



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**TEMA: IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO GENERADOR DE
SEÑALES, OSCILOSCOPIO Y ANALIZADOR DE ESPECTROS
PARA MEJORAR EL PROCESO ENSEÑANZA APRENDIZAJE DE
LOS ESTUDIANTES, MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE BAJO
COSTO.**

AUTOR: CHASI CAJAS, CHRISTIAN PAÚL

DIRECTOR: ING. MEYTHALER NARANJO, AMPARO

LATACUNGA

2019



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO GENERADOR DE SEÑALES, OSCILOSCOPIO Y ANALIZADOR DE ESPECTROS PARA MEJORAR EL PROCESO ENSEÑANZA APRENDIZAJE DE LOS ESTUDIANTES, MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE BAJO COSTO.”*** fue realizado por el señor ***Chasi Cajas, Christian Paúl***, el mismo que ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 18 de Septiembre del 2019


Ing. Meythaler Naranjo, Amparo de las Mercedes
C.O. 0501515803



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Chasi Cajas, Christian Paúl** declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“Implementación de un módulo generador de señales, osciloscopio y analizador de espectros para mejorar el proceso enseñanza aprendizaje de los estudiantes, mediante tecnologías de bajo costo”*** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 18 de Septiembre del 2019



Chasi Cajas, Christian Paúl
C.C.: 050325221-5



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

AUTORIZACIÓN

Yo, **Chasi Cajas, Christian Paúl** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación **“Implementación de un módulo generador de señales, osciloscopio y analizador de espectros para mejorar el proceso enseñanza aprendizaje de los estudiantes, mediante tecnologías de bajo”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 18 de Septiembre del 2019

Chasi Cajas, Christian Paúl

C.C.: 050325221-5

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación en primer lugar a Dios quien me ha permitido seguir adelante y alcanzar esta meta, me brindó la fuerza para levantarme y continuar.

A mis padres Magdalena Cajas y Marco Chasi que sin importar mis errores siempre me han dado su amor y han estado junto a mí en los peores momentos brindándome su apoyo incondicional.

A mi hermana Yesenia Chasi por escuchar mis historias y ser mi confidente y amiga gracias por estar ahí cuando más lo necesitaba.

AGRADECIMIENTO

A Dios quien me ha dado la fuerza para seguir adelante, a mis padres por creer en mí, me brindaron su amor y apoyo incondicional, a mi madre que a pesar de mis errores confió en mí, siempre tuvo la valentía de afrontar los problemas que se presentan a diario, y sacó a nuestra familia adelante. Ha sido un ejemplo a seguir, y voy a hacer todo lo posible para que se sienta orgulloso de mí, el logro alcanzado es solo el principio.

A mi hermana, amigos y amigas que me han dedicado su tiempo para escuchar mis problemas, me han apoyado en las decisiones que he tomado y espero seguir contando con su amistad.

A la Ing Amparo Meythaler y al Ing Marco Pilatasig por todas sus recomendaciones, conocimientos y por brindarme su apoyo en todo el tiempo de desarrollo del proyecto.

A las personas que dejaron una parte de ellas en mí, porque en el transcurso de estos años, se ganaron mi confianza, mi afecto, tuvieron una palabra de aliento, y me tendieron su mano, las personas son efímeras pero dejan una huella imborrable para bien o para mal, menciono a una persona en especial; a quién agradezco por ser luz y fortaleza en el pasado, cambió mi forma de ver la vida y por todo lo bueno que dejó en mí; gracias de todo corazón, que Dios ilumine su camino, y guíe sus pasos a donde quiera que vaya.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
RESUMEN	xxi
ABSTRACT	xxii

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Justificación e importancia.....	2
1.4. Objetivos.....	3

1.4.1.	Objetivo General.....	3
1.4.2.	Objetivos Específicos	3
1.5.	Variables de la investigación	4
1.5.1.	Variable independiente.....	4
1.5.2.	Variable dependiente.....	4
1.6.	Hipótesis.....	4

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes Investigativos	6
2.2.	Fundamentación teórica	8
2.2.1.	Osciloscopio Digital	8
2.2.2.	Características de un osciloscopio digital.....	10
2.2.3.	Sección vertical	10
a)	Impedancia de entrada	11
b)	Selector de acoplamiento	12
c)	Amplificador Vertical	13
2.2.4.	Convertor analógico digital	14

2.2.5.	Características estáticas de los conversores ADC	16
a)	Resolución	16
b)	Error de linealidad no integral (INL)	16
c)	Error de no linealidad diferencial	17
d)	Monotonicidad	18
e)	Error de Offset	19
2.2.6.	Características dinámicas de los conversores ADC	20
a)	Tiempo de adquisición	20
b)	Tiempo de conversión	21
c)	Slew rate.....	21
2.2.7.	Muestreo	22
a)	Muestreo en tiempo real	22
b)	Muestreo en tiempo equivalente.....	24
c)	Interpolación	25
2.2.8.	Generador de señales	26
2.2.9.	Características de la forma de onda.....	27
a)	Amplitud.....	28
b)	Frecuencia.....	28
c)	Fase.....	28

2.2.10.	Ondas básicas	29
a)	Ondas sinusoidales	29
b)	Ondas cuadradas y rectangulares	30
c)	Ondas dientes de sierra y triangulares	31
d)	Formas de onda de pulsos	31
2.2.11.	Analizador de espectro de frecuencia.....	32
2.2.13.	Transformada rápida de Fourier	35
2.2.14.	Tarjeta Artix-7 35T	36
2.2.15.	Raspberry 3 PI modelo B	39
2.2.16.	Módulo pantalla de cristal líquido (TFT)	40

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

3.1.	Diseño e implementación del circuito de entrada y salida	43
3.1.1.	Diseño del circuito de entrada	43
3.1.2.	Diseño del circuito de salida	45
3.2.	Desarrollo e implementación de la interfaz gráfica	46
3.2.1.	Programación del menú principal	47
3.2.2.	Programación del HMI del osciloscopio.....	48

3.2.3.	Programación del HMI del generador de señales.....	52
3.2.4.	Programación del HMI del analizador de espectro de frecuencia	53
3.3.	Selección de la tarjeta de aplicación.....	56
3.3.1.	Instalación del software Vivado Design	58
3.4.	Diseño e implementación en VHDL	63
3.4.1.	Conversión A/D	65
3.4.2.	Comunicación UART	68
3.4.3.	Programación del Osciloscopio	70
3.4.4.	Programación del Generador de Funciones	72
3.4.5.	Programación del Analizador de Espectro de Frecuencia	75
3.5.	Diseño e implementación de la estructura del módulo	78

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1.	Pruebas Experimentales.....	82
4.2.	Resultados de la investigación	84
4.2.1.	Generador de funciones del módulo didáctico	84
4.2.2.	Osciloscopio del módulo didáctico	97
4.2.3.	Analizador de espectro de frecuencia	108

4.3.	Análisis de resultados	112
4.4.	Comprobación de la hipótesis	115

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	Conclusiones	121
5.2.	Recomendaciones	123

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
---	-----

ANEXOS	129
---------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción del Hardware de la tarjeta Artix-7 35T	38
Tabla 2. Características Técnicas Raspberry 3PI Modelo B.....	40
Tabla 3. Características de las tarjetas de aplicación	56
Tabla 4. Tabla utilizada para el Generador de Funciones	72
Tabla 5. Cálculo del error de la señal sinusoidal generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	85
Tabla 6. Cálculo del error de la señal triangular generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	86
Tabla 7. Cálculo del error de la señal cuadrada generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	87
Tabla 8. Cálculo del error de la señal sinusoidal generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio del módulo	88
Tabla 9. Cálculo del error de la señal triangular generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio del módulo	89
Tabla 10. Cálculo del error de la señal cuadrada generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio del módulo.....	90
Tabla 11. Cálculo del error de la señal sinusoidal generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	91
Tabla 12. Cálculo del error de la señal triangular generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	92

Tabla 13. Cálculo del error de la señal cuadrada generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	93
Tabla 14. Cálculo del error de la señal sinusoidal generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio del módulo.....	94
Tabla 15. Cálculo del error de la señal triangular generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio del módulo.....	95
Tabla 16. Cálculo del error de la señal cuadrada generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio del módulo.....	96
Tabla 17. Medición de la señal sinusoidal generada con el generador Agilent 33500B medido con el Canal B del osciloscopio del módulo ...	98
Tabla 18. Cálculo del error de la señal sinusoidal medida con el osciloscopio del módulo.....	99
Tabla 19. Medición de la señal triangular generada con el generador Agilent 33500B medido con el Canal B del osciloscopio del módulo .	100
Tabla 20. Cálculo del error de la señal triangular medida con el osciloscopio del módulo.....	100
Tabla 21. Medición de la señal cuadrada generada en el equipo Agilent 33500B medido con el Canal B del osciloscopio del módulo	101
Tabla 22. Cálculo del error de la señal cuadrada medida con el osciloscopio del módulo.....	102
Tabla 23. Señal sinusoidal generada en el equipo Agilent 33500B y medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	103

Tabla 24. Cálculo del error de la señal cuadrada medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	103
Tabla 25. Señal triangular generada en el equipo Agilent 33500B y medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 5014 ^a	104
Tabla 26. Cálculo del error de la señal triangular medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	105
Tabla 27. Señal cuadrada generada en el equipo Agilent 33500B y medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	106
Tabla 28. Cálculo del error de la señal cuadrada medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	106
Tabla 29. Cálculo del error de la señal de la red medida con el osciloscopio del módulo.....	108
Tabla 30. Cálculo del error de la señal cuadrada medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	108
Tabla 31. Cálculo del error del %THD de una onda cuadrada	112
Tabla 32. Comparación de errores de las mediciones de las ondas generadas en el canal A del módulo utilizando el osciloscopio del módulo y el equipo Agilent DSO-X 5014 ^a	113
Tabla 33. Comparación de errores de las mediciones de las ondas generadas en el canal B del módulo utilizando el osciloscopio del módulo y el equipo Agilent DSO-X 5014 ^a	113

Tabla 34. Comparación de errores de las mediciones de las ondas generadas en el equipo Agilent 33500B utilizando el osciloscopio del módulo y el equipo Agilent DSO-X 5014 ^a	114
Tabla 35. Comparación de errores de las mediciones de la red entre el osciloscopio del módulo y el osciloscopio DSO-X 2014 ^a	115
Tabla 36. Escala Likert para las preguntas de la encuesta	116
Tabla 37. Análisis de costos de los equipos del laboratorio	119
Tabla 38. Análisis de costos del módulo didáctico.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama simplificado de un osciloscopio.....	9
Figura 2. Modelo sonda Pasiva	11
Figura 3. Circuito de acoplamiento de C.C y C.A con respuesta de frecuencia ...	13
Figura 4. Amplificador vertical	13
Figura 5. Conversión analógica-digital	15
Figura 6. Curva entrada-salida de un conversor A/D.....	16
Figura 7. Linealidad no integral referida a las entradas.....	17
Figura 8. Error de no linealidad diferencial	18
Figura 9. Error de monotonicidad	19
Figura 10. Error de Offset de un convertidor de código binario natural	19
Figura 11. Circuito para obtener el tiempo de adquisición.....	21
Figura 12. Circuito Sample & Hold	22
Figura 13. Muestreo en Tiempo Real de la Señal de Entrada	23
Figura 14. Esquema de muestreo en tiempo equivalente	24
Figura 15. Métodos de interpolación lineal y sinusoidal	26
Figura 16. Cambio de fase de dos ondas senoidales.....	29
Figura 17. Ondas sinusoidales y amortiguadas.....	30
Figura 18. Ondas cuadradas y rectangulares.....	31
Figura 19. Ondas cuadradas y rectangulares.....	31
Figura 20. Formas de pasos, pulsos y tren de pulsos	32
Figura 21. Espectro de frecuencias de la forma de onda triangular	33

Figura 22. Hardware de la tarjeta Artix-7 35T	38
Figura 23. Hardware de la tarjeta Raspberry 3PI	39
Figura 24. Hardware de la pantalla TFT de 5 pulgadas.....	41
Figura 25. Sistema Implementado	43
Figura 26. Circuito de entrada del Canal A del osciloscopio	44
Figura 27. Circuito de entrada del Canal B del osciloscopio	44
Figura 28. Circuito de salida del generador de señales.....	46
Figura 29. Diagrama de bloques del HMI del módulo didáctico.....	47
Figura 30. Diagrama de flujo del HMI del menú principal	48
Figura 31. Distribución de las coordenadas del canvas	49
Figura 32. HMI de la pantalla del osciloscopio	50
Figura 33. Diagrama de flujo del HMI del osciloscopio.....	51
Figura 34. HMI del generador de señales	52
Figura 35. Diagrama de flujo del HMI del generador de funciones.....	53
Figura 36. Diagrama de flujo del HMI del analizador de espectro de frecuencia..	54
Figura 37. HMI del analizador de espectro de frecuencia	56
Figura 38. Versión Vivado HLx2018.3 WebPACK	58
Figura 39. Usuario y contraseña para instalación de Vivado.....	59
Figura 40. Selección gratuita versión WebPACK	60
Figura 41. Configuración de las herramientas de Vivado	61
Figura 42. Selección del directorio de destino del software.....	62
Figura 43. Creación de la carpeta board_files	62
Figura 44. Instalación de las librerías de Vivado	63

Figura 45. Diagrama de flujo de la programación en VHDL	65
Figura 46. Elementos internos del módulo XDAC	66
Figura 47. Interfaz gráfica del XADC Wizard 3.3	67
Figura 48. Interfaz gráfica del Clocking Wizard 6.0	68
Figura 49. Diagrama de flujo del VHDL del osciloscopio	71
Figura 50. Onda sinusoidal obtenida	73
Figura 51. Diagrama de flujo del VHDL del generador de funciones	74
Figura 52. Diagrama de flujo del VHDL del analizador de espectro de frecuencia	77
Figura 53. Pieza frontal de la estructura	79
Figura 54. Pieza frontal con salidas para los conectores del módulo	79
Figura 55. Piezas Laterales de la estructura	80
Figura 56. Pieza posterior, base y superior de la estructura	80
Figura 57. Módulo didáctico terminado.....	81
Figura 58. Conexión entre el generador del módulo y el equipo Agilent DSO-X 2014 ^a	82
Figura 59. Conexión entre el generador Agilent 33500B y el osciloscopio del módulo	83
Figura 60. Onda sinusoidal de 5KHz generada en el Canal A y medida con el osciloscopio Agilent.....	84
Figura 61. Onda triangular de 5KHz generada en el Canal A y medida con el osciloscopio Agilent.....	85
Figura 62. Onda cuadrada de 5KHz generada en el Canal A y medida con el osciloscopio Agilent.....	86

Figura 63. Onda sinusoidal de 5KHz generada en el Canal A y medida con el módulo	87
Figura 64. Onda triangular de 5KHz generada en el Canal A y medida con el módulo	88
Figura 65. Onda cuadrada de 5KHz generada en el Canal A y medida con el módulo	89
Figura 66. Onda sinusoidal de 5KHz generada en el Canal B del módulo y medida con el osciloscopio Agilent.....	91
Figura 67. Onda triangular de 5KHz generada en el Canal B del módulo y medida con el osciloscopio Agilent.....	92
Figura 68. Onda cuadrada de 5KHz generada en el Canal B del módulo y medida con el osciloscopio Agilent.....	93
Figura 69. Onda sinusoidal de 5KHz generada en el Canal B y medida con el módulo.....	94
Figura 70. Onda triangular de 5KHz generada en el Canal B y medida con el módulo.....	95
Figura 71. Onda cuadrada de 5KHz generada en el Canal B y medida con el módulo.....	96
Figura 72. Onda sinusoidal de 75KHz visualizada con interpolación lineal	97
Figura 73. Onda sinusoidal de 300KHz visualizada con interpolación sinusoidal.	98
Figura 74. Onda triangular de 50KHz visualizada con interpolación lineal	99
Figura 75. Onda cuadrada de 50KHz visualizada con interpolación lineal	101
Figura 75. Onda cuadrada de 100KHz medida con el osciloscopio Agilent	102

Figura 77. Onda triangular de 50KHz medida con el osciloscopio Agilent	104
Figura 78. Onda triangular de 50KHz medida con el osciloscopio Agilent	105
Figura 79. Onda sinusoidal de la red medida con el osciloscopio Agilent	107
Figura 80. Onda sinusoidal de la red medida con el Canal A del osciloscopio del módulo.....	107
Figura 81. Aplicación desarrollada en el Guide de Matlab R2018b	109
Figura 82. Espectro de frecuencia de una onda sinusoidal a 75KHz (Módulo) ..	109
Figura 83. Espectro de frecuencia de una onda sinusoidal a 75KHz (Matlab R2018b).....	110
Figura 84. Espectro de frecuencia de una onda triangular a 75KHz (Módulo) ...	110
Figura 85. Espectro de frecuencia de una onda triangular a 75KHz (Matlab R2018).....	111
Figura 86. Espectro de frecuencia de una onda cuadrada a 75KHz (Módulo) ...	111
Figura 87. Espectro de frecuencia de una onda cuadrada a 75KHz (Matlab R2015b).....	112
Figura 88. Resultados de la pregunta 1	116
Figura 89. Resultados de la pregunta 2.....	117
Figura 90. Resultados de la pregunta 3.....	118
Figura 91. Resultados de la pregunta 4.....	118

RESUMEN

El trabajo de investigación presenta un módulo de dos canales con tres opciones osciloscopio, generador de señales y analizador de espectro de frecuencia. Para la visualización de cada opción se utilizó una pantalla TFT (Pantalla de cristal líquido) de cinco pulgadas acoplada a una tarjeta Raspberry 3PI. El acondicionamiento, adquisición, procesamiento y generación de señales se realizó en la tarjeta Artix-7 35T que utiliza la plataforma Vivado 2018.3 propia de Xilinx. Se desarrolló el software para implementar un osciloscopio convencional, que puede medir los valores típicos como V_{pp} (Voltaje pico-pico), f_r (Frecuencia), V_{rms} (Voltaje raíz media cuadrática), En la función del generador se puede obtener señales de tipo cuadrada, triangular, sinusoidal, en un rango de frecuencia de 1Hz a 5KHz, se puede variar las características como frecuencia, tipo de señal y el cambio de canal. El analizador de espectro de frecuencia se desarrolló en la tarjeta Raspberry 3PI mediante el algoritmo de Cooley-Tukey para el cálculo de la DFT (Transformada discreta de Fourier), para poder visualizar los armónicos y el valor en porcentaje del %THD (Distorsión armónica total) para los diversos valores de la frecuencia natural ω_n .

PALABRAS CLAVE:

- **OSCILOSCOPIO DIGITAL**
- **GENERADOR DE ONDAS**
- **ANALIZADOR DE ESPECTRO DE FRECUENCIA**

ABSTRACT

The research paper presents a two-channel module with three oscilloscope options, signal generator and frequency spectrum analyzer. For the display of each option, a five-inch TFT (Liquid Crystal Display) screen attached to a Raspberry 3PI card was used. The conditioning, acquisition, processing and signal generation was carried out on the Artix-7 35T card that uses Xilinx's Vivado 2018.3 platform. The software was developed to implement a conventional oscilloscope, which can measure typical values such as V_{pp} (Peak-Peak Voltage), f_r (Frequency), V_{rms} (Quadratic Mean Root Voltage). In the function of the generator you can obtain signals of square, triangular, sinusoidal type, in a frequency range of 1Hz to 5KHz, you can vary the characteristics such as frequency, type signal and channel change. In the function of the generator you can obtain signals of square, triangular, sinusoidal type, in a frequency range of 1Hz to 5KHz, you can vary the characteristics such as frequency, type signal and channel change. The frequency spectrum analyzer was developed on the Raspberry 3PI card using the Cooley-Tukey algorithm to calculate the DFT (Discrete Fourier Transform), in order to visualize the harmonics and the percentage value of the % THD (Total Harmonic Distortion) for the various values of the natural frequency ω_n .

KEYWORDS:

- **DIGITAL OSCILLOSCOPE**
- **WAVE GENERATOR**
- **FREQUENCY SPECTRUM ANALYZER**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En los laboratorios de la Universidad, no existe el número adecuado de osciloscopios, generadores de onda, y mucho menos equipos analizadores de espectro de frecuencia, a pesar de que son herramientas fundamentales e indispensables para la docencia y la investigación. Estos equipos permiten generar y medir instantáneamente cierta cantidad de variables eléctricas y electrónicas de circuitos análogos y digitales, que se pueden visualizar en una pantalla, particularmente en los analizadores de espectro se puede visualizar el comportamiento de las señales acústicas u ópticas en el dominio de la frecuencia.

1.2. Antecedentes

El osciloscopio es un sistema que captura diferentes señales eléctricas y electrónicas, que se obtienen en forma de diferencia de potencial o tensiones, esto con el objetivo de estudiarlas en una pantalla, la misma que puede estar integrada al dispositivo, o a su vez hacer uso de un monitor externo como un PC u ordenador portátil, el generador de ondas es un dispositivo electrónico que produce ondas senoidales, cuadradas, triangulares, TTL; sus aplicaciones incluyen pruebas y calibración de sistemas de audio, ultrasónicos, servos, entre otros, el analizador de espectros es un instrumento de medición utilizado

con regularidad por los laboratorios para realizar diversos análisis espectrales, los cuales ayudan a descubrir problemas que un osciloscopio no es capaz de detectar.

Los dispositivos mencionados anteriormente son muy importantes en los laboratorios de las Universidades, cuyos fines pueden ser industriales, académicos o de investigación, son fundamentales para la generación y medición instantánea de algunas variables eléctricas y electrónicas de circuitos análogos y digitales que son visibles en una pantalla.

Con el desarrollo de la ciencia y la tecnología, cada vez se busca optimizar los recursos para evitar inconvenientes con respecto a equipos de gran tamaño y con funciones limitadas donde los equipos de medición electrónicos tradicionales ya que no son adecuados para propósitos comunes. De manera que se ha creado diversas herramientas como: un osciloscopio basado en instrumentación virtual, un osciloscopio inalámbrico con la aplicación de Android, y otros basados en Android con Raspberry Pi, entre otros; se puede desarrollar aplicaciones que puedan brindar más funciones, una mayor velocidad de procesamiento, un ancho de banda más amplio y una interfaz más amigable, con una alta reducción de costos con respecto a los equipos convencionales.

1.3. Justificación e importancia

La implementación de un módulo generador de señales, osciloscopio y analizador de espectros, portable y de bajo costo, permitirá al docente y al estudiante tener una herramienta fundamental para realizar prácticas dentro y fuera del laboratorio.

El módulo permitirá generar señales: senoidales, cuadráticas y dientes de sierra, además de mostrar las características de la señal como frecuencia, amplitud, entre otras, esto conllevará a que los estudiantes manipulen el equipo así como las variables que se pueden presentar; también se podrá comprender de mejor manera los temas relacionados con la electrónica como por ejemplo en el campo de las comunicaciones, microcontroladores, instrumentación y sensores, electrónica de potencia, sistemas de control entre otros.

El desarrollo del módulo ayudará a que los estudiantes puedan aprovechar el uso del equipo dentro y fuera de la institución, pues al ser una herramienta que utiliza elementos livianos y de fácil acceso, puede ser replicada con facilidad.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Implementar un módulo generador de señales, osciloscopio y analizador de espectros, para mejorar el proceso enseñanza aprendizaje de los estudiantes, mediante tecnologías de bajo costo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Investigar acerca de los componentes y requerimientos que se necesitan en un generador de señales, osciloscopio y analizador de espectros para garantizar su correcto funcionamiento.

- Diseñar y construir el hardware requerido para la adquisición, conversión, acondicionamiento de señales y envío de datos a la interfaz de usuario.
- Realizar el procesamiento requerido para cada una de las señales mediante una tarjeta de aplicación.
- Desarrollar una interfaz de visualización utilizando una pantalla de visualización a color para mostrar la forma de onda y los valores típicos de las señales medidas y las características de señales generadas.
- Validar el generador de señales, osciloscopio y analizador de espectro de bajo costo, mediante la comparación con generadores, osciloscopios comerciales y el último mediante una aplicación realizada en el software Matlab R2018b.

1.5. Variables de la investigación

1.5.1. Variable independiente

Implementación de un módulo generador, osciloscopio y analizador de espectros.

1.5.2. Variable dependiente

Desarrollo de prácticas de electrónica analógica y digital.

1.6. Hipótesis

El diseño e implementación de un módulo generador de señales, osciloscopio y analizador de espectro que permitirá el desarrollo de prácticas de Electrónica dentro y fuera de la institución, mejorando el proceso de enseñanza aprendizaje de los estudiantes

de la Carrera de Electrónica e Instrumentación de la Universidad de las Fuerzas Armadas
ESPE.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Investigativos

Con el desarrollo de la tecnología, los equipos electrónicos hoy en día brindan sistemas más rápidos, con mayor capacidad de almacenamiento, procesamiento de información y sistemas de comunicación más eficientes de manera que se pueden resolver diversos problemas que se presentan en el campo laboral e investigativo. El uso de equipos electrónicos como: los generadores de onda, analizadores de espectro de frecuencia y osciloscopios, en la actualidad son parte de la vida diaria de catedráticos en diferentes universidades, también se los utiliza en el área industrial o con fines de investigación. Los instrumentos mencionados anteriormente, tienen un alto costo económico, por lo que se han desarrollado diversas soluciones de bajo costo que permiten a los usuarios acceder a los equipos utilizando dispositivos que son fáciles de adquirir.

Los instrumentos mencionados anteriormente, tienen un alto costo económico, por lo que no se adquieren en un gran número ni se los puede actualizar periódicamente. Por otro lado, al tener un elevado número de usuarios, que acuden a realizar las diversas prácticas de laboratorio, el tiempo de utilización de los equipos se reduce, debido a que existen pocos puestos de trabajo, a pesar de que se dividen en grupos, ocasionando que el proceso de enseñanza aprendizaje de la parte práctica sea limitado.

En la actualidad, se han desarrollado varios trabajos relacionados con el tema: “Implementación de un módulo generador de señales, osciloscopio y analizador de espectros para mejorar el proceso enseñanza aprendizaje de los estudiantes, mediante tecnologías de bajo costo”, los mismos que utilizan diferentes tarjetas de aplicación, pantallas de visualización y sistemas operativos, que permiten medir y visualizar el comportamiento de las diferentes señales para las etapas de osciloscopio, generador de señales y analizador de espectro de frecuencia. Entre algunas investigaciones que se han desarrollado se tienen las siguientes:

- En (Sandoval Cueva, Repositorio Digital-EPN, 2017), se desarrolló el diseño e implementación de un osciloscopio, que constituía de una etapa de hardware para la adquisición, acondicionamiento, conversión y envío de datos hacia Android, y una segunda etapa de software donde se desarrolló la interfaz gráfica utilizando el sistema operativo Android.
- En (Suarez Giraldo & Peña Trellez, 2017) se desarrolló un módulo generador de ondas y osciloscopio de dos canales, utilizando el Microcontrolador TIVA C y Android, con un sistema de comunicación inalámbrica que permitía la conexión con diferentes dispositivos, compartiendo ciertos protocolos de comunicación.
- En (Domingo Suárez & Peña Tellez, 2017) se desarrolló un equipo osciloscopio y generador de ondas con un sistema embebido, integrado con dispositivos Android con dispositivos externos para la visualización de las señales con facilidades para la conexión a internet y almacenamiento de datos en la nube.

En los trabajos mencionados, no se incluye el equipo analizador de espectro de frecuencia, siendo éste el aporte adicional que se desarrollará en el presente trabajo de investigación.

2.2. Fundamentación teórica

2.2.1. Osciloscopio Digital

El osciloscopio digital es una herramienta muy importante utilizada en todo tipo de laboratorio, y la finalidad de su uso puede ser industrial, académico o con fines de investigación, el cual es fundamental para la medición instantánea de algunas variables eléctricas y electrónicas de circuitos análogos y digitales, las mismas que se muestran o visualizan en un monitor. (Cortés Osorio, Chavez Osorio, Medina A, & Cortés Osorio , 2007)

El osciloscopio es un sistema completo, que tiene la capacidad de capturar diferentes señales eléctricas y electrónicas, que se obtienen en forma de diferencia de potencial o tensiones, con el fin de analizarlas mediante una pantalla de visualización, que puede estar integrada al dispositivo, o también se puede utilizar un monitor externo como un computador portátil o una PC.

En la figura 1 se muestra un osciloscopio de almacenamiento digital, donde la principal diferencia entre un osciloscopio analógico es que la señal vertical, después de pasar a través del atenuador de entrada, el preamplificador Y, y la etapa de activación del disparador, no se encamina directamente a la etapa de deflexión Y. En cambio, se

muestra a intervalos y las muestras se alimentan a un convertidor ADC (analógico a digital, a veces abreviado como A/D) para ser digitalizado; es decir, convertido en una cadena de números. Cada número representa el voltaje en la entrada en el instante en que se tomó la muestra correspondiente. Los datos digitalizados se almacenan en una parte de la memoria digital total que está asignada al canal de entrada Y particular, del que generalmente hay dos y a menudo más. La memoria digital consiste en un banco de circuitos integrados (IC) RAM (memoria de acceso aleatorio). Para fines de visualización, se utilizan pantallas CRT (tubo de rayos catódicos) Sin embargo, actualmente en muchos instrumentos, un CRT no se usa en absoluto, siendo reemplazado por un LCD. (Hickman, 2005)

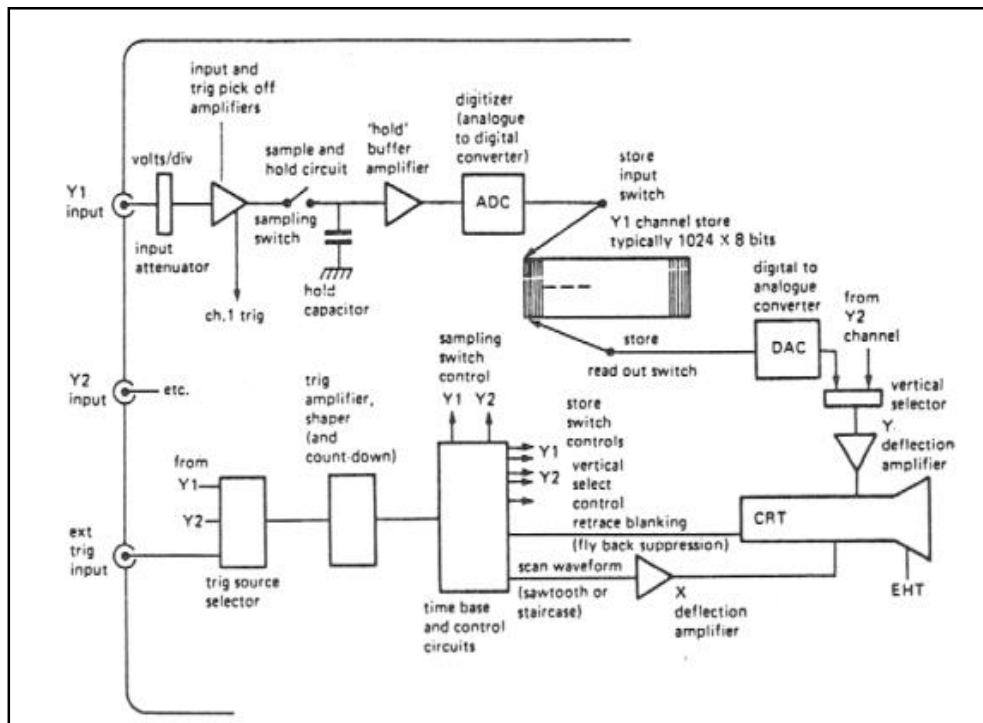


Figura 1. Diagrama simplificado de un osciloscopio.

Fuente: (Hickman, 2005)

2.2.2. Características de un osciloscopio digital.

El propósito principal de cualquier osciloscopio, sea analógico o digital es graficar una señal eléctrica, que varía con el tiempo. La mayoría de los equipos producen un gráfico bidimensional con el tiempo en el eje x y el voltaje en el eje y. (Seidle, 2013)

Un osciloscopio se usa generalmente para examinar formas de onda de voltaje, las mismas que pueden darse en un circuito de baja impedancia, como una fuente de alimentación o la etapa de salida en un amplificador de alta fidelidad, pero también se pueden encontrar en circuitos de alta impedancia, como las primeras etapas de un amplificador de alta fidelidad. En el primer caso, la impedancia de entrada del equipo, tendría poca importancia, pero para evitar cargar nodos de circuito de alta impedancia y cambiar la amplitud e incluso la forma de onda de interés, los osciloscopios siempre están diseñados para tener una alta impedancia de entrada, que no depende de la fábrica que los produce ni del modelo, la cifra elegida invariablemente es $1\text{M}\Omega$; en paralelo, hay una capacitancia de entrada inevitable, no estandarizada, variando de modelo a modelo, pero generalmente es de alrededor de 20 pF . (Hickman, 2005)

2.2.3. Sección vertical

En esta sección se van a describir cada uno de los bloques que conforman un osciloscopio para tener una mejor concepción y entendimiento del equipo; lo expuesto a continuación será utilizado específicamente para un canal de entrada, pero para el segundo canal del osciloscopio el procedimiento será exactamente igual.

a) Impedancia de entrada

El osciloscopio consta de un divisor de tensión en la entrada, como se muestra en la figura 2, formada de elementos y componentes pasivos, como resistencia, capacitancia e inductancia, en este caso se modelará un circuito RC, para obtener una impedancia elevada en la entrada, del equipo. (Technologies, 2017)

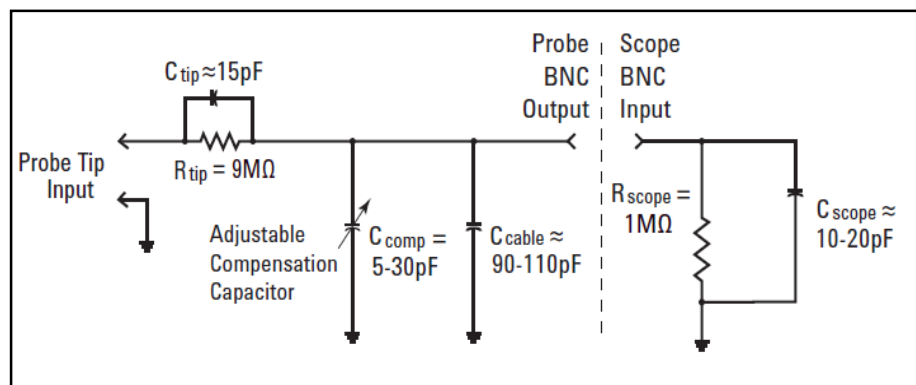


Figura 2. Modelo sonda Pasiva
Fuente: (Technologies, 2017)

En la impedancia de entrada del osciloscopio, se deben considerar ciertos parámetros:

- Cuando se van a utilizar dos o más canales simultáneamente, la puesta a tierra es común, y está conectada en el interior del equipo.
- Cuando se realiza la conexión de un equipo de medida a un circuito, existe un problema en el mismo, que altera su funcionamiento, por esta razón la impedancia del circuito debe ser menor a la impedancia de entrada del equipo de medida, razón por la cual el osciloscopio debe tener una alta impedancia de entrada.

La impedancia de entrada del osciloscopio es un circuito RC en paralelo, como se muestra en la figura 2. El valor del capacitor puede tomar valores de 10pF a 20pF y su resistencia es de 1Mohm, valores que son generales para todo tipo de osciloscopio. (Comunidad, 2015)

b) Selector de acoplamiento

En la figura 3, se puede observar el circuito que permite realizar el acoplamiento de las señales de C.A o C.C, las mismas que se seleccionan de acuerdo a las necesidades del usuario del dispositivo.

En la entrada del osciloscopio, para el modelamiento, se puede utilizar una resistencia generalmente de un 1Mohm y una capacitancia total o efectiva, que incluye el circuito del osciloscopio, aproximadamente 30 pF, cables de 30 pF/m y capacitancia parásita. El símbolo del conector de entrada, representa la conexión común (cable negro o blindaje) en la entrada del osciloscopio con una caja de metal, por esta razón, la entrada común sólo se puede conectar a un punto de 0 V en el circuito, de manera que las entradas comunes para cada canal A y B están cortocircuitadas entre sí.

Los amplificadores presentan ciertas limitaciones, dando como resultado una respuesta de frecuencia limitada. Para el acoplamiento de C.A, el equipo tiene una serie de circuitos RC que actúan con un filtro de paso alto (HPF), de forma que si se tiene señales de baja frecuencia, no se podrá medir ningún desplazamiento de C.C, y también se eliminará cierta información de baja frecuencia. (Waterloo, 2009)

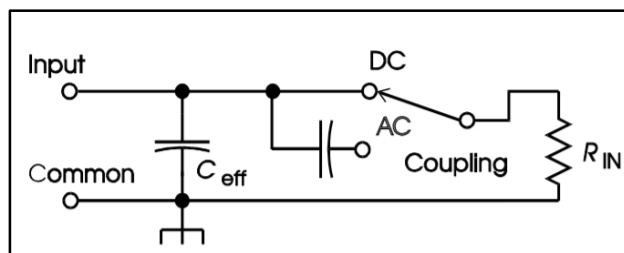


Figura 3. Circuito de acoplamiento de C.C y C.A con respuesta de frecuencia
Fuente: (Waterloo, 2009)

c) Amplificador Vertical

El amplificador vertical es el encargado de atenuar y amplificar las señales, realizando un ajuste en su amplitud. Al utilizar dos dispositivos se puede realizar la operación en doble recorrido o si se desea un sólo trayecto se utilizará un solo amplificador, de manera que todo tipo de osciloscopio pueda estar en la capacidad de analizar y ajustar las señales de tensión que sean elevadas (alta potencia), mejorando las prestaciones que tienen estos equipos en el campo eléctrico y en el campo electrónico. (EEEGUIDE, s.f.)

En la figura 4, se observa las tres partes indispensables de un amplificador vertical, que consta de: circuito amplificador, circuito atenuador y un seguidor catódico o seguidor emisor.

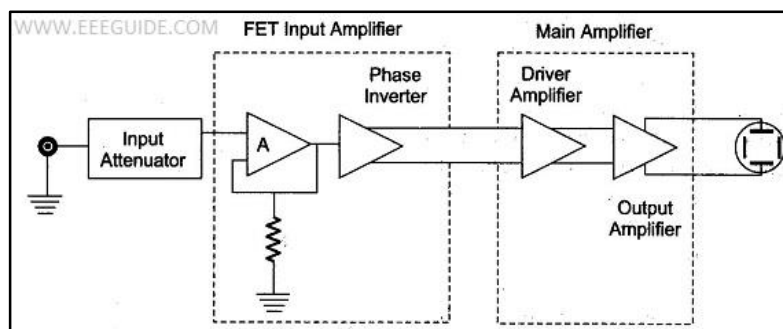


Figura 4. Amplificador vertical
Fuente: (EEEGUIDE, s.f.)

En la primera sección se encuentra el circuito amplificador que realiza la amplificación del valor de la señal de entrada, de manera que aumenta la tensión, hasta valores en los que se puedan manejar de mejor manera en las siguientes etapas del amplificador vertical, también se calibra el compartimiento del eje horizontal del marco principal para propósitos de visualización, sin que sobrepasen los límites de visualización.

En la segunda sección se tiene la etapa de atenuación, que disminuye los valores de tensión que son muy elevados a valores normalizados y de fácil manejo. Para finalizar en la etapa de salida se tiene un seguidor emisor que tiene como finalidad realizar el acople de impedancia de entrada del osciloscopio, para evitar un cambio en el funcionamiento del circuito puesto bajo prueba. (Sandoval Cueva, Repositorio Digital EPN, 2017)

2.2.4. Conversor analógico digital

El conversor analógico digital (ADC), representa uno de los elementos utilizados en el software de radio y sistemas de procesamiento digital de señales, que transforman las señales de tiempo continuo en un tipo de código binario de tiempo discreto. En la actualidad existe una gran cantidad de ADC, su eficiencia depende de ciertos parámetros fundamentales: resolución establecida (número de bits por muestra), relación señal-ruido (SNR), rango dinámico libre de espurios (SFDR) y potencia de disipación. (Walden, 1999)

En la figura 5 se indica un diagrama de bloques, que muestra la entrada al sistema empezando por una señal física, donde es transformada en una señal de código binario, posteriormente se realiza un muestreo, donde se toman valores discretos en el tiempo de

la señal analógica, obteniéndose un tren de pulsos con amplitudes limitadas por la envolvente de la señal analógica. (Huircán, s.f.)

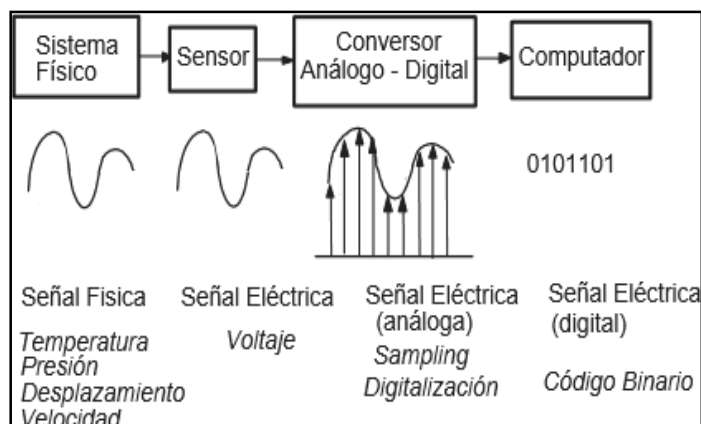


Figura 5. Conversión analógica-digital

Fuente: (Huircán, s.f.)

Para realizar la conversión de la entrada analógica a un código digital, se debe considerar dos etapas: la cuantización y la decodificación, en la primera etapa se realiza el muestreo de la señal analógica de la entrada y se coloca un valor analógico como estado, el mismo que depende de los bits que tenga el ADC, en la segunda etapa se decodifica el valor cuantizado, y posteriormente es decodificado para transformarlo en un código binario, que tendrá un número determinado de bits que depende de las salidas del convertor ADC.

En la figura 6, se indica la representación ideal de la función de transferencia de un ADC, obteniéndose una línea recta, al relacionar entre sí la entrada analógica con respecto a la salida en código digital. (Sandoval Cueva, Repositorio Digital-EPN, 2017)

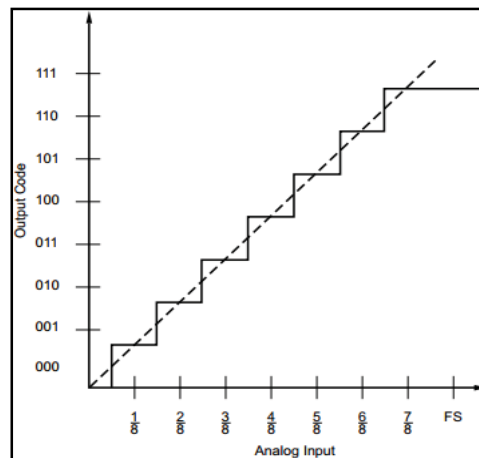


Figura 6. Curva entrada-salida de un convertidor A/D
Fuente: (Sandoval Cueva, Repositorio Digital EPN, 2017)

2.2.5. Características estáticas de los convertidores ADC

a) Resolución

Se define como los bits obtenidos después de realizarse la conversión en el convertidor ADC. Cuando se tiene un convertidor de n bits se tiene 2^n niveles de tensión y su resolución se expresara como $1/2^n$, de manera que la resolución por sí sola no indica nada referente a la precisión del convertidor como se muestra en la ecuación 1. (Sandoval Cueva, Repositorio Digital-EPN, 2017)

$$LSB = resolución = \frac{1}{2^n} \quad (1)$$

b) Error de linealidad no integral (INL)

Es la máxima desviación que se produce entre la función de transferencia real del convertidor y la función de transferencia ideal, representándose en una línea recta

(Fenández Olmos, 2012), que se conforma por los puntos de transición de los valores de entrada que determinan cambios de nivel en la salida. Mientras más se ajuste el comportamiento real a esta recta, más preciso se considera al convertidor (Huircán, s.f.) como se muestra en la figura 7.

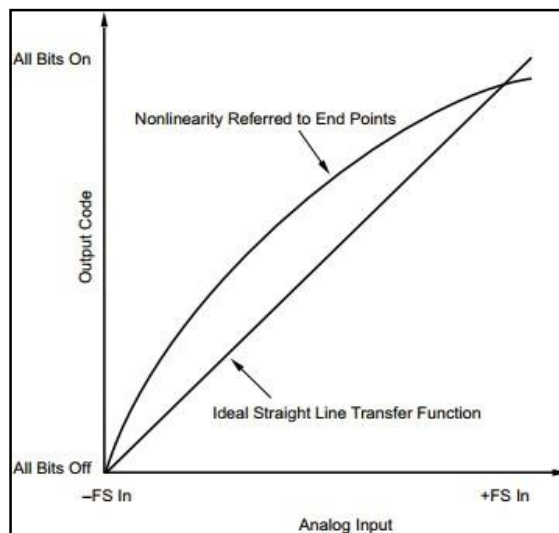


Figura 7. Linealidad no integral referida a las entradas
Fuente: (Texas Instruments, 2015)

c) Error de no linealidad diferencial

El error de no linealidad diferencial se define como la diferencia máxima de amplitud real de los intervalos analógicos con salida digital constante a partir de la amplitud ideal (Sandoval Cueva, Repositorio Digital EPN, 2017). En la figura 8, se muestra la máxima diferencia entre un salto a la salida debido a un cambio de 1 LSB y el salto ideal, esta se expresa como porcentaje del máximo nominal o en LSB, siendo el valor ideal 0 LSB. (Miraya, 2004)

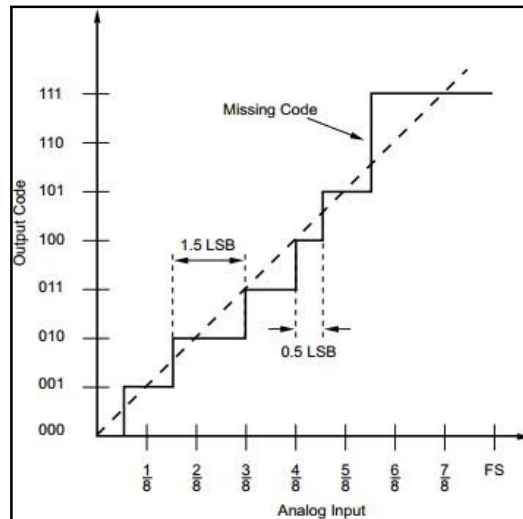


Figura 8. Error de no linealidad diferencial
Fuente: (Texas Instruments, 2015)

d) Monotonicidad

Un conversor ADC presenta monotonicidad, cuando a un incremento de la tensión en la entrada le corresponda un incremento en la salida, y para una reducción en la entrada, su correspondiente disminución, de manera que, para una determinada combinación de bit no hay un aumento en la entrada, sino una disminución, se identificará el valor analógico con el código que provoca la no monotonicidad. (Huircán, s.f.) De forma ideal, la monotonía debe ser igual a la resolución y se relaciona con la no linealidad. Una no linealidad mayor de $\pm 0,5$ LSB podría provocar una pérdida del carácter monótono de la respuesta, especialmente cuando en un código el error es por exceso y en el que le sigue es por defecto. (Miraya, 2004)

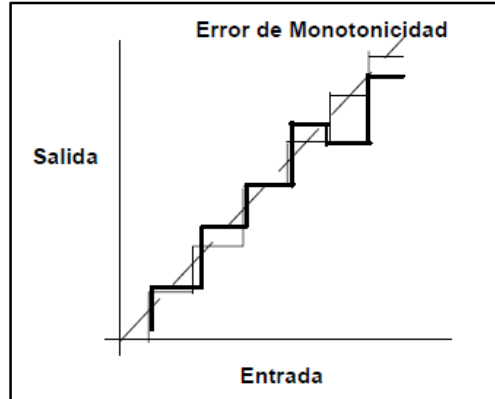


Figura 9. Error de monotonicidad
Fuente: (Huircán, n.d.)

e) Error de Offset

El error de Offset, se define como la diferencia entre los puntos de desplazamiento nominal y real, para los conversores ADC, el punto de compensación es el valor de la mitad del paso cuando la salida digital es cero. Este error afecta a todos los códigos en la misma cantidad y generalmente, puede compensarse mediante un proceso de recorte, si no se puede realizar un recorte el error se conoce como error de escala cero, como se muestra en la figura 10. (Texas Instrument, 1995)

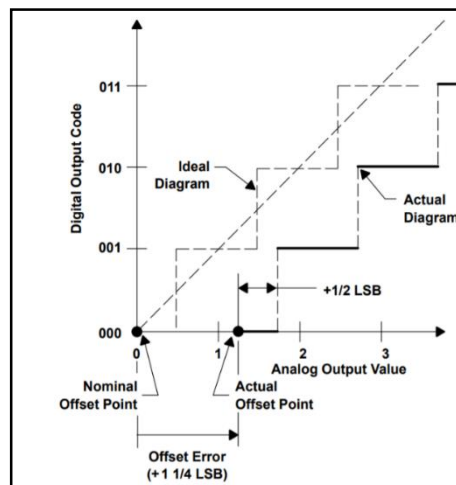


Figura 10. Error de Offset de un convertidor de código binario natural
Fuente: (Texas Instrument, 1995)

2.2.6. Características dinámicas de los conversores ADC

a) Tiempo de adquisición

El tiempo de adquisición o tiempo de muestreo es el tiempo necesario para que el conversor ADC, capture el voltaje de entrada mientras se realiza el muestreo. El tiempo de adquisición de un ADC del registro de aproximación sucesiva (SAR) es la cantidad de tiempo requerida para cargar el condensador de retención (CHOLD) en el extremo delantero de un ADC. En la parte interna, el circuito de seguimiento y retención es implementado como un condensador de retención de carga que se desconecta del pin de entrada analógica en el momento preciso, antes de que comience la conversión de analógico a digital. El capacitor debe tener suficiente tiempo para ajustarse al nivel de voltaje de entrada analógica antes de que se inicie la conversión real, si no se dispone del tiempo necesario para la adquisición, la conversión será incorrecta, de manera que el tiempo de adquisición requerido se basa en varios factores como: el valor del condensador de retención (CHOLD), impedancia del multiplexor analógico interno, impedancia de salida de la fuente analógica (RSOURCE) y la impedancia del interruptor (RSS). En la figura 11 se indica el modelo típico para la entrada analógica de un ADC SAR. Los parámetros del modelo de entrada variarán, por lo que el diseñador debe consultar la hoja de datos del dispositivo para asegurarse de que se proporciona el tiempo de adquisición adecuado en función del circuito de entrada que se utiliza en el diseño. (MicrochipTechnology, Inc.)

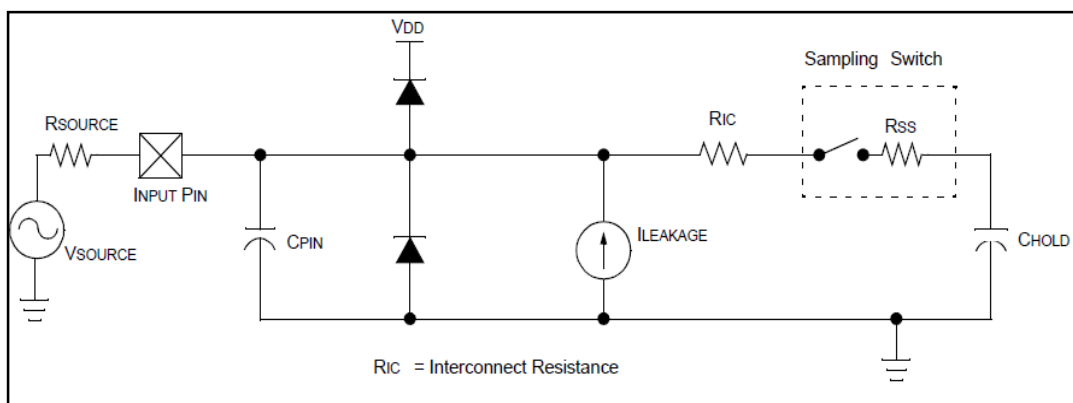


Figura 11. Circuito para obtener el tiempo de adquisición
Fuente: (MicrochipTechnology, Inc.)

b) Tiempo de conversión

El tiempo de conversión se define como el tiempo requerido para obtener la respuesta digital, en otras palabras, es el tiempo que se tarda en completar una sola conversión, si incluir tiempo de adquisición o el tiempo de configuración del DAC y en general se especifica en ciclos de reloj analógico a digital y el período mínimo para el reloj se especifica para obtener la precisión que requiere el conversor ADC. (MicrochipTechnology, Inc.). El tiempo de conversión se determina con la ecuación 2.

$$t_c = \frac{1}{f \cdot \pi \cdot 2^{n+1}} \quad (2)$$

c) Slew rate

Es la velocidad a la cual el valor de la salida del Sample & Hold converge al valor muestreado deseado. El proceso de conversión analógica-digital requiere que la señal analógica de entrada permanezca en un valor constante de tal forma que el ADC pueda realizar su tarea en forma adecuada. Aparece aquí, un elemento llamado Sample & Hold,

que toma una muestra de la señal seleccionada y mantiene su valor durante el tiempo que dura la conversión análoga digital ó Track & Hold, que se limita a detectar puntualmente el nivel de la señal analógica. El circuito básico Sample & Hold es el que se muestra en la figura 12. (Huircán, n.d.)

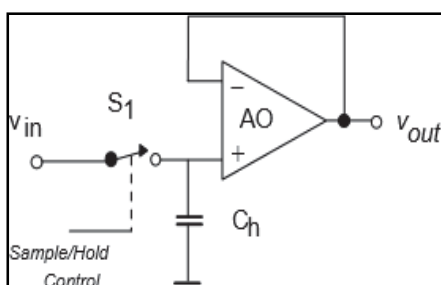


Figura 12. Circuito Sample & Hold
Fuente: (Huircán, n.d.)

2.2.7. Muestreo

La técnica de muestreo realiza un procedimiento donde se realiza una conversión de un fragmento de la señal continua que ingresa a un número discreto cuyos valores son binarios y están definidos en el dominio del tiempo, se debe tomar intervalos periódicos de tiempo para medir la señal que será muestreada. (Sandoval Cueva, Repositorio Digital EPN, 2017). Para realizar el proceso de muestreo existen dos técnicas de uso general entre las que podemos mencionar: tiempo real y tiempo equivalente. (García Gonzáles & Culala García, s.f.)

a) Muestreo en tiempo real

En la técnica de muestreo en tiempo real, los datos son tomados a máxima velocidad en un solo barrido para obtener la mayor cantidad de puntos muestreados, la peculiaridad

de este método es que se lo puede utilizar en señales que no se repiten; es decir, en señales que sean de un único disparo o que presenten características transitorias, como se puede observar en la figura 13. (Sandoval Cueva, Repositorio Digital EPN, 2017)

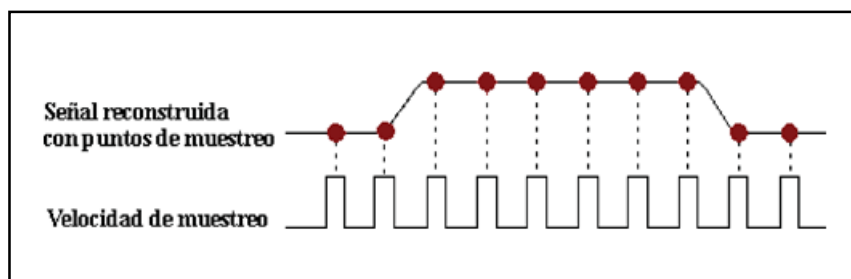


Figura 13. Muestreo en Tiempo Real de la Señal de Entrada
Fuente: (García Gonzáles & Culala García, s.f.)

Esta técnica utilizada en los osciloscopios digitales presenta grandes retos, debido a que necesita una velocidad de muestreo alta necesaria para digitalizar de forma precisa señales transitorias de alta frecuencia, las mismas que ocurren una única vez por lo que deben ser muestreadas en el mismo momento de su ocurrencia.

Si la velocidad de muestreo no es suficientemente alta, las componentes de alta frecuencia no se capturarán adecuadamente, causando el efecto de aliasing en la onda de salida. Para evitar el efecto de aliasing es necesario utilizar el Teorema de Nyquist-Shannon que establece que la frecuencia de muestreo f_s debe ser como mínimo el doble del ancho de banda de la señal a ser muestreada $2f_n$ como se indica en la expresión (3). (García Gonzáles & Culala García, s.f.)

$$f_s > 2f_n \quad (3)$$

b) Muestreo en tiempo equivalente

El muestreo en tiempo equivalente se utiliza cuando se tiene una señal que sea periódica, donde se tiene ciclos iguales a los anteriores y se lo aprovecha para reconstruir la señal completa tomando una pequeña parte de la señal en un periodo determinado, se tiene entonces muestras a partir de varios ciclos de la señal lo cual permite representar con exactitud señales cuyas frecuencias tengan componentes mayores que la capacidad máxima de muestreo como se observa en la figura 14. (García Gonzáles & Culala García, n.d.)

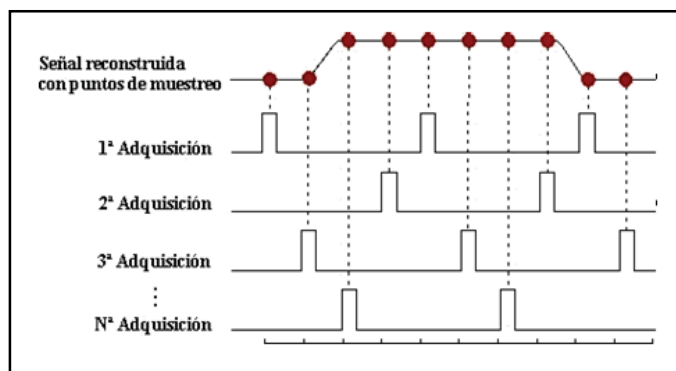


Figura 14. Esquema de muestreo en tiempo equivalente
Fuente: (García Gonzáles & Culala García, s.f.)

El tiempo equivalente se clasifica en dos: muestreo secuencial y muestreo aleatorio. El muestreo aleatorio, tiene un reloj interno y su tren de pulsos es asíncrono respecto a las señales de entrada y disparo, el disparo controla la toma de muestras de forma aleatoria y de forma continua.

En el muestreo secuencial, en cada instante de disparo se tomara un valor de muestra, en un retardo de tiempo denominado dt , si se llega al siguiente disparo se añade este

retardo y se realiza una nueva toma de muestra, este proceso se repetirá continuamente añadiendo cada vez el mismo incremento dt a la última adquisición, de manera que el muestreo secuencial proporciona una mejor resolución y exactitud que el muestreo aleatorio, cabe recalcar que al tomar la muestra luego de un instante de tiempo de haber detectado el disparo, el punto de disparo se debe representar sin un pre-disparo externo.

En el muestreo aleatorio se basa en un reloj interno que posee un tren de pulsos asíncrono con respecto a las señales de entrada y disparo, cada muestra se toman de forma continua y aleatoria con respecto al disparo, este actúa como un generador de pre-disparo, que elimina la necesidad de tener señales externas con pre-disparo o líneas de retardo.

El muestreo secuencial proporciona mejores resultados que el muestreo aleatorio, con respecto a la resolución y exactitud, de forma que al tomar una muestra luego de un instante de tiempo de haber detectado el disparo, este se representa sin un pre-disparo externo. (García Gonzáles & Culala García, n.d.)

c) Interpolación

Cuando se tienen los puntos muestreados, los osciloscopios digitales utilizan la interpolación para obtener una visualización de la onda reconstruida. Existen dos métodos de interpolación para la reconstruir de las señales.

La primera es la interpolación lineal donde los puntos de cada muestra se los conecta mediante líneas rectas.

La segunda es la interpolación sinusoidal, los puntos de cada muestra son unidos mediante curvas representadas por una expresión matemática con la que se puede visualizar de mejor manera la onda reconstruida, cuando se tiene pocos puntos de muestreo. (García Gonzáles & Culala García, n.d.)

En la figura 15 se muestra los métodos de interpolación mencionados.

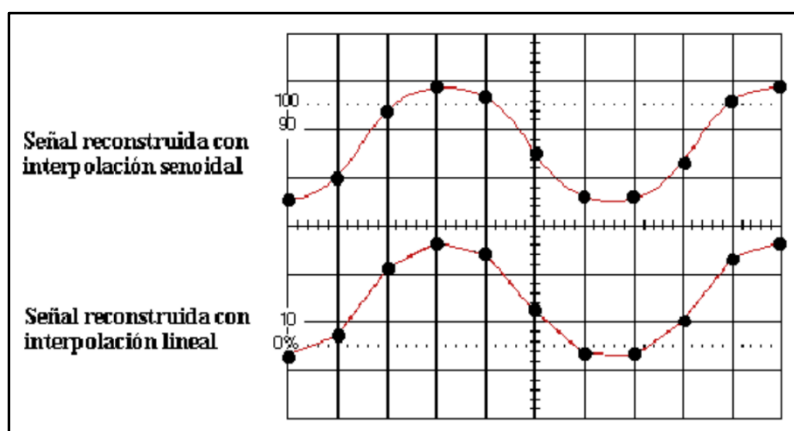


Figura 15. Métodos de interpolación lineal y sinusoidal
Fuente: (García Gonzáles & Culala García, s.f.)

2.2.8. Generador de señales

El generador de señales desempeña un papel muy importante en la comunicación, los instrumentos de medición electrónicos, los circuitos electrónicos, el control automático, el radar y otros sistemas electrónicos. (Chen & Chen, 2011)

Los generadores de señales se utilizan para probar y alinear todos los tipos de transmisores y receptores, y para generar una señal (senoidal, cuadrada y triangular) o una fuente de ruido. La función de un generador de señal es producir una Corriente alterna (C.A) de las frecuencias y amplitudes deseadas con la modulación necesaria para

probar o medir circuitos. El progreso de la señal de prueba se puede rastrear a través del equipo mediante voltímetros electrónicos u osciloscopios.

En muchos generadores de señales, se proporcionan redes calibradas de resistencias, llamadas atenuadores, las mismas, que se utilizan en generadores de señales para regular el voltaje de la señal de salida, de manera que sólo se pueden usar atenuadores calibrados con precisión porque la intensidad de la señal de los generadores debe regularse para evitar sobrecargar el circuito que recibe la señal. (Engineering 360, 2018)

2.2.9. Características de la forma de onda

El término "onda" se define como un patrón de valores cuantitativos variables que se repite en un intervalo de tiempo, en la naturaleza existen ondas comunes como: ondas de sonido, ondas cerebrales, ondas oceánicas, ondas de luz, ondas de voltaje y mucho más, que son fenómenos periódicos repetitivos. Los generadores de señales generalmente se ocupan de producir ondas eléctricas (típicamente voltaje) que se repiten de manera controlable. Una forma de onda es una representación gráfica de la actividad de la onda, su variación a lo largo del tiempo. Una forma de onda de voltaje es un gráfico cartesiano clásico con el tiempo en el eje horizontal y el voltaje en el eje vertical. (Tektronix, 2008)

Las características principales de las formas de onda son: amplitud, frecuencia y fase.

a) Amplitud

La amplitud se define como una medida de fuerza del voltaje de la forma de onda que está cambiando constantemente en una señal de CA, en los generadores de señales se puede establecer rangos de voltaje, por ejemplo de -3 a +3 voltios, de forma que se obtiene una señal que fluctúa entre los dos límites, y la tasa de cambio depende tanto de la forma de onda como de la frecuencia. (Tektronix, 2008)

b) Frecuencia

Se define como la velocidad a la que se producen los ciclos de forma de onda completa, se mide en hercios (Hz), y es inversamente relacionada con el período (o longitud de onda) de la forma de onda, que es una medida de la distancia entre dos picos similares en ondas adyacentes como dato adicional si las frecuencias son altas los períodos tienden a ser más cortos. (Tektronix, 2008)

c) Fase

La fase desde el punto de vista práctico, se define como la colocación temporal de un ciclo en relación con una forma de onda de referencia o un punto en el tiempo. Las ondas están relacionadas matemáticamente con el movimiento circular. Como un círculo completo, un ciclo de una onda sinusoidal viaja 360 grados. El ángulo de fase de una onda sinusoidal describe cuánto de su período ha transcurrido. Dos formas de onda pueden tener una frecuencia y amplitud idénticas y aún difieren en la fase. El cambio de fase, también conocido como retardo, describe la diferencia en el tiempo entre dos

señales similares, como se muestra en la figura 16. Los parámetros que se utilizan para la construcción de un generador de señales son: la amplitud, frecuencia y fase que se utilizan para optimizar las formas de onda para casi cualquier aplicación; además, hay otros parámetros que definen más las señales, y estos también se implementan como variables controladas en muchos generadores de señales. (Tektronix, 2008)

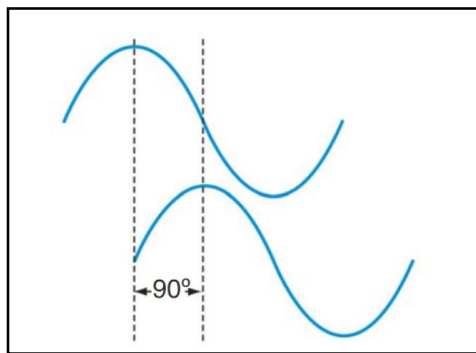


Figura 16. Cambio de fase de dos ondas senoidales.
Fuente: (Tektronix, 2008)

2.2.10. Ondas básicas

En la actualidad las formas de onda existen en diversas variedades y la gran parte de ellas se pueden medir con dispositivos electrónicos. Entre las más importantes se puede mencionar:

a) Ondas sinusoidales

Las ondas sinusoidales se presentan en la mayoría de las fuentes de alimentación de AC y son utilizadas generalmente en demostraciones elementales de los principios eléctricos y electrónicos. La onda sinusoidal es el resultado de una función matemática básica: graficar una curva sinusoidal a 360 grados producirá una imagen de onda

sinusoidal definitiva, existe un caso especial de la onda sinusoidal denominada amortiguada y se presenta cuando al dar un impulso el circuito se torna oscilatorio y se reduce el tiempo. La figura 17 muestra algunos ejemplos de señales de onda sinusoidal y amortiguada. (Tektronix, 2008)

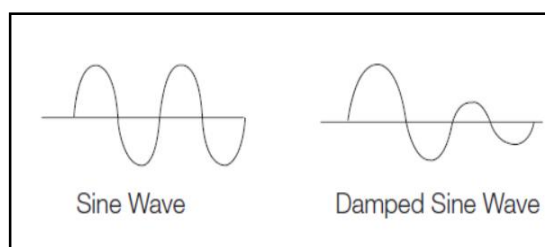


Figura 17. Ondas sinusoidales y amortiguadas
Fuente: (Tektronix, 2008)

b) Ondas cuadradas y rectangulares

Una onda cuadrada y rectangular se define como un voltaje que cambia entre dos niveles de voltaje fijo en intervalos iguales, se utilizan para probar los amplificadores, que deberían poder reproducir las rápidas transiciones entre los dos niveles de voltaje.

Una onda rectangular tiene características de conmutación similares a las de una onda cuadrada, excepto que sus intervalos de tiempo alto y bajo no tienen la misma longitud, en la figura 18 se indican algunas formas de onda cuadradas y rectangulares. (Tektronix, 2008)

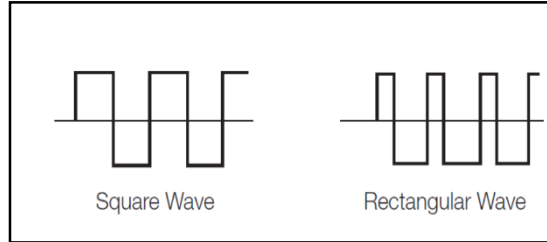


Figura 18. Ondas cuadradas y rectangulares
Fuente: (Tektronix, 2008)

c) Ondas dientes de sierra y triangulares

Las ondas de diente de sierra y triángulo, suben de manera lenta y uniforme a un pico en cada ciclo, y luego caen rápidamente, este tipo de ondas tienen tiempos de subida y caída más simétricos. Estas formas de onda se utilizan a menudo para controlar otros voltajes en sistemas como los osciloscopios y televisores analógicos; en la figura 19 se indican algunas formas de onda. (Tektronix, 2008)

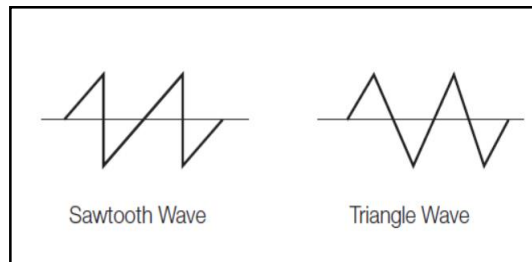


Figura 19. Ondas cuadradas y rectangulares
Fuente: (Tektronix, 2008)

d) Formas de onda de pulsos

Este tipo de formas de onda están relacionadas con la onda rectangular, y se producen cambios hacia arriba y después hacia abajo o inversamente desde hacia abajo y después arriba, entre dos niveles de voltaje fijo. Los pulsos son intrínsecamente binarios y, por lo tanto, son la herramienta básica para transportar información en sistemas digitales. Un

pulso puede representar un bit de información, y una colección de pulsos que viajan juntos crea un tren de pulsos y si los pulsos se agrupan en un tren sincronizado de impulsos se forma un patrón digital. La figura 20 muestra ejemplos de formas de pasos y pulsos y un tren de pulsos. (Tektronix, 2008)

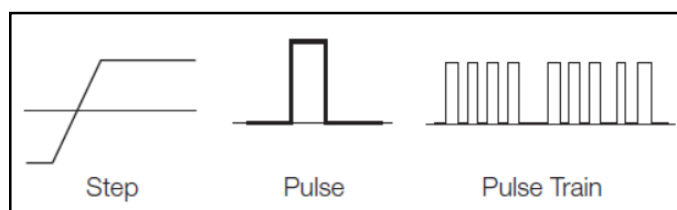


Figura 20. Formas de pasos, pulsos y tren de pulsos
Fuente: (Tektronix, 2008)

2.2.11. Analizador de espectro de frecuencia

Un Analizador de espectro de frecuencia, es un instrumento de medición utilizado con regularidad para realizar diversos análisis espectrales, a diferencia de un Osciloscopio, un Analizador de espectros modela la luz, el sonido e incluso las ondas de radio, las cuales pueden estar en superposición a diferentes frecuencias, a esto se le conoce como análisis espectral. (Electrónica, 2016)

Cada uno de los ejes representa una característica específica en un tipo de onda, en el eje horizontal se representa la frecuencia y en el eje vertical se representa la amplitud, de manera que existirá una deflexión vertical para cada frecuencia que está presente en la entrada, una forma de onda se barre a una frecuencia variable, con ayuda de un filtro de pasa banda, cuya frecuencia central está sincronizada con la velocidad de barrido horizontal de la pantalla de visualización.

Cada frecuencia que está presente en la forma de onda de entrada produce una línea vertical en la pantalla (estas son las componentes espectrales). La deflexión vertical (altura) de cada línea es proporcional a la amplitud de la frecuencia que representa.

Cuando se realiza una representación de una onda en el dominio de la frecuencia se obtienen todas las componentes de entrada en un instante específico de tiempo. En la figura 21 se indica el espectro de frecuencias de una señal triangular con sus amplitudes máximas y las frecuencias de los primeros cinco armónicos impares. (Palestina Reyes , 2013)

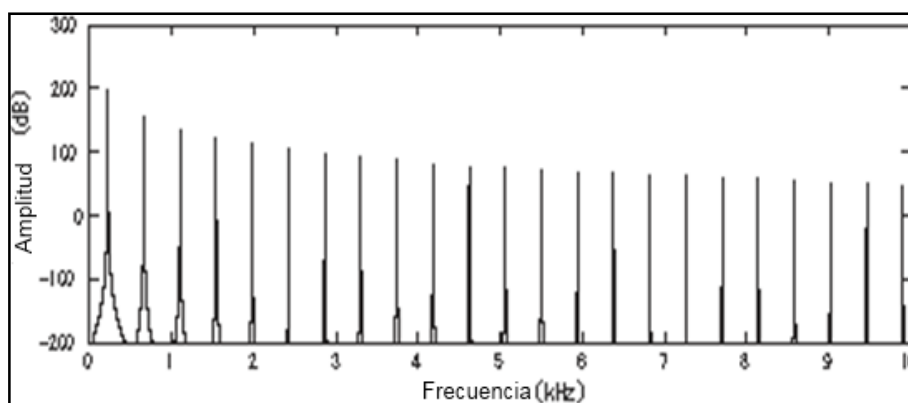


Figura 21. Espectro de frecuencias de la forma de onda triangular
Fuente: (Palestina Reyes , 2013)

2.2.12. Transformada discreta de Fourier

Una de las razones del gran aumento en el uso de métodos de tiempo discreto para el análisis y síntesis de señales y sistemas fue el desarrollo de herramientas sumamente eficientes para realizar el análisis de Fourier de secuencias de tiempo discreto. A la cabeza de estos métodos está una técnica muy relacionada con el análisis de Fourier de tiempo discreto y que resulta ideal para usarla en computadora o ponerla en práctica en

circuitos electrónicos digitales de uso específico. Esta técnica es la transformada discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés) para señales de duración finita.

Sea $x[n]$ una señal de duración finita; de manera, que hay un entero N_1 como se muestra en la ecuación 4.

$$x[n] = 0, \text{ fuera del intervalo } 0 \leq n \leq N_1 - 1 \quad (4)$$

Además, sea que $X(e^{j\omega})$ denota la transformada de Fourier de $x[n]$. Podemos construir la señal periódica $x[n]$ que sea igual a $x[n]$ en un periodo. En concreto, sea $N \geq N_1$ un entero dado, y sea $x[n]$ periódica con periodo N como se muestra en ecuación 5.

$$x[n] = x[n], 0 \leq n \leq N_1 - 1 \quad (5)$$

Los coeficientes de la serie de Fourier para $x[n]$ están dados por la ecuación 6.

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_N x e^{-jk(2\pi/N)n} \quad (6)$$

Los coeficientes de la serie de Fourier para $x[n]$ están dados por la ecuación 7.

$$a_k = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-jk(2\pi/N)n} \quad (7)$$

El conjunto de coeficientes definidos en la ecuación (5) comprenden la DFT de $x[n]$. Específicamente, la DFT de $x[n]$ se denota comúnmente por $X[k]$ y se define en la ecuación 8.

$$X[k] = a_k = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-jk(2\pi/N)n}, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (8)$$

La importancia de la DFT emana de varios hechos. Primero, observe que la señal de duración finita se puede recuperar a partir de su DFT. Se tiene entonces la ecuación 9.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} X[k] e^{-jk(2\pi/N)n}, n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (9)$$

Así, la señal de duración finita puede especificarse como el conjunto finito de valores diferentes de cero o por el conjunto finito de valores de su DFT. Además, debido a su cercana relación con la serie y la transformada de Fourier de tiempo discreto, la DFT hereda algunas de sus importantes propiedades. (Palestina Reyes , 2013)

2.2.13. Transformada rápida de Fourier

Existe inconvenientes cuando se necesita calcular la transformada discreta de Fourier (DFT) de señales de tiempo discreto, debido a que algunas señales presentan larga duración, y en tales casos es muy importante usar procedimientos de cálculo eficientes. El algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) se utiliza para el cálculo de la DFT de secuencias de duración finita. (Ambardar, 2002) El principio en el que se basa la FFT se indica a continuación. Sea $x[n]$ una señal que es 0 fuera del intervalo. Para $N \geq N_1$ la DFT del punto N de $x[n]$ esta dada por la ecuación 10.

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[n] e^{-jk(2\pi/N)n}, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (10)$$

Es conveniente reescribir la ecuación anterior como la ecuación 11:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[n] W^{nkN} \quad (11)$$

Donde la ecuación 12 está dada por:

$$W_N = e^{-2\pi/N} \quad (12)$$

Una medida útil de la complejidad de este cálculo es el número total de multiplicaciones complejas requeridas. (Ambardar, 2002)

2.2.14. Tarjeta Artix-7 35T

Artix-7 35T es una tarjeta de aplicación que pertenece a la fábrica Xilinx y que maneja la plataforma Arty la misma que se utiliza para la programación de la matriz de puertas programables que contiene su FPGA. Fue diseñado; específicamente para su uso como un sistema de procesamiento suave MicroBlaze. Si se la utiliza en el contexto mencionado, Arty es una plataforma de procesamiento más flexible, que puede adaptarse a las necesidades que el usuario requiera para su aplicación. Arty es muy robusto contiene UARTS, SPI, IIC y un Ethernet MAC; además; de una docena de temporizadores de 32 bits. (DIGILENT, 2016) La tarjeta tiene las siguientes características:

Características de la FPGA

- 5.200 celdas que contienen cuatro LUTS de 6 entradas y 8 flip-flops (15.850 celdas)
- 1,800 Kbits de RAM (4860Kbits)
- 5 bloques de reloj (CMT), cada uno con un bucle de bloqueo de fase y un administrador de reloj de modo mixto (6 CMT).
- 90 celdas DSP;
- Velocidades de reloj internas superiores a 450MHz;

- Convertidor analógico-digital en chip (XADC).
- Programable sobre JTAG y Quad-SPI Flash

Características del sistema

- 256MB DDR3L con un bus de 16 bits a 667MHz
- 16MB Quad-SPI Flash
- Circuito de programación USB-JTAG
- Alimentado desde USB o cualquier fuente de 7V-15V

Conectividad del sistema

- 10/100 Mbps Ethernet
- Puerto USB-UART

Dispositivos de interacción y sensoriales.

- 4 interruptores
- 4 botones
- 1 botón de reinicio
- 4 LEDs
- 4 LEDs RGB
- Conectores de expansión
- 4 conectores Pmod.
- Arduino/chipKIT Shield conector.

En la figura 22 se indica el hardware de la tarjeta.

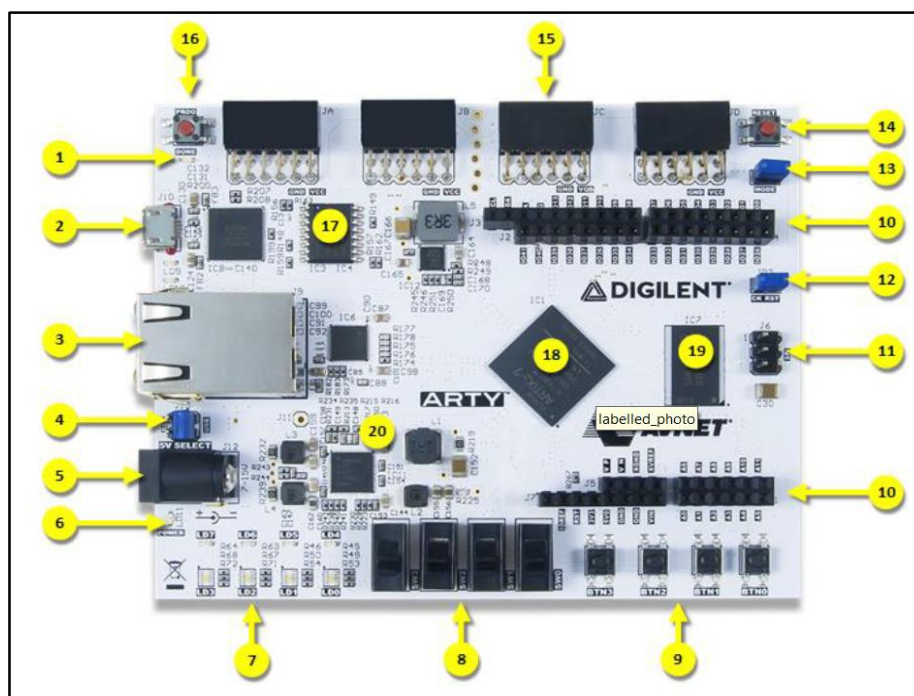


Figura 22. Hardware de la tarjeta Artix-7 35T

Fuente: (DIGILENT, 2016)

En la tabla 1 se describe cada uno de los componentes que conforman la tarjeta.

Tabla 1

Descripción del Hardware de la tarjeta Artix-7 35T

Número	Descripción
1	Programación FPGA en LED.
2	Puerto compartido USB JTAG/UART.
3	Conector Ethernet.
4	Puente de selección de alimentación (fuente de alimentación/USB).
5	Toma de corriente (para fuente de alimentación opcional).
6	Buena potencia LED.
7	LED de usuario.
8	Interruptores deslizantes de usuario.
9	Pulsadores de usuario.
10	Conectores Arduino/chipKIT.

CONTINÚA

11	Encabezado SPI (compatible con Arduino/chipKIT).
12	Chip de arranque del procesador chipKIT.
13	Modo de programación FPGA (JTAG/Flash).
14	Restablecimiento del procesador chipKIT.
15	Encabezados Pmod.
16	Programación del botón de reinicio de FPGA.
17	SPI Flash.
18	Artix FPGA.
19	Memoria Micron DDR3.
20	Dispositivos analógicos de alimentación ADP 5052.

Fuente: (DIGILENT, 2016)

2.2.15. Raspberry 3 PI modelo B

En la figura 23 se observa el hardware de la tarjeta Raspberry Pi 3 Modelo B Raspberry Pi, la cual es una computador (SBC) que tiene un procesador de cuatro núcleos de 64 bits que funciona a 1,2 GHz, posee una LAN inalámbrica de 2,4 GHz y 5 GHz, con Bluetooth 4.2/BLE y Ethernet más rápida con PoE de capacidad a través de un PoE HAT separado. La LAN inalámbrica de banda dual viene con una certificación de cumplimiento modular, lo que permite que la placa se diseñe en productos finales con pruebas de cumplimiento de LAN inalámbrica. (terraelectronica)



Figura 23. Hardware de la tarjeta Raspberry 3PI

Fuente: (terraelectronica)

En la tabla 2 se puede observar las características de la tarjeta.

Tabla 2
Características Técnicas Raspberry 3PI Modelo B

Ítems	Descripción
Procesador	Broadcom BCM2837, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC, 1.2 Ghz
Memoria	1GB LPDDR2 SDRAM
Conectividad	<ul style="list-style-type: none"> • LAN inalámbrica IEEE 802.11.b/g/n/ac de 2.4GHz y 5GHz, Bluetooth 4.2, BLE. • Gigabit Ethernet sobre USB 2.0 (rendimiento máximo) 300Mbps). • 4 puertos USB 2.0.
Acceso	Cabecera GPIO extendida de 40 pines.
Audio y video	<ul style="list-style-type: none"> • 1 puerto HDMI. • Puerto de visualización DSI MIPI. • Puerto de la cámara MIPI CSI. • Salida estéreo de 4 polos y puerto de video compuesto.
Multimedia	H.264, decodificación MPEG-4 (1080p30); Codificación H.264 (1080p30); OpenGL ES 1.1, gráficos 2.0.
Soporte de tarjeta SD	Formato micro SD para cargar el sistema operativo y el almacenamiento de datos.
Potencia de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • 5V/2.5A DC a través de conector micro USB. • 5V DC a través de la cabecera GPIO. • Power over Ethernet (PoE): habilitado (requiere PoE HAT por separado).
Temperatura	0–50 ° C.

Fuente: (terraelectronica)

2.2.16. Módulo pantalla de cristal líquido (TFT)

En la figura 24 se observa el módulo TFT de 5 pulgadas táctil que es un Lcd de 800x480 pixeles con puerto HDMI para Raspberry 3PI. (Banggood, n.d.)

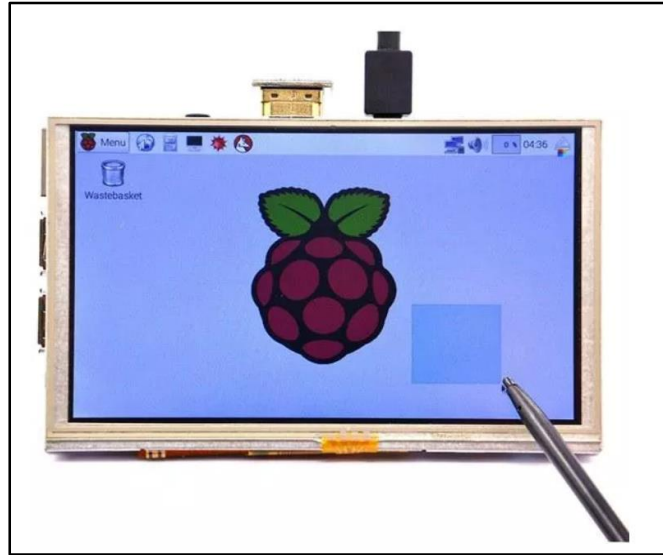


Figura 24. Hardware de la pantalla TFT de 5 pulgadas
Fuente: (Banggood, n.d.)

La pantalla TFT cuenta con las siguientes características técnicas.

- Resolución 800 × 480 (HD), soporte para control táctil
- Compatible con versiones mayores a la primera generación del modelo B que utilice HDMI.
- Soporta Raspberry Pi Image, Ubuntu, LinuxMint, Win 10 IOT entre otras.
- Energía: 5V Energía vía GPIO de Raspberry pi
- Tipo de pantalla: TFT LCD de 5 pulgadas
- Resolución: 800x480 pixeles.
- Pantalla táctil: SPI vía Raspberry PI
- Dimensiones: 120mm x 74mm x 7mm

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Este capítulo detalla el diseño y la implementación realizados en cada una de las etapas, además de las configuraciones necesarias para comunicar cada una de las tarjetas con la pantalla de cristal líquido necesarias para seleccionar una de las tres opciones que presenta el HMI entre ellas: osciloscopio, generador de ondas y analizador de espectro de frecuencia.

La figura 25 indica el esquema físico del módulo didáctico donde se muestra la conexión entre la tarjeta FPGA Artix-7 35T con el circuito de entrada y salida, para el generador de ondas y el osciloscopio, mediante un cable USB se conecta la Tarjeta Artix con la parte que se utiliza para visualizar el HMI de la aplicación, esta sección está conformada por una pantalla de cristal líquido a color TFT de 5 pulgadas acoplada a una Raspberry 3PI mediante un adaptador HDMI, donde se tendrán 4 opciones en el menú de selección: para la opción de osciloscopio se puede visualizar los valor típicos como el voltaje pico-pico (V_{pp}), voltaje raíz media cuadrada V_{rms} , la frecuencia (f_r), y la forma de onda (cuadrada, triangular, rectangular), para la función de generador se puede manipular el valor de la frecuencia, y cambiar el tipo onda, para el analizador de espectro se puede visualizar los armónicos que genera una onda determinada así como el valor en porcentaje de la distorsión armónica total %THD, para finalizar se tiene una opción para regresar a la pantalla principal del módulo didáctico.

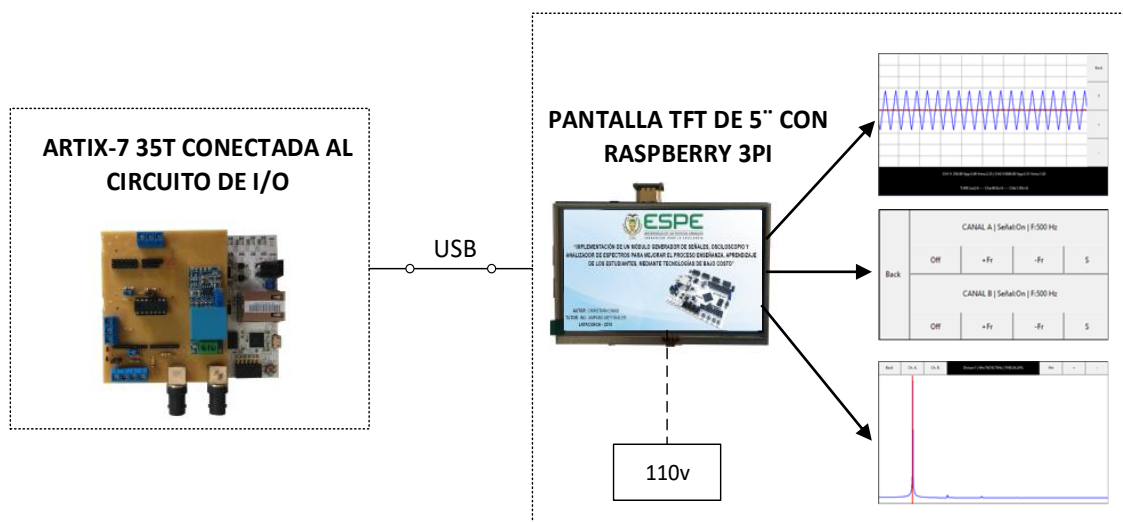


Figura 25. Sistema Implementado

3.1. Diseño e implementación del circuito de entrada y salida

En esta sección se muestra el diseño del circuito electrónico para las entradas de los dos canales, el canal A puede medir y visualizar los parámetros de una onda de Corriente alterna (C.A) y el canal B se lo utiliza para una onda de Corriente continua (C.C). En las salidas se colocó dos canales de generación de ondas sinusoidal, cuadrada y triangular con una sección de filtrado para eliminar los ruidos que se pueden presentar y mejorar las formas de ondas en especial la señal cuadrada.

3.1.1. Diseño del circuito de entrada

En el figura 26 se indica el circuito de entrada, del canal A que permite medir el V_{pp} , V_{rms} y la F_r , en Corriente alterna (C.A), el pin analógico A1 del chipKit Uno de la FPGA se conectó al módulo AC ZMPT101B que tiene un transformador de voltaje de baja, en el lado primario se conecta el voltaje de la red y el lado secundario contiene un divisor de voltaje con un amplificador LM358 para añadir un offset de 1,6V (Naylamp Mechatronics,

s.f.) a partir del voltaje de alimentación de 3.3V de la tarjeta Artix, de esta manera se puede visualizar la forma de onda de la red y medir directamente el V_{pp} y el V_{rms} .

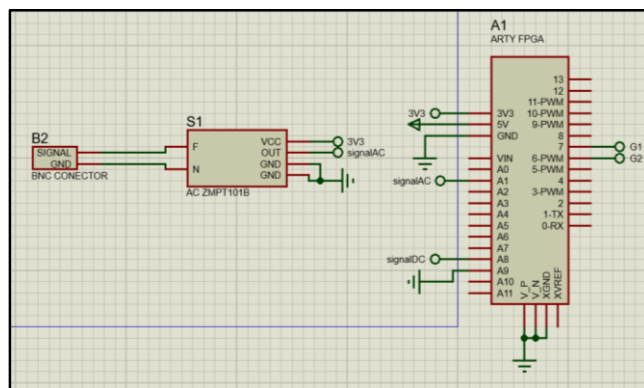


Figura 26. Circuito de entrada del Canal A del osciloscopio

En la figura 27 se muestra el circuito de entrada del canal B donde se puede medir el V_{pp} , V_{rms} y la F_r en Corriente continua (C.C), el canal utiliza un divisor de tensión conectado al pin analógico A8 y el pin A9 se envía a tierra para que se conecte al BNC para la punta del osciloscopio.

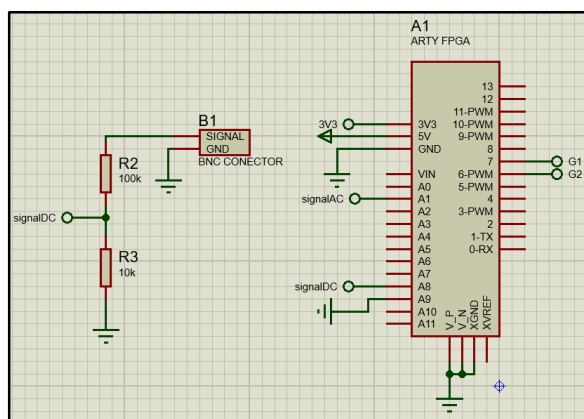


Figura 27. Circuito de entrada del Canal B del osciloscopio

Como resultado del divisor de tensión, se tiene un voltaje de salida de 0.45v como se muestra en la ecuación 13, los valores de las resistencias colocadas se obtuvieron en base a pruebas experimentales, realizadas en el canal B.

$$V_{out} = \frac{10k}{110k} (5v) = 0.45v \quad (13)$$

3.1.2. Diseño del circuito de salida

En la figura 28 se muestra el circuito de salida, se utilizaron los pines IO7 e IO6 para el canal A y el canal B respectivamente, se colocó un interruptor para cada canal del generador. En el primer estado del interruptor se pueden seleccionar señales sinusoidales y triangulares, con un rango de frecuencia de 1Hz a 5 KHz y un voltaje de salida de 3.3v, a la salida se colocó un filtro pasa bajo RC, formado por una resistencia de 330Ω y un condensador cerámico de 22nF, estos valores se obtuvieron en base a pruebas experimentales; para eliminar el paso de las frecuencias o ruidos que generen distorsión en la salida. En el segundo estado se obtiene una señal cuadrada con un voltaje de salida de 5.1v, se utilizó el circuito integrado 74LS14 que es un inversor Schmitt Trigger para eliminar los picos existentes en el umbral positivo (V_{T+}) y negativo (V_{T-}) (CarrodElectrónica, s.f.), que da como resultado una señal cuadrada sin frecuencias parásitas ni ruidos externos.

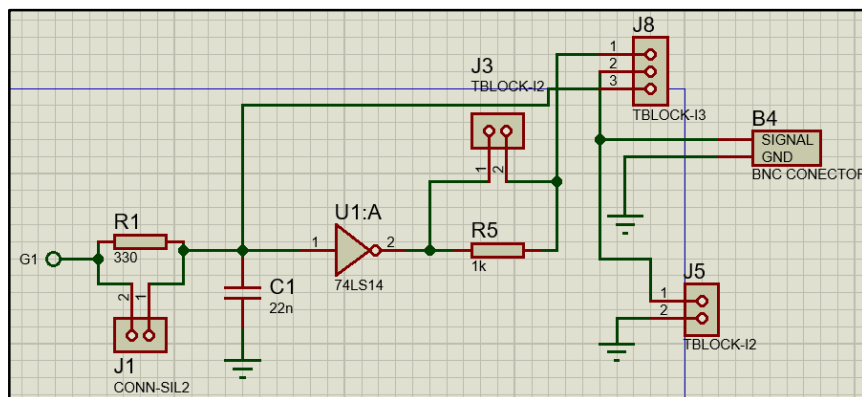


Figura 28. Circuito de salida del generador de señales

3.2. Desarrollo e implementación de la interfaz gráfica

El HMI del módulo didáctico, se puede resumir mediante el diagrama de bloques que se muestra en la figura 29, la programación se realizó en el software de código abierto Python 3.7.1 compatible con las versiones de Windows 10 y macOS 10.9 para x64, que permite realizar aplicaciones de alto nivel.

En Python se desarrolló la lógica de programación necesaria para crear una serie de ventanas para la visualización y manipulación de cada uno de los elementos indicados en el diagrama de bloques. El HMI consta de una pantalla principal que muestra una ventana con la presentación del tema del proyecto de titulación, el autor, e incluye un botón que permite al usuario ingresar al menú principal, en donde se puede escoger una de las tres opciones: osciloscopio, generador de funciones y analizador de espectro de frecuencia; y en cada una de estas opciones se puede seleccionar, observar y manipular los valores típicos, dependiendo de la necesidad del usuario. Se puede ejecutar cada una de las simulaciones o regresar hacia el menú principal para escoger otra opción.

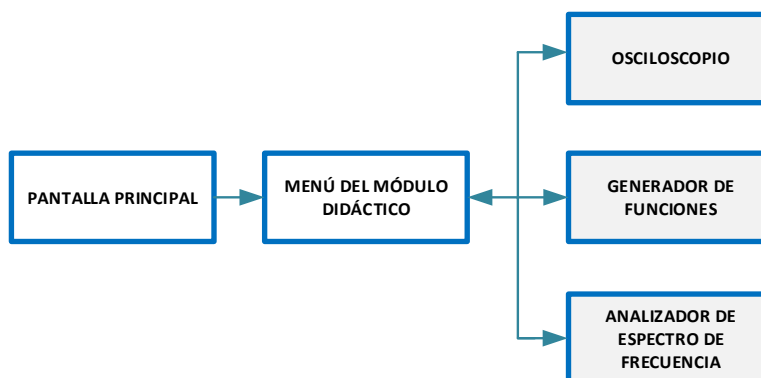


Figura 29. Diagrama de bloques del HMI del módulo didáctico

3.2.1. Programación del menú principal

En la figura 30 se describe el diagrama de flujo que resume el procedimiento para programar la carátula y el menú principal, previamente se deben instalar los drivers y ciertas librerías propias de Python, utilizadas para ahorrar recursos y realizar ciertas tareas de forma eficiente y en el menor tiempo.

La librería *pyserial* se utilizó para la comunicación serial entre Raspberry 3PI y la Tarjeta Artix-7 35T. La librería *Tkinter* permite al usuario crear diversas aplicaciones de interfaces gráficas independientes orientadas a objetos; debido a su lenguaje de programación abierto, es necesario crear una clase de tipo *tk* y funciones que correspondan a la pantalla principal y a cada una de las opciones del menú. La pantalla principal ocupa la totalidad de los pixeles de la TFT de 5 pulgadas, dentro de las funciones creadas en cada una de ellas se definen los buttons, labels y los canvas que corresponden a cada una de las opciones que presenta el menú principal. Cuando se inicializa la simulación el *threading* permite que la aplicación se ejecute simultáneamente, y en la TFT se presentan los buttons creados para la selección, por parte del usuario, del

menú de opciones: osciloscopio, generador de ondas y analizador de espectro de frecuencia.

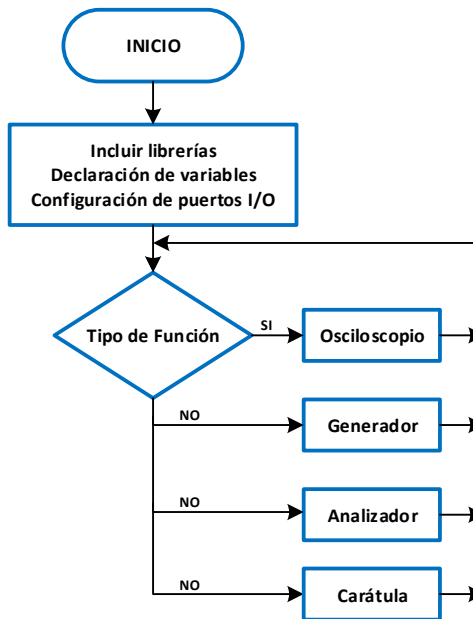


Figura 30. Diagrama de flujo del HMI del menú principal

3.2.2. Programación del HMI del osciloscopio

Cuando se ingresa a la opción del osciloscopio a partir del menú principal se borra la información de la ventana anterior, se define una matriz de (10×10) que representa la división de la pantalla TFT de 800×480 píxeles.

Para la creación del canvas que representa una sección donde se visualizará las gráficas de las ondas (sinusoidales, cuadradas y triangulares), se utilizó una de las aplicaciones del módulo *Tkinter* que permite introducir el área de dibujo en una zona definida por un contenedor de clase *Tk()*, a partir de la altura y el ancho que posee la pantalla gráfica, tomando los valores actuales y siguientes en la figura 31 se muestra la

distribución utilizada para crear el canvas a partir de número de pixeles que posee la pantalla, como se puede observar los pixeles utilizados en el canvas se han reducido para poder crear los buttons y las labels para manipular y visualizar los datos.

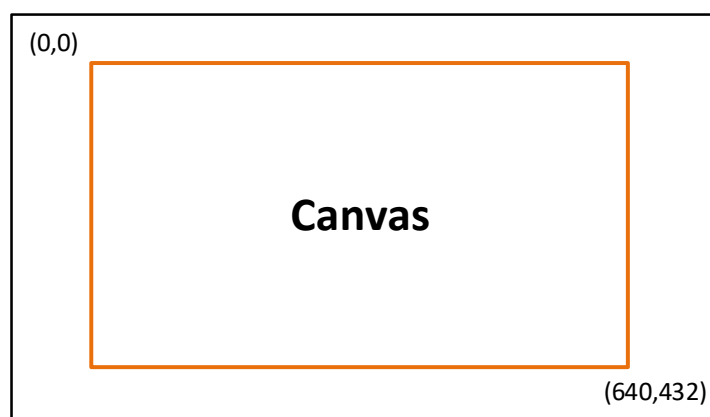


Figura 31. Distribución de las coordenadas del canvas

Para ordenar los buttons ubicados en la parte derecha de la pantalla y las labels ubicados en la parte inferior es necesario manipular la matriz declarada, de manera que para cada opción de se debe ubicar de forma matricial los 4 buttons en la parte derecha y las labels en la parte inferior. Se utiliza el método de geometría de cuadrícula que permite posicionar los widgets en una celda en específico, se indica el número de celda usando el índice de fila y columna correspondiente, al ancho y la altura de cada celda se las puede configurar de acuerdo a las necesidades.

Las labels creadas fueron ubicados en la coordenada $(8x0)$ ocupando toda la fila, donde se muestran los valores del V_{pp} , V_{rms} , y la frecuencia de la señal que se ingresa al osciloscopio para cada uno de los canales, en la coordenada $(9x0)$ las labels creados muestran los valores del período (T) y las divisiones de voltaje asignados para cada canal, finalmente los buttons de la parte derecha permiten al usuario regresar al menú principal,

cambiar los valores de la escala y el cambio del trigger entre los canales A y B, desplazar el eje de los canales en el eje Y, cambiar la amplitud de las señales, aumentar o disminuir el valor del periodo y seleccionar cada tipo de interpolación para cada señal ingresada, se tiene dos tipos: lineal y senoidal, en la figura 32 se muestra la distribución de los elementos que integran la ventana del osciloscopio.

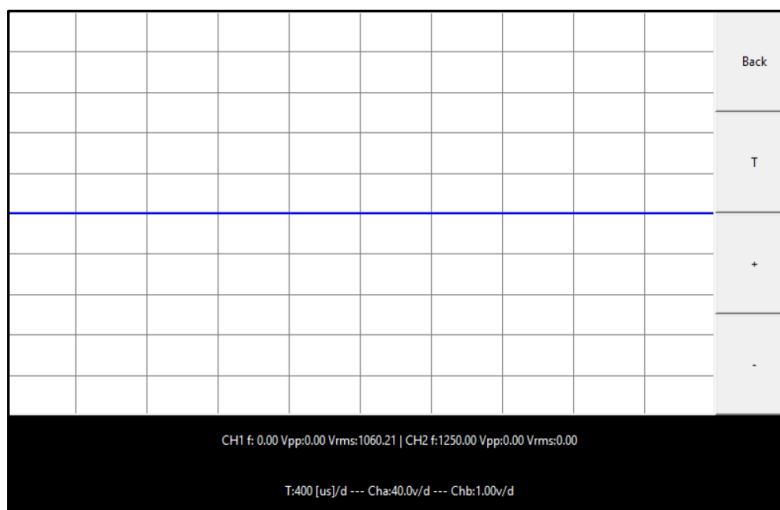


Figura 32. HMI de la pantalla del osciloscopio

En la figura 33 se muestra el diagrama de flujo del osciloscopio, donde se utilizaron librerías para la adquisición de datos y para la creación de buttons, labels y canvas. Para cada uno de los buttons se asignó una función, para que cuando se lo presione reenvíe los datos hacia la FPGA y pueda realizar la acción que se requiera mostrar en la pantalla TFT. Se utilizó el recurso *exeframe* de manera que cuando se inicializa la aplicación las líneas creadas en el canvas no desaparezcan hasta que se regrese al menú, si esto sucede el *thread* simplemente detiene lo que se está realizando. Posteriormente se envía el serial *0x00* hacia la FPGA para que envíe la información necesaria para que las líneas del canvas se inicialice cuando se haya modificado algún parámetro al utilizar los buttons

del osciloscopio. Posteriormente se tomaron 400 divisiones para cada canal, con una conversión de 12 bits, el canvas requiere 2 bytes adicionales, en total se tendrá 1600 bits correspondientes a las 400 divisiones para los dos canales. De manera que las señales se dibujan tomando como referencia el valor de la coordenada del punto X anterior en conjunto con el X actual, realizando el mismo proceso para la coordenada del punto Y , para que la gráfica concuerde con el canvas, la coordenada del punto Y se lo multiplica por un escalador y se le suma el valor del offset, para que exista el punto cero en el plano del canvas. Se colocó un contador para para que se actualicen los valores de la señal cada 10 ciclos, de modo que cuando se ha terminado de ejecutar el contador en ambos canales se recalculan los valores del V_{pp} , F_r y V_{rms} correspondientes a las labels creados anteriormente, de manera que los valores se actualizan constantemente.

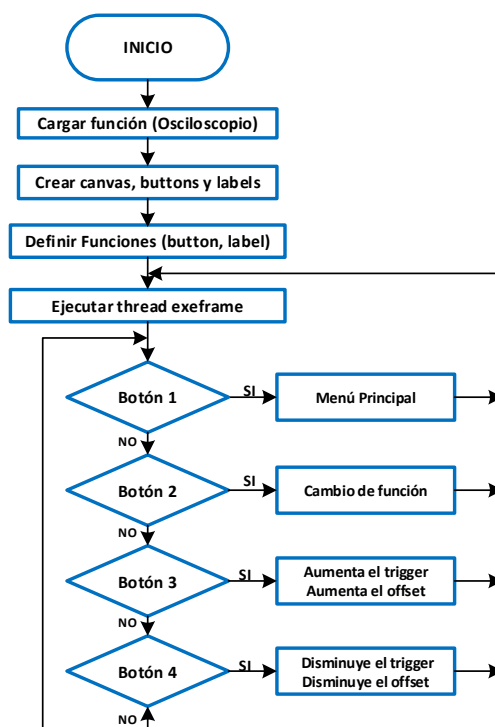


Figura 33. Diagrama de flujo del HMI del osciloscopio

3.2.3. Programación del HMI del generador de señales

Cuando se ingresa a la opción del generador de señales desde el menú principal se borra la información de la ventana anterior, se utilizó como base el módulo *Tkinter* para introducir en el área de la pantalla, dos labels uno para el canal A y otro para el canal B para visualizar los valores que se modifican a partir de los buttons creados en la parte inferior, con los que se puede aumentar o disminuir la frecuencia, cambiar el tipo de señal y regresar al menú principal, los buttons se los ubicó mediante el método de posicionamiento relativo *pack manager* donde se especifica con una matriz de posición el lugar donde se requiere que los buttons se ubiquen, sea en la parte superior, inferior, izquierda o derecha, en la figura 34 se muestra el HMI del generador con los buttons correspondientes a cada uno de los canales.



Figura 34. HMI del generador de señales

Los buttons del generador envían el valor serial correspondiente hacia la FPGA, mediante comandos y como respuesta se pueden realizar acciones como regresar al menú principal. Con los buttons *On* y *Off* se activa o desactiva el canal seleccionado, al presionar el botón *S* se puede ir seleccionando el tipo de señal, existen 3 tipos: señal

sinusoidal, señal cuadrada y señal triangular, se puede aumentar o disminuir la frecuencia de la señal utilizando los buttons $+Fr$ y $-Fr$ respectivamente, desde 1 Hz hasta 5KHz donde su variación se observa en las labels creados para cada canal. En la figura 35 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del generador de funciones.

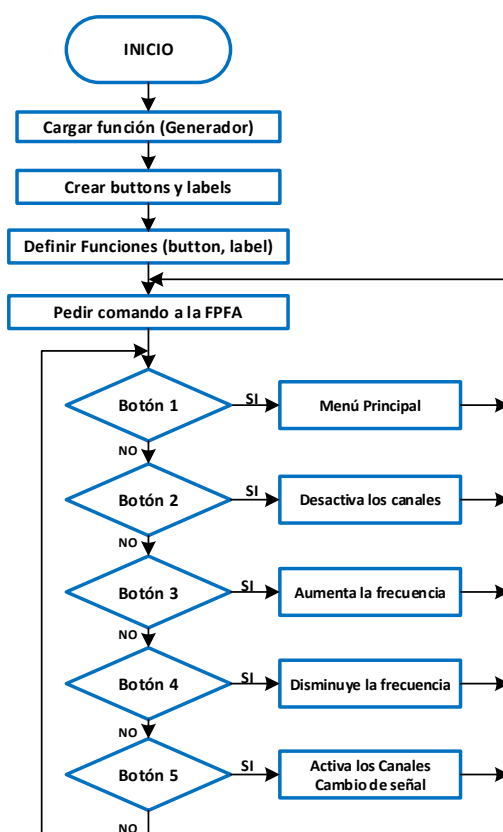


Figura 35. Diagrama de flujo del HMI del generador de funciones

3.2.4. Programación del HMI del analizador de espectro de frecuencia

En la figura 36 se muestra el diagrama de flujo del analizador de espectro de frecuencia, cuando se inicializa la aplicación desde el menú principal, se ingresa al HMI del analizador, para cada uno de los buttons creados se les asignó una función de manera que cuando se haya presionado alguno de ellos el software solicite a la FPGA los datos

a través del comando $0x40$, cuando se reciba la información requerida se mostrarán en la pantalla TFT, se calcula la DFT y se gráfica los armónicos en el canvas, también se muestra el porcentaje de la distorsión armónica total %THD, si se modifica algún dato con los buttons, el valor de las labels se actualizará; los cálculos se realizan es décimas de segundo.

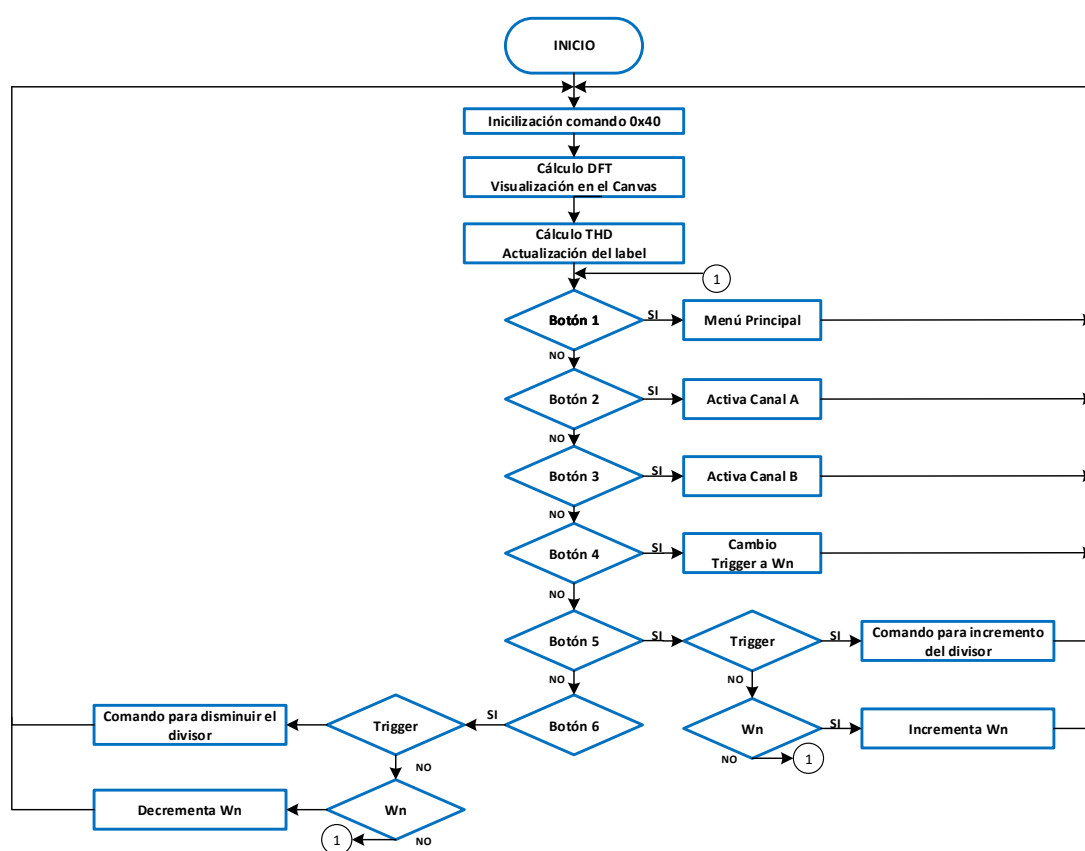


Figura 36. Diagrama de flujo del HMI del analizador de espectro de frecuencia

Cada uno de los buttons envían el serial hacia la FPGA mediante comandos y como respuesta se pueden realizar diferentes acciones con los buttons como: regresar al menú principal, activar el canal A o el canal B, cambiar de trigger a W_n o viceversa, si se selecciona el trigger se puede aumentar o disminuir su valor utilizando divisores de

tiempo, los buttons envían el serial mediante los comandos $0x41$ y $0x42$ a la FPGA para cambiar de escala, con el que se puede acercar o alejar la gráfica de los armónicos para visualizar el valor del porcentaje de la distorsión armónica total %THD, colocando el selector en la frecuencia natural del armónico seleccionado, hay que recalcar que al seleccionar W_n no se requiere ningún comando, por lo que se va aumentando o disminuyendo su valor desde 1Hz hasta 490 KHz.

Al ingresar a la opción del analizador de espectro de frecuencia la información de las ventanas anteriores son borradas, se utiliza un widget Frame que es un contenedor que sirve para agrupar y organizar el canvas y las grillas de la aplicación, se define un valor mínimo para el tamaño de cada grilla de 48×80 pixeles, posteriormente se crea el canvas modificando la matriz de (0×10) definida como el área total de la pantalla TFT, el canvas ocupa la coordenada (1×9) desde la fila 1 y las 9 columnas restantes, los buttons fueron ubicados en la coordenada (0×9) , es decir empieza en la fila cero y ocupa las 9 columnas restantes, finalmente se crean las labels para observar las variaciones de la frecuencia natural W_n y el valor correspondiente al valor en porcentaje de la distorsión armónica total %THD. En la figura 37 se muestra el HMI de analizador de espectro de frecuencia con los buttons y labels correspondientes a cada uno de los canales.

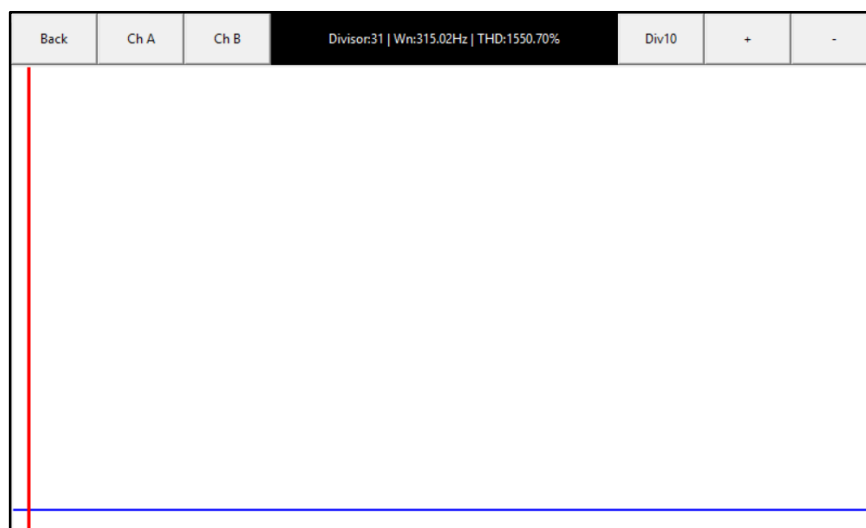


Figura 37. HMI del analizador de espectro de frecuencia

3.3. Selección de la tarjeta de aplicación

Se realizaron pruebas de funcionamiento con las características de las tarjetas Arduino Due, Raspberry 3PI y Artix-7 35 T. En la tabla 3 se muestra las características más importantes de ellas.

Tabla 3

Características de las tarjetas de aplicación

Características	Arduino Due	Raspberry 3PI Modelo B	Artix-7 35T
Procesador	ARM Cortex-M3 24-bit	Broadcom BCM2837, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC	MicroBlaze-RISC 32 bits
Conversor DAC	1 DAC de 12 bits 1Msps	No disponible Módulo PCF8591T	1 DAC de 104Mhz 1 DAC de 100 Mhz 1Msps
Memoria	256-512 Kbytes Flash 32-100 Kbytes SRAM 16 Kbytes ROM 4 Kbyte RAM	1GB LPDDR2 SDRAM	DDR3L de 256MB-bus de 16 bits a 667MHz 16MB Quad-SPI Flash
Frecuencia de operación	84 MHz	1,2 GHz	450 Mhz
Conectividad	USB 2.0 Device/Mini Host	2.4GHz IEEE 802.11.b/g/n	10/100 Mbps Ethernet Puerto USB-UART

	Ethernet (EMAC)	MAC	10/100	Bluetooth 4.1 Fast Ethernet Gbps	10/100
Interfaces de comunicación	4 USARTs			4 Puertos USB	UART
	1 UART			1 I2C	USB 2.0
	2 TWI			1 UART	Quad SPI
	6 SPIs			1 SPI	GPIO
	2 CAN			1 HMDI	PWM
	1 I2C				
	1 HSMCI				

Al analizar las características presentadas, se muestra que en la Raspberry 3PI, no se cuenta con conversores ADC por lo que se utilizó un módulo externo PCF8591T de 8 bits, con una interfaz de bus I2C en serie para la comunicación que está sincronizada con el reloj, de manera que la velocidad de transmisión de datos es de 100us, y se tiene problemas cuando se realiza el muestreo de las señales, presenta un tiempo de respuesta muy lento entre cada muestra.

En el Arduino Due, la comunicación no presenta problemas y es sencilla de implementar, por el uso de librerías y la facilidad de programación. El muestreo se realiza a 1Msps (Mega Samples por segundo), pero el microcontrolador tiene una frecuencia de trabajo baja de 84Mhz, no se obtiene una respuesta rápida en cuanto a cálculos y visualización.

Posteriormente se realizaron pruebas con la tarjeta Artix-7 35T, que fue elegida como la mejor opción entre las comparaciones con las anteriores. Esta FPGA es propietaria de Xilinx que maneja la plataforma Arty que permite realizar diversos diseños y que es una herramienta con grandes prestaciones para diversas aplicaciones. (DIGILENT, 2016)

La tarjeta posee un módulo XADC que contiene un ADC dual de 12 bits y que realiza 1Msps (Mega Samples por segundo), el módulo permite dos modos de operación el modo predeterminado que no requiere configuración y el modo de muestreo simultáneo, utiliza dos ADC el primero trabaja a una frecuencia de 104Mhz y el segundo a una frecuencia de 100Mhz, para muestrear dos señales analógicas externas con el almacenamiento en los registro de estado correspondientes, además los modos operativos del XADC se pueden usar con modos de muestreo continuo o controlado por eventos, de acuerdo a las necesidades del usuario. (Xilinx, 2018)

3.3.1. Instalación del software Vivado Design

Se debe descargar el software Vivado desde la página oficial, tomando en cuenta el sistema operativo que se va a utilizar, esta versión es compatible con Windows 10, en la figura 38 se indica la versión utilizada.

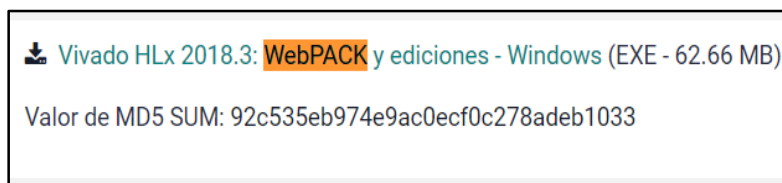


Figura 38. Versión Vivado HLx2018.3 WebPACK

Luego se debe crear una cuenta con un usuario y una contraseña, y seleccionar instalar ahora y click en siguiente como se muestra en la figura 39.

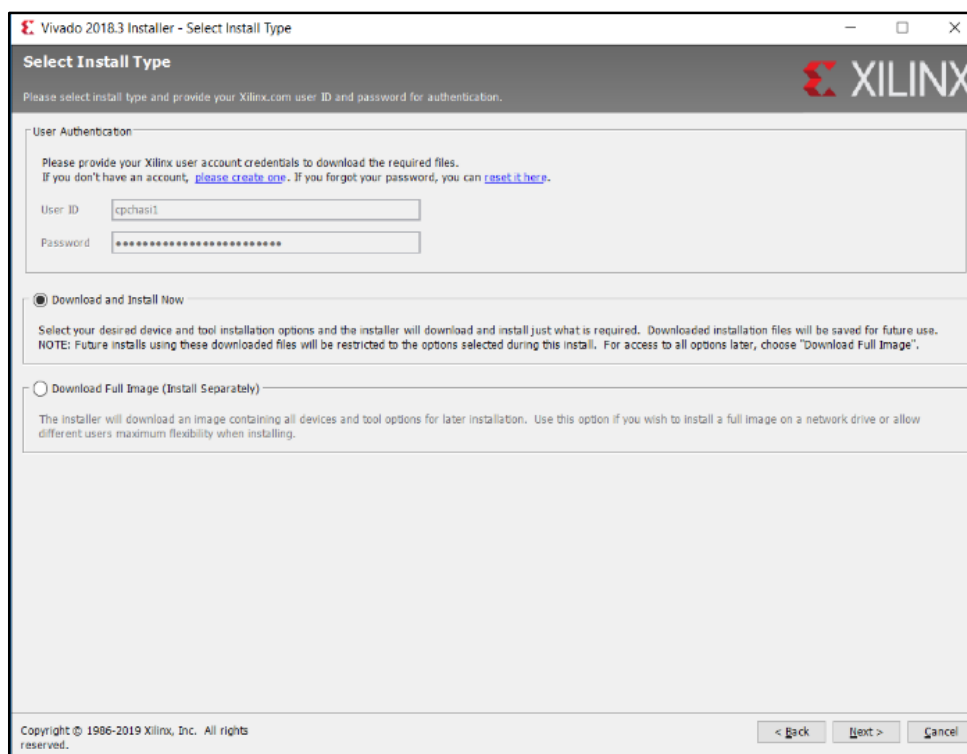


Figura 39. Usuario y contraseña para instalación de Vivado

Cuando se ha aceptado los términos y condiciones, se muestran en la pantalla tres opciones, de las cuales se debe seleccionar Vivado WebPACK Edition que es gratuito y permite al usuario utilizar el software sin la necesidad de una licencia, luego presionar siguiente, como se muestra en la figura 40.

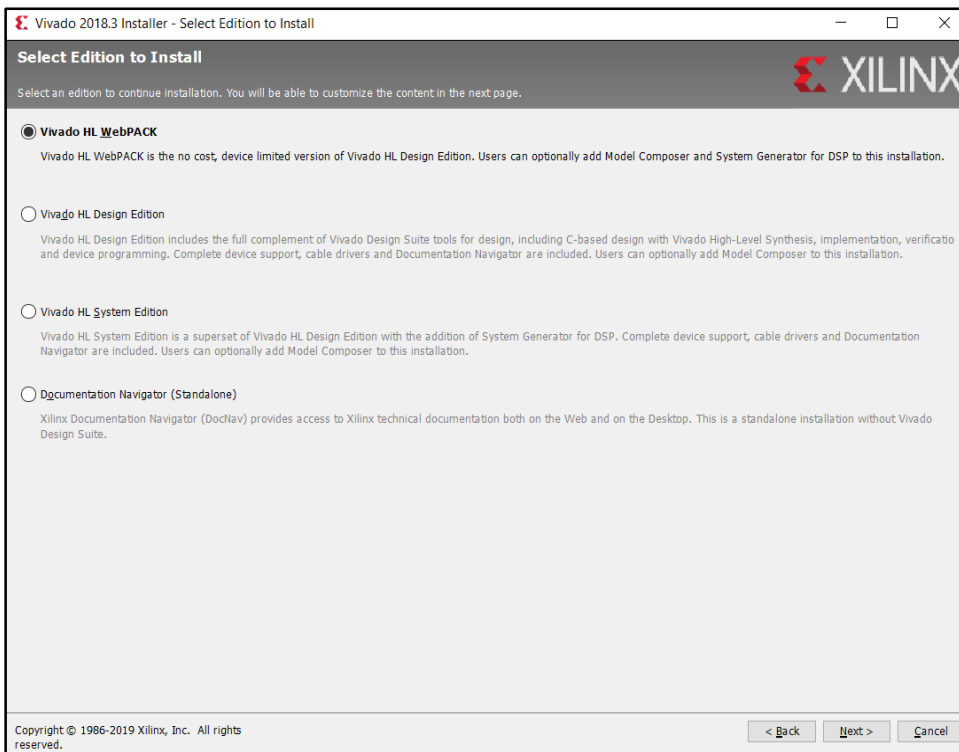


Figura 40. Selección gratuita versión WebPACK

En la siguiente ventana se debe configurar las herramientas necesarias para realizar la aplicación que se desea crear, seleccionar todas las opciones excepto Ultrascale, Kintex o dispositivos Virtex, cuando se ha terminado el proceso se debe hacer click en siguiente como se muestra en la figura 41.

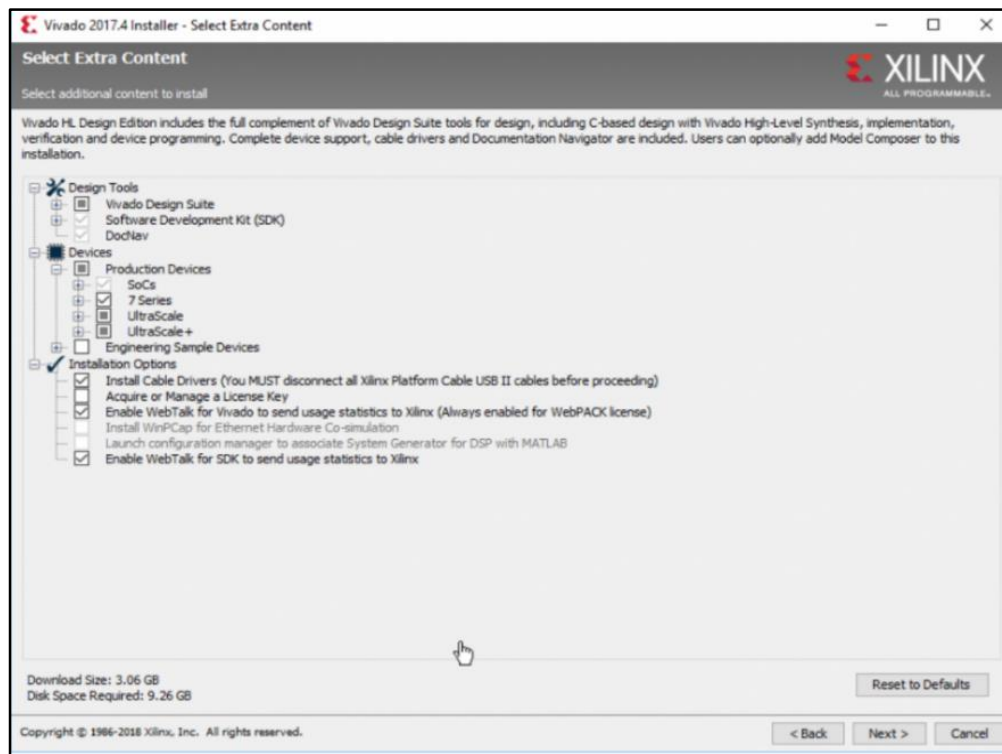


Figura 41. Configuración de las herramientas de Vivado

Se debe seleccionar el directorio de destino donde se desea que se instale el software, finalmente hay que revisar el resumen de la instalación si todo esta correcto hacer click en instalar como se muestra en le figura 42.

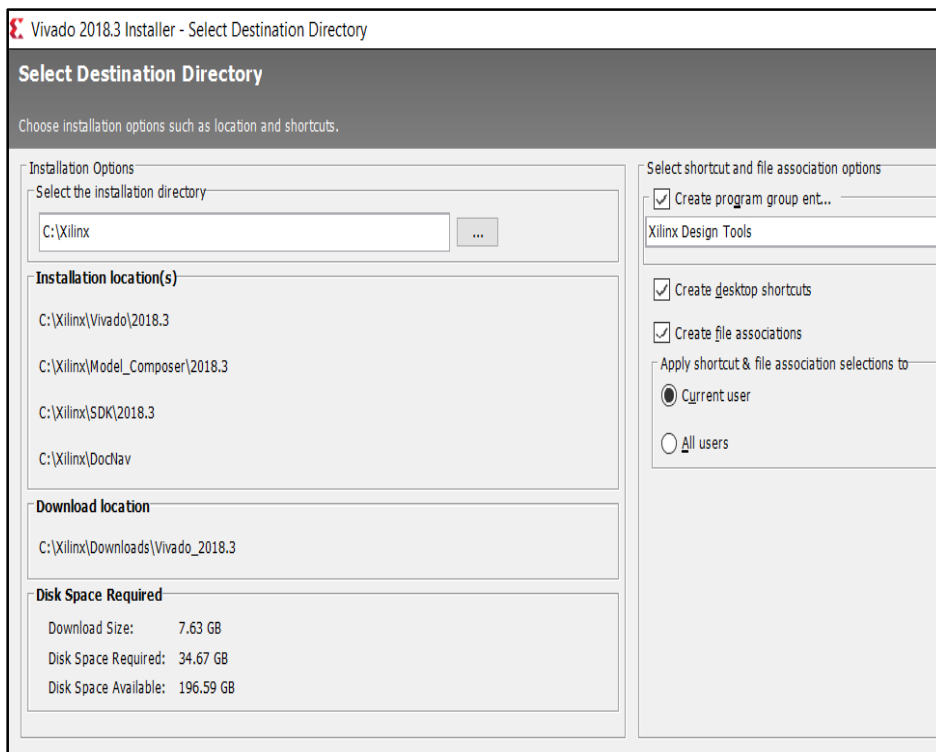


Figura 42. Selección del directorio de destino del software

Cuando se haya instalado Vivado, el directorio de instalación predeterminado contendrá una carpeta llamada `board_files`, como se utilizó instalación predeterminada esta carpeta se la encuentra en la dirección: `C:\Xilinx\Vivado\2018.3\data\boards`, como se muestra en la figura 43.

<input checked="" type="checkbox"/>	board_files	06/05/2019 11:25	Carpeta de archivos	
<input type="checkbox"/>	board_parts	16/04/2019 1:52	Carpeta de archivos	
<input type="checkbox"/>	board_schemas	16/04/2019 5:33	Carpeta de archivos	
<input type="checkbox"/>	board_interface_preferences.xml	06/12/2018 22:55	Documento XML	3 KB
<input type="checkbox"/>	boards.ENCRYPT	06/12/2018 22:55	Archivo ENCRYPT	3 KB
<input type="checkbox"/>	boards_parts.IDR	06/12/2018 22:55	Archivo IDR	6 KB

Figura 43. Creación de la carpeta `board_files`

Descargar el instalador desde el repositorio de Github de vivado-boards. Este archivo comprimido contendrá una carpeta llamada **new/board_files**. Posteriormente se debe copiar los archivos de la carpeta **new/board_files** y ubicarlos en la carpeta **board_files** para poder fusionarlas, como se muestra en la figura 44.

<input checked="" type="checkbox"/>	ac701	16/04/2019 1:45	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	arty	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	arty-a7-35	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	arty-a7-100	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	arty-s7-25	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	arty-s7-50	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	arty-z7-10	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	arty-z7-20	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	basys3	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	cmod_a7-15t	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	cmod_a7-35t	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	cmod-s7-25	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	cora-z7-07s	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	cora-z7-10	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	genesys2	18/04/2019 11:41	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	kcu116	16/04/2019 1:55	Carpeta de archivos
<input type="checkbox"/>	li-imx274-mipi	16/04/2019 5:39	Carpeta de archivos

Figura 44. Instalación de las librerías de Vivado

Cada uno de los archivos que fueron agregados a la carpeta **board_files** contiene subcarpetas con archivos XML que definen diferentes interfaces en la tarjeta como: interruptores deslizantes, botones, LED, USB-UART, memoria DDR, Ethernet, entre otras.

3.4. Diseño e implementación en VHDL

En la figura 45 se muestra el diagrama de bloques simplificado de la programación realizada en el software Vivado 2018.3. Se debe cargar las librerías necesarias para realizar la conversión analógica/digital y almacenar los datos en los registros de memoria para enviarlos hacia la Raspberry 3PI para ser mostrados en la TFT de acuerdo a la función requerida por el usuario. La programación en VHDL cubre dos dominios, el

concurrente y el secuencial, (Rushon, 1999) en el dominio concurrente se declara las señales y la instanciación de entidades. Para el dominio secuencial se emplean procesos, dentro de un proceso el código se ejecuta de forma ordenada, mientras que el proceso en si se ejecuta de forma concurrente.

El código en VHDL para el proyecto utiliza dos entidades IP de Xilinx que son el XADC-WIZARDc y el CLOCKING-WIZARD, además de estas entidades el código está formado por procesos que manejan la comunicación UART, por ejemplo si se requiere los datos del osciloscopio la FPGA recibirá el comando `0x00` y si es el generador de funciones será el comando `0x11`, para cada uno de los buttons utilizados le corresponde su comando, para poder visualizar y manipular los valores numéricos y gráficos en cada una de las opciones del módulo didáctico. También para los procesos del generador de funciones y el almacenamiento de datos obtenidos del XDAC para mostrar la función de osciloscopio y analizador de espectro de frecuencia.

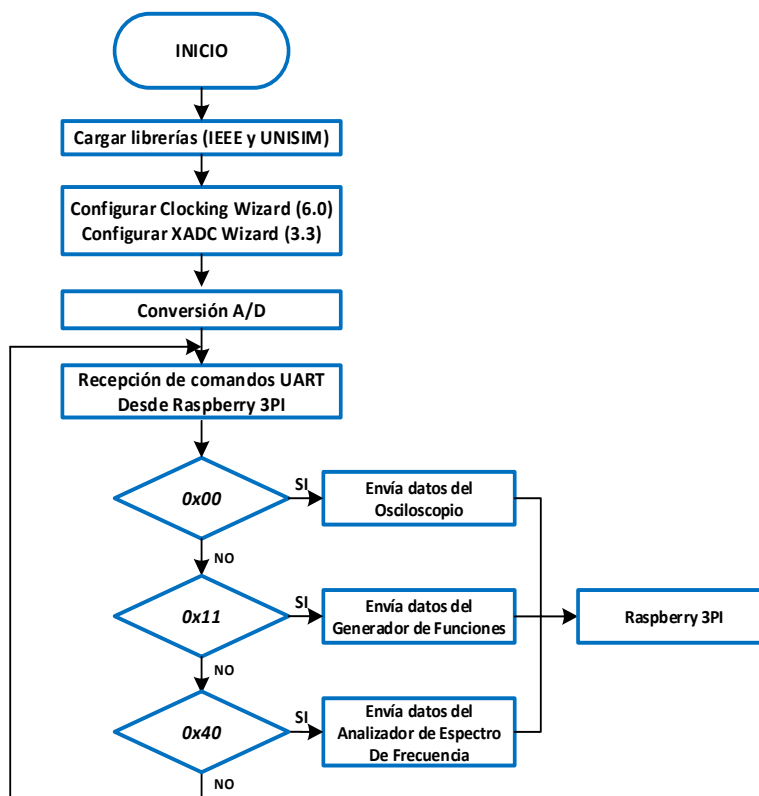


Figura 45. Diagrama de flujo de la programación en VHDL

3.4.1. Conversión A/D

Para realizar la conversión analógica digital requerida se empleó el módulo XDAC que forma parte de la tarjeta utilizada, en la figura 46 se muestra el diagrama de funcionamiento del módulo XDAC. Para configurar al módulo XDAC se debe escribir en los registros de configuración (40h a 42h), registros de prueba (43h a 47h), registros del sentenciador de canales (48h a 4fh) y registros de alarma (50h a 51h). Por la gran cantidad de registros que se debe configurar Xilinx ofrece una IP llamada XADC WIZARD para configurar el módulo XADC, este software genera automáticamente los códigos en lenguaje VHDL o en VERILOG con la configuración del módulo XADC, desde el código

principal se debe instanciar el código generado empleando los archivos de ejemplo de instanciación que también se generan con el software (Xilinx, 2018).

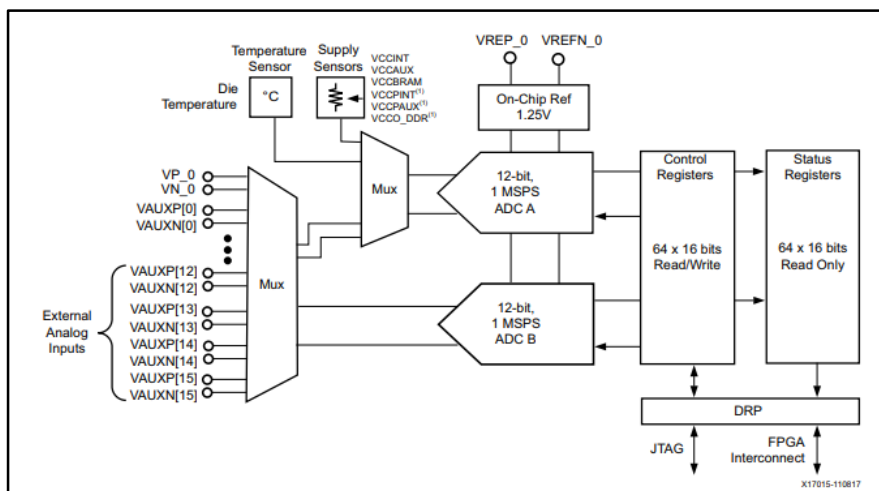


Figura 46. Elementos internos del módulo XDAC
Fuente: (Xilinx, 2018)

Las opciones principales que se emplean son la interfaz DRP del módulo que será utilizado para obtener la información de las conversiones, la opción de selección simultánea para tener acceso a los dos convertidores que integran al módulo XADC al mismo tiempo y la frecuencia de 104 Mhz necesaria para obtener una frecuencia de conversión de 1000 KSPS. En la figura 47 se muestra la interfaz gráfica del XADC WIZARD.

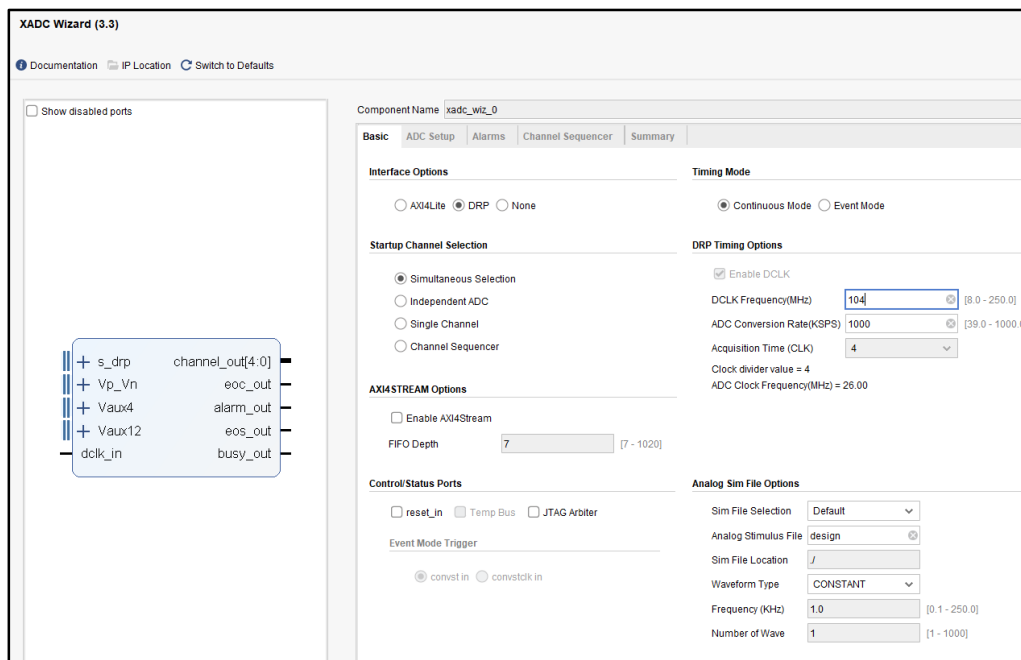


Figura 47. Interfaz gráfica del XADC Wizard 3.3

Para obtener los datos de la conversión utilizando la interfaz DRP (Dynamic Reconfiguration Port) se ha creado un proceso dentro del código VHDL. La interfaz DRP proporciona una señal que cambia a alto cada vez que se termina de realizar una conversión, por lo que el proceso analiza esta señal cada vez que se termina una conversión. Se debe acceder al registro que almacena el resultado de la conversión, la interfaz DRP solamente proporciona un registro de salida, por lo que se debe activar una señal para indicar a la interfaz que se requiere el valor de la conversión. La interfaz tiene un registro de dirección que indica a qué canal de la conversión se desea acceder; en el caso del proyecto actual se debe ingresar las direcciones "0010100" y "0011100" (Xilinx, 2015) que corresponden a los canales Vaux 12 y Vaux 4 que se emplean. El resultado se guarda en dos señales que servirán de entrada para los demás procesos que

necesitan utilizar las conversiones analógicas a digital, además se activa una señal para indicar que existen valores actualizados.

El módulo XADC necesita una señal de entrada de 104 MHz para alcanzar la frecuencia de conversión máxima que es 1000 KSPS, en la figura 48 se muestra la forma de obtener esta señal con otra IP de Xilinx llamada *CLOCKING WIZARD*, esta IP permite generar señales a distintas frecuencias, en la figura imagen se presenta la interfaz gráfica del XADC WIZARD. Este software genera código en VHDL para ser instanciado por el usuario.

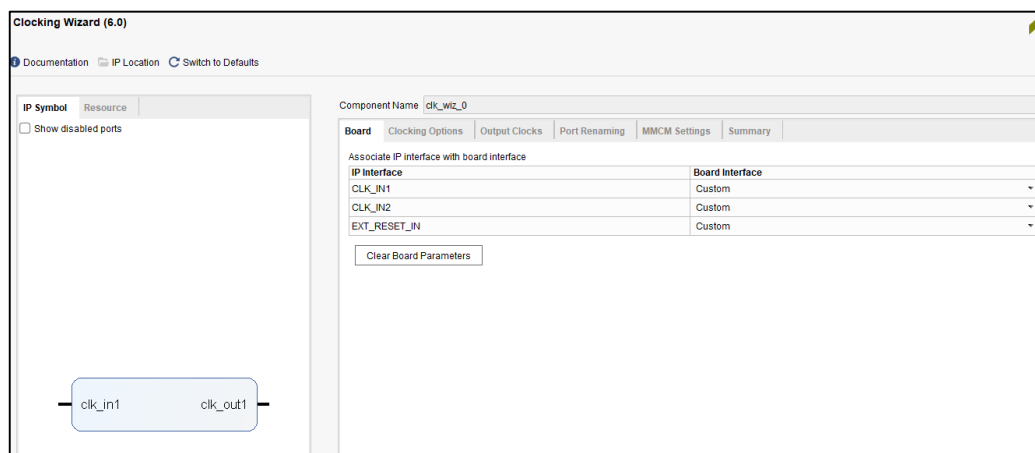


Figura 48. Interfaz gráfica del Clocking Wizard 6.0

3.4.2. Comunicación UART

La comunicación UART está separada en tres procesos, de envío de datos desde la Raspberry 3PI, la recepción de datos por la FPGA y un proceso para controlar la ejecución de comandos después de recibir datos. El proceso encargado de enviar datos espera un cambio en una señal llamada *transmit* para enviar el dato que se encuentre en la señal de dato de transmisión que es un vector de 8 bits. El proceso de recepción de

datos espera el *start bit* en la señal de recepción (*Rx*) que le indica que debe almacenar un dato en el vector de recepción de dato. Una vez que se termina de recibir los datos cambia la señal a *dataNew* para indicar al proceso que controla la ejecución de comandos que se ha recibido nueva información. El proceso de ejecución de comandos ejecuta las acciones indicadas en el diagrama de comunicación serial cuando existe una nueva recepción de comandos, este proceso también es el encargado de manejar al proceso de transmisión de datos cuando hay un comando que necesite transmitir datos, cada uno de los comandos UART utilizados en la aplicación se los detalla a continuación:

Comandos Osciloscopio.

- 0x00: Obtiene datos del osciloscopio.
- 0x01: Aumenta el zoom.
- 0x02: Disminuye el zoom.
- 0x03: Aumenta el Trigger.
- 0x04: Disminuye el Trigger.
- 0x05: Selección del Canal A.
- 0x06: Selección del Canal B.

Comandos Generador de ondas.

- 0x11: Obtiene datos del generador de ondas
- 0x09: Apaga el Canal A.
- 0x0A: Escoge el tipo de señal para el Canal A.
- 0x0B: Aumenta la frecuencia del Canal A.

- 0x0C: Disminuye la frecuencia del Canal A.
- 0x0D: Apaga el Canal B.
- 0x0E: Escoge el tipo de señal para el Canal B.
- 0x0F: Aumenta la frecuencia del Canal B.
- 0x10: Disminuye la frecuencia del Canal B.

Comandos Analizador de Espectro de Frecuencia.

- 0x40: Obtiene datos del Analizador de Espectro de Frecuencia.
- 0x41: Aumenta el divisor por 1.
- 0x42: Disminuye el divisor por 1.
- 0x43: Selección del Canal A.
- 0x44: Selección del Canal B.
- 0x45: Aumenta el divisor por 10.
- 0x46: Disminuye el divisor por 10.

3.4.3. Programación del Osciloscopio

El osciloscopio funciona mediante un proceso que guarda en una memoria cada conversión para el Canal A correspondiente a Corriente alterna (C.A) y para el Canal B correspondiente a Corriente continua (C.C), el diagrama de flujo se muestra en la figura 49. Para comenzar a guardar en primer lugar se compara el valor de la conversión analógica a digital con el valor del trigger, el proceso sólo comienza cuando el valor de la conversión es mayor al trigger y la última conversión es menor o igual al trigger, existe

una variable manejada por el proceso de ejecución de comandos que controla con qué canal se compara el trigger, igualmente el proceso de ejecución de comandos controla la frecuencia con la que las conversiones se guardan en la memoria que contiene los 400 puntos tomados para realizar el proceso de muestreo y para que se vaya dibujando las señales que se muestran en la pantalla. Si se cumplen los puntos mencionados, se debe esperar al valor del trigger para realizar un nuevo proceso de comparación.

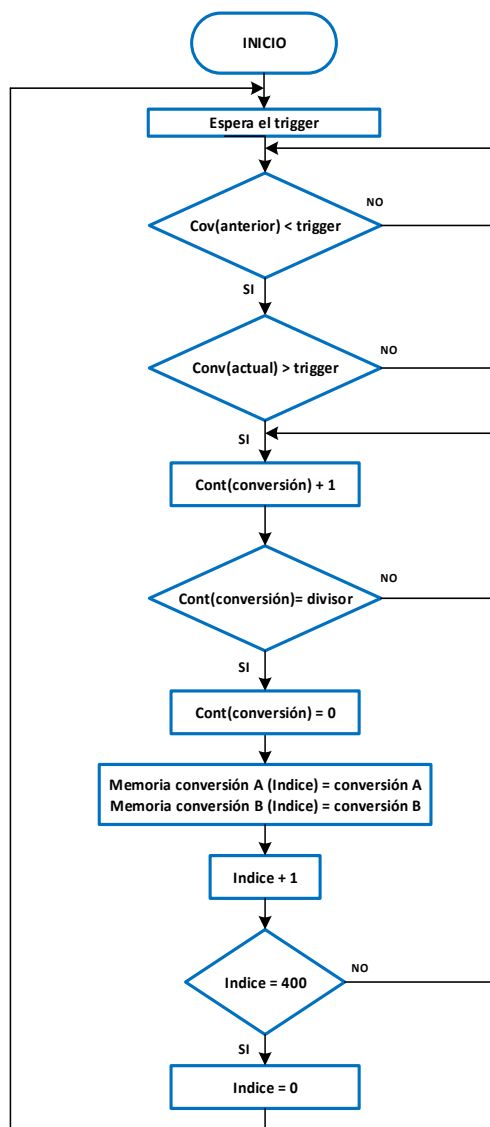


Figura 49. Diagrama de flujo del VHDL del osciloscopio

3.4.4. Programación del Generador de Funciones

Para implementar el generador de funciones, primero se declara una tabla formada por 200 filas y 4 columnas que contiene los valores numéricos ordenados que deben tomar las funciones para cada una de las señales generadas, en la tabla 4 se muestra una sección de los valores utilizados para generar la onda sinusoidal, cuadrada, triangular y para apagar el canal utilizado.

Tabla 4
Tabla utilizada para el Generador de Funciones

Sinusoidal	Cuadrada	Triangular	Apagar
50	0	0	0
51	0	1	0
53	0	2	0
54	100	3	0
56	100	4	0
57	100	5	0
59	100	6	0
60	100	7	0
62	100	8	0
63	100	9	0
65	100	10	0
68	100	11	0
69	100	12	0
71	100	13	0
72	100	14	0
74	100	15	0
75	100	16	0
76	100	17	0
78	100	18	0
79	100	19	0
80	100	20	0
81	100	21	0
83	100	22	0
84	100	23	0
85	100	24	0
86	100	25	0
87	100	26	0

En la figura 50 se muestra la onda sinusoidal obtenida con los valores de la Tabla 4.

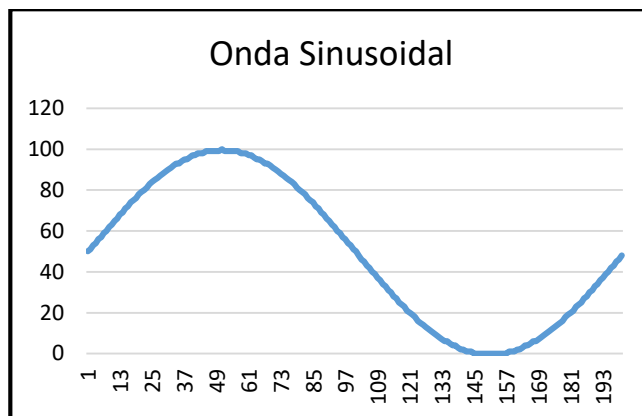


Figura 50. Onda sinusoidal obtenida

El funcionamiento total del generador se muestra en el diagrama de la figura 51, donde se declara la tabla mencionada anteriormente; las señales son manejadas por el proceso de ejecución de comandos que controlan el tipo de señal que debe emitir cada canal y su frecuencia.

El generador funciona con un reloj de 100 Mhz, un contador que cambia de valor a esta frecuencia se compara con el valor actual de la tabla para generar una señal modulada que posee el valor en voltaje promedio que se requiere. Un segundo contador se compara con la señal que controla la frecuencia y con la que un tercer contador sirve como índice de la tabla y se actualiza. Este proceso es el mismo para los dos canales.

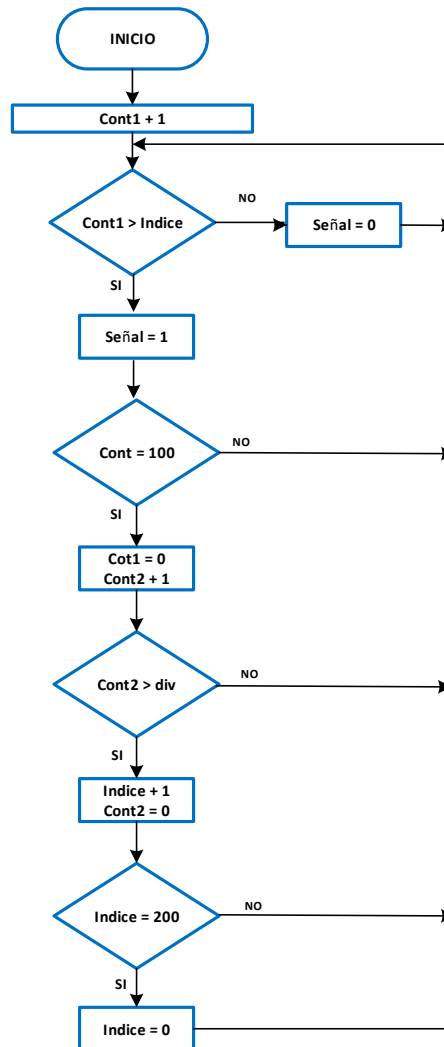


Figura 51. Diagrama de flujo del VHDL del generador de funciones

La tabla de valores para las señales tiene 200 valores; por lo que la frecuencia máxima de las señales generadas es de 5KHz, este valor se obtiene dividiendo la frecuencia del proceso para 100, que es el valor hasta el que avanza el primer contador y para el número de valores en la tabla, esto se observa en la ecuación 14.

$$f = \frac{100Mhz}{(100 \times 200)} = 5Khz \quad (14)$$

3.4.5. Programación del Analizador de Espectro de Frecuencia

Para la programación del analizador de espectro de frecuencia se utilizó el algoritmo de Cooley-Tukey, que define a las señales periódicas existentes como la suma de las series de Fourier, siempre que sean de duración finita, y que se las denomina Transformada de Fourier Discreta (DFT), se la representa en la ecuación 15:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} X[n] e^{-jk(2\pi/N)n} \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (15)$$

La resolución indica N multiplicaciones complejas y $N - 1$ sumas complejas por cada valor de k . De manera que el cálculo de la DFT es de orden (N^2). Cuando se tiene valores de N pequeños el cálculo de la DFT se reduce en tiempo y recursos si por el contrario los valores son grandes el cálculo se lo realizará en el mayor tiempo y con el consumo de mayores recursos. En consecuencia por los inconvenientes presentados principalmente, con respecto al tiempo real se utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) el cual elimina una gran parte de los cálculos repetitivos a los que se ve sometida la DFT, entonces se puede incrementar la velocidad del cálculo a menor costo.

El algoritmo de la FFT divide el tiempo, es decir descompone de manera iterativa la Transformadas de Fourier Discretas en formas más simples. La FFT asume que N es potencia de 2, pero esto no restringe a los valores de N , pues existen métodos para modificar los valores de N de acuerdo a las condiciones que se requiera. Existen propiedades que son de suma importancia para el cálculo de la FFT y entre las que se menciona a las siguientes:

En la ecuación 16 se muestra la Simetría Conjugada Compleja:

$$W_N^{k(N-n)} = W_N^{-kn} = W_N^{kn} \quad (16)$$

En la ecuación 17 se muestra la periodicidad en n, k :

$$W_N^{kn} = W_N^{k(N+n)} = W_N^{(k+N)n} \quad (17)$$

La FFT divide la Transformada de Fourier Discreta a calcular en dos DFT menores según la paridad de los términos se muestra en la ecuación 18:

$$X[k] = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2r] (W_N^2)^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2r+1] (W_N^2)^{rk} \quad (18)$$

Donde $W_N^2 = e^{-j\frac{2\pi}{N}2} = e^{-j\frac{2\pi}{N/2}} = W_{N/2}$ y se puede expresar la DFT de N como la suma de las DFT de $N/2$ muestras como se muestra en la ecuación 18. (Schmidt, 2013)

$$X[k] = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2r] (W_{N/2})^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2r+1] (W_{N/2})^{rk} \quad (19)$$

En el figura 52 se muestra el diagrama de flujo del analizador de espectro de frecuencia, la aplicación envía el comando UART $0x40$ desde la Raspberry 3PI hacia la FPGA, donde se recolectan 1024 muestras de la conversión analógica a digital con la frecuencia indicada por el boton W_n , la función (*numpy.fft*) propia del software Python, que describe las ecuaciones matemáticas descritas en la sección anterior, el resultado sigue un orden, y realiza el cálculo de la FFT utilizando las 1024 muestras posteriormente son enviadas a la Raspberry 3PI mediante el puerto serial, el algoritmo realiza las

operaciones necesarias para obtener el valor de la frecuencia en el pico más alto del espectro, y se visualizará la FFT como armónicos para las diversas señales ingresadas en las entradas del módulo.

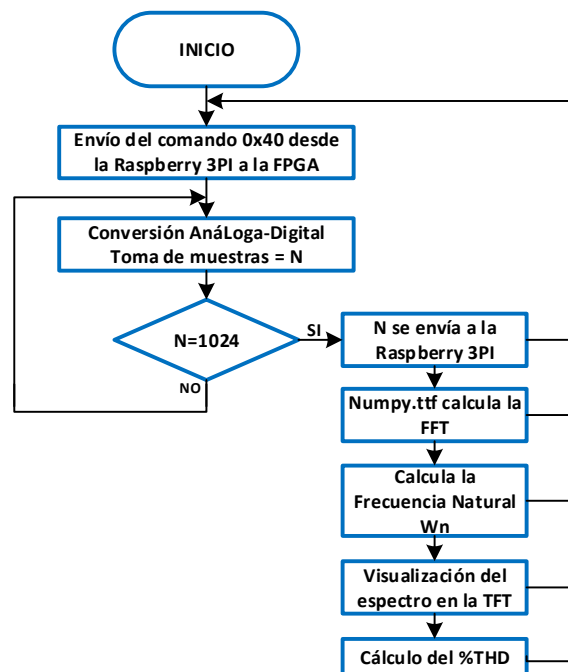


Figura 52. Diagrama de flujo del VHDL del analizador de espectro de frecuencia

Cuando se tiene un número par de puntos en la entrada real, la frecuencia de Nyquist se representa para valores positivos y negativos, por el contrario si se tiene un número impar de puntos en la entrada, se tiene el valor más elevado de la frecuencia positiva y negativa. Como resultado se obtiene una matriz que contiene los elementos de las frecuencias de los elementos correspondientes en la salida.

El porcentaje de la distorsión armónica total %THD se obtiene con la raíz cuadrada de la sumatoria de los cuadrados de todos armónicos totales dividido para la frecuencia fundamental W_n , de manera que se obtiene el valor de distorsión como porcentaje de W_n .

Matemáticamente, el %THD relaciona la suma de la raíz media de los cuadrados (RMS) del contenido de los armónicos con el valor cuadrático medio (RMS) de la señal fundamental, que se expresa en porcentaje, (Jiménez Molano, 2008) se puede expresar la distorsión armónica de dos formas como se muestra en las ecuaciones 19 y 20:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (20)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (21)$$

3.5. Diseño e implementación de la estructura del módulo

La estructura externa del módulo fue diseñada en AutoCAD 2016 que es una herramienta utilizada para realizar diseños asistidos por computadora (CAD), el tipo de material utilizado fue MDF de tres líneas, el diseño de la presentación con respecto a letras y gráficos se los realizó en el software CorelDRAW2016, que es una aplicación que permite realizar diseños vectoriales, se utiliza para crear dibujos complejos para la impresión láser.

La estructura está formada por 6 partes y las cotas para cada elemento están descritas en centímetros. La cara frontal presenta el corte para la pantalla TFT como se muestra en la figura 53.

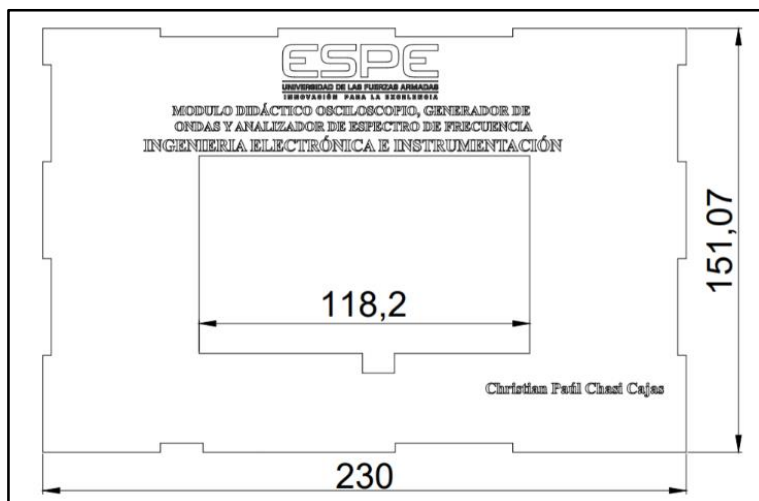


Figura 53. Pieza frontal de la estructura

En la figura 54 se muestra los cortes realizados para colocar los conectores BNC para el osciloscopio y las borneras para el generador de señales, cada uno presenta la descripción en cuanto a funcionalidad y los terminales de conexión.

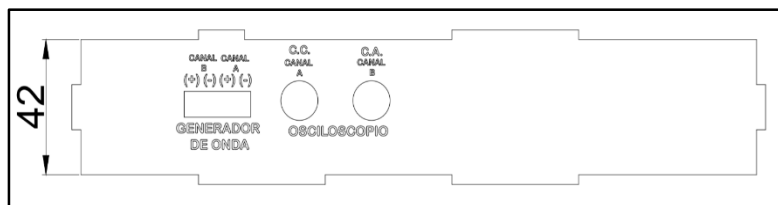


Figura 54 Pieza frontal con salidas para los conectores del módulo

En la figura 55 se muestra las caras laterales, en la parte izquierda se realizó el corte necesario para incluir los dos interruptores correspondientes a los canales del generador de onda, que permite elegir el tipo de señal que el usuario necesite.

El ángulo de inclinación de cada cara lateral es de 65 grados, y también se incluyó dos cortes adicionales, que sirven para colocar la base que será utilizada para fijar la pantalla TFT.

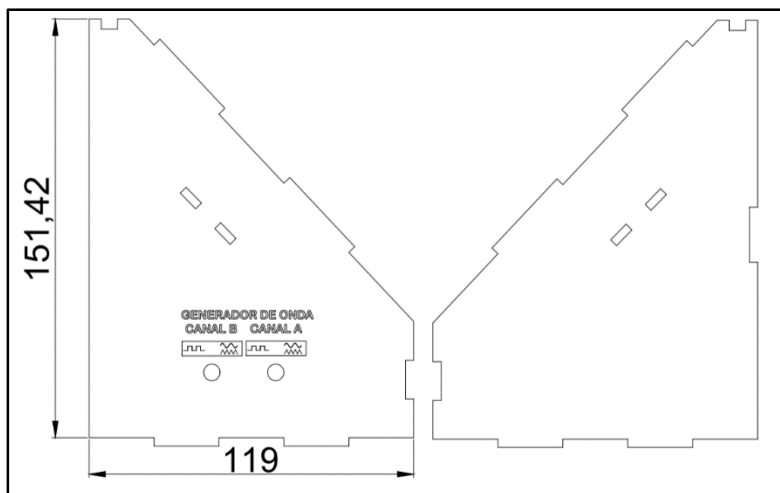


Figura 55 Piezas Laterales de la estructura

Finalmente en la figura 56 se muestra en la parte izquierda la cara posterior, en la parte derecha la base y en la parte inferior la cara de la parte superior de la estructura diseñada.

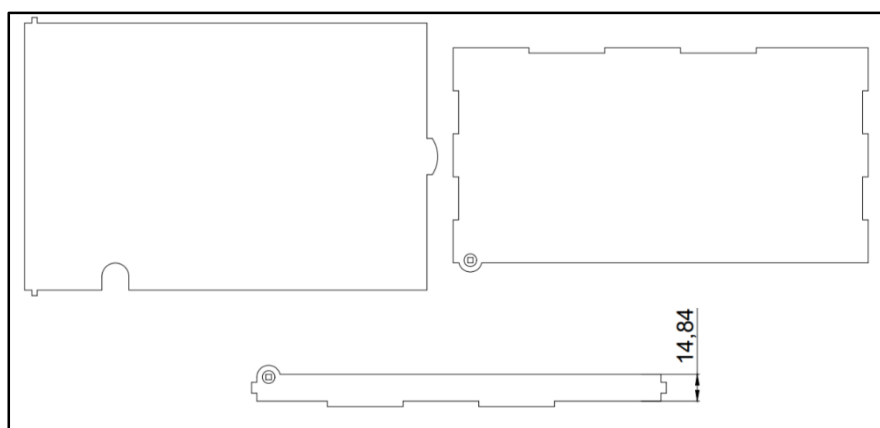


Figura 56 Pieza posterior, base y superior de la estructura

Terminado el diseño estructural se procede a unir las piezas y a colocar los elementos: tarjeta Artix-7 35T, Raspberry 3PI y la pantalla TFT de 5 pulgadas dentro del módulo. La figura 57 muestra el módulo terminado.



Figura 57 Módulo didáctico terminado

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan las pruebas y los resultados obtenidos con el módulo didáctico, los mismos que fueron comparados con los equipos del laboratorio de Electrónica Digital de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE Sede Latacunga. Se utilizó el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a y el Generador de Funciones Agilent 33500B, ambos de uso comercial. Para la sección del Analizador de Espectro de Frecuencia el módulo se validó utilizando una aplicación en el software Matlab R2018b.

4.1. Pruebas Experimentales

a) Función Generador de ondas

Para realizar las pruebas experimentales de la función generador, se utilizó el módulo para generar las formas de onda sinusoidal, cuadrada y triangular con frecuencias desde 1Hz hasta los 5KHz, las cuales fueron medidas con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a, en la figura 58 se muestra la conexión entre los dos equipos.



Figura 58. Conexión entre el generador del módulo y el equipo Agilent DSO-X 2014^a

b) Función Osciloscopio

Se utilizó el generador de funciones Agilent 33500B para generar las tres formas de onda, con voltajes desde 1Vpp a 6Vpp, de manera que se puede determinar el valor de frecuencia para observar nítidamente las formas de ondas medidos el osciloscopio del módulo en la figura 59 se muestra la conexión entre los equipos.



Figura 59. Conexión entre el generador Agilent 33500B y el osciloscopio del módulo

c) Función Analizador de Espectro de Frecuencia

Para la sección del analizador de espectro de frecuencia se realizó una aplicación en Matlab R2018b para comparar el valor del porcentaje de la distorsión armónica total %THD con el valor obtenido en el módulo didáctico, de igual manera los armónicos obtenidos para cada tipo de señal ingresada a diferentes frecuencias, la conexión utilizada es igual a la mostrada en la figura 59, para el Canal A y el Canal B.

4.2. Resultados de la investigación

4.2.1. Generador de funciones del módulo didáctico

Para verificar si el generador de funciones del módulo didáctico funciona correctamente, la frecuencia generada fue medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a, y posteriormente con el sistema didáctico para identificar el error.

En la figura 60 se muestra la onda sinusoidal generada en el canal A del módulo de 5KHz y visualizada en el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a.

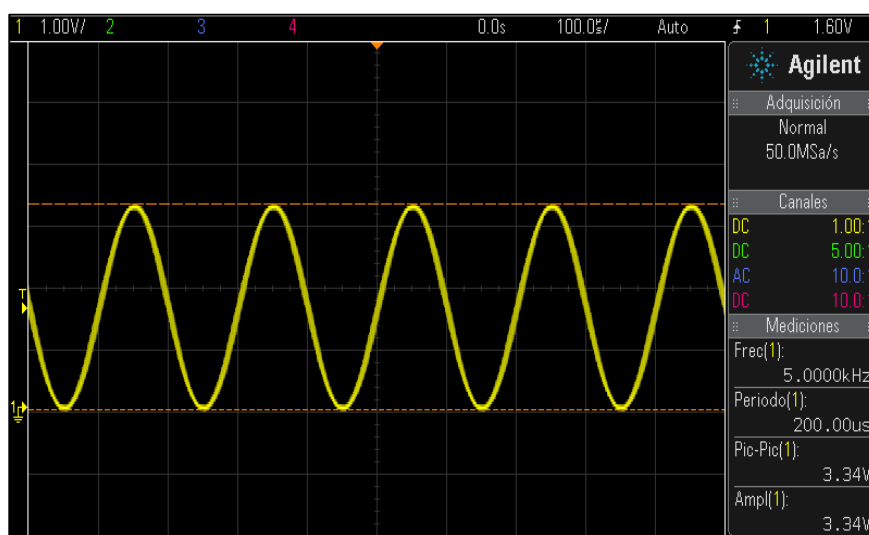


Figura 60. Onda sinusoidal de 5KHz generada en el Canal A y medida con el osciloscopio Agilent

En la tabla 5 se muestra el error al medir la señal con el osciloscopio Agilent.

Tabla 5

Cálculo del error de la señal sinusoidal generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) DSO-X 2014 ^a	Voltaje de salida (v) DSO-X 2014 ^a	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	3.3	9.99	3.34	0.1	0.04
1	100	3.3	99.86	3.34	0.14	0.04
2	500	3.3	499.85	3.29	0.15	0.01
3	1000	3.3	1000	3.34	0	0.04
4	5000	3.3	5000	3.34	0	0.04
%Error Total					0.076	0.034

En la figura 61 se muestra una onda triangular generada en el canal A del módulo de 5KHz y visualizada en el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a.

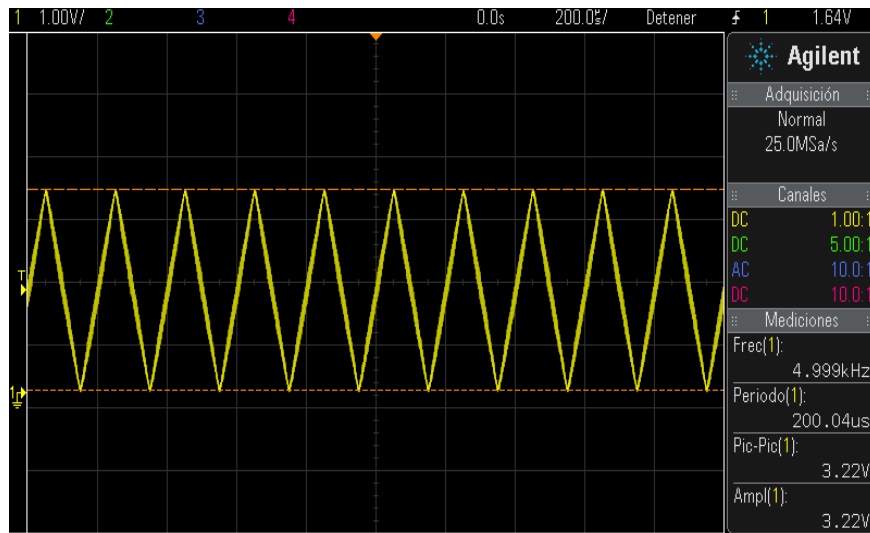


Figura 61. Onda triangular de 5KHz generada en el Canal A y medida con el osciloscopio Agilent

En la tabla 6 se muestra el error al medir la señal triangular utilizando el osciloscopio Agilent.

Tabla 6

Cálculo del error de la señal triangular generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) DSO-X 2014 ^a	Voltaje de salida (v) DSO-X 2014 ^a	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	3.3	9.98	3.34	0.02	0.04
1	100	3.3	99.74	3.34	0.26	0.04
2	500	3.3	501.30	3.34	1.3	0.04
3	1000	3.3	998.40	3.34	0.0016	0.04
4	5000	3.3	4990	3.34	0.01	0.04
%Error Total					0.318	0.004

En la figura 62 se muestra la onda cuadrada generada en el canal A del módulo de 5KHz y visualizada en el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a.

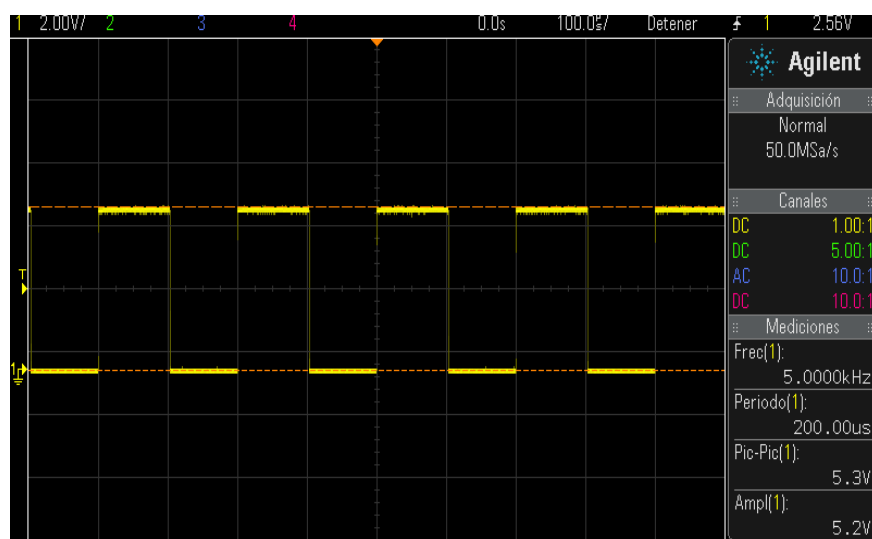


Figura 62. Onda cuadrada de 5KHz generada en el Canal A y medida con el osciloscopio Agilent

En la tabla 7 se muestra el error al medir la señal cuadrada utilizando el osciloscopio Agilent.

Tabla 7

Cálculo del error de la señal cuadrada generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) DSO-X 2014 ^a	Voltaje de salida (v) DSO-X 2014 ^a	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	5.1	10	5.3	0.07	0.2
1	100	5.1	100	5.3	0.07	0.2
2	500	5.1	500	5.3	0.07	0.2
3	1000	5.1	1000	5.3	0.07	0.2
4	5000	5.1	5000	5.3	0.07	0.2
%Error Total					0.07	0.2

Luego de terminar las mediciones con el osciloscopio Agilent se procede a realizar el mismo procedimiento, se utilizó el canal A del módulo para la generación de las señales, y el osciloscopio del módulo didáctico, la figura 63 se muestra la onda sinusoidal de 5KHz visualizada en el osciloscopio.

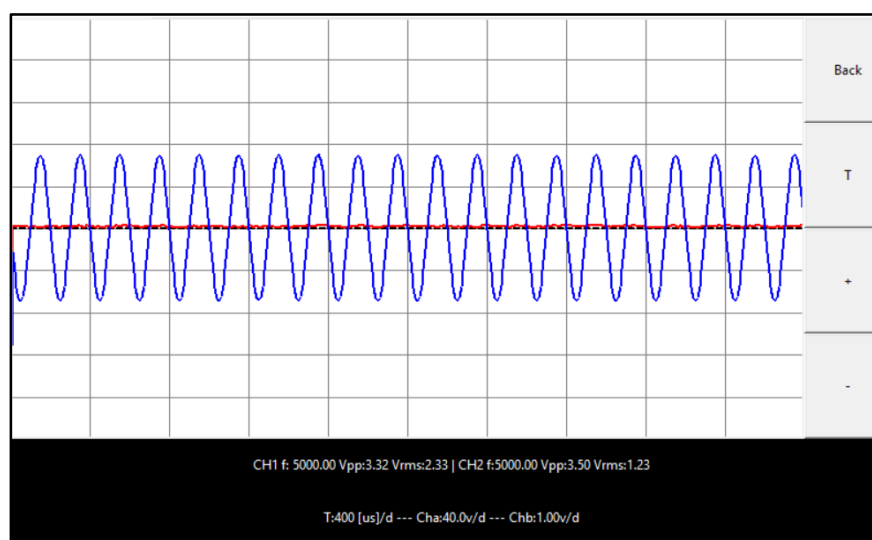


Figura 63. Onda sinusoidal de 5KHz generada en el Canal A y medida con el módulo

En la tabla 8 se muestra el error al medir la señal sinusoidal utilizando el osciloscopio del módulo.

Tabla 8

Cálculo del error de la señal sinusoidal generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	3.3	10	3.50	0	0.2
1	100	3.3	100	3.51	0	0.21
2	500	3.3	500	3.51	0	0.21
3	1000	3.3	1000	3.52	0	0.22
4	5000	3.3	5000	3.50	0	0.2
%Error Total					0	0.21

La figura 64 se muestra la onda triangular de 5KHz visualizada en el osciloscopio del módulo didáctico.

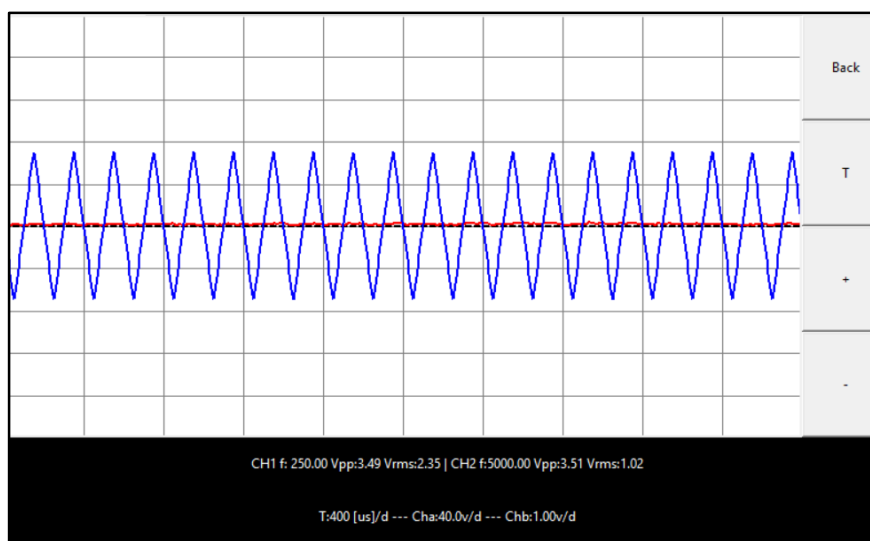


Figura 64. Onda triangular de 5KHz generada en el Canal A y medida con el módulo

En la tabla 9 se muestra el error al medir la señal triangular utilizando el osciloscopio del módulo.

Tabla 9

Cálculo del error de la señal triangular generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	3.3	10	3.50	0	0.2
1	100	3.3	100	3.50	0	0.2
2	500	3.3	500	3.51	0	0.21
3	1000	3.3	1000	3.51	0	0.21
4	5000	3.3	5000	3.50	0	0.2
%Error Total					0	0.204

La figura 65 se muestra la onda cuadrada de 5KHz visualizada en el osciloscopio del módulo didáctico.

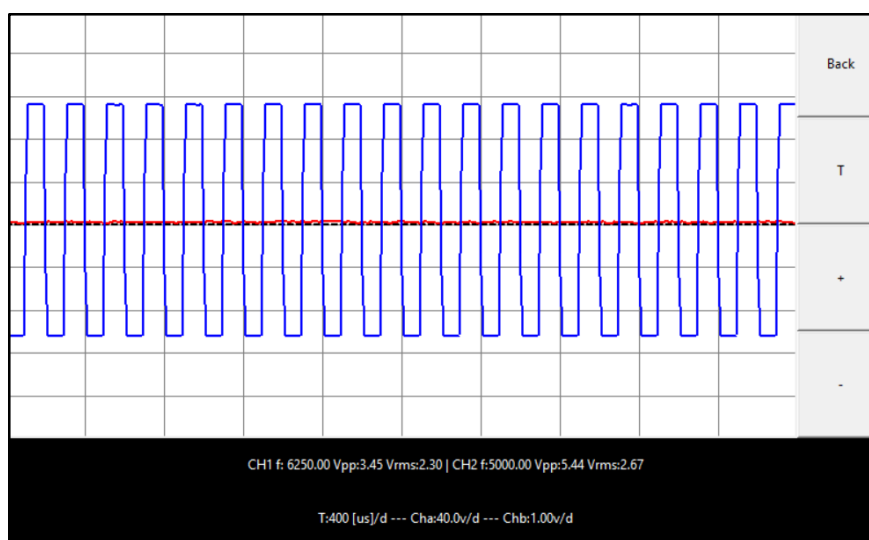


Figura 65. Onda cuadrada de 5KHz generada en el Canal A y medida con el módulo

En la tabla 10 se muestra el error al medir la señal cuadrada utilizando el osciloscopio del módulo.

Tabla 10

Cálculo del error de la señal cuadrada generada en el Canal A del módulo medido con el osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	5.1	10	5.44	0	0.34
1	100	5.1	100	5.44	0	0.34
2	500	5.1	500	5.44	0	0.34
3	1000	5.1	1000	5.45	0	0.35
4	5000	5.1	5000	5.44	0	0.34
				%Error Total	0	0.342

Cuando se ha terminado las pruebas del generador utilizando el canal A se procede a utilizar el canal B para generar una onda sinusoidal, la frecuencia generada fue medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014A, y posteriormente con el sistema didáctico para identificar el error. En la figura 66 se muestra la onda sinusoidal generada en canal A del módulo de 5KHz y visualizada en el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a.

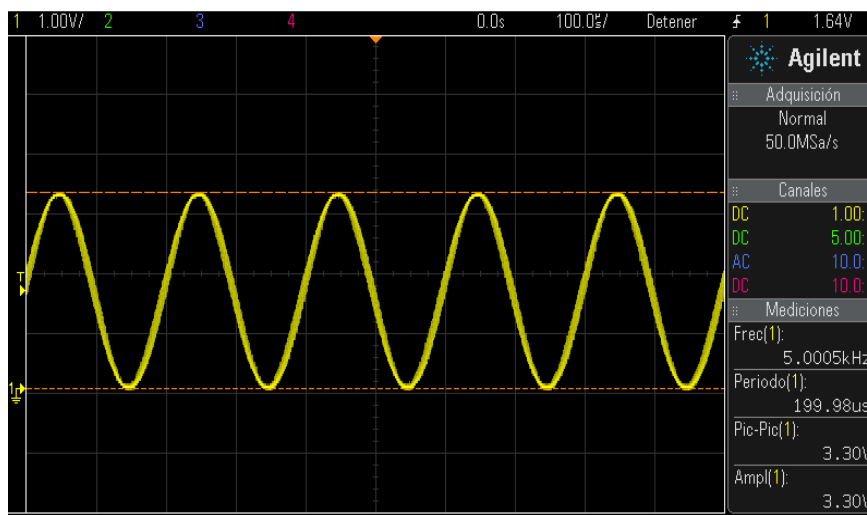


Figura 66. Onda sinusoidal de 5KHz generada en el Canal B del módulo y medida con el osciloscopio Agilent

En la tabla 11 se muestra el error al medir la señal sinusoidal utilizando el osciloscopio Agilent DSO-X 2014A.

Tabla 11

Cálculo del error de la señal sinusoidal generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) DSO-X 2014 ^a	Voltaje de salida (v) DSO-X 2014 ^a	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	3.3	10	3.4	0	0.1
1	100	3.3	100.01	3.4	0.01	0.1
2	500	3.3	500.01	3.4	0.01	0.1
3	1000	3.3	1000	3.4	0	0.1
4	5000	3.3	5010	3.4	0.01	0.1
%Error Total					0.006	0.1

En La figura 67 se muestra una onda triangular generada en el canal B del módulo de 5KHz y visualizada en el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a.

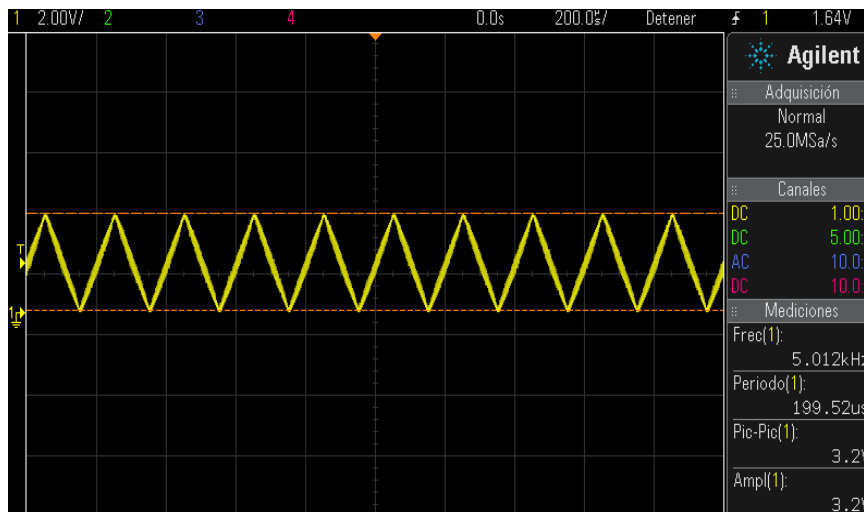


Figura 67. Onda triangular de 5KHz generada en el Canal B del módulo y medida con el osciloscopio Agilent

En la tabla 12 se muestra el error al medir la señal triangular utilizando el osciloscopio Agilent.

Tabla 12

Cálculo del error de la señal triangular generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) DSO-X 2014 ^a	Voltaje de salida (v) DSO-X 2014 ^a	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	3.3	10.04	3.4	0.04	0.04
1	100	3.3	100.01	3.4	0.01	0.04
2	500	3.3	500	3.4	0	0.04
3	1000	3.3	1000	3.4	0	0.04
4	5000	3.3	5012	3.4	0.012	0.04
%Error Total					0.0124	0.04

En La figura 68 se muestra una onda cuadrada generada en el canal B del módulo de 5KHz y visualizada en el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a.

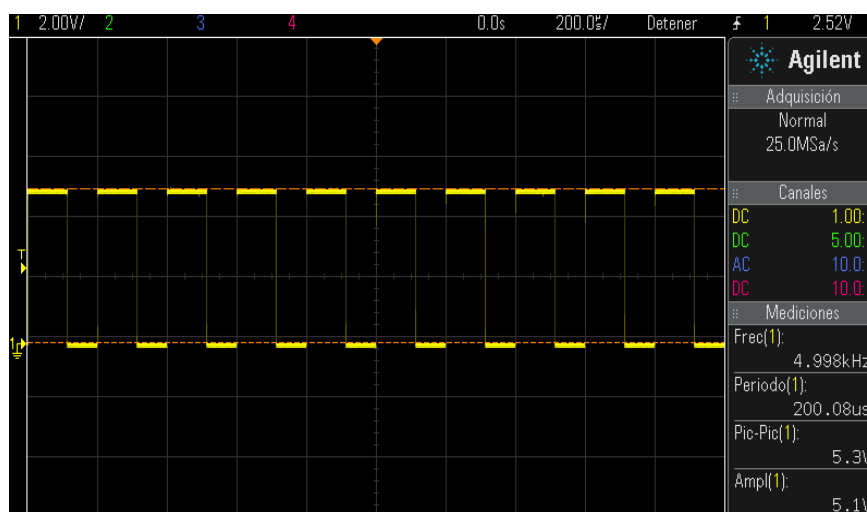


Figura 68. Onda cuadrada de 5KHz generada en el Canal B del módulo y medida con el osciloscopio Agilent

En la tabla 13 se muestra el error al medir la señal cuadrada utilizando el osciloscopio Agilent.

Tabla 13

Cálculo del error de la señal cuadrada generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) DSO-X 2014 ^a	Voltaje de salida (v) DSO-X 2014 ^a	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	5.1	10	5.3	0	0.2
1	100	5.1	100	5.3	0	0.2
2	500	5.1	500	5.3	0	0.2
3	1000	5.1	1000	5.3	0	0.2
4	5000	5.1	4999	5.3	0.001	0.2
%Error Total					0.0004	0.2

Luego de terminar las mediciones con el osciloscopio Agilent, se procede a realizar el mismo procedimiento utilizando el módulo didáctico, la figura 69 muestra la onda sinusoidal de 5KHz, visualizada en el osciloscopio del módulo didáctico.

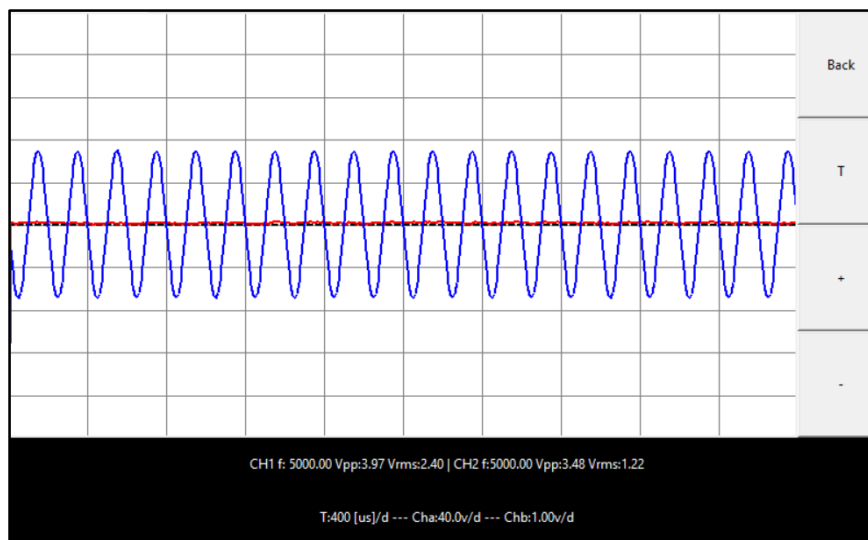


Figura 69. Onda sinusoidal de 5KHz generada en el Canal B y medida con el módulo

En la tabla 14 se muestra el error al medir la señal sinusoidal con el osciloscopio del módulo.

Tabla 14

Cálculo del error de la señal sinusoidal generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	3.3	10	3.47	0	0.17
1	100	3.3	100	3.47	0	0.17
2	500	3.3	500	3.49	0	0.19
3	1000	3.3	1000	3.48	0	0.18
4	5000	3.3	5000	3.48	0	0.18
%Error Total					0	0.166

La figura 70 se muestra la onda triangular de 5KHz, visualizada en el osciloscopio del módulo didáctico.

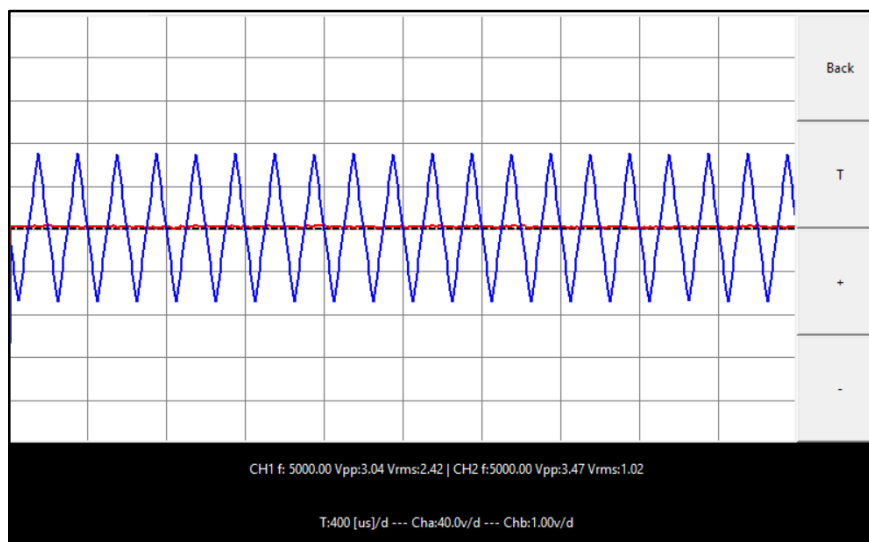


Figura 70. Onda triangular de 5KHz generada en el Canal B y medida con el módulo

En la tabla 15 se muestra el error al medir la señal triangular utilizando el osciloscopio del módulo.

Tabla 15

Cálculo del error de la señal triangular generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	3.3	10	3.49	0	0.19
1	100	3.3	100	3.49	0	0.19
2	500	3.3	500	3.48	0	0.18
3	1000	3.3	1000	3.47	0	0.17
4	5000	3.3	5000	3.47	0	0.17
%Error Total					0	0.18

La figura 71 se muestra la onda cuadrada de 5KHz visualizada en el osciloscopio del módulo didáctico.

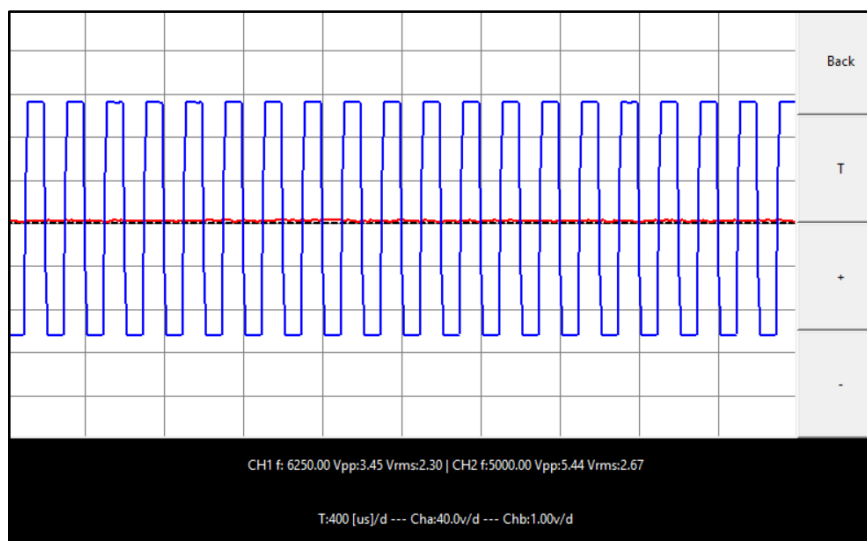


Figura 71. Onda cuadrada de 5KHz generada en el Canal B y medida con el módulo

En la tabla 16 se muestra el error al medir la señal cuadrada utilizando el osciloscopio del módulo.

Tabla 16

Cálculo del error de la señal cuadrada generada en el Canal B del módulo medido con el osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	Frecuencia Medida (Hz) Módulo	Voltaje de salida (v) Módulo	%Error Frecuencia	%Error Voltaje
0	10	5.1	10	5.43	0	0.33
1	100	5.1	100	5.45	0	0.35
2	500	5.1	500	5.43	0	0.33
3	1000	5.1	1000	5.44	0	0.34
4	5000	5.1	5000	5.44	0	0.34
%Error Total					0	0.338

4.2.2. Osciloscopio del módulo didáctico

Se procede a realizar mediciones con el osciloscopio del módulo utilizando el canal B para Corriente continua (C.C), y el canal A para Corriente alterna (C.A). Las ondas de prueba se obtienen del Generador de Funciones Agilent 33500B; para la visualización de las señales se realizaron pruebas utilizando dos tipos de interpolación: lineal y sinusoidal, implementados para minimizar los problemas que se presentaron al aumentar la frecuencia. Para señales con frecuencias desde 1Hz hasta 120KHz, se utiliza la interpolación lineal y para señales con frecuencias en el rango de 121KHz hasta 425KHz se utiliza la interpolación sinusoidal, La figura 72 muestra una onda sinusoidal generada en el equipo Agilent 33500B con una frecuencia de 75 KHz y 6Vpp visualizada con interpolación lineal.

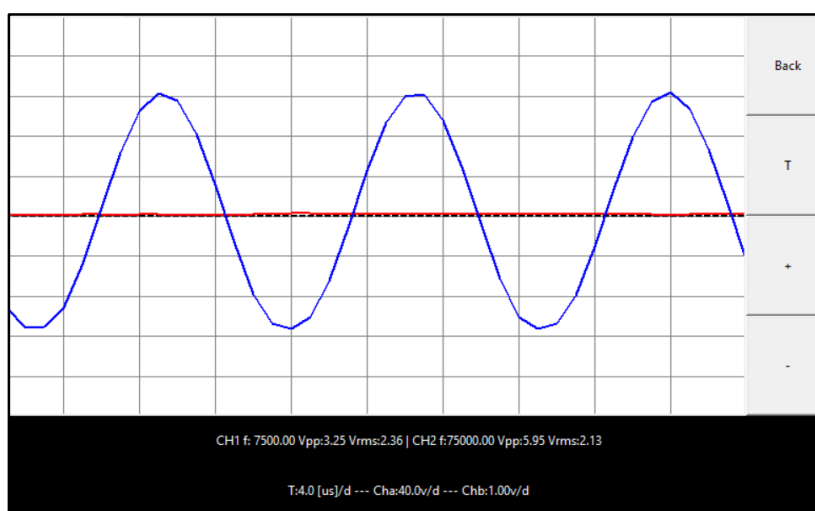


Figura 72. Onda sinusoidal de 75KHz visualizada con interpolación lineal

La figura 73 muestra una onda sinusoidal generada en el equipo Agilent 33500B con una frecuencia de 300 KHz y 6Vpp visualizada con interpolación sinusoidal en el osciloscopio del módulo.

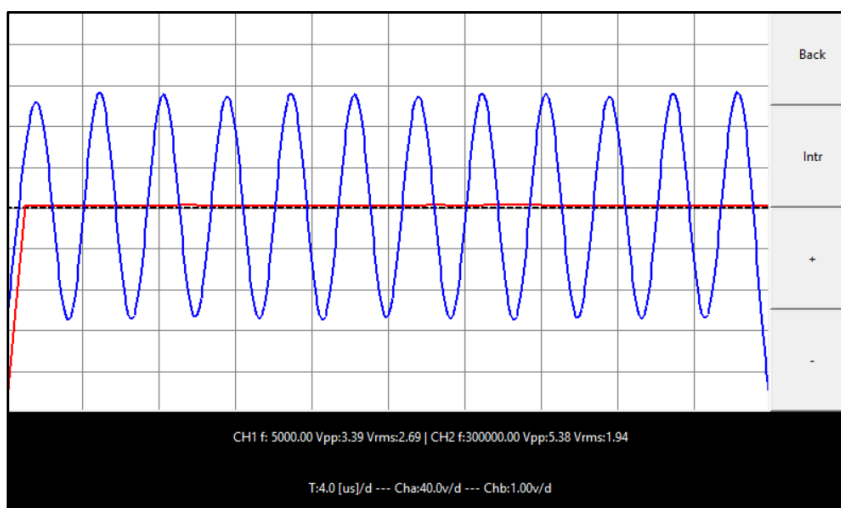


Figura 73. Onda sinusoidal de 300KHz visualizada con interpolación sinusoidal

La tabla 17 muestra los resultados de las mediciones obtenidas para cada frecuencia, Vpp y Vrms.

Tabla 17

Medición de la señal sinusoidal generada con el generador Agilent 33500B medido con el Canal B del osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) 33500B	Voltaje Generado V _{PP} 33500B	Voltaje Generado V _{RMS} 33500B	Frecuencia Medida (Hz) Módulo	Voltaje Medido V _{PP} Módulo	Voltaje Medido V _{RMS} Módulo
0	10000	6	2.12	10000	5.93	2.14
1	50000	6	2.12	50000	5.93	2.13
2	100000	6	2.12	100000	5.98	2.14
3	200000	2	0.70	200000	2.10	0.65
4	425000	2	0.70	425000	1.82	0.65

En la tabla 18 se detalla el error para cada de las mediciones realizadas por el módulo.

Tabla 18

Cálculo del error de la señal sinusoidal medida con el osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	%Error Frecuencia	%Error V_{PP}	%Error V_{RMS}
0	0	0.07	0.02
1	0	0.07	0.01
2	0	0.02	0.02
3	0	0.1	0.05
4	0	0.18	0.05
%Error Total	0	0.088	0.03

La figura 74 se muestra una onda triangular generada en el equipo Agilent 33500B de 50 KHz con 6Vpp visualizada con interpolación lineal en el osciloscopio del módulo, la gráfica se puede visualizar de forma clara en un rango de 1Hz a 100KHz.

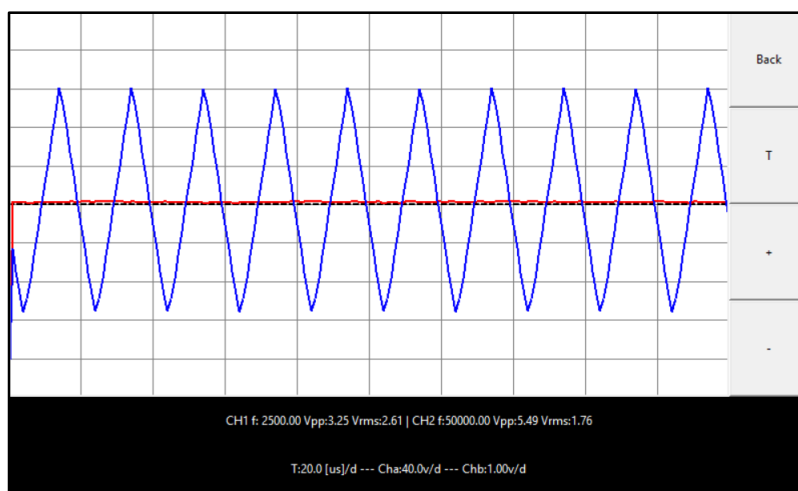


Figura 74. Onda triangular de 50KHz visualizada con interpolación lineal

En la tabla 19 se muestra los resultados de las mediciones para una señal triangular utilizando el osciloscopio del módulo.

Tabla 19

Medición de la señal triangular generada con el generador Agilent 33500B medido con el Canal B del osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) 33500B	Voltaje Generado V_{PP} 33500B	Voltaje Generado V_{RMS} 33500B	Frecuencia Medida (Hz) Módulo	Voltaje Medido V_{PP} Módulo	Voltaje Medido V_{RMS} Módulo
0	10000	6	2.12	10000	5.91	2.13
1	25000	6	2.12	25000	5.92	2.13
2	50000	6	2.12	50000	5.74	2.14
3	100000	2	0.70	100000	1.93	0.74

En la tabla 20 se detalla el error para cada una de las mediciones realizadas por el módulo.

Tabla 20

Cálculo del error de la señal triangular medida con el osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	%Error Frecuencia	%Error V_{PP}	%Error V_{RMS}
0	0	0.09	0.01
1	0	0.08	0.01
2	0	0.26	0.02
3	0	0.07	0.04
%Error Total	0	0.125	0.02

La figura 75 muestra una onda cuadrada generada en el equipo Agilent 33500B de 50 KHz con 6Vpp visualizada con interpolación lineal en el osciloscopio del módulo, la gráfica se puede visualizar de forma clara en un rango de 1Hz a 100KHz.

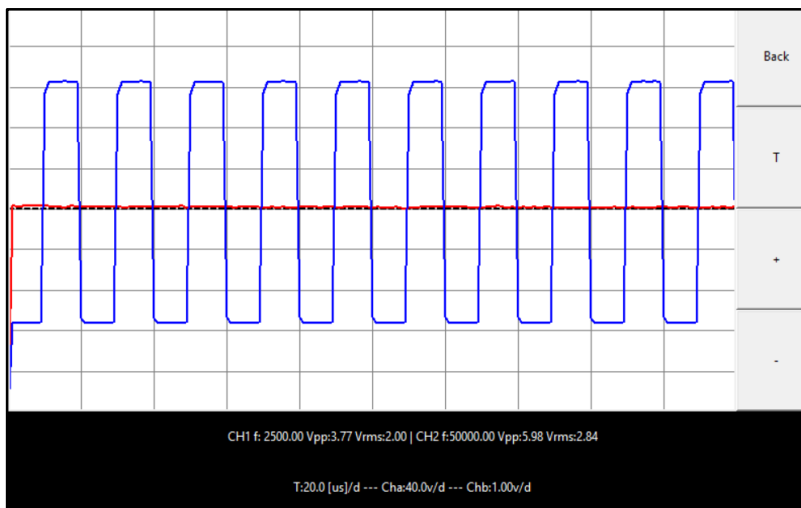


Figura 75. Onda cuadrada de 50KHz visualizada con interpolación lineal

En la tabla 21 se muestra los resultados para la medición de una señal cuadrada utilizando el osciloscopio del módulo.

Tabla 21

Medición de la señal cuadrada generada en el equipo Agilent 33500B medido con el Canal B del osciloscopio del módulo

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) 33500B	Voltaje Generado V_{PP} 33500B	Voltaje Generado V_{RMS} 33500B	Frecuencia Medida (Hz) Módulo	Voltaje Medido V_{PP} Módulo	Voltaje Medido V_{RMS} Módulo
0	5000	6	2.12	5000	5.99	2.90
1	10000	6	2.12	10000	6.01	2.88
2	25000	6	2.12	25000	5.99	2.95
3	75000	2	0.70	75000	1.98	0.88
4	100000	2	0.70	100000	1.70	0.87

En la tabla 22 se detalla el error para cada una de las mediciones realizadas por el módulo.

Tabla 22

Cálculo del error de la señal cuadrada medida con el osciloscopio del módulo

N° de mediciones	%Error Frecuencia	%Error V_{PP}	%Error V_{RMS}
0	0	0.01	0.78
1	0	0.01	0.76
2	0	0.01	0.83
3	0	0.02	0.18
4	0	0.3	0.17
%Error Total	0	0.17	0.544

La figura 75 muestra una onda sinusoidal generada en el equipo Agilent 33500B de 100 KHz, visualizada en el osciloscopio Agilent.

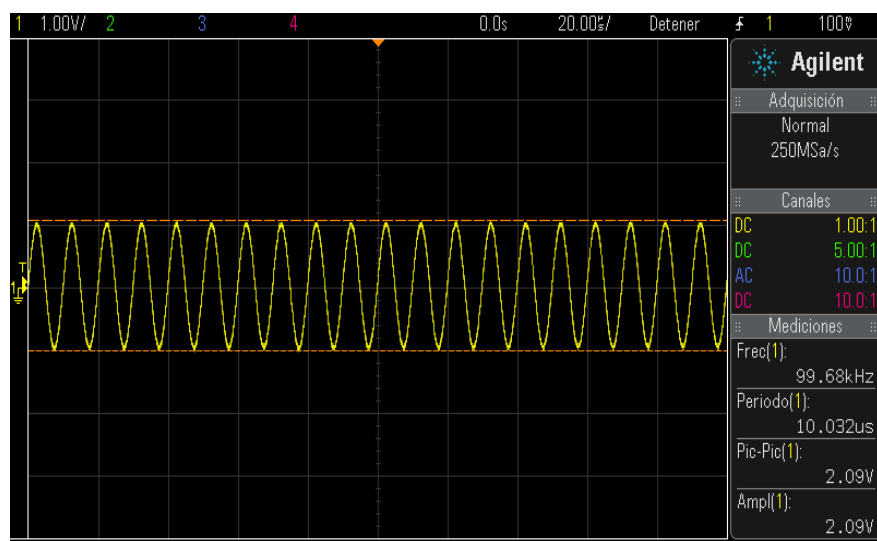


Figura 76. Onda cuadrada de 100KHz medida con el osciloscopio Agilent

En la tabla 23 se muestran los resultados para la medición de una señal sinusoidal utilizando el osciloscopio Agilent.

Tabla 23

Señal sinusoidal generada en el equipo Agilent 33500B y medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

N° de mediciones	Frecuencia Generada	Voltaje Generado	Voltaje Generado	Frecuencia Medida	Voltaje Medido	Voltaje Medido
	(Hz) 33500B	V _{PP} 33500B	V _{RMS} 33500B	(Hz) DSO-X 2014 ^a	V _{PP} DSO-X 2014 ^a	V _{RMS} DSO-X 2014 ^a
0	10000	6	2.12	9990	6	2.07
1	50000	6	2.12	49980	5.99	2.07
2	100000	6	2.12	99840	5.99	2.07
3	200000	2	0.70	199680	1.99	0.70
4	425000	2	0.70	425000	2	0.70

En la tabla 24 se detalla el error para cada una de las mediciones realizadas por el osciloscopio Agilent.

Tabla 24

Cálculo del error de la señal cuadrada medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

N° de mediciones	%Error Frecuencia	%Error V _{PP}	%Error V _{RMS}
0	0.01	0	0.05
1	0.02	0.01	0.05
2	0.16	0.01	0.05
3	0.32	0.01	0
4	0	0	0
%Error Total	0.102	0.006	0.03

La figura 77 muestra una onda triangular generada en el equipo Agilent 33500B de 50KHz, visualizada en el osciloscopio Agilent.

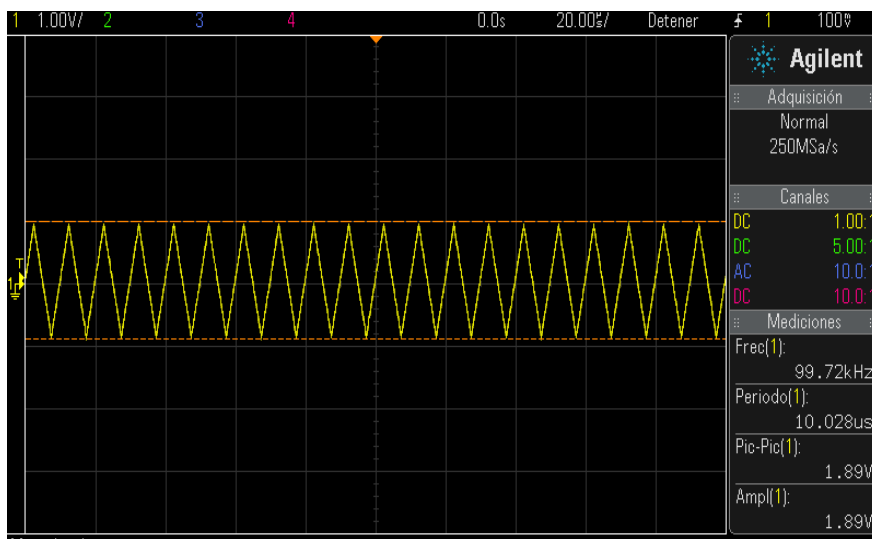


Figura 77. Onda triangular de 50KHz medida con el osciloscopio Agilent

En la tabla 25 se muestran los resultados para la medición de una señal sinusoidal utilizando el osciloscopio Agilent.

Tabla 25

Señal triangular generada en el equipo Agilent 33500B y medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 5014^a

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) 33500B	Voltaje Generado V_{PP} 33500B	Voltaje Generado V_{RMS} 33500B	Frecuencia Medida (Hz) DSO-X 2014 ^a	Voltaje Medido V_{PP} DSO-X 2014 ^a	Voltaje Medido V_{RMS} DSO-X 2014 ^a
0	10000	6	2.12	9960	5.9	2.14
1	25000	6	2.12	24900	5.9	2.14
2	50000	6	2.12	49900	5.8	2.14
3	100000	2	0.70	99640	2	0.70

En la tabla 26 se detalla el error para cada una de las mediciones realizadas por el osciloscopio Agilent.

Tabla 26

Cálculo del error de la señal triangular medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

Nº de mediciones	%Error Frecuencia	%Error V _{PP}	%Error V _{RMS}
0	0.04	0.1	0.02
1	0.1	0.1	0.02
2	0.1	0.2	0.02
3	0.36	0	0
%Error Total	0.15	0.1	0.015

La figura 78 muestra una onda cuadrada generada en el equipo Agilent 33500B de 50 KHz, visualizada en el osciloscopio Agilent.

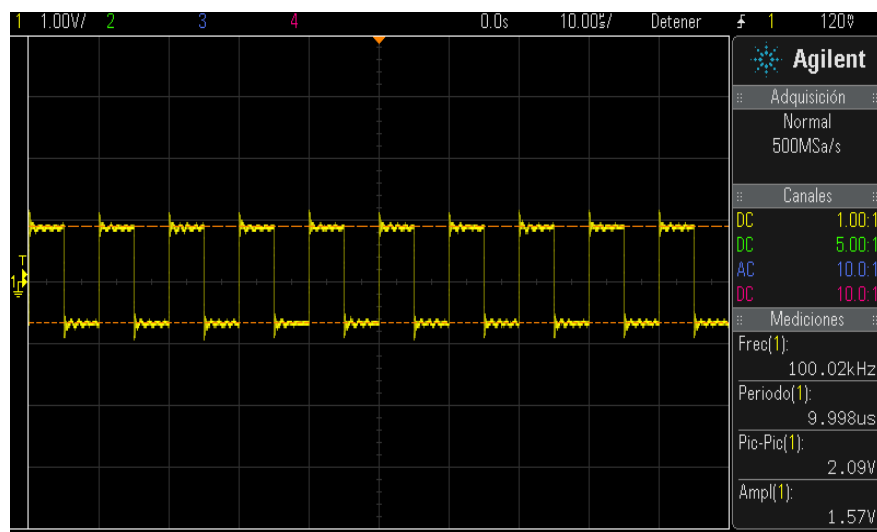


Figura 78. Onda triangular de 50KHz medida con el osciloscopio Agilent

En la tabla 27 se muestran los resultados para la medición de una señal cuadrada utilizando el osciloscopio Agilent.

Tabla 27

Señal cuadrada generada en el equipo Agilent 33500B y medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz) 33500B	Voltaje Generado V _{PP} 33500B	Voltaje Generado V _{RMS} 33500B	Frecuencia Medida (Hz) DSO-X 2014 ^a	Voltaje Medido V _{PP} DSO-X 2014 ^a	Voltaje Medido V _{RMS} DSO-X 2014 ^a
0	10000	6	2.12	10000	6	2.90
1	50000	6	2.12	49980	6	2.90
2	100000	6	2.12	99980	6.01	2.90
3	200000	2	0.70	199900	1.99	0.98
4	500000	2	0.70	496700	2	0.98

En la tabla 28 se detalla el error para cada una de las mediciones realizadas por el osciloscopio Agilent.

Tabla 28

Cálculo del error de la señal cuadrada medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

Nº de mediciones	%Error Frecuencia	%Error V _{PP}	%Error V _{RMS}
0	0	0	0.78
1	0.02	0	0.78
2	0.02	0.01	0.78
3	0.1	0.01	0.28
4	3.3	0	0.28
%Error Total	0.688	0.04	0.58

Posteriormente se utilizó un multímetro digital Agilent U1232A para medir el V_{rms} de la red, en la ecuación 19 se indica el valor del V_{pp}, la frecuencia con la que se trabaja en Ecuador es de 60Hz.

$$V_{pp} = V_{RMS} * (2\sqrt{2}) = 128.2(2\sqrt{2})v = 362.60v \quad (19)$$

La figura 79 se muestra los parámetros medidos en el osciloscopio Agilent.

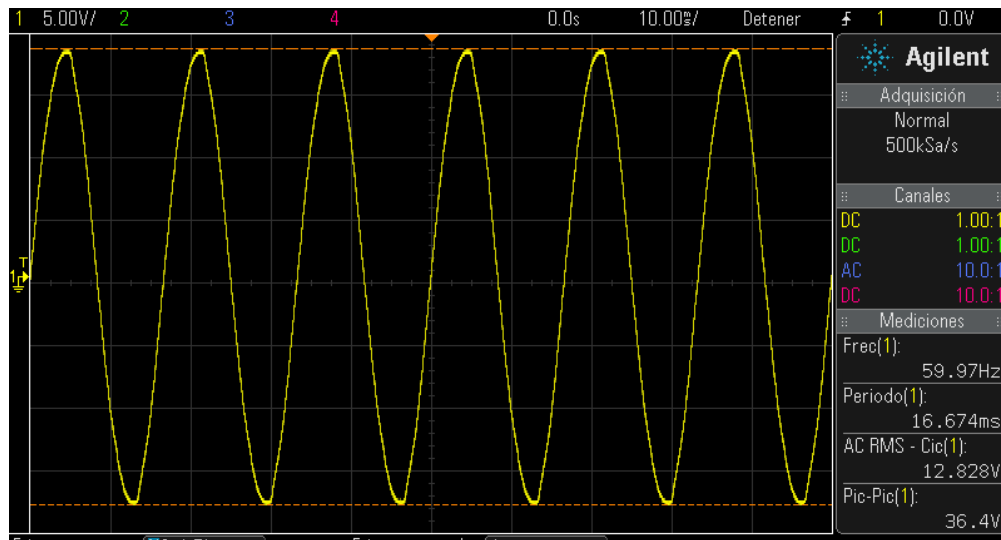


Figura 79. Onda sinusoidal de la red medida con el osciloscopio Agilent

El canal A del osciloscopio del módulo permite medir el voltaje en (C.A), la figura 80 muestra los resultados obtenidos.

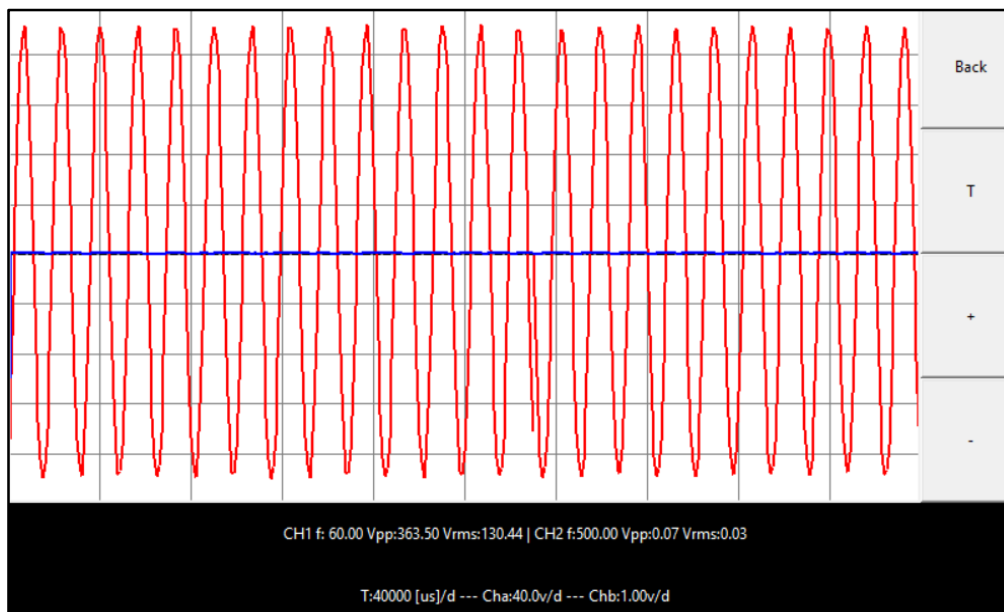


Figura 80. Onda sinusoidal de la red medida con el Canal A del osciloscopio del módulo

El error obtenido al medir la señal en C.A utilizando el Canal A del módulo se detalla en la tabla 29.

Tabla 29

Cálculo del error de la señal de la red medida con el osciloscopio del módulo

Frecuencia Hz	V _{RMS} de la Red	V _{PP} de la Red	Fr Medida (Hz)	V _{RMS} Medida	V _{PP} Medida	%Error Fr	%Error V _{RMS}	%Error V _{PP}
60	128.2	362.60	60	129.09	362.15	0	0.89	0.45
Error Total						0	0.89	0.45

En la tabla 30 se muestra el error obtenido al medir la señal en C.A utilizando el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a para la medición del voltaje de la red.

Tabla 30

Cálculo del error de la señal cuadrada medida con el osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a

Frecuencia Hz	V _{RMS} de la Red	V _{PP} de la Red	Fr Medida (Hz)	V _{RMS} Medida	V _{PP} Medida	%Error Fr	%Error V _{RMS}	%Error V _{PP}
60	128.2	362.60	59.97	128.28	364	0.03	0.08	1.4
Error Total						0.03	0.08	1.4

4.2.3. Analizador de espectro de frecuencia

Para validar el analizador de espectro de frecuencia se desarrolló una aplicación en el software Matlab R2018b, y se la muestra en la figura 81, el usuario puede ingresar el valor de la frecuencia y calcular el valor de la distorsión armónica total en porcentaje %THD, para las tres formas de onda, además de poder visualizar los armónicos para la frecuencia ingresada; el rango que se puede ingresar a la aplicación es de 1Hz a 480KHz.

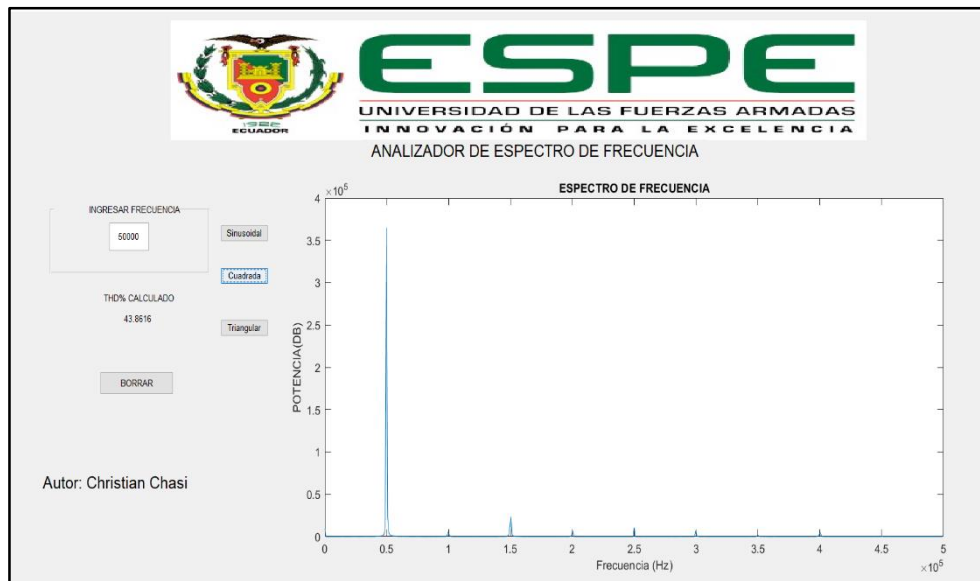


Figura 81. Aplicación desarrollada en el Guide de Matlab R2018b

La figura 82 muestra los armónicos de una onda sinusoidal de 75KHz con el valor de %THD, obtenidos en el módulo didáctico.

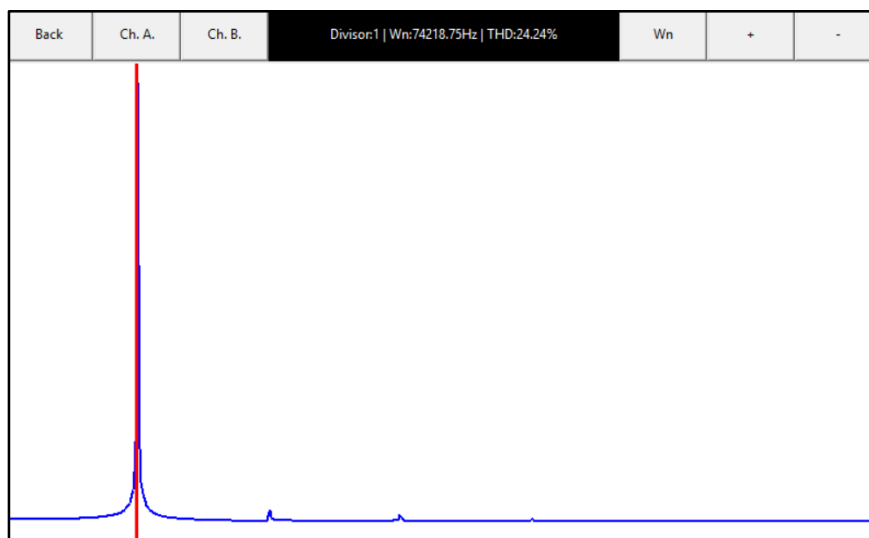


Figura 82. Espectro de frecuencia de una onda sinusoidal a 75KHz (Módulo)

La figura 83 se muestra los armónicos para una onda sinusoidal, obtenidos en el software Matlab R2018b.

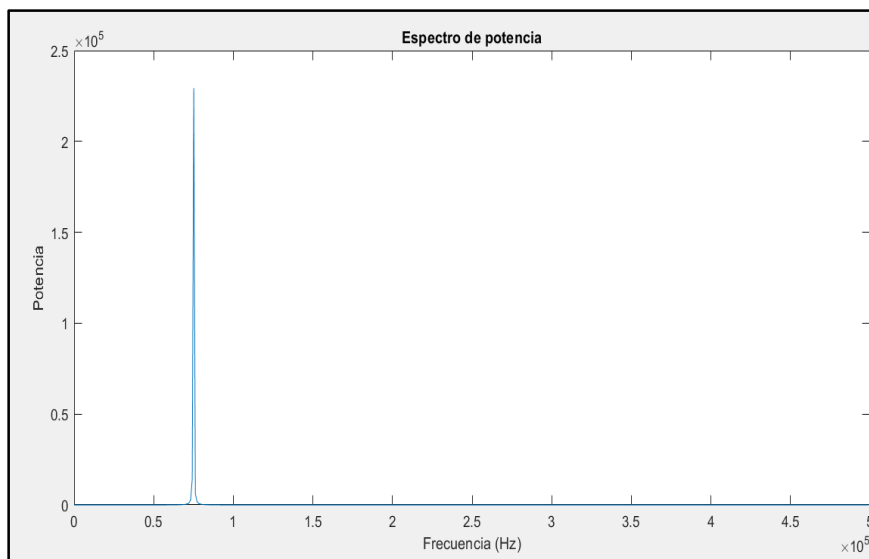


Figura 83. Espectro de frecuencia de una onda sinusoidal a 75KHz (Matlab R2018b)

La figura 84 muestra los armónicos de una onda triangular de 75KHz con el valor de %THD, obtenidos en el módulo didáctico.

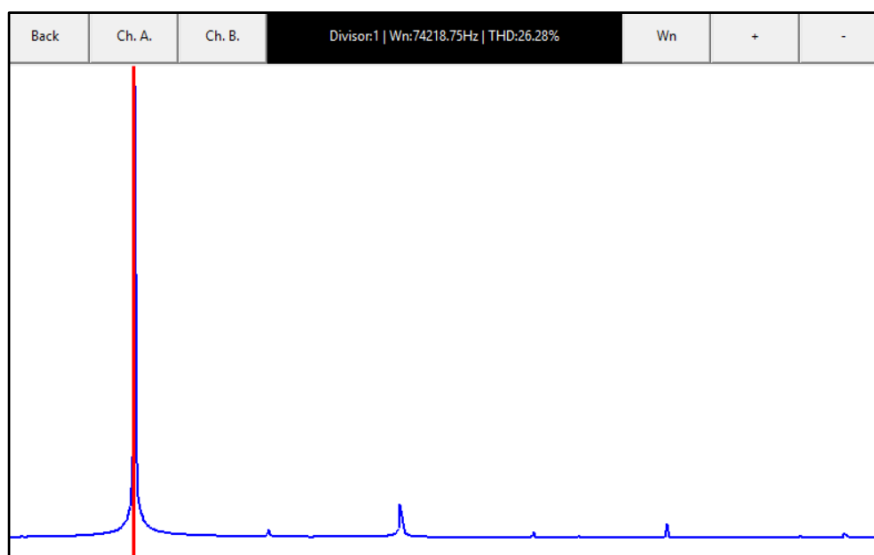


Figura 84. Espectro de frecuencia de una onda triangular a 75KHz (Módulo)

La figura 85 se muestra los armónicos para una onda triangular, obtenidos en el software Matlab R2018b.

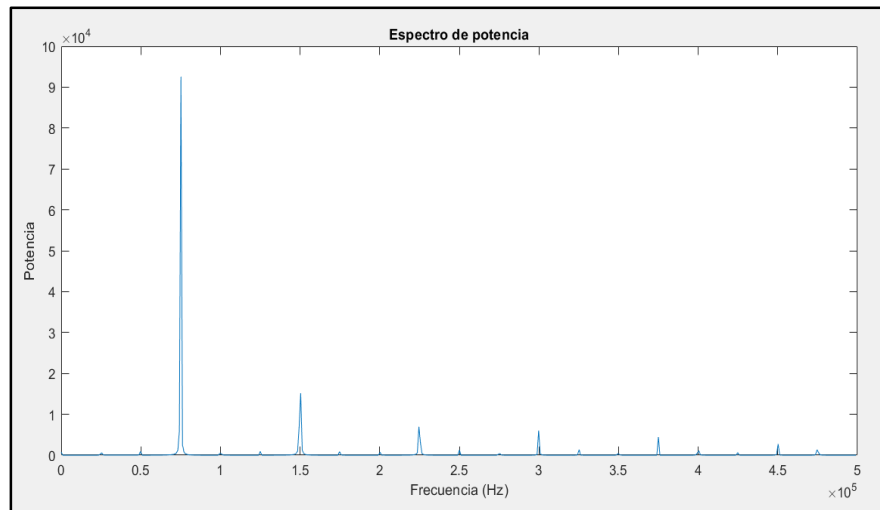


Figura 85. Espectro de frecuencia de una onda triangular a 75KHz (Matlab R2018b)

La figura 86 muestra los armónicos de una onda cuadrada de 75KHz con el valor de %THD, obtenidos en el módulo didáctico.

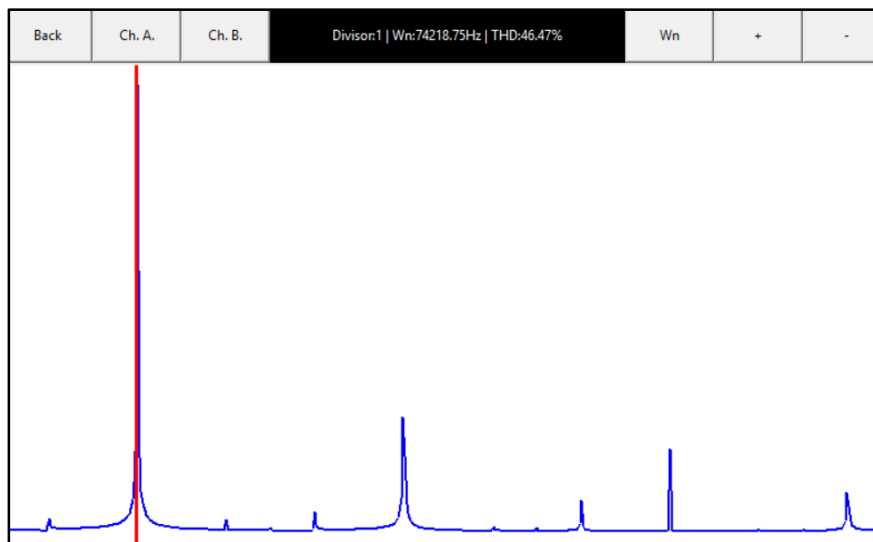


Figura 86. Espectro de frecuencia de una onda cuadrada a 75KHz (Módulo)

La figura 87 muestra los armónicos para una onda cuadrada, obtenidos en el software Matlab R2018b.

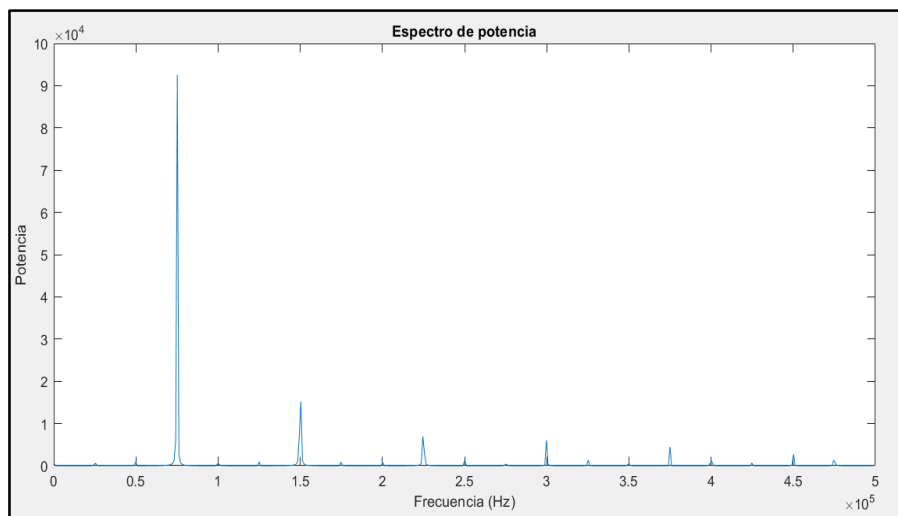


Figura 87. Espectro de frecuencia de una onda cuadrada a 75KHz (Matlab R2015b)

En la tabla 31 se muestra el error del %THD, obtenidos en el analizador del módulo y en el Guide de Matlab R2018b para una señal cuadrada.

Tabla 31

Cálculo del error del %THD de una onda cuadrada

Nº de mediciones	Frecuencia Generada (Hz)	THD Módulo	THD Matlab	%Error THD Módulo
	33500B			
0	10000	26.66	25.89	0.77
1	50000	22.91	21.99	0.92
2	75000	26.40	26.00	0.40
3	100000	36.28	35.69	0.59
%Error Total				0.67

4.3. Análisis de resultados

En la tabla 32 se muestra el error total al realizar las mediciones de las ondas generadas en el canal A del módulo, utilizando el osciloscopio del mismo y el equipo Agilent DSO-X 5014^a, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 32

Comparación de errores de las mediciones de las ondas generadas en el canal A del módulo utilizando el osciloscopio del módulo y el equipo Agilent DSO-X 5014^a

Formas de Ondas	Agilent DSO – X 2014A		Módulo Didáctico	
	%Error Total (Fr)	%Error Total (V)	%Error Total (Fr)	%Error Total (V)
Sinusoidal	0.076	0.034	0	0.21
Triangular	0.318	0.004	0	0.204
Cuadrada	0.07	0.2	0	0.342

Una vez finalizado el análisis para el generador del Canal A del sistema, se puede observar que el módulo didáctico presenta un error de medición de frecuencia de valor 0 para los tres tipos de señales sinusoidal triangular y cuadrada, en cuanto al error de medición de voltaje se tiene para la señal sinusoidal un valor de 0.21 para la señal triangular 0.204 y para la señal cuadrada 0.342, en comparación con los valores del error obtenidos en el equipo Agilent DSO-X 5014^a, el módulo presenta errores bajos de medición, por lo tanto el sistema fue validado con éxito.

En la tabla 33 se muestra el error total al realizar las mediciones de las ondas generadas en el canal B del módulo, utilizando el osciloscopio del mismo y el equipo Agilent DSO-X 5014^a, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 33

Comparación de errores de las mediciones de las ondas generadas en el canal B del módulo utilizando el osciloscopio del módulo y el equipo Agilent DSO-X 5014^a

Formas de Ondas	Agilent DSO – X 2014A		Módulo Didáctico	
	%Error Total (Fr)	%Error Total (V)	%Error Total (Fr)	%Error Total (V)
Sinusoidal	0.006	0.1	0	0.166
Triangular	0.0124	0.04	0	0.18
Cuadrada	0.0004	0.2	0	0.338

Una vez finalizado el análisis para el generador del Canal B del sistema, se puede observar que el módulo didáctico presenta un error de medición de frecuencia de valor %0 para los tres tipos de señales sinusoidal triangular y cuadrada, en cuanto al error de medición de voltaje se tiene para la señal sinusoidal un valor de 0.166 para la señal triangular 0.18 y para la señal cuadrada 0.338, en comparación con los valores del error obtenidos en el equipo Agilent DSO-X 5014^a, el módulo presenta errores bajos de medición, por lo tanto el sistema fue validado con éxito.

En la tabla 34 se muestra el error total al realizar las mediciones de las ondas generadas en el equipo Agilent 33500B, utilizando el osciloscopio del módulo y el equipo Agilent DSO-X 5014^a, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 34

Comparación de errores de las mediciones de las ondas generadas en el equipo Agilent 33500B utilizando el osciloscopio del módulo y el equipo Agilent DSO-X 5014^a

Formas de onda	Agilent DSO-X 2014 ^a			Módulo Didáctico		
	%Error Total (Fr)	%Error Total V_{PP}	%Error Total V_{RMS}	%Error Total (Fr)	%Error Total V_{PP}	%Error Total V_{RMS}
Sinusoidal	0.102	0.006	0.03	0	0.088	0.03
Triangular	0.15	0.1	0.015	0	0.125	0.02
Cuadrada	0.688	0.04	0.58	0	0.17	0.544

Al finalizar el análisis se observa que los errores de medición del módulo didáctico para cada una de las señales, presentan valores muy bajos y al compararlas con los valores obtenidos en el equipo Agilent DSO-X 5014^a, el sistema didáctico queda validado al no presentar una gran diferencia en cuanto a los valores de medición.

En la tabla 35 se muestra los errores obtenidos para las mediciones de la red utilizando el osciloscopio Agilent DSO-X 5014^a y el Canal A del osciloscopio del módulo didáctico.

Tabla 35

Comparación de errores de las mediciones de la red entre el osciloscopio del módulo y el osciloscopio DSO-X 2014^a

Señal de la Red	Agilent DSO – X 2014A			Módulo Didáctico		
	%Error Total (Fr)	%Error Total V_{PP}	%Error Total V_{RMS}	%Error Total (Fr)	%Error Total V_{PP}	%Error Total V_{RMS}
Sinusoidal	0.03	1.4	0.08	0	0.45	0.89

Al finalizar el análisis, se observa que los errores obtenidos para los diferentes parámetros en el osciloscopio del módulo son muy bajos, y en relación con el equipo Agilent 33500B, no existe una gran diferencia, por lo que el sistema didáctico fue validado con éxito.

Para la sección del analizador de espectro de frecuencia se obtuvo en la señal sinusoidal un error total del %THD de 0.67, de forma que el módulo fue validado con éxito con la aplicación desarrollada en Matlab R2018b, para las diferentes formas de onda utilizadas.

4.4. Comprobación de la hipótesis

4.4.1. Usabilidad

Cuando se ha terminado la implementación del sistema didáctico, se procede a la comprobación de la Usabilidad mediante encuestas aplicadas a 21 estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica. Estas pruebas permitieron conocer la facilidad en la

utilización del sistema como una herramienta de enseñanza y aprendizaje. Se realizaron 4 preguntas cada una debía responderse una calificación entre 1 y 10, en la tabla 36 se muestra la puntuación dada de acuerdo al nivel de aceptación.

Tabla 36

Escala Likert para las preguntas de la encuesta

Puntuación	Nivel de aceptación			
	Pregunta 1	Pregunta 2	Pregunta 3	Pregunta 4
1 y 2	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indiferente
3 y 4	No es útil	No es intuitivo	No es capaz	No ayuda al aprendizaje
5 y 6	Tal vez sea útil	Poco intuitivo	Medianamente capaz	De poca ayuda al aprendizaje
7 y 8	Es útil	Es intuitivo	Es capaz	Ayuda al aprendizaje
9 y 10	Muy útil	Muy intuitivo	Muy capaz	Muy útil para el aprendizaje

La figura 88, muestra los resultados obtenidos para la primera pregunta.

1. ¿El módulo didáctico es sencillo de utilizar?

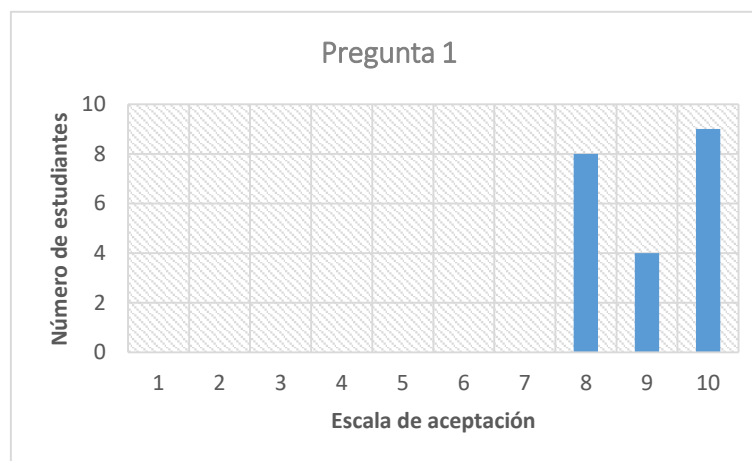


Figura 88. Resultados de la pregunta 1

El 38.01 % que equivale a 8 estudiantes, acepta el módulo didáctico como útil mientras que el 61.89% que equivale a 13 estudiantes acepta el módulo didáctico como un equipo de gran utilidad.

La figura 89, muestra los resultados obtenidos para la segunda pregunta.

2. ¿La interfaz gráfica del módulo didáctico es amigable e intuitivo?

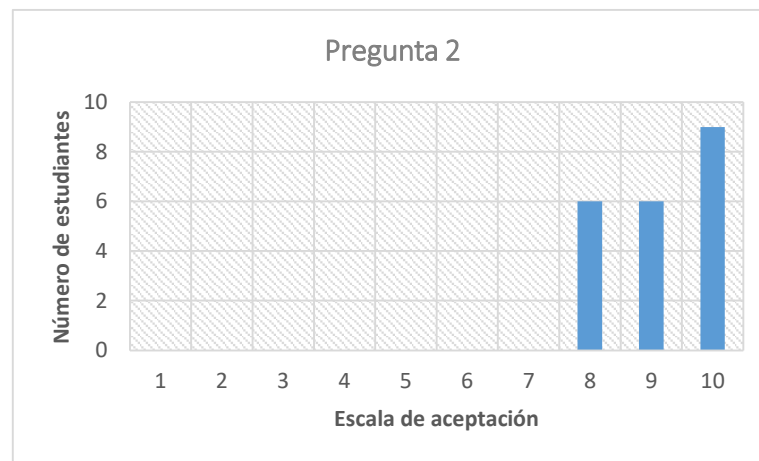


Figura 89. Resultados de la pregunta 2

El 28,57 % que equivale a 6 estudiantes, acepta el módulo didáctico como intuitivo mientras que el 71.42% que equivale a 15 estudiantes acepta el módulo didáctico como muy intuitivo.

La figura 90, muestra los resultados obtenidos para la tercera pregunta.

3. ¿Es capaz de realizar mediciones en el sistema didáctico de entrenamiento?

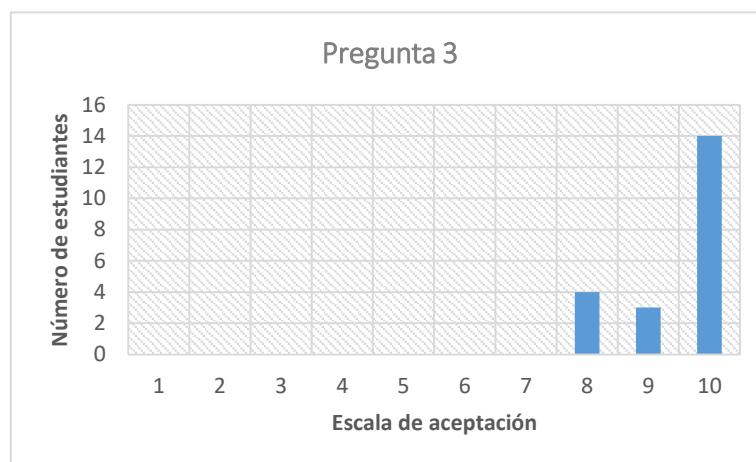


Figura 90. Resultados de la pregunta 3

El 19.04% que equivale a 4 estudiantes, es capaz de utilizar el módulo didáctico para realizar mediciones, y el 80.95% corresponde a los 17 estudiantes que no tuvieron ningún problema para realizar mediciones en el módulo didáctico.

La figura 91, muestra los resultados obtenidos para la cuarta pregunta.

4. ¿El sistema didáctico contribuye al aprendizaje práctico para los estudiantes de Universidad de las Fuerzas Armadas

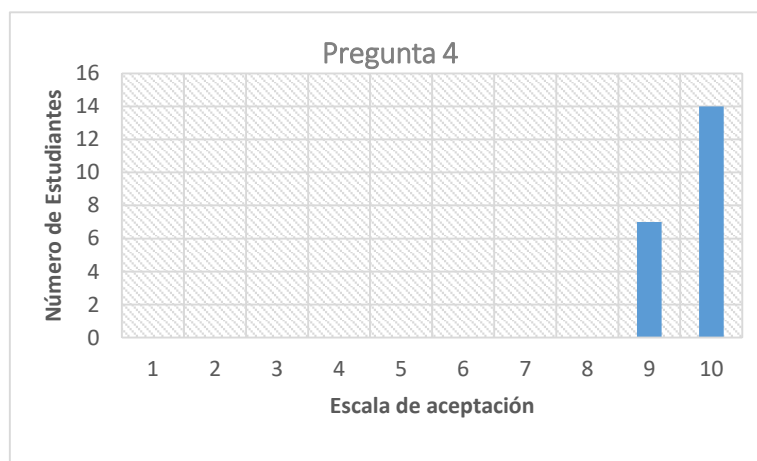


Figura 91. Resultados de la pregunta 4

El 100% que equivale a los 21 estudiantes, aceptan al módulo como una herramienta que ayuda a fortalecer sus conocimientos prácticos.

De acuerdo a los resultados obtenidos la hipótesis queda validada, al demostrarse que el módulo didáctico ayuda a mejorar el proceso de enseñanza aprendizaje de los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

4.4.2. Costos

Se procede a realizar una comparación de costos de los equipos comerciales y los utilizados para implementar el módulo didáctico. En la tabla 37 se muestra el costo del osciloscopio Agilent DSO-X 2014^a, y el generador de señales Agilent 33500B.

Tabla 37

Análisis de costos de los equipos del laboratorio

Cantidad	Detalle	Valor Unitario (Dólares)	Valor Total (Dólares)
1	Osciloscopio Agilent DSO-X 2014 ^a	5000,00	5000,00
1	Generador de onda Agilent 33500B	2000,00	2000,00
Total			7000,00

En la Tabla 38 se muestra el costo de los elementos que constituyen el módulo didáctico.

Tabla 38
Análisis de costos del módulo didáctico

Cantidad	Detalle	Valor Unitario (Dólares)	Valor Total (Dólares)
1	Tarjeta Artix-7 35T	119,00	119,00
1	Raspberry 3PI	50,00	50,00
1	TFT de 5 pulgadas	65,00	65,00
1	Punta	5,00	5,00
-	Dispositivos Electrónicos	20,00	20,00
1	Estructura del módulo	11,00	11,00
		Total	270,00

Como se puede observar el módulo completo representa un ahorro de 25,93 veces del valor de los equipos comerciales utilizados en el laboratorio, lo que demuestra que se puede diseñar e implementar la propuesta con tecnologías de bajo costo, a lo anterior el objetivo general queda comprobado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se diseñó un módulo didáctico, que presenta las opciones de osciloscopio, generador de funciones y analizador de espectro de frecuencia, basados en los elementos constitutivos de cada uno, utilizando elementos de bajo costo.
- Se implementó el hardware para la adquisición de las señales (sinusoidal, triangular y cuadrada) para Corriente continua y para Corriente alterna, la conversión y acondicionamiento de cada una de las señales se lo realizó en la FPGA Artix-7 35 T, para el generador de señales se obtuvieron frecuencias de 1Hz a 5KHz, en el osciloscopio se puede medir frecuencias hasta los 500KHz, la visualización para la onda senoidal se puede observar desde un rango de frecuencias de 1Hz hasta los 425 KHz para la onda cuadrada desde 1Hz hasta los 100Khz y para la onda triangular desde 1Hz hasta los 100 KHz, utilizando los métodos de interpolación implementados en el módulo, y en el analizador de espectro, se puede observar los armónicos y el valor de la distorsión armónica para cada señal ingresada al módulo.
- Se realizó el procesamiento necesario para cada una de las señales, se utilizó el módulo XDAC, que fue configurado para tener acceso a los dos convertidores que integran al módulo al mismo tiempo, para seleccionar frecuencia de 104 Mhz

necesaria para obtener una frecuencia de conversión de 1000 KSPS, con la finalidad de obtener una frecuencia de medición de 500KHz.

- La interfaz gráfica se desarrolló en la tarjeta Python 3PI, utilizando una TFT de 5 pulgadas se utilizaron los métodos de geometría de cuadrícula y posicionamiento relativo para ubicar cada uno de los buttons, labels y el canvas para cada sección del módulo.
- En las mediciones realizadas por el módulo, para cada una de las opciones se obtuvo un error menor a 1, demostrando así que el módulo implementado tiene gran similitud con los equipos comerciales, y que es de gran utilidad para los docentes y estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE Sede Latacunga.
- Al aumentar el valor de la frecuencia el número de muestras disminuye, y al tener un tiempo de muestreo de 1us, se implementó dos tipos de interpolaciones la lineal para las ondas triangulares y cuadradas y la interpolación sinusoidal para las ondas sinusoidales, de esta forma se mejoró la visualización de las ondas a altas frecuencias.

5.2. Recomendaciones.

- Para el desarrollo de sistemas donde se debe medir valores de frecuencia y de voltaje superiores es necesario la adquisición de tarjetas con mejores prestaciones, para que en futuros trabajos se obtengan rangos de mediciones más altos, y una mejor resolución de las ondas visualizadas, y que serían de gran aporte para el trabajo desarrollado.
- Para la utilización del módulo es necesario conocer los requerimientos propios del proceso, como características y el funcionamiento.
- Para el HMI es necesario conocer los métodos utilizados, como geometría de cuadrícula y posicionamiento relativo, para que el usuario si lo desea pueda cambiar la presentación de acuerdo a sus necesidades.
- Para un mejor uso del equipo es necesario leer la documentación del manual de usuario descrito en el Anexo E.
- Cuando se realice la conexión para medir los voltajes en C.A se debe tener en cuenta; no unir los cables de fase y neutro para evitar daños en el equipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ambardar, A. (2002). *Procesamiento de Señales Analógicas y digitales*. México: Thomson International.

Banggood. (s.f.). *Banggood*. Recuperado el 16 de 06 de 2019, de Banggood: https://es.banggood.com/5-Inch-800-x-480-HDMI-TFT-LCD-Touch-Screen-For-Raspberry-PI-3-Model-B2-Model-BBAB-p-1054289.html?cur_warehouse=CN

CarrodElectrónica. (s.f.). *CarrodElectrónica*. Recuperado el 11 de 06 de 2019, de CarrodElectrónica: <https://www.carrod.mx/products/ci-ttl-seis-inversores-schmitt-trigger-74ls14>

Chen , X., & Chen, J. (2011). Design of an arbitrary waveform signal generator. *ELSEVIER*, 2500 – 2504. Recuperado el 09 de 03 de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811019710>

Comunidad, P. d. (2015). *Website Under Maintenance*. Recuperado el 05 de 01 de 2019, de <http://comunidad.udistrital.edu.co/medidaselectricas/3-3/>

Cortés Osorio, J. A., Chavez Osorio, J. A., Medina A, F. A., & Cortés Osorio , J. A. (12 de Enero de 2007). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OSCILOSCOPIO DIGITAL IMPLEMENTADO EN MATLAB. *Scientia Et Technica*, 489-494. Recuperado el 16 de 05 de 2019, de <https://www.researchgate.net/publication/26544336>

DIGILENT. (08 de 04 de 2016). *DIGILENT*. Recuperado el 16 de 03 de 2019, de

DIGILENT: https://reference.digilentinc.com/_media/reference/programmable-logic/arty/arty_rm.pdf

Domingo Suárez, J. D., & Peña Tellez, J. A. (2017). *Osciloscopio y generador de ondas con un sistema embebido, integrado con dispositivos Android*. Recuperado el 02 de 11 de 2018, de

<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5201/1/tesis.pdf>

EEEGUIDE. (s.f.). *EEEGUIDE*. Recuperado el 05 de 11 de 2018, de

<http://www.eeeguide.com/vertical-amplifier/>

Electrónica, I. (13 de 08 de 2016). *Ingeniería Electrónica*. Recuperado el 15 de 03 de 2019, de <https://ingenieriaelectronica.org/analizador-de-espectros-definicion-tipos-y-caracteristicas/>

Engineering 360. *IEEE GlobalSpec*. Recuperado el 15 de 03 de 2019 de

https://www.globalspec.com/productfinder/data_acquisition_signal_conditioning

Fenández Olmos, J. M. (27 de 12 de 2012). *Tecnun*. Obtenido de

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5176/fichero/2.+C%C3%A1lculos%252FAnexo+IV+Convertidores+de+se%C3%B1al.pdf>

García González , J., & Culala García, P. (s.f.). *DOCPLAYER*. Recuperado el 13 de 11

de 2018, de <https://docplayer.es/8078185-El-osciloscopio-digital.html>

Hickman, I. (2005). *Oscilloscope*. Amsterdam: Elsevier.

Huircán, J. I. (s.f.). *Versión 1.0. Die Ufro*. Recuperado el 20 de 03 de 2018, de <https://core.ac.uk/download/pdf/47281302.pdf>

Jiménez Molano, G. O. (11 de 02 de 2008). *Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado el 15 de 11 de 2018, de Universidad Nacional de Colombia: <http://bdigital.unal.edu.co/975/1/giovannioswaldojimenezmolano.2008.pdf.pdf>

Jiménez, B. (2006). Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. *Modelación y análisis de un sistema híbrido: Un caso de estudio con un sistema de tanques*.

MicrochipTechnology, Inc. (s.f.). *microchip*. Recuperado el 13 de 11 de 2018, de <http://microchipdeveloper.com/adc:adc-acquisition-time#top-of-page>

Miraya, F. (12 de 11 de 2004). *FCEIA - UNR*. Recuperado el 15 de 11 de 2018, de <https://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>

Naylamp Mechatronics. (s.f.). *Naylamp MNaylamp*. Recuperado el 29 de 06 de 2019, de Naylamp Mechatronics: <https://naylampmechatronics.com/sensores-corriente-voltaje/393-transformador-de-voltaje-ac-zmpt101b.html?fbclid=IwAR0IJJ4wemmGUn11tO6DDZDOD9rVN-ZdDuE-jODCHBmSkORuK5RqL4fs9w>

Palestina Reyes , D. (2013). *INTERFAZ GRAFICA PARA EL ANÁLISIS EN EL DOMINIO TEMPORAL Y FRECUENCIA DE SEÑALES DE AUDIO EN TIEMPO REAL*. Culhuacan.

Rushon, A. (1999). *VHDL for Logic Synthesis*. England: WILEY.

Sandoval Cueva, B. D. (08 de 05 de 2017). *Repositorio Digital EPN*. Recuperado el 29 de 10 de 208, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17313>

Schmidt, A. L. (13 de 03 de 2013). *Universidad Nacional del Sur*. Recuperado el 20 de 11 de 2018, de lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-Schmidt%20Ana%20Lucía.pdf

Seidle, N. (2013). *SparkFun*. Recuperado el 20 de 11 de 2018, de <https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-use-an-oscilloscope/all>

Suarez Giraldo, J. D., & Peña Trellez, J. A. (2017). *Repositorio Digital Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas*. Recuperado el 20 de 11 de 2018, de repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5201/1/tesis.pdf

Technologies, K. (12 de 2017). *Keysight Technologies*. Recuperado el 19 de 11 de 2018, de <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-8064EN.pdf>

Tektronix. (20 de 02 de 2008). *Tektronix*. Recuperado el 18 de 11 de 2018, de http://engineering.case.edu/lab/circuitlab/sites/engineering.case.edu/lab/circuitlab/files/docs/Signal_Generator_Fundamentals-_Tektronix.pdf

terraelectronica. (s.f.). *terraelectronica*. Recuperado el 10 de 03 de 2019, de terraelectronica:

https://www.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf_file=%252Fds%252Fpdf%252FT%252FTechicRP3.pdf

Texas Instrument. (12 de 11 de 1995). *TI*. Recuperado el 11 de 03 de 2019, de <http://www.ti.com/lit/an/slaa013/slaa013.pdf>

Texas Instruments. (2015). Selecting an A/D Converter. *TI*, 1-16. Recuperado el 29 de 05 de 2019, de <http://www.ti.com/lit/an/sbaa004a/sbaa004a.pdf>

Walden, R. H. (1999). Analog-to-Digital Converter Survey and Analysis. *IEEE*, 539-550. Recuperado el 11 de 05 de 2019, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/761034>

Waterloo, U. o. (2009). *Uwaterloo*. Recuperado el 05 de 02 de 2019, de https://ece.uwaterloo.ca/~lab140/scope_notes.pdf

Xilinx. (01 de 04 de 2015). *Xilinx*. Recuperado el 05 de 02 de 2019, de Xilinx: https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/xadc_wiz/v3_0/pg091-xadc-wiz.pdf

Xilinx. (23 de 06 de 2018). *Xilinx*. Recuperado el 03 de 03 de 2019, de Xilinx: https://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug480_7Series_XADC.pdf

ANEXOS



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN
CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo de titulación fue desarrollado por el señor CHASI CAJAS, CHRISTIAN PAÚL.

En la ciudad de Latacunga, 19 de Septiembre del 2019.

Aprobado por:



 ING. AMPARO MEYTHALER NARANJO
 DIRECTORA DEL PROYECTO



 ING. AMPARO MEYTHALER NARANJO
 DIRECTORA DE CARRERA



 DR. JAIME RODRIGO VACA CORRALES
 SECRETARIO ACADÉMICO