



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y SISTEMAS



**DESARROLLO DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE BAJO
COSTO MEDIANTE SDR EMPLEANDO LA TARJETA REDPITAYA**

EDUARDO MARMOL
JUAN VIERA

Bárbula, 7 de Diciembre del 2015



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y SISTEMAS



DESARROLLO DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE BAJO COSTO MEDIANTE SDR EMPLEANDO LA TARJETA REDPITAYA

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE
CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE TELECOMUNICACIONES

EDUARDO MARMOL
JUAN VIERA

Bárbula, 7 de Diciembre del 2015



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y SISTEMAS



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado «DESARROLLO DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE BAJO COSTO MEDIANTE SDR EMPLEANDO LA TARJETA REDPITAYA», realizado por los bachilleres EDUARDO MARMOL, cédula de identidad 21.273.257, JUAN VIERA, cédula de identidad 19.792.739, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Firma

Prof. ELIMAR HERNÁNDEZ

TUTOR

Firma

Prof. CARLOS MEJIAS

JURADO

Firma

Prof. AHMAD OSMAN

JURADO

Bárbula, 7 de Diciembre del 2015

Dedicatoria

A Dios, Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos y la fortaleza para afrontar cada uno de los retos.

A mi madre Zoraida Blanco, por haberme apoyado en todo momento de la carrera, por sus consejos y motivación constante que me ha permitido ser una buena persona.

A mi padre Eduardo Mármol, Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante.

EDUARDO MARMOL

A Sandra Gonzalez, que a lo largo de toda mi vida lucho y sacrificó mucho para darme lo necesario para mi formación personal y académica.

A Romer Gonzalez, que ha sido toda mi vida un padre para mí, y el mejor ejemplo a seguir que Dios ha podido darme.

A toda mi familia, quienes a pesar de las adversidades siguieron creyendo en mí y me apoyaron a lo largo de mis estudios

A Maria Key, a pesar de que no estés aquí, sé que estás viendo el fruto de mis esfuerzos y espero te sientas orgullosa.

JUAN VIERA

Agradecimientos

Primeramente a dios por protegerme durante toda la carrera y darme la fuerza necesaria para superar los diferentes obstáculos y dificultades.

Agradezco a mis padres Eduardo Mármol y Zoraida Blanco quienes me han brindado su apoyo incondicional en todo momento para lograr esta nueva meta en mi vida. A todos mis amigos, los cuales nos apoyamos mutuamente en nuestra formación como profesionales los cuales me atrevería a nombrar a José Este, David Santamaría, Nelson Mogollon, Rafael Camacho y en especial a Gerardo Chiavelli quien ha estado allí tendiéndome esa mano amiga en todo momento. A María De Los Ángeles Rodríguez por ser una parte muy importante de mi vida y por todo el apoyo recibido antes y durante la realización de este trabajo.

Finalmente a los Profesores, todos aquellos que marcaron cada etapa del camino universitario y que me ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de este trabajo especial de grado, en especial Elimar Hernández y Mariluz Simanca.

A todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de este trabajo. ¡Gracias a ustedes!**(Eduardo Mármol)**

Primeramente a Dios, pues fue él quien me permitió seguir este sendero, me brindo la fortaleza y sabiduría necesaria para alcanzar las metas propuestas, y puso en mi camino a todas las personas que nombrare a continuación.

A toda mi familia, que siempre estuvieron pendientes de mi durante todos los años de estudio, principalmente a Sandra Gonzalez y Romer Gonzalez, quienes fueron mis pilares fundamentales en mi crecimiento y desarrollo de quien soy y del camino que he seguido. A Norman Viera por apoyarme en puntos importantes de mi carrera, y al resto de la familia por siempre estar dispuestos a ayudarme en cuanto lo necesitara.

A los muchachos de la 3ra promoción de Ingeniería de Telecomunicaciones de la UC, quienes compartieron conmigo en las buenas y en las malas del trayecto de la carrera. En especial a Gustavo Malpica, Nelson Mogollón, David Santamaría

y Roghert Rivero quienes hicieron amenas esos tormentosos días de desarrollo e implementación, a Luis Mendez por siempre estar dispuesto a ayudar con la mayor de las amabilidades.

A mis mejores amigos José Serrano y Francisco Egidi, que siempre estuvieron ahí para ayudarme y compartir conmigo en los mejores y peores momentos. Gracias hermanos por haberme dado fuerzas cuando las había perdido.

A mi mejor amiga, Antonella Yannone, quien todos los días durante el desarrollo de la tesis me escribía el desesperante recordatorio “Tesis”, por estar pendiente de mí, por mantenerme animado y siempre creer en que lo lograría. **(Juan Viera)**

...

Índice general

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XVII
Acrónimos	XIX
Resumen	XXI
I. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Alcance	4
II. Marco Conceptual	7
2.1. Descripción general de RedPitaya	7
2.2. Instrumentos disponibles en RedPitaya	10
2.2.1. Osciloscopio	10
2.2.2. Analizador de espectros	11
2.2.3. Generador de señales	12
2.2.4. Medidor LCR	12
2.3. Software Defined Radio	13
2.4. Lenguajes de programación	14
2.4.1. HTML	14
2.4.2. CSS	15
2.4.3. JavaScript	15
2.4.4. JQuery	15
2.4.5. Bootstrap	15
2.4.6. AJAX	16
2.4.7. C	16
2.4.8. FPGA	16
2.5. Elementos circuitales	17

2.6. Transformada Discreta de Fourier (TDF)	18
2.7. Transformada de Fourier Rápida (FFT)	19
III. Procedimientos de la investigación	21
3.1. Fase I. Revisión bibliográfica del contenido programático y manuales de usuario de los instrumentos utilizados en el laboratorio de la asignatura de Instrumentación Electrónica para determinar los instrumentos a desarrollar.	21
3.2. Fase II. Revisión bibliográfica de los manuales de usuario y desarrolladores de RedPitaya para determinar los lenguajes de programación a utilizar para el desarrollo de las interfaces de los instrumentos y algoritmos de medición.	23
3.3. Fase III. Desarrolle los módulos de programación para la emulación del comportamiento de los controles y cálculo de mediciones disponibles de los instrumentos utilizados en el laboratorio de Instrumentación Electrónica.	25
3.3.1. Osciloscopio + Generador.	25
3.3.2. Medido LCR.	32
3.3.3. Analizador de espectros y medidor de distorsión armónica total.	37
3.4. Fase IV. Diseño de las interfaces gráficas que emulan la apariencia y funcionamiento de los instrumentos utilizados en el laboratorio de Instrumentación Electrónica.	42
3.4.1. Osciloscopio + Generador UC.	42
3.4.2. Medidor LCR UC.	47
3.4.3. Analizador de Espectro y medidor de THD - UC	51
IV. Análisis, interpretación y presentación de los resultados	57
4.1. RedPitaya: interfaz de entrada	57
4.2. Resultados y comparaciones entre la interfaz gráfica Osciloscopio + Generador UC mediante el uso de RedPitaya y el Osciloscopio digital Tektronix TDS380:	59
4.3. Resultados y comparaciones entre la interfaz gráfica Medidor LCR UC mediante el uso de RedPitaya y el RCL METER (FLUKE) PM6306:	72
4.4. Resultados y comparaciones entre la interfaz grafica Analizador de Espectro/THD mediante el uso de RedPitaya y el Analizador de Espectro HP 8590:	82
4.5. Comparación de instrumentos del laboratorio de instrumentación electrónica, instrumentos disponibles en RedPitaya e instrumentos desarrollados:	94
V. Conclusiones y recomendaciones	99
5.1. Conclusiones	99
5.2. Recomendaciones	101

Índice general	IX
<hr/>	
A. Código de Osciloscopio + Generador UC	103
B. Código de Medidor LCR - UC	105
C. Código de Analizador de Espectros y THD - UC	107
Referencias Bibliográficas	109
Anexos	
A. Especificaciones de Hardware de Red Pitaya	

Índice de figuras

2.1. Interconexion RedPitaya - Dispositivo de usuario. Fuente: Redpitaya.com	7
2.2. Interfaces hardware de RedPitaya. Fuente: Redpitaya.com	8
2.3. Estructura de comunicacion de software de RedPitaya. Fuente: Redpitaya.com	9
2.4. Interfaz Web inicial de RedPitaya. Fuente: redpitaya.com	10
2.5. Spectrum Analyzer en Google Chrome para PC/Mac. Fuente: redpitaya.com	11
2.6. Spectrum Analyzer en Navegador Predeterminado iPhone. Fuente: redpitaya.com	11
2.7. Interfaz gráfica de Osciloscopio RedPitaya. Fuente: redpitaya.com	12
2.8. controles de generador de señales en aplicación “Osciloscopio RedPitaya”. Fuente: redpitaya.com	13
2.9. Diagrama de conexión para medidor LCR en RedPitaya. Fuente: redpitaya.com	13
2.10. Interfaz Web – Medidor LCR RedPitaya . Fuente: redpitaya.com	14
2.11. Equivalentes serie-paralelo. Fuente: [1]	18
3.1. Diagrama de proceso de actualizacion de datos de la interfaz de osciloscopio. Fuente: propia	28
3.2. Diagrama de proceso de operaciones matematicas de Osciloscopio. Fuente: propia	29
3.3. Diagrama de proceso de escalamiento de señales en Osciloscopio. Fuente: propia	29
3.4. Grilla de Osciloscopio. Fuente: propia	30
3.5. Tiempo de subida/bajada. Fuente: propia	32
3.6. Diagrama de proceso de Actualizacion de datos de interfaz de medidor LCR. Fuente: propia	34
3.7. Diagrama de proceso de determinación de parámetros dominante y secundario en configuración automática. Fuente: propia	35
3.8. Diagrama de proceso de determinación de parámetros dominante y secundario en configuración serie. Fuente: propia	36
3.9. Diagrama de proceso de determinación de parámetros dominante y secundario en configuración paralelo. Fuente: propia	36

3.10. Diagrama de proceso de verificación de frecuencias asignadas por usuario. Fuente: propia	38
3.11. Diagrama de proceso de verificación de frecuencias máxima según ancho de banda de resolución y frecuencia final. Fuente: propia	38
3.12. Diagrama de proceso de verificación de frecuencias al cambiar ancho de banda de resolución. Fuente: propia	39
3.13. Ventana de búsqueda de armónicos de THD. Fuente: propia	41
3.14. Interfaz Web – Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia	42
3.15. Controles Básicos. Fuente: propia	43
3.16. Opciones de Visualización. Fuente: propia	43
3.17. Panel de configuración del Trigger. Fuente: propia	44
3.18. Opciones de Canal. Fuente: propia	44
3.19. Panel de cursores. Fuente: propia	45
3.20. Panel de marcadores. Fuente: propia	46
3.21. Panel de medidas. Fuente: propia	46
3.22. Operaciones matemáticas y opciones de guardado. Fuente: propia	47
3.23. Panel Generador de funciones. Fuente: propia	47
3.24. Interfaz Web – Medidor LCR UC. Fuente: propia	48
3.25. Parámetros de Medición. Fuente: propia	49
3.26. Opciones de Barrido de Mediciones - LCR. Fuente: propia	49
3.27. Opciones de Barrido de Frecuencia - LCR. Fuente: propia	50
3.28. Opciones de escala - LCR. Fuente: propia	50
3.29. Panel de guardado - LCR. Fuente: propia	51
3.30. Interfaz Web – Analizador de Espectros y THD – UC. Fuente: propia	51
3.31. Panel de visualización - Analizador de espectros. Fuente: propia	52
3.32. Panel de configuración de frecuencias y referencia - Analizador de espectros. Fuente: propia	53
3.33. Panel de Marcadores - Analizador de espectros. Fuente: propia	53
3.34. Panel de función de cálculo de THD - Analizador de espectros. Fuente: propia	54
3.35. Panel de mediciones - Analizador de espectros	55
3.36. Panel de guardado - Analizador de espectros. Fuente: propia	55
4.1. Interfaz de entrada - RedPitaya. Fuente: propia	58
4.2. Señal medida a través de la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia	59
4.3. Señal medida a través de Osciloscopio Tektronix TDS380. Fuente: propia	60
4.4. Otras mediciones con la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia	61
4.5. Mediciones de Osciloscopio Tektronix TDS380. Fuente: propia	61
4.6. Onda cuadrada y Triangular vista desde la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia	62

4.7. Onda cuadrada y Triangular vista desde Osciloscopio Tektronix TDS380. Fuente: propia	62
4.8. Cursores de la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia	64
4.9. Tabla Cursores de la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia	65
4.10. Marcadores de la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia	65
4.11. Tabla Marcadores de la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia	66
4.12. Operación matemática CH1+CH2. Fuente: propia	66
4.13. Operación matemática CH1-CH2. Fuente: propia	67
4.14. Operación matemática CH1xCH2. Fuente: propia	67
4.15. Puntas de prueba de 1x y 10x usadas en la prueba 5. Fuente: propia	67
4.16. Adquisición con configuración de 1x en canal 1 y 1x en canal 2. Fuente: propia	68
4.17. Adquisición con configuración de 10x en canal 2 y 1x en canal 1. Fuente: propia	69
4.18. Generación de señal senoidal desde la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia	69
4.19. Comparación de adquisición de señal generada por Osciloscopio + Generador UC (100us/div - 50us/div). Fuente: propia	70
4.20. Señal medida de 50MHz – Osciloscopio + Generador – UC. Fuente: propia	70
4.21. Señal medida de 50MHz – Osciloscopio Tektronix TDS380. Fuente: propia	71
4.22. Circuitería externa utilizada en la aplicación Medidor LCR UC. Fuente: propia	72
4.23. Resistencia de valor 100KΩ. Fuente: propia	73
4.24. Equivalente Serie de la Resistencia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	73
4.25. Equivalente Paralelo de la Resistencia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	73
4.26. Resistencia medida a través del RCL METER (FLUKE) PM6306. Fuente: propia	74
4.27. Capacitancia de valor 10nF. Fuente: propia	74
4.28. Equivalente Serie de la Capacitancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	74
4.29. Equivalente Paralelo de la Capacitancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	75
4.30. Capacitancia Serie y Paralelo medida a través del RCL METER (FLUKE) PM6306. Fuente: propia	75
4.31. Inductor de valor 4,7uH. Fuente: propia	75

4.32. Equivalente Serie de la Inductancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	76
4.33. Equivalente Paralelo de la inductancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	76
4.34. Inductancia Serie y Paralelo medida a través del RCL METER (FLU- KE) PM6306. Fuente: propia	76
4.35. Equivalente Serie de la Resistencia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	78
4.36. Equivalente Paralelo de la Resistencia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	78
4.37. Resistencia serie y paralelo medida a través del RCL METER (FLU- KE) PM6306. Fuente: propia	79
4.38. Equivalente Serie de la Capacitancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	79
4.39. Equivalente Paralelo de la Capacitancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	79
4.40. Capacitancia serie y paralelo medida a través del RCL METER (FLU- KE) PM6306. Fuente: propia	80
4.41. Equivalente Serie de la Inductancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	80
4.42. Equivalente Paralelo de la Inductancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia	80
4.43. Inductancia serie y paralelo medida a través del RCL METER (FLU- KE) PM6306. Fuente: propia	81
4.44. Espectro de la señal medida en la aplicación Analizador de Espectro, entre 0.5 y 1.5 KHz. Fuente: propia	82
4.45. Espectro de la señal medida en Analizador de Espectro HP 8590, en- tre 0.5 y 1.5 KHz. Fuente: propia	83
4.46. Espectro de frecuencia con escala vertical en mV. Fuente: propia	83
4.47. Espectro de frecuencia con escala vertical en mW. Fuente: propia	84
4.48. Generador de funciones a 500 KHz. Fuente: propia	84
4.49. Espectro de la señal de frecuencia fundamental 500KHz. Fuente: pro- pia	85
4.50. Resultado THD para la señal medida en la figura 4.49 mediante Ana- lizador de espectros y medidor de THD - UC. Fuente: propia	85
4.51. Resultado THD para la señal medida en la figura 4.49 mediante el Analizador de Distorsión HP 332A. Fuente: propia	86
4.52. Generador de funciones a 2MHz. Fuente: propia	86
4.53. Espectro de la señal senoidal generada de frecuencia fundamental 2MHz. Fuente: propia	86
4.54. Resultado THD medido con la aplicación Analizador de Espectros y medidor de THD – UC. Fuente: propia	87

4.55. Posicionamiento de marcadores en el espectro en el Analizador de espectros y medidor de THD - UC. Fuente: propia	87
4.56. Tabla de marcadores de la aplicación Analizador de Espectro y medidor de THD - UC. Fuente: propia	88
4.57. Tabla de marcadores del Analizador de Espectro HP 8590A. Fuente: propia	88
4.58. Señal a 2 MHz con RBW = 3.8 KHz - Analizador de Espectros y medidor de THD – UC. Fuente: propia	89
4.59. Señal a 2 MHz con RBW = 30.5 KHz - Analizador de Espectros y medidor de THD – UC. Fuente: propia	90
4.60. Señal a 2 MHz con RBW = 3 KHz - Analizador de Espectro HP 8590. Fuente: propia	90
4.61. Señal a 2 MHz con RBW = 30 KHz - Analizador de Espectro HP 8590. Fuente: propia	90
4.62. Señal AM de 50 MHz con modulante de 250 kHz e índice de modulación de 0.3	91
4.63. Comparación 1 de Generador Vectorial Vs Índice de modulación en Analizador de espectros UC	92
4.64. Señal AM de 50 MHz con modulante de 450 kHz e índice de modulación de 0.5	92
4.65. Comparación 2 de Generador Vectorial Vs Índice de modulación en Analizador de espectros UC	92
4.66. Señal AM de 50 MHz con modulante de 100 kHz e índice de modulación de 0.8	93
4.67. Comparación 3 de Generador Vectorial Vs Índice de modulación en Analizador de espectros UC	93
4.68. Señal AM de 50 MHz con modulante de 100 kHz e índice de modulación de 0.25	94
4.69. Relación de potencia promedio de canal vs potencia pico	94
4.70. Espectro de la señal medida en la aplicación Analizador de Espectro a 50 MHz. Fuente: propia	95
4.71. Espectro de la señal medida a 50MHz en Analizador de Espectro HP 8590, Fuente: propia	95

Indice de tablas

3.1. Lenguajes de programación seleccionados	24
3.2. Ancho de banda de resolución y frecuencia máxima	37
3.3. Ancho de banda de ventana de búsqueda de armónicos Vs Ancho de banda de resolución	40
4.1. Tabla comparativa de medidas adquiridas - Osciloscopio + Generador - UC	60
4.2. Tabla comparativa de medidas adquiridas en dos canales - Osciloscopio + Generador - UC	63
4.3. Tabla comparativa de señal medida de 5kHz – Osciloscopio + Generador - UC	68
4.4. Tabla comparativa de señal medida de 50MHz – Osciloscopio + Generador - UC	71
4.5. Resultados de mediciones de elementos pasivos a 1 kHz	77
4.6. Error porcentual entre mediciones a 1 kHz obtenidas por la aplicación LCR UC y el RCL METER FLUKE PM6306	78
4.7. Resultados de mediciones de elementos pasivos a 1 MHz	81
4.8. Error porcentual entre mediciones a 1 MHz obtenidas por la aplicación LCR UC y el RCL METER FLUKE PM6306	81
4.9. Tabla comparativa - medidas de marcadores	89
4.10. Pruebas de índice de modulación	91
4.11. Comparaciones Osciloscopio + Generador UC, Osciloscopio + Generador RedPitaya y osciloscopio Tektronix TDS380	96
4.12. Comparaciones medidor LCR UC, medidor LCR RedPitaya y RCL METER (FLUKE) PM6306	97
4.13. Comparaciones Analizador de Espectro - THD UC, Analizador de Espectro RedPitaya y Analizador de Espectro HP 8590	97

Acrónimos

AC	Alternating Current
DC	Direct Current
DSP	Digital Signal Processing
DUT	Device Under Test
FPGA	Field Programmable Gate Aarray
HID	H:uman Interface Device
LCR	L:inductor Capacitor Resistor
RF	Radio Frecuencia
SDR	Ssoftware Defined Radio
THD	Total Harmonic Distortion
UC	Universidad de Carabobo

DESARROLLO DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE BAJO COSTO MEDIANTE SDR EMPLEANDO LA TARJETA REDPITAYA

por

EDUARDO MARMOL y JUAN VIERA

Presentado en el Departamento de Señales y Sistemas
de la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones
el 7 de Diciembre del 2015 para optar al Título de
Ingeniero de Telecomunicaciones

RESUMEN

En la asignatura de Instrumentación Electrónica, dictada en la escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo, se estudia el comportamiento de los componentes electrónicos pasivos (Resistores, capacitores e inductores) ante la excitación de una señal oscilante y de los instrumentos básicos utilizados para las mediciones de dichos estudios. El laboratorio de Instrumentación Electrónica cuenta con equipos necesarios para experimentos que faciliten la comprensión de los fenómenos descritos en la asignatura, los cuales presentan fallas debido al deterioro por el largo tiempo que han estado en servicio, sumado a esto, la poca cantidad de instrumentos dificulta el acceso a la cantidad de estudiantes que usualmente cursan la materia, generando deficiencias en el aprendizaje del

uso de los mismo. Para solventar este problema, se planteó el desarrollo de instrumentación electrónica mediante el uso de la tarjeta de desarrollo RedPitaya, para lo cual se realizó el estudio de los lenguajes de programación aptos para la creación de aplicaciones que permitan interactuar con dicha tarjeta, resultando como mejor opción los lenguajes de programación HTML, CSS, Javascript, jQuery, Ajax y Bootstrap, los cuales permitieron desarrollar las aplicaciones destinadas a emular la apariencia y comportamiento de los instrumentos del laboratorio de Instrumentación Electrónica, con la capacidad de ser ejecutadas en múltiples plataformas que incluyan navegadores web compatibles con las versiones de dichos lenguajes de programación para el años 2015. Como resultado se obtuvieron tres aplicaciones que engloban los instrumentos de Osciloscopio, generador de funciones, analizador de distorsión, analizador de espectros, medidor LCR, las cuales permiten al usuario estudiar señales adquiridas a través de la tarjeta RedPitaya de forma similar al estudio realizado mediante los instrumentos del laboratorio. A partir de las pruebas de las aplicaciones desarrolladas y las comparaciones realizadas con los instrumentos disponibles en el laboratorio se pudo concluir a partir de la aproximación en los valores obtenidos, que las aplicaciones desarrolladas pueden ser utilizadas para la materia de Instrumentación Electrónica ya que permiten al estudiante manipular instrumentos de manera similar a como lo haría en el laboratorio actual. . .

Palabras Claves: RedPitaya, SDR, Instrumentacion Electronica, Interfaz gráfica, instrumentacion digital

Tutor: ELIMAR HERNÁNDEZ

Profesor del Departamento de Señales y Sistemas

Escuela de Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería adscrito al Laboratorio de Instrumentación Electrónica

Capítulo I

Introducción

1.1. Motivación

Las instalaciones del laboratorio de Instrumentación electrónica cuentan actualmente con un osciloscopio analógico, con un osciloscopio digital, un analizador de espectro, y dos analizadores de impedancia que operan a rangos de frecuencia diferentes. Estos equipos presentan fallas debido al deterioro por el uso a lo largo del tiempo que han estado en servicio, sumado a esto, la poca cantidad de instrumentos en comparación a la cantidad de estudiantes que cursan la materia dificulta el proceso de aprendizaje debido al poco acceso de alumnos a los equipos de medición, disminuyendo así la eficiencia del tiempo usado para las prácticas de laboratorio, provocando la necesidad de hacer uso del laboratorio en horarios extracurriculares para la culminación de las prácticas de laboratorio y limitando el tiempo de experiencia de cada estudiante con los instrumentos.

En 2014 la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo realizó la adquisición de la tarjeta de desarrollo SDR RedPitaya que permite la implementación de instrumentos digitales de medición a través de una interfaz gráfica de control. Esta tarjeta posee actualmente los instrumentos básicos

utilizados en el laboratorio de la asignatura de instrumentación electrónica, brindando la posibilidad al usuario de obtener una experiencia similar a la de un instrumento físico por medio de controles en una interfaz gráfica digital. Los instrumentos disponibles a través de la interfaz de RedPitaya cuentan con un número reducido de controles que permiten realizar funciones básicas sobre la visualización de las señales y algunos parámetros de adquisición, pero no brinda al usuario la posibilidad de usar marcadores o barras de medición, por el contrario, muestra mediciones básicas como máximos y mínimos; entre otros; de forma fija. Por estas razones, la interactividad con el usuario se limita básicamente al manejo de visualización de la señal sin incluir funciones básicas de medición que se encuentran en instrumentos tradicionales.

Para el 2002 Chandan Bhunia, Saikat Giri, Samrat Kar, Sudarshan Haldar, y Prithwiraj Purkait desarrollaron como trabajo de tesis de grado un osciloscopio digital de bajo costo basado en una tarjeta de adquisición [2] desarrollada para realizar la conversión de señales analógicas a digital a ser enviadas a una PC IBM a través de un puerto paralelo para ser tratadas por un software de interfaz gráfica de control, el cual también maneja el proceso de adquisición a través del mismo puerto. Este proyecto tuvo como objetivo eliminar la necesidad de múltiples osciloscopios digitales de alto costo.

Santiago Celma, Alfonso Carlosena, y Pedro A. Martinez describen el desarrollo y análisis de rendimiento de un analizador de espectro de bajo costo [3] propuesto para el uso académico de estudiantes universitarios. El instrumento propuesto se basa en una tarjeta de adquisición desarrollada para tratar las señales de forma heterodino y comunicarse con una PC IBM para el posterior procesamiento de la información mediante software. En principio el instrumento funciona de manera analógica a través de la tarjeta, pero al agregar la característica de análisis por software se suman nuevas funciones al instrumento que aumentan el alcance del mismo.

En la Universidad de Massachusetts Lowell, J. Weitzen, E. Webster y A. Rux proponen y comprueban en 2013 el uso de los dispositivos de medición y prueba de bajo costo “AnalogDiscovery” de Digilent junto con un software de control

de la misma empresa para el curso de Ingeniería eléctrica y computacional [4], mediante el cual cada uno de los estudiantes participa activamente en los trabajos de laboratorio, mejorando el proceso de aprendizaje y ampliando las opciones de experimentos y proyectos a realizar en el curso, al mismo tiempo que reduce los costos de adquisición y reparación de instrumentos de medición y agregando la posibilidad de adquirir equipos más especializados gracias a los recortes de gastos mencionados.

En el ámbito académico se propone el desarrollo de una interfaz gráfica de aspecto y funcionamiento análogo al de los instrumentos del laboratorio de la asignatura de Instrumentación Electrónica, mediante la interacción con las señales generadas y/o censadas a través de la tarjeta de desarrollo RedPitaya que le permita al usuario el acceso a los equipos de forma remota, con el fin de reforzar el proceso de aprendizaje de manera didáctica e interactiva. El uso de una interfaz gráfica junto con la tarjeta de desarrollo RedPitaya supone la sustitución de controles electromecánicos por controles gráficos digitales similares, conservando el uso de señales reales y circuitería externa conectada al dispositivo, de manera que el usuario pueda tratar con experimentos reales mediante el uso de un instrumento controlado por una interfaz gráfica digital como si operara físicamente un instrumento convencional, esto supone una reducción en los riesgos de daño por uso, aumentando así el tiempo efectivo de disponibilidad de los equipos de medición y disminuyendo los costos por reparación. Al posibilitar a los estudiantes el acceso a instrumentos del laboratorio de forma remota mediante la RedPitaya permitirá a los docentes de la asignatura llevar a cabo experiencias prácticas, para las cuales cada alumno tendrá participación en la realización de mediciones y estudios de señales, favoreciendo de esta manera una impartición equitativa de los conocimientos que abarca la materia en relación a la operación de los instrumentos de medición.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Desarrollar instrumentación electrónica de bajo costo mediante SDR empleando la tarjeta RedPitaya.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar la revisión bibliográfica del contenido programático y manuales de usuario de los instrumentos utilizados en el laboratorio de la asignatura de Instrumentación Electrónica para determinar los instrumentos a desarrollar.
- Realizar una revisión bibliográfica de los manuales de usuario y desarrolladores de RedPitaya para determinar el(los) lenguaje(s) de programación a utilizar para el desarrollo de las interfaces de los instrumentos y algoritmos de medición.
- Desarrollar los módulos de programación para la emulación del comportamiento de los controles y cálculo de mediciones disponibles de los instrumentos utilizados en el laboratorio de Instrumentación Electrónica.
- Diseñar la interfaz gráfica necesaria para emular la apariencia y funcionamiento de los instrumentos utilizados en el laboratorio de Instrumentación Electrónica mediante el uso de los módulos de programación previamente desarrollados.

1.3. Alcance

Los resultados obtenidos tras el uso de las diferentes interfaces graficas digitales se basan en la manipulación de los parámetros de visualización de la señal así como la realización de mediciones de forma didáctica a través de marcadores o mediante

el uso de funciones automáticas según sea el caso de cada instrumento de acuerdo a los equipos disponibles en el laboratorio de la asignatura de instrumentación electrónica.

Al utilizar la aplicación del osciloscopio el usuario tendrá a disposición botones de selección de canales, perilla de control y ajuste de voltaje/división y tiempo/división, además de los botones para la configuración del trigger, opciones de adquisición de mediciones de la señal y opciones de guardado de gráficos, datos de pares ordenados y medidas de adquisición para su posterior estudio. También cuenta con dos generadores de funciones totalmente configurables en cuanto al tipo de señal, amplitud, frecuencia y voltaje DC.

La interfaz del analizador de espectro dispone de botones de selección de canales, selección de rangos de frecuencia, opciones de adquisición de medidas, además de poseer la función de detección de picos y suministrarle al usuario la opción de marcadores con la correspondiente manipulación de los mismos para la obtención detallada de las señales en el dominio de la frecuencia. Además esta aplicación posee de la función especial que simula el cálculo de la distorsión armónica total (THD).

La aplicación del analizador de impedancia (LCR meter) dispone de los parámetros de configuración previa, para el cual permite al usuario la opción de calibración y configuración de los parámetros iniciales, así como también la disposición de la ventana de resultados la cual dispone de una perilla ajustable con el propósito recorrer el gráfico suministrado por el dispositivo bajo prueba y/o situar una posición en frecuencia mediante el cursor para indicar la magnitud de la parte real e imaginaria, el valor dominante y secundario y el tipo de configuración serie o paralelo.

Capítulo II

Marco Conceptual

2.1. Descripción general de RedPitaya

La tarjeta de desarrollo RedPitaya es un proyecto de código abierto para el desarrollo de instrumentos de medición y control reconfigurables, que puede sustituir múltiples instrumentos de los laboratorios tradicionales con una sola unidad. RedPitaya está basada en Linux y se une a una red de datos a través de un puerto Ethernet para brindar acceso a los usuarios a través de navegadores web en diferentes dispositivos, móviles o fijos (figura 2.1).

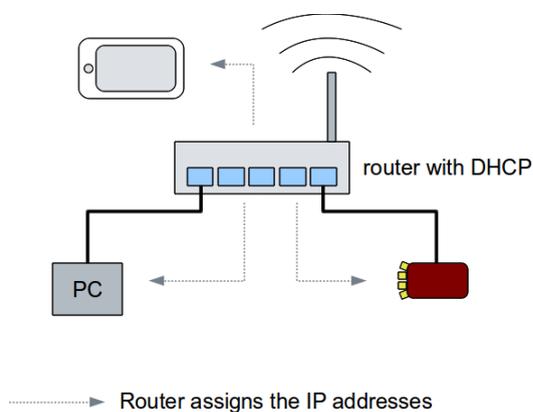


Figura 2.1: Interconexión RedPitaya - Dispositivo de usuario. Fuente: Redpitaya.com

La RedPitaya incluye sistemas de adquisición y generación de señales de frecuencia, módulos FPGA, C y CPU para el procesamiento y generación de los datos mediante la interacción de los usuarios con las aplicaciones instaladas en la unidad. Debido a que se trata de un proyecto de código abierto, los usuarios pueden desarrollar sus propias aplicaciones e instalarlas en la RedPitaya que posean, e incluso compartirlas con la comunidad mediante “Bazaar”, que es el sistema que permite descargar e instalar nuevas aplicaciones y actualizaciones a través de una conexión a internet.

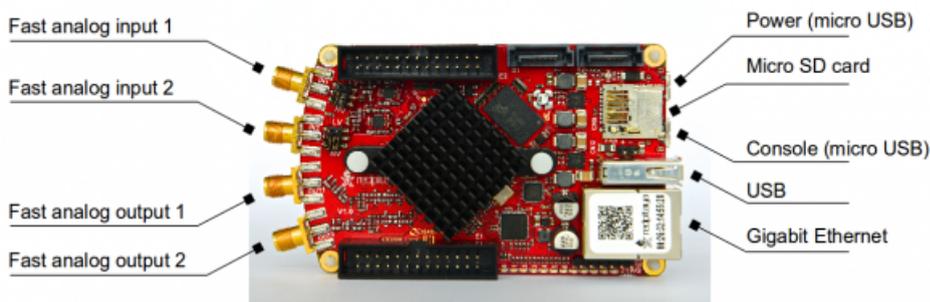


Figura 2.2: Interfaces hardware de RedPitaya. Fuente: Redpitaya.com

La RedPitaya cuenta con 4 puertos SMA, 2 de adquisición y 2 de generación (Figura 2.2) con un ancho de banda de 50 MHz y una tasa de muestreo de hasta 125 Msps a través de módulos de Conversión A/D de 14 bits de resolución controlados por el módulo FPGA que interactúa con la interfaz gráfica que maneja el usuario por medio de aplicaciones ejecutadas por un módulo Nginx (Servidor web) (figura 2.3) que corre el sistema operativo para permitir la comunicación bidireccional RedPitaya-Usuario.

La precisión de la adquisición y generación de señales con Redpitaya está asociada a los convertidores analógico-digital que posee la tarjeta. La versión actual disponible en la escuela de Ing. de Telecomunicaciones de la UC posee el ADC de dos canales LTC2145CUP-14 y un DAC DAC1401D125HL, también de dos canales; ambos de la empresa Linear Technologies.

Actualmente la RedPitaya adquirida por la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo tiene instaladas las aplicaciones para los

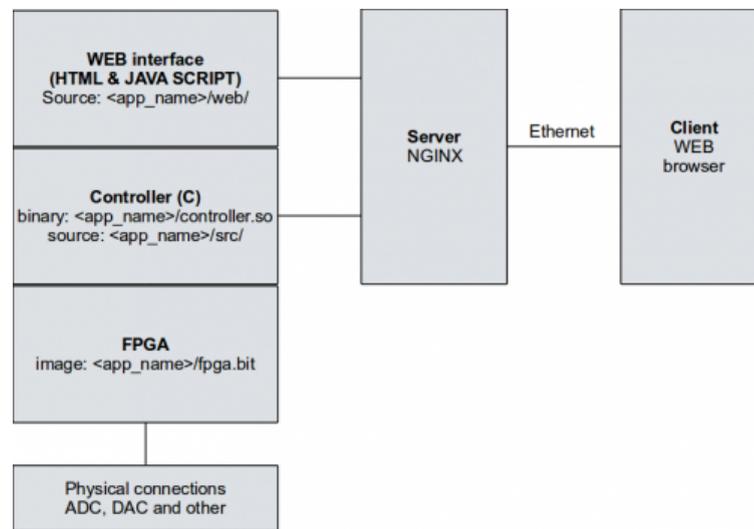


Figura 2.3: Estructura de comunicación de software de RedPitaya. Fuente: Redpitaya.com

siguientes instrumentos:

- Osciloscopio de 2 canales
- Analizador de espectro de 2 canales
- Generador de funciones arbitrarias de 2 canales
- LCR meter

Para acceder a estas aplicaciones, se debe escribir la dirección IP asignada a la unidad RedPitaya en la red a la que pertenece; en cualquier navegador que sea compatible con el lenguaje en que estén desarrolladas las aplicaciones (ver figuras 2.5 y 2.6) ; para visualizar la interfaz web que permite seleccionar la aplicación (Instrumento) a ejecutar (Ver Figura 2.4)

Una vez seleccionada la aplicación a ejecutar, el navegador web inicia una comunicación con el servidor web ejecutado en la RedPitaya para intercambiar data y parámetros correspondientes a las señales tratadas por la tarjeta según la aplicación, para ser procesada y posteriormente presentarla en un formato legible como se muestra en la figura 2.7

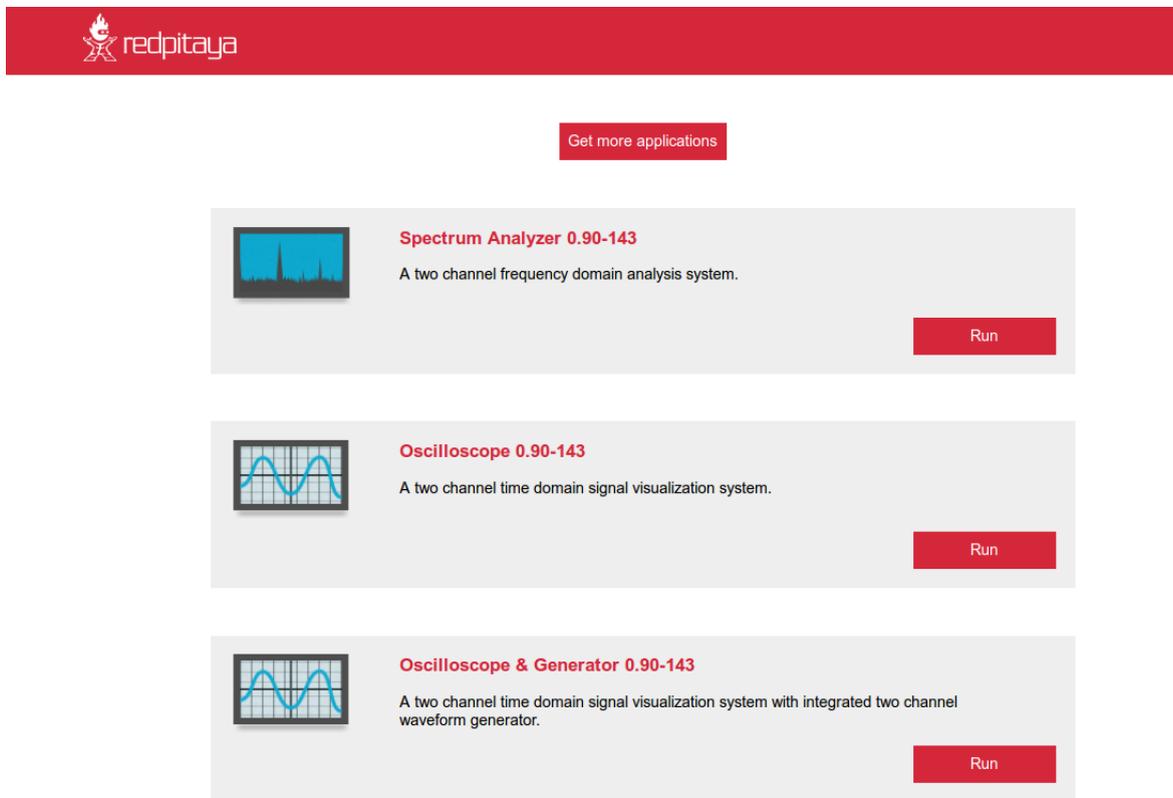


Figura 2.4: Interfