promedio	1,0%

Voltaje Mínimo		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
-2	-2	0,0%
-4	-4	0,0%
-6	-6.1	1,7%
-7.8	-7.9	1,3%
-9.8	-10.2	4,1%
	Promedio	1,4%

El prototipo, a pesar de establecerse un rango de operación en frecuencia de 0 a 5 [kHz], soporta frecuencias más altas a las cuales se verá afectada la visualización en pantalla de la forma de onda de la señal medida como se muestra en la figura 28.

**Figura 26** - Frecuencia 10280 [Hz].



**Figura 27** - Señal Cuadrada Frecuencia 1789 [Hz].



Las mediciones, en el caso de las señales cuadradas, se ven afectadas debido a la existencia de sobre-picos de voltajes introducidos a la lectura por el hardware de acondicionamiento.

En las siguientes tablas se presentan los errores de las mediciones calculadas por el prototipo para una señal cuadrada con frecuencia constante de 2.5 [kHz]:

**Tabla 9** - Errores para los parámetros del Osciloscopio - señal cuadrada.

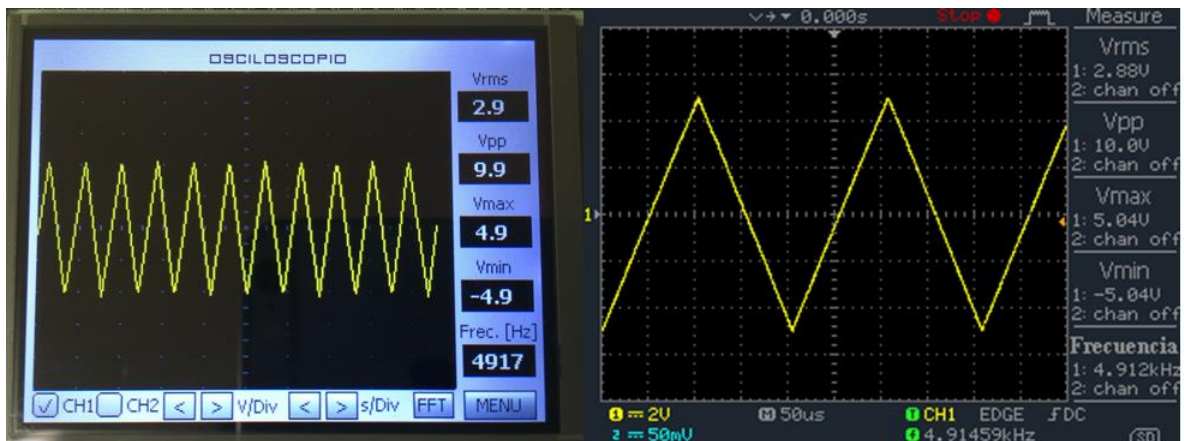
Voltaje RMS		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
1.95	2.1	7,1%
3.94	4	1,5%
5.93	6.0	1,2%
7.76	7.8	0,5%
9.75	9.8	0,5%
	Promedio	2,2%

Voltaje Pico a Pico		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
4.16	4.2	1,0%
8.08	8.1	0,2%
12	12.2	1,7%
16.2	16.4	1,2%
20	20.1	0,5%
	Promedio	0,9%

Voltaje Máximo		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
2.08	2.1	1,0%
4.08	4.1	0,5%
6.08	6.1	0,3%
8.2	8.1	1,2%
10.2	10.3	1,0%
	Promedio	0,8%

Voltaje Mínimo		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
-2.0	-2.1	5,0%
-4.0	-4.0	0,0%
-6.08	-6.1	0,3%
-7.8	-7.9	1,3%
-9.8	-10.2	4,1%
	Promedio	2,1%

**Figura 28** - Señal Triangular Frecuencia 4921 [Hz]



En las siguientes tablas se presentan los errores de las mediciones calculadas por el prototipo para una señal Triangular con frecuencia constante de 2.5 [kHz]:

**Tabla 10** - Errores para los parámetros del Osciloscopio - señal Triangular.

Voltaje RMS		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
1.12	1.2	7,1%
2.29	2.4	4,8%
3.44	3.5	1,7%
4.56	4.6	0,9%
5.72	5.8	1,4%
	Promedio	3,2%

Voltaje Pico a Pico		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
4	3.9	2,5%
8	8	0,0%
12	12.1	0,8%
16	15.9	0,6%
20	20	0,0%
	Promedio	0,8%

Voltaje Máximo		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
2	2	0,0%
4	4	0,0%
6.08	6.1	0,3%
8.2	8.1	1,2%
10.2	10	2,0%
	Promedio	0,7%

Voltaje Mínimo		
Osciloscopio	Prototipo	Error %
-2	-1.9	5,0%
-4	-4	0,0%
-6	-5.9	1,7%
-7.8	-7.9	1,3%
-9.8	-9.9	1,0%
	Promedio	1,8%

Estos errores se deben principalmente a dos fuentes, la primera corresponde a la aproximación a una cifra decimal que posee el dispositivo para presentar los valores en pantalla; la segunda corresponde a la presencia de dispositivos no ideales dentro del *hardware* para el acondicionamiento de señal que, en la práctica y por esta condición, modifican levemente los valores teóricos calculados para parámetros como la ganancia o el rango de excursión.

### Pruebas adicionales.

En las siguientes imágenes se muestra el funcionamiento del control vertical del prototipo y del caso de una señal entrante con *offset*.

**Figura 29 - Control Vertical.**



**Figura 30 - Señal con offset.**



Como se muestra en la imagen derecha de la figura No. 32, la señal de entrada presenta un nivel de *offset*, lo cual hace que el valor máximo de la señal sea mayor al soportado por el prototipo, esto hace que se visualice el fenómeno de

saturación debido a la protección implementada en hardware y al rango de excursión generado por la fuente de alimentación.

### 3.1.2 Osciloscopio, pantalla secundaria

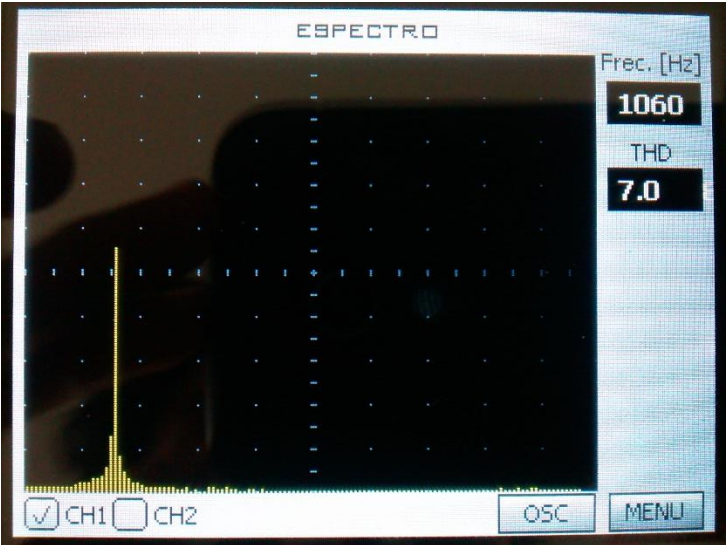
Puesto que el código implementado para el cálculo de la frecuencia fue el mismo en las dos pantallas, en esta sección no se presenta dicho parámetro.

Al igual que las pruebas para comparar los resultados de la pantalla primaria, para la pantalla secundaria también se usó el mismo osciloscopio disponible, pero dicho osciloscopio no muestra en pantalla directamente el valor del parámetro THD, por lo cual fue necesario apoyarnos en la gráfica disponible en el osciloscopio para calcular la siguiente expresión:

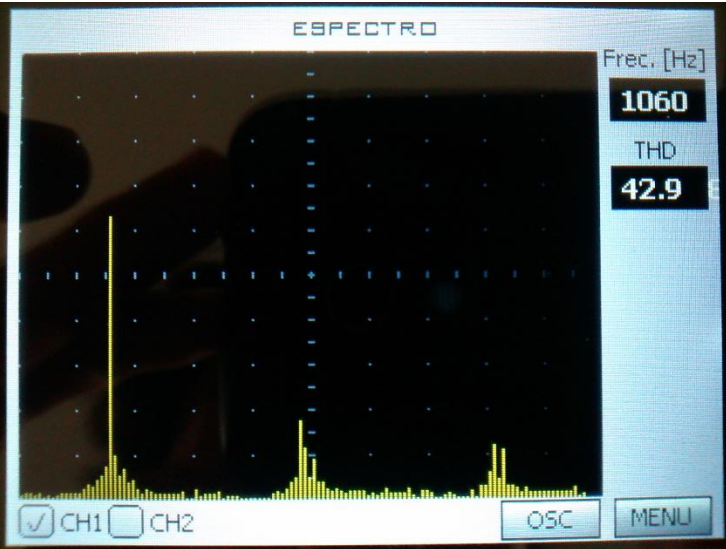
$$THD = 100\% * \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n 10^{\frac{-x_i}{20}}}}{10^{\frac{-x_1}{20}}} \quad (4.1)$$

Una vez registradas las amplitudes de los armónicos en decibelios, se calculaba el valor del parámetro y se comparaba con el valor registrado por el prototipo.

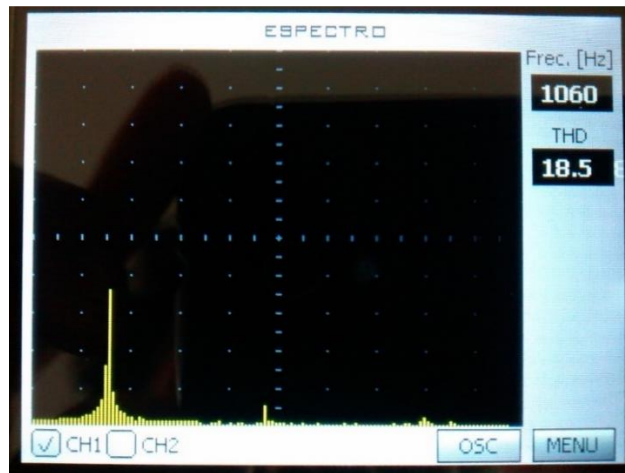
**Figura 31** - Espectro de una señal senoidal.



**Figura 32** - Espectro de una señal cuadrada.



**Figura 33** - Espectro de una señal triangular.



A continuación se presentan los errores calculados para el parámetro THD.

**Tabla 11** - Error de medición THD - Señal Senoidal

Señal Senoidal - 1 [kHz]			
Voltaje	Prototipo	Osciloscopio	Error %
4	7,1	1%	84%
8	7,4	1%	86%
12	8,3	1%	87%
Promedio			86%

**Tabla 12** - Error de medición THD - Señal Cuadrada

Señal Cuadrada - 1 [kHz]			
Voltaje	Prototipo	Osciloscopio	Error %
4	40,3	42%	5%
8	45,2	46%	1%
12	43,3	42%	2%
Promedio			3%

**Tabla 13 - Error de medición THD - Señal Triangular**

Señal Triangular - 1 [kHz]			
Voltaje	Prototipo	Osciloscopio	Error %
4	18,2	13%	35%
8	17	14%	26%
12	15,2	11%	41%
Promedio			34%

### 3.2 Pruebas del Generador

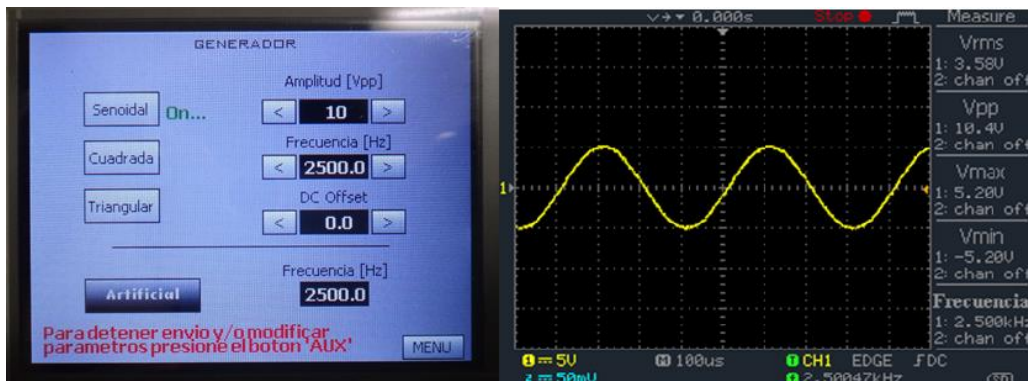
Las señales generadas por el prototipo fueron comprobadas por el osciloscopio GW Instek GDS-1062, para lo cual

#### 3.2.1 Señales convencionales

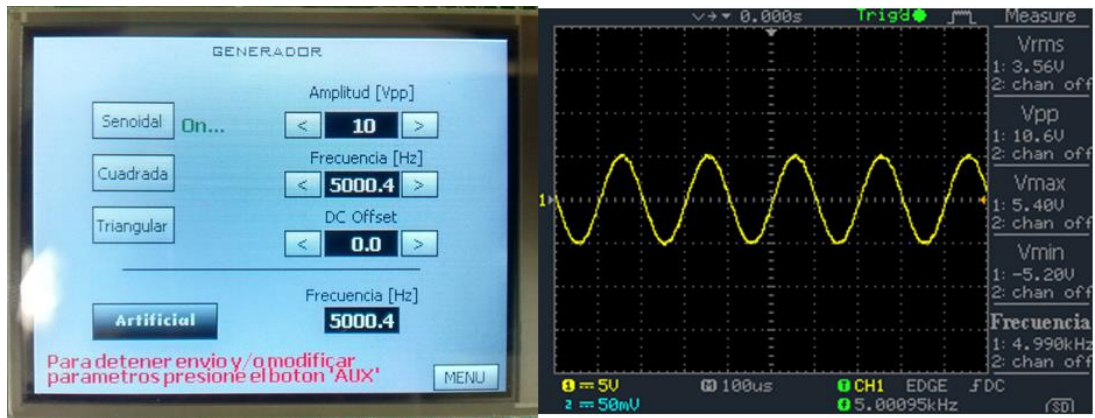
Se generaron las tres señales convencionales: senoidal, cuadrada y triangular, todas con los valores por defecto de Amplitud, Frecuencia y DC offset de 10[Vpp], 2500[Hz] y 0 [V] respectivamente y también con los valores máximos de frecuencia y amplitud:

- **Señal Senoidal.**

**Figura 34 - Señal senoidal a 2500 [Hz].**



**Figura 35 - Señal senoidal a 5000 [Hz].**



En las siguientes tablas se presentan los errores de los parámetros de una señal senoidal generada por el prototipo:

**Tabla 14 - Errores para los parámetros del Generador - señal senoidal.**

Voltaje Pico a Pico [V] a 2500 [Hz]			Frecuencia [Hz] a 10 [V]		
Prototipo	Osciloscopio	Error %	Prototipo	Osciloscopio	Error %
4	4.12	3,0%	1000	1000.4	0,04%
8	8.16	2,0%	2000.3	2000.7	0,02%
12	12.3	2,5%	3000.7	3003	0,08%
16	16.4	2,5%	4000	4000.5	0,01%
20	20.4	2,0%	5000.4	5000.9	0,01%
	Promedio	2,4%		Promedio	0,03%

- Señal Cuadrada.

Figura 36 - Señal cuadrada a 2500 [Hz].

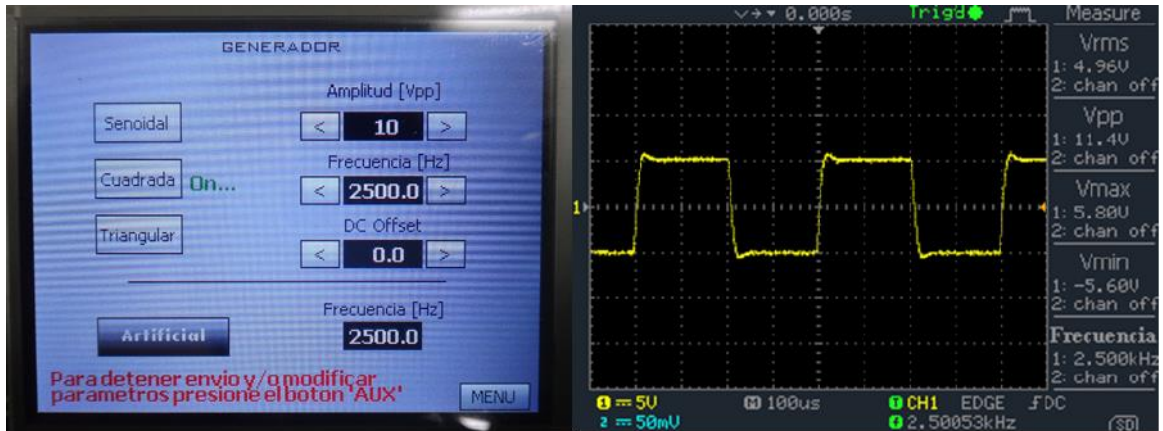


Figura 37 - Señal cuadrada a 5000 [Hz].



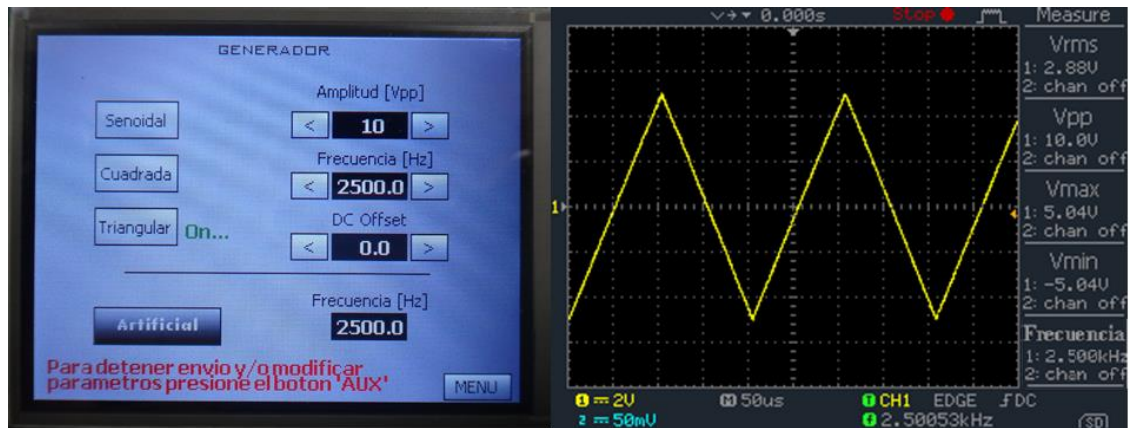
En las siguientes tablas se presentan los errores de los parámetros de una señal cuadrada generada por el prototipo:

**Tabla 15 - Errores para los parámetros del Generador- señal cuadrada.**

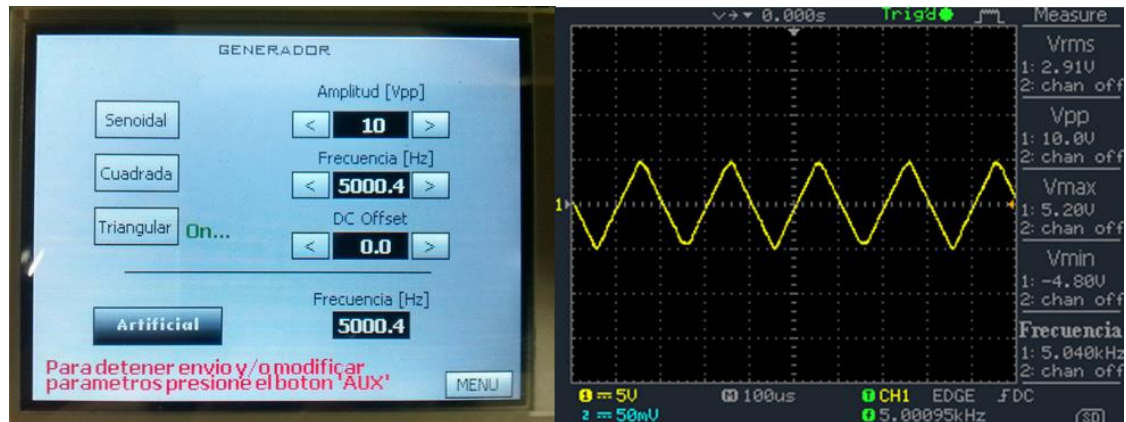
Voltaje Pico a Pico [V] a 2500 [Hz]			Frecuencia [Hz] a 10 [V]		
Prototipo	Osciloscopio	Error %	Prototipo	Osciloscopio	Error %
4	4.52	13,0%	1000	1000.4	0,04%
8	9.12	14,0%	2000.3	2000.7	0,02%
12	13.5	12,5%	3000.7	3001	0,01%
16	18.2	13,8%	4000	4000.4	0,01%
20	21.6	8,0%	5000.4	5001.07	0,01%
	Promedio	12,3%		Promedio	0,02%

- Señal triangular.

**Figura 38 - Señal triangular a 2500 [Hz].**



**Figura 39** - Señal triangular a 5000 [Hz].



En las siguientes tablas se presentan los errores de los parámetros de una señal Triangular generada por el prototipo:

**Tabla 16** - Errores para los parámetros del Generador- señal Triangular.

Voltaje Pico a Pico [V] a 2500 [Hz]			Frecuencia [Hz] a 10 [V]		
Prototipo	Osciloscopio	Error %	Prototipo	Osciloscopio	Error %
4	3.96	1,0%	1000	1000.3	0,03%
8	8	0,0%	2000.3	2000.7	0,02%
12	11.8	1,7%	3000.7	3001	0,01%
16	16	0,0%	4000	4000.6	0,01%
20	19.8	1,0%	5000.4	5000.9	0,01%
	Promedio	0,7%		Promedio	0,02%

Estos errores se deben principalmente a la presencia de dispositivos no ideales dentro del *hardware* para el acondicionamiento de señal que, en la práctica y por esta condición, modifican levemente los valores teóricos calculados para parámetros como la amplitud o el voltaje de offset.

- Pruebas adicionales

Se verificó el envío de señales con niveles de *offset* y simulando un voltaje continuo o señales con baja frecuencia:

Figura 40 - Señal senoidal con offset.

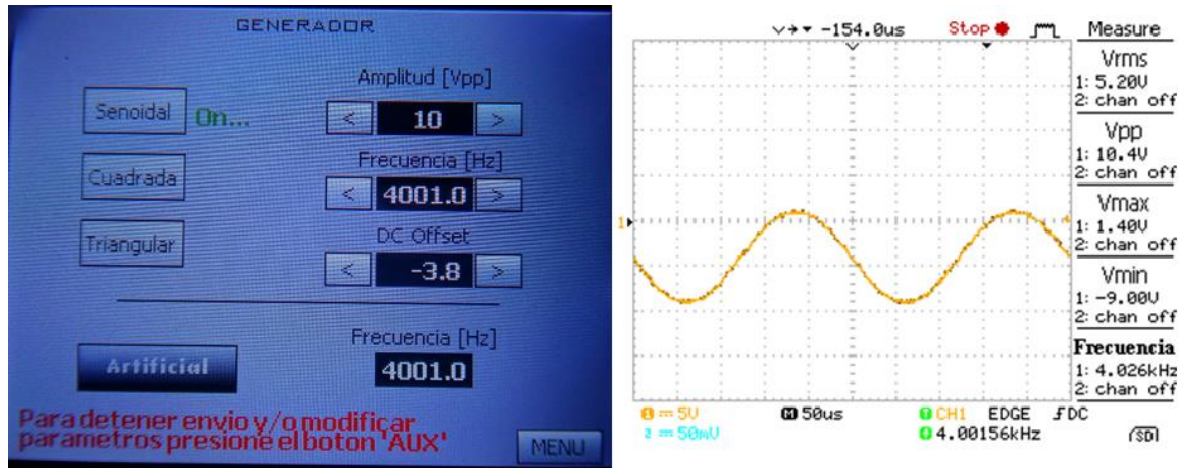
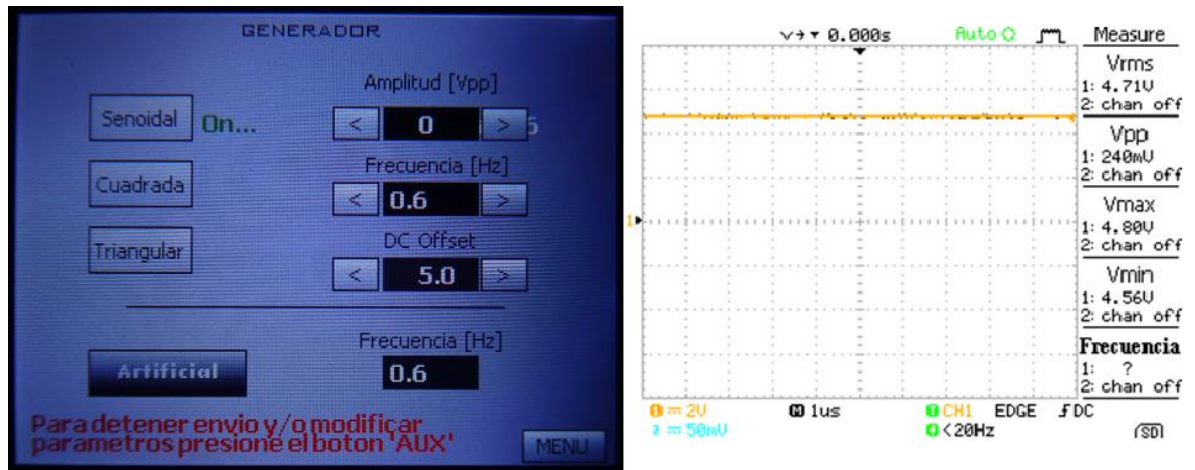


Figura 41 - Señal continua de 5 [V].



El generador permite incorporar niveles de *offset* a la señal a generar, se debe tener en cuenta que la amplitud máxima permitida es de  $\pm 10$  [V], por lo tanto

dependiendo de la amplitud y el nivel se *offset* se puede presentar el fenómeno de saturación en la señal generada.

En las siguientes tablas se presentan los errores de una señal senoidal generada por el prototipo con adición de distintos niveles de *offset*:

**Tabla 17** - Errores para los voltajes de *offset* del Generador – 4 Vpp.

Senoidal			Cuadrada			Triangular		
Voltaje de <i>offset</i> [V]			Voltaje de <i>offset</i> [V]			Voltaje de <i>offset</i> [V]		
Prototipo	Osciloscopio	Error %	Prototipo	Osciloscopio	Error %	Prototipo	Osciloscopio	Error %
-8	-8.3	3,8%	-8	-8.4	5,0%	-8	-8.3	3,8%
-4	-4.2	5,0%	-4	-4.1	2,5%	-4	-4.3	7,5%
-2	-2.2	10,0%	-2	-2.2	10,0%	-2	-2.1	5,0%
2	2.2	10,0%	2	1.8	10,0%	2	1.9	5,0%
4	3.9	2,5%	4	4	0,0%	4	4	0,0%
8	8	0,0%	8	8	0,0%	8	8	0,0%
	Promedio	5,2%		Promedio	4,6%		Promedio	3,5%

### 3.2.2 Señal sintética

Se verificó el correcto funcionamiento de la pantalla táctil y de la generación de señales dibujadas en ella, comprobando los parámetros establecidos.

Figura No. 42 - Señal sintética con periodo de 627 [ms].

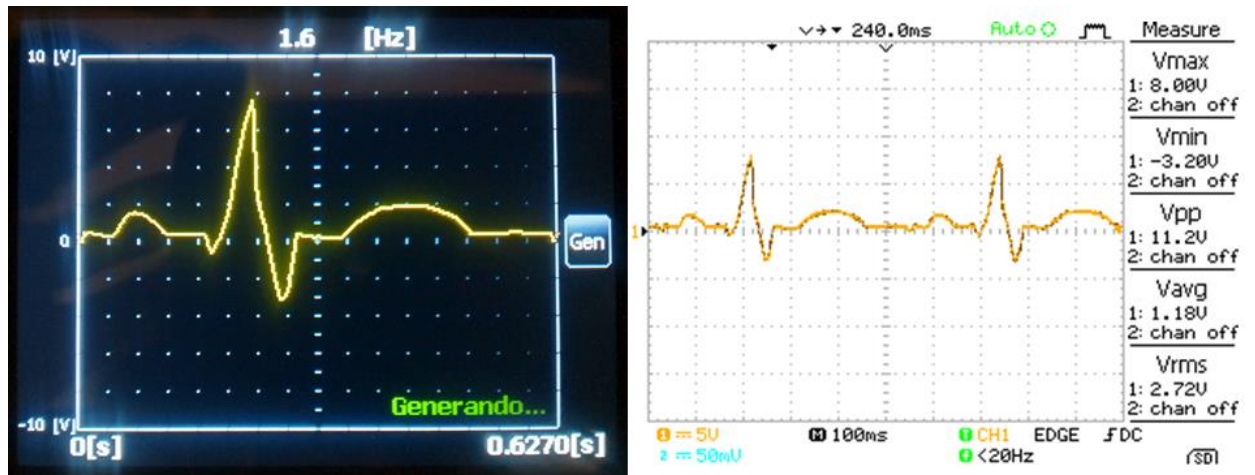
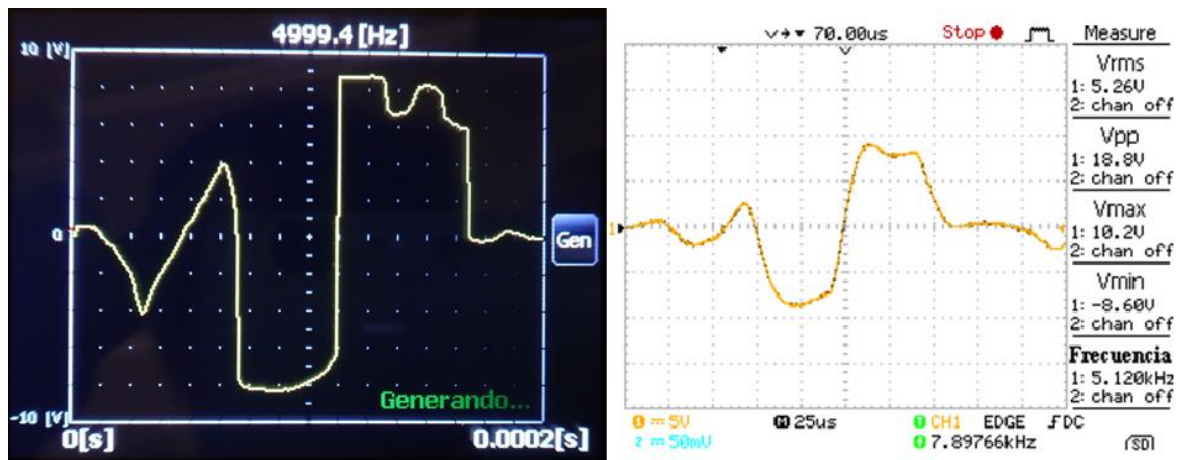


Figura 43 - Señal sintética con periodo de 0.2 [ms].



Debido a la presencia de un filtro paso bajo de segundo orden en la etapa de salida, las señales dibujadas con cambios bruscos en su amplitud y con frecuencias establecidas al máximo de 5 [kHz] o cercanas, se verán atenuadas y se generará una versión aproximada de la señal dibujada como se muestra en la figura 45.

#### 4. CONCLUSIONES

Los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, principalmente sobre temas relacionados al procesamiento de señales, sistemas digitales, diseño de circuitos analógicos y programación en C++ fueron necesarios para el desarrollo del prototipo puesto que la aplicación de los múltiples conceptos que estas involucran fueron la base y el cimiento para el alcance de los objetivos establecidos, por lo tanto, esta implementación valida y refuerza los conceptos del estudiante y le abre diversos campos de aplicación para la vida laboral.

Aunque el ancho de banda dispuesto para el procesamiento de las señales del prototipo fue de 5 [kHz], la tarjeta de desarrollo Mikromedia for dsPIC33® puede procesar señales en un rango de frecuencias que permiten analizar la red eléctrica.

Para un procesamiento óptimo de las señales procesadas a través del ADC disponible en la tarjeta, es necesario acondicionar cada señal al rango de excursión especificado por la tarjeta de desarrollo Mikromedia for dsPIC33®, puesto que de esta forma no se desperdicia el rango de cuantificación.

Puesto que fue posible emular las características básicas de un osciloscopio y un generador de señales sobre una misma plataforma, se demuestra que sería posible implementar herramientas adicionales para el procesamiento de señales. Cabe mencionar que esto sería realizable mientras que la capacidad de memoria no alcance su límite o no se agote la disponibilidad de los periféricos en caso de ser requeridos.

## 5. RECOMENDACIONES

Se puede desarrollar una fuente de alimentación propia para el prototipo que lo haga independiente de una fuente externa.

Las funciones emuladas por el prototipo son básicas y pueden ser mejoradas, por ejemplo, la interacción en tiempo real de las mediciones de los canales del osciloscopio y sus respectivas formas de onda.

El usuario debe ser cauteloso al momento de manipular el prototipo teniendo presente el rango de voltaje especificado.

Si se desea manipular el código fuente del prototipo, se recomienda analizar y dimensionar los efectos del uso de las funciones propias de la tarjeta de desarrollo en el desempeño de las múltiples funciones emuladas.

En el caso en que se requiera mejorar, actualizar o modificar el hardware de acondicionamiento para la tarjeta de desarrollo, se recomienda realizar la caracterización de la correspondencia analógica en la interacción de las mismas.

Debido al buen desempeño del prototipo como instrumento de medición y generación de señales, es posible que supla las necesidades básicas de los temas de estudio planteados para un laboratorio de ingeniería electrónica.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. J. P. A. Moya, Procesamiento Digital de Señales, Cartago, 2011.
- [2] S. W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, San Diego, California: California Technical Publishing , 1999.
- [3] J. G. P. a. D. G. Manolakis, Tratamiento digital de señales, Prentice Hall, 1998.
- [4] O. E. BRIGHAM, The fast Fourier transform and its applications, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- [5] MikroElektronika, «Mikroelektronika, Programming dsPIC MCU in C,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.mikroe.com/products/view/266/programming-dspic-mcu-in-c/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [6] C. M. Dibujes Salgado y E. A. Torres Morales, «Diseño e implementación de un osciloscopio con un dsPIC,» Quito, 2008.
- [7] T. Instruments, «DAC8830,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8830.pdf>. [Último acceso: Abril 2015].
- [8] Mikroelektronika, «Mikromedia for dsPIC33,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.mikroe.com/mikromedia/dspic33/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [9] Microchip, «dsPIC33FJ256GP710A,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en546064>. [Último acceso: Abril 2015].

- [10] Mikroelektronika, «visualTFT,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.mikroe.com/visualtft/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [11] Mikroelektronika, «mikroc,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.mikroe.com/mikroc/dspic/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [12] MikroElektronika, «mikroProg,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.mikroe.com/mikroprog/pic-dspic-pic32/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [13] GwInstek, «Electrocomponentes S.A,» 2015. [En línea]. Available: [http://tienda.electrocomponentes.com/detalle.php3?titulo=Osciloscopio%20digital%20de%20banco%20\(GDS-1062\)&rubro=8&expand=SI&articulo=GDS-1062&subrubro=802](http://tienda.electrocomponentes.com/detalle.php3?titulo=Osciloscopio%20digital%20de%20banco%20(GDS-1062)&rubro=8&expand=SI&articulo=GDS-1062&subrubro=802). [Último acceso: Abril 2015].
- [14] B. PRECISION, «BK PRECISION Model 4040A,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.bkprecision.com/products/signal-generators/4040A-20-mhz-sweep-function-generator.html>. [Último acceso: Abril 2015].
- [15] I. V. PROAKIS John, Digital Signal Processing using MATLAB, Cengage Learning.
- [16] J. R. C. Mendoza, «Diseño y simulacion de sistemas microcontrolados en lenguaje C, vol. 1,» 2011.
- [17] A. Oppenheim y A. Willsky, «Señales y sistemas,» Pearson Education, 1998.

## BIBLIOGRAFIA

- BRIGHAM O. E. The fast Fourier transform and its applications, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- DIBUJES SALGADO M. y TORRES MORALES E. A. Diseño e implementacion de un osciloscopio con un dsPIC, Quito, 2008.
- GwInstek, Electrocomponentes S.A, 2015. Disponible en la siguiente dirección web:  
[http://tienda.electrocomponentes.com/detalle.php3?titulo=Osciloscopio%20digital%20de%20banco%20\(GDS-1062\)&rubro=8&expand=SI&articulo=GDS-1062&subrubro=802](http://tienda.electrocomponentes.com/detalle.php3?titulo=Osciloscopio%20digital%20de%20banco%20(GDS-1062)&rubro=8&expand=SI&articulo=GDS-1062&subrubro=802).
- MOYA J. P. A. Procesamiento Digital de Señales, Cartago, 2011.
- PROAKIS V. John, Digital Signal Processing using MATLAB, Cengage Learning.
- MANOLAKIS D. G. a. PROAKIS J. G. Tratamiento digital de señales, Prentice Hall, 1998.
- MENDOZA J. R. C. Diseño y simulacion de sistemas microcontrolados en lenguaje C, vol. 1, 2011.
- Microchip, «dsPIC33FJ256GP710A,» 2015. Disponible en la siguiente dirección web:  
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en546064>.


- Mikroelektronika, «mikroc,» 2015. Disponible en la siguiente dirección web:  
<http://www.mikroe.com/mikroc/dspic/>.
- MikroElektronika, «Mikroelektronika, Programming dsPIC MCU in C,» 2015. Disponible en la siguiente dirección web:  
<http://www.mikroe.com/products/view/266/programming-dspic-mcu-in-c/>.
- MiKroelectronika, «Mikromedia for dsPIC33,» 2015. Disponible en la siguiente dirección web:  
<http://www.mikroe.com/mikromedia/dspic33/>.
- MikroElektronika, «mikroProg,» 2015. Disponible en la siguiente dirección web:  
<http://www.mikroe.com/mikroprog/pic-dspic-pic32/>.
- Mikroelectronika, «visualTFT,» 2015. Disponible en la siguiente dirección web:  
<http://www.mikroe.com/visualtft/>.
- OPPENHEIM y WILLSKY A. Señales y sistemas, Pearson Education, 1998.
- PRECISION, BK PRECISION Model 4040A, 2015. Disponible en la siguiente dirección web:  
<http://www.bkprecision.com/products/signal-generators/4040A-20-mhz-sweep-function-generator.html>.
- SMITH S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, San Diego, California: California Technical Publishing , 1999.

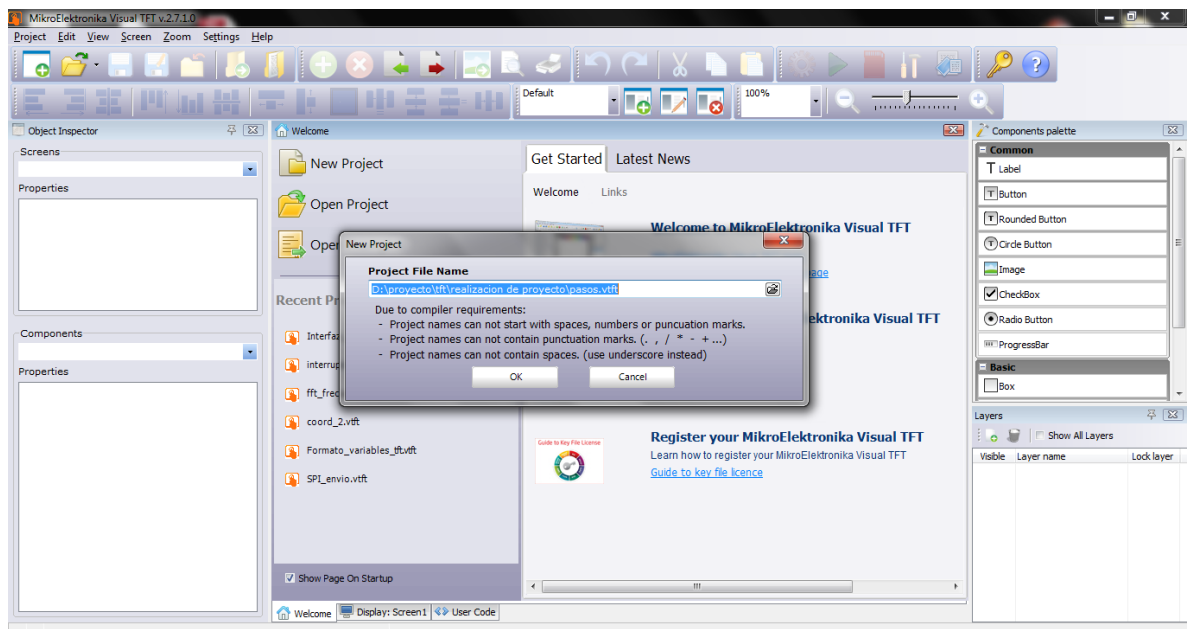
- T. Instruments, «DAC8830,» 2015. Disponible en la siguiente dirección web:  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8830.pdf>.

## ANEXOS

### ANEXO A: Creación de un proyecto en Visual TFT

Para la realización de un proyecto que contenga elementos para ser manipulados con la pantalla táctil TFT existe la aplicación Visual TFT que permite de una manera fácil el desarrollo de interfaces gráficas para las distintas tarjetas de desarrollo y compiladores de MikroElektronika.

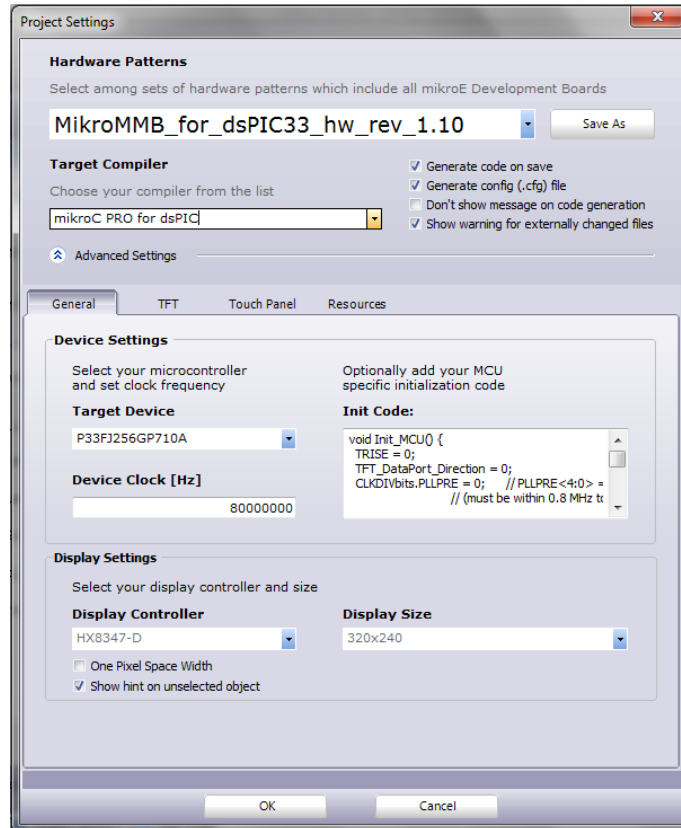
Una vez abierto el Visual TFT se selecciona nuevo proyecto  en la barra de herramientas, el usuario debe asignar el destino y nombre del proyecto como se muestra en la siguiente figura:



#### Interfaz gráfica del Visual TFT

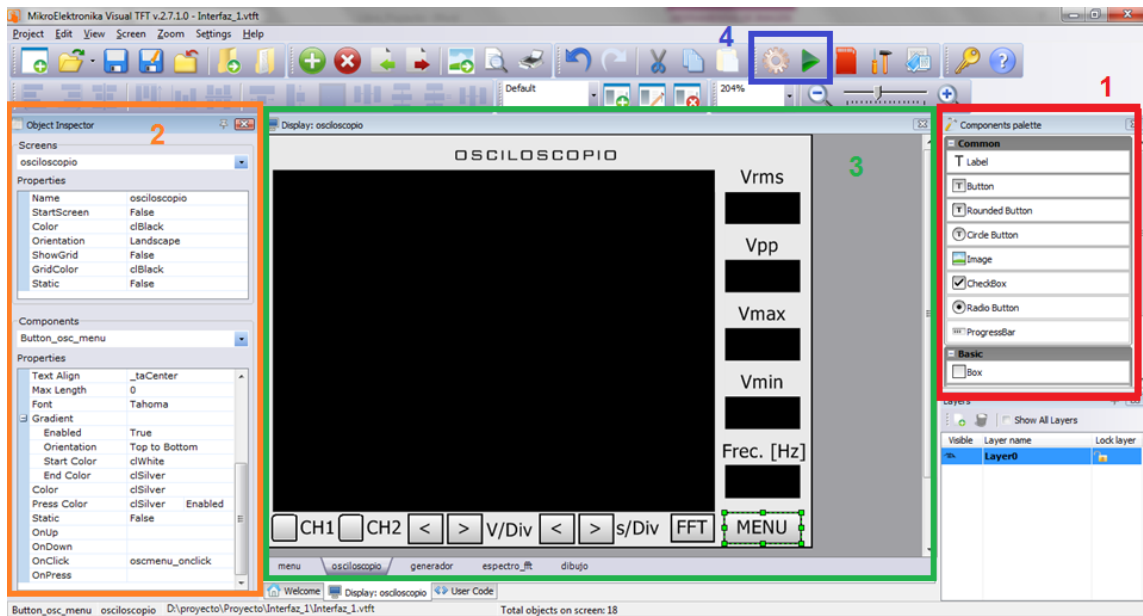
Como paso siguiente, se debe escoger el tipo de Mikromedia que se tienen, en este caso en específico es la MMB\_for\_dsPIC33\_hw\_rev\_1.10 y el compilador es el mikroC PRO for dsPIC, es importante realizar correctamente este paso para no

tener problemas de compatibilidad y verificar el microcontrolador que posee la tarjeta en opciones avanzadas.



Propiedades del proyecto.

## Características básicas del Visual TFT.



### Entorno de trabajo del visual TFT

1. Paleta de componentes del Visual TFT: se encuentran los diferentes tipos de botones y elementos necesarios para el diseño de la interfaz gráfica.
2. Propiedades: se especifican las propiedades de los elementos en la interfaz, entre ellos el nombre, color, eventos, entre otros.
3. Zona de diseño: aparece el tamaño de la pantalla, para la MikroMedia for dsPIC33 es de 30x240, en ella podemos agregar los elementos que el usuario necesita en su diseño.
4. Botón de generación de código y envío a compilador compatible instalado y especificado por el usuario.

Teniendo el diseño de la interfaz gráfica listo, se oprime el botón generar código



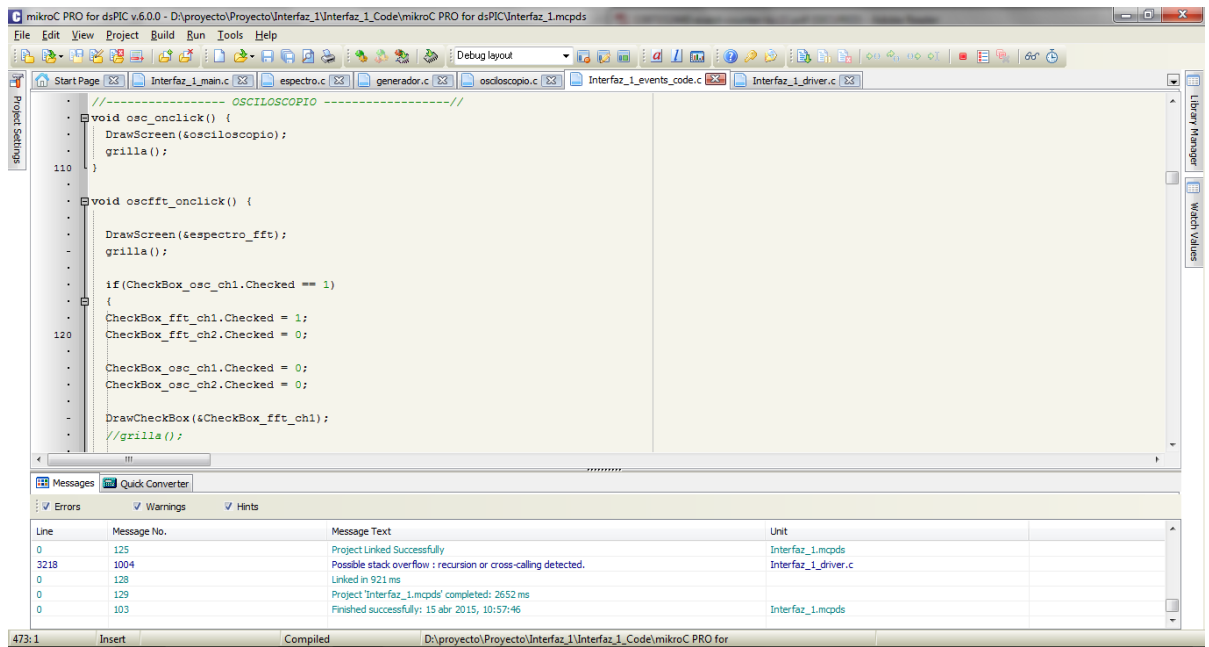
, el Visual TFT automáticamente genera los archivos que contienen las características y eventos de los objetos en el lenguaje de programación especificado por el usuario. Se debe tener en cuenta que este programa no es

para realizar la programación completa de la aplicación a desarrollar, esto se realiza en el compilador de preferencia.


La tarjeta de desarrollo MikroMedia for dsPIC33 tiene una gran cantidad de periféricos y rutinas que requieren de una inicialización previa para su uso, uno de los archivos generados por el Visual TFT el "driver.c", contiene estas inicializaciones, las cuales pueden ser modificadas dependiendo de las necesidades de programación.

Para realizar la programación, se utilizó el MikroC PRO for dsPIC33, en él se cargan los archivos generados por el Visual TFT y/o se crean los necesarios para el desarrollo de la aplicación.

Se debe tener en cuenta que algunos objetos creados en la interfaz, requieren el uso de la capacidad táctil de la pantalla, por lo tanto están acciones de entrada asociadas a los objetos está estructurada como una rutina llamada Check\_TP(), la cual debe ser ejecutada repetidamente para la detección de estas acciones detectando la actividad de la pantalla.



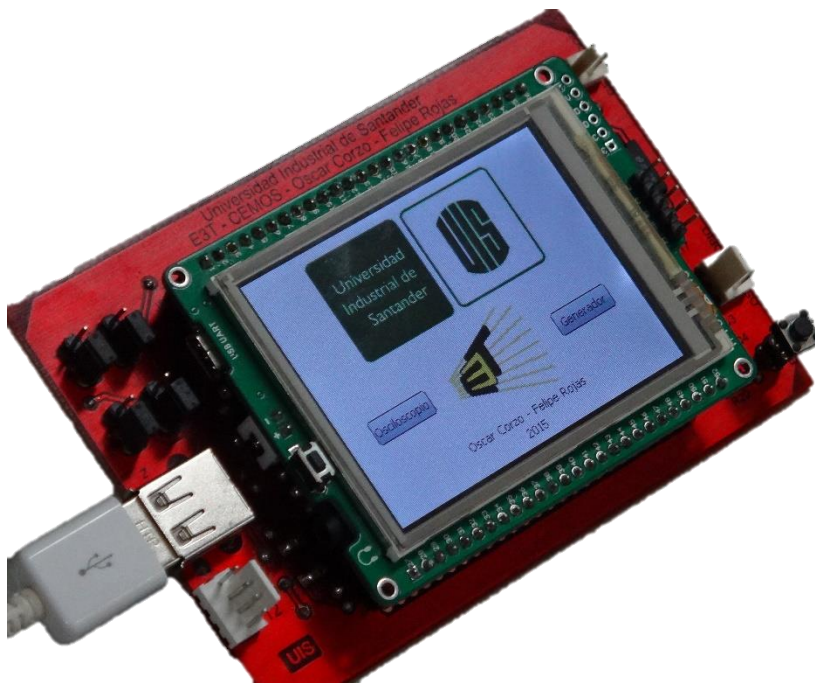
### Interfaz del compilador MikroC PRO for dsPIC33.

Cuando el proyecto es terminado, se compila oprimiendo el botón “Build” , se verifican y corrigen los errores si los hay, el MikroC PRO genera un archivo .HEX el cual se utiliza para programar la tarjeta de desarrollo.

**ANEXO B:** Manual de usuario.

## **Prototipo *Toolbox* para señales digitales utilizando DSP**

### **Manual de usuario**



**OSCAR LEONARDO CORZO - LUIS FELIPE ROJAS MUÑOZ**

## Seguridad general

El dispositivo cuenta con una serie de recomendaciones que permitirán evitar daños al dispositivo o lesiones personales, para esto se deberán tener en cuenta las siguientes especificaciones:

### Para evitar daños en el equipo

- **Usar el cable de alimentación especificado.** El prototipo (*toolbox*) posee una alimentación por medio de un cable USB o por los pines auxiliares de alimentación teniendo en cuenta los valores de voltaje adecuados para cada uno de sus pines que se encuentran descritos en la tarjeta.
- **Desconexión de la alimentación.** Para desconectar el prototipo se recomienda principalmente retirar el cable USB o la conexión de pines auxiliares; una forma alternativa consiste en apagar directamente la fuente de alimentación.
- **No ejercer demasiada presión en la pantalla táctil TFT.**
- **No utilizar el prototipo en entornos húmedos.**

## Procedimientos iniciales

En este manual se presenta el funcionamiento y uso del prototipo *Toolbox* para señales digitales utilizando una plataforma de desarrollo con DSP. Este prototipo es pequeño y de fácil transporte y puede ser usado para el análisis individual de máximo dos señales eléctricas individualmente, al igual que la generación de una de las mismas. Las funciones principales como “visualización”, “FFT” y “generación” no pueden ser ejecutadas de forma simultánea.

### Características generales

- Pantalla táctil TFT en color integrada en la tarjeta de desarrollo Mikromedia for dsPIC33.
- Circuito para la adecuación de las señales de entrada y salida.
- Ancho de banda de 5 [KHz].
- Rango de operación en amplitud de -10 a 10 voltios.
- Alimentación dual de  $\pm 12$  [V] y 5 [V] por cable USB o pines auxiliares.
- 2 canales independientes en el osciloscopio con 5 medidas automáticas.
- Control de factor de escala vertical y horizontal.
- Transformada rápida de Fourier (FFT).
- Generación de señales convencionales.
- Generación de señal sintética dibujada por el usuario.

### Instalación

Para alimentar el prototipo basta con conectar el cable USB específico a la entrada, esto lo encenderá inmediatamente; utilice una fuente de alimentación dual de  $\pm 12$  [Vdc] y una de 5 [Vdc]. De igual manera se pueden utilizar los pines auxiliares de alimentación de manera similar.

## Calibración de la pantalla TFT

Cuando se conecta a la alimentación, el dispositivo pedirá de forma inmediata la rutina de calibración de la pantalla táctil TFT, solo basta con presionar donde se indica para asegurar un uso eficiente de la interfaz gráfica del prototipo. Si al ingresar a la pantalla de presentación del prototipo o a alguna de las demás pantallas la función táctil no funciona correctamente, oprima el botón *reset* y realice la calibración nuevamente.

## Fundamentos de uso

El prototipo *Toolbox* para señales digitales utilizando una plataforma de desarrollo con DSP tiene dos funciones separadas de fácil manejo y que tienen interfaz gráfica diferente; en modo “osciloscopio” se podrá visualizar la señal adquirida y sus principales medidas, además de la transformada rápida de Fourier (FFT); en modo “generador” se podrán generar las señales convencionales (senoidal, cuadrada y triangular) con sus parámetros básicos y adicionalmente se puede realizar el envío de una señal sintética que puede ser dibujada a necesidad del usuario en la pantalla táctil TFT.

## Pantalla de presentación

Luego de la calibración correspondiente de la pantalla táctil se ingresa a la pantalla de presentación del prototipo, en ella se puede seleccionar el modo a trabajar pulsando el botón correspondiente ya sea como “osciloscopio” o como “generador”.

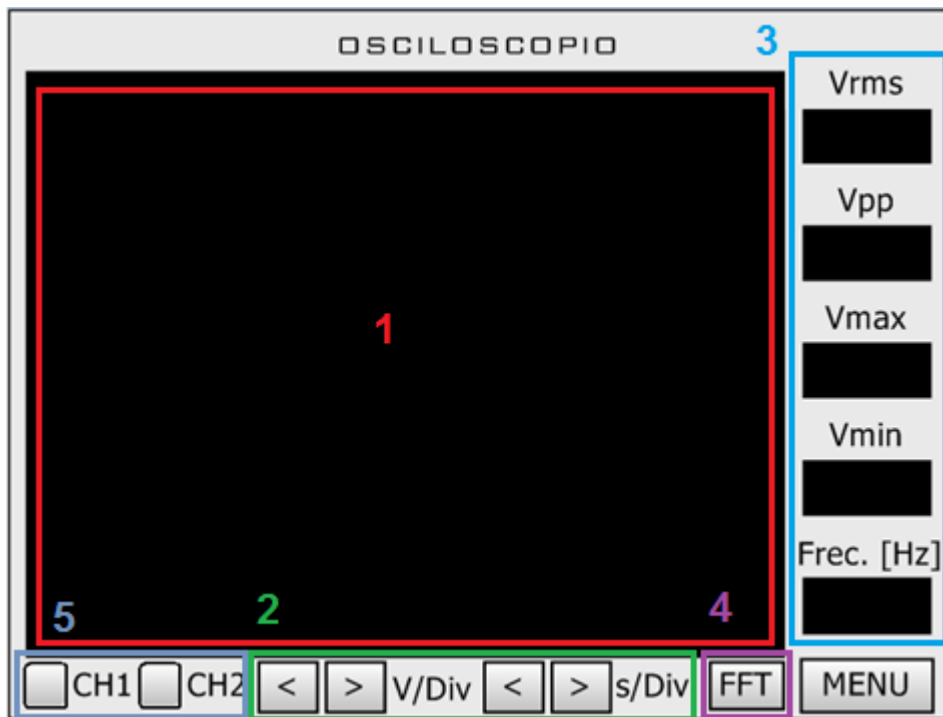


Pantalla de presentación.

Nota: cuando se está trabajando en uno de los modos ya sea osciloscopio o generador y se requiere pasar al otro, se hace necesario oprimir el botón MENU y regresar a la pantalla de presentación.

## Osciloscopio

En el modo osciloscopio se mostrara la interfaz gráfica correspondiente, la cual está separada por áreas de fácil manejo. En este apartado se muestran los controles e información mostrada en pantalla.



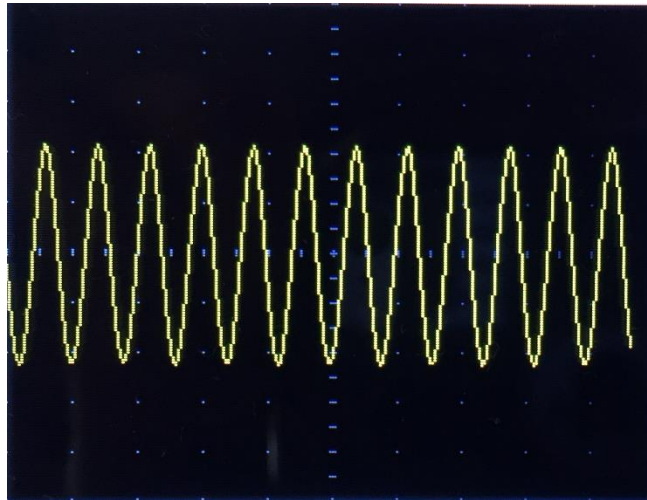
Interfaz gráfica del modo osciloscopio

1. Área de visualización de las señales.
2. Controles verticales y horizontales.
3. Medidas básicas de la señal tomada (los valores de voltaje se muestran en Voltios).
4. Botón para cambiar a pantalla de visualización de la FFT.
5. Selección de canal.

Nota: El botón  lleva a la pantalla de presentación de la *toolbox*.

### Área de visualización de las señales.

En esta área se presenta la señal de entrada como una representación gráfica de la forma de onda.



Area de visualización

### Controles verticales y horizontales

**V/Div (CH1 o CH2).**   V/Div Con estos botones se puede seleccionar el factor de escala vertical de la señal. Se debe tener en cuenta que debido a la resolución de la pantalla y del ADC, señales por debajo de **0.5 [V]** no podrán ser visualizadas de forma correcta.

**S/Div.**   s/Div Permite ajustar el tiempo por división de las representaciones gráficas de las señales, escalándolas para brindar una mejor visualización de ella a medida que varía la frecuencia de la señal.

### Medidas básicas de la señal tomada

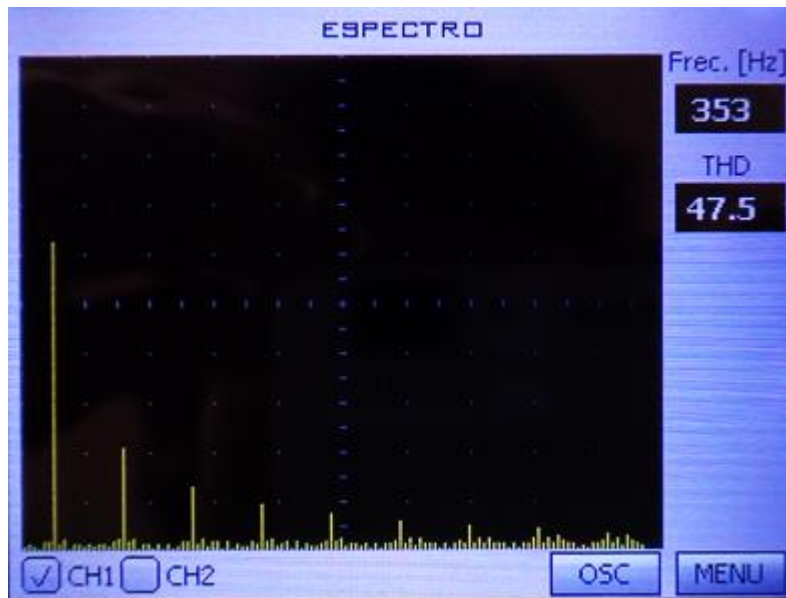
En esta área se muestran los valores de los voltajes máximo, mínimo, rms, pico a pico y la frecuencia de la señal medida.

### Botón para cambia a pantalla de visualización de la FFT

Con el botón  se puede realizar la visualización de la función FFT de la señal del canal activo, la interfaz gráfica cambia y se muestra el cálculo de la frecuencia y de su voltaje pico a pico como se muestra en la figura.



Interfaz del modo FFT del osciloscopio



Ejemplo del espectro de una señal cuadrada.

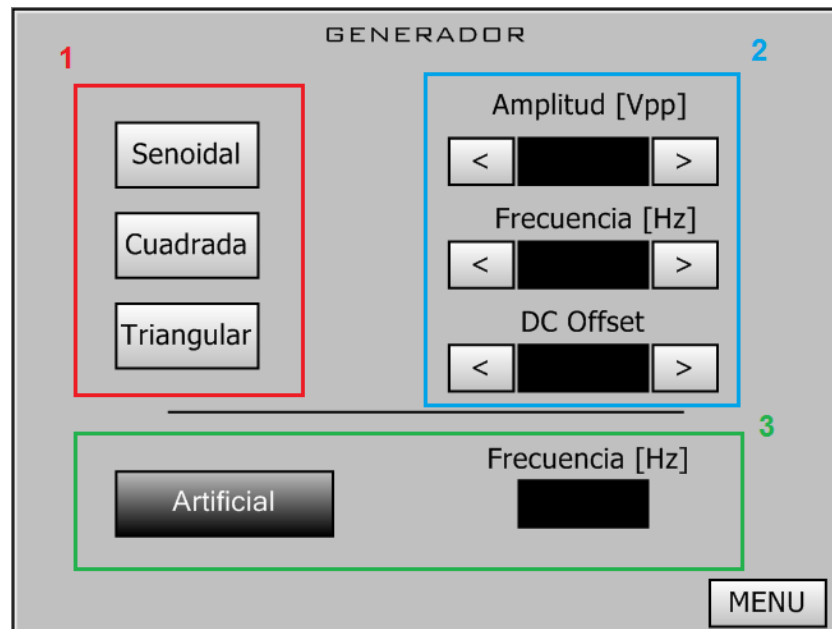
Para regresar al modo principal del osciloscopio se debe oprimir el botón  o si se desea volver a la pantalla de presentación oprimir .

### Selección de canal

El prototipo cuenta con dos canales que funcionan de forma independiente no simultánea, es decir, cuando se activa uno de los canales automáticamente se desactiva el otro, de igual manera sucede en la función FFT. A pesar de no permitir visualizar las dos señales de manera simultánea, ahorra tiempo en cambiar los cables de muestra de una señal a otra.


## Generador

En modo Generador el dispositivo puede generar señales de forma sinusoidal, cuadrada, triangular y sintética, todas con una frecuencia máxima de 5[KHz] y un rango de voltaje de  $\pm 10$  [V] con offset incluido.



Interfaz gráfica del modo generador

1. Botones de envío de las diferentes señales.
2. Botones de ajuste de las propiedades de la señal a generar.
3. Área de la señal artificial o sintética.

Nota: para volver a la pantalla de presentación o entrar al modo osciloscopio del dispositivo se debe oprimir el botón .

## Envío o generación de señal

Para que el dispositivo genere una señal es necesario oprimir el botón correspondiente a la forma de señal deseada, al lado derecho del botón aparecerá un indicador con la palabra 'on' en color verde indicando que la señal está siendo generada, para detener el envío oprimir el botón físico 'AUX'. Se debe tener en cuenta que durante la generación de la señal no se pueden cambiar los parámetros de la señal.


## Ajuste de parámetros de la señal

Al entrar en modo generador los parámetros de Amplitud, Frecuencia y DC offset están por defecto a 10[Vpp], 2500[Hz] y 0 [V] respectivamente.

Para cambiar el parámetro deseado basta con pulsar o mantener oprimido el botón correspondiente, una vez determinados, pulsar el botón de la forma de señal deseada.

## Creación de la señal artificial o sintética

El generador permite que el usuario dibuje en la pantalla TFT del dispositivo la forma de onda que desee para ser generada, el rango de amplitud de la señal es de  $\pm 10$  [V] y con una frecuencia máxima de 5 [kHz], es decir que a la frecuencia máxima hay 0.2 ms de comienzo a fin de la señal que se dibuja.

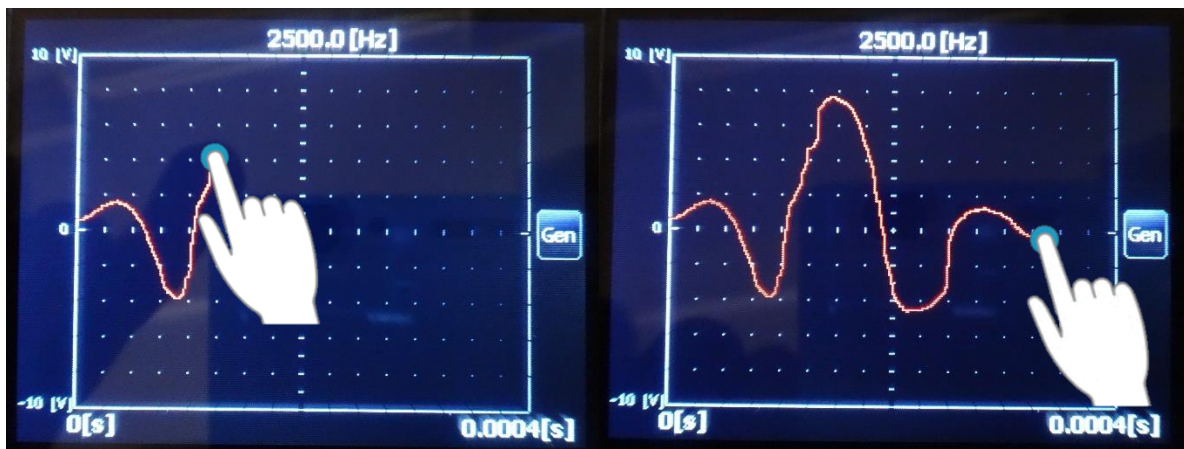
Para ingresar a la ventana de dibujo de la señal artificial el usuario debe ajustar el parámetro 'frecuencia' primero, el cual está a 2500[Hz] por defecto si no ha sido cambiado previamente, luego oprimir el botón  en la parte inferior izquierda de la pantalla.



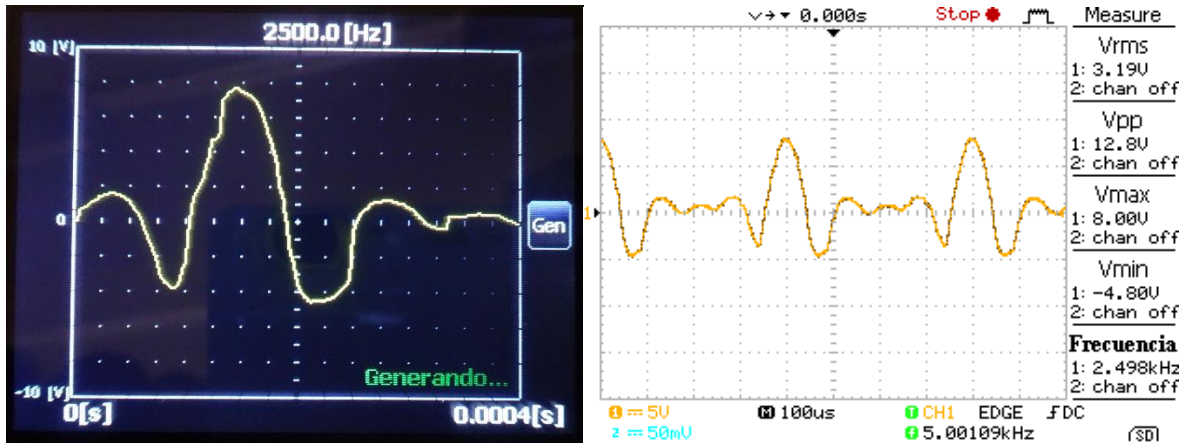
Zona de dibujo de la señal artificial

Al ingresar a la pantalla de señal artificial, el usuario tiene un rectángulo que delimita la zona en la que puede dibujar, indicando los rangos de amplitud fija en voltios y tiempo en segundos dependiendo de la frecuencia ajustada.

La señal se debe dibujar de izquierda a derecha, preferiblemente iniciar y terminar en cero y ser continua:




La señal cambiará de rojo a amarillo cuando haya sido creada correctamente e inmediatamente será generada como se indica en pantalla.



La frecuencia mostrada corresponde a un periodo de la señal dibujada.

Para detener el envío se debe oprimir el botón 'AUX' y luego para ir al generador y

volver a dibujar oprimir .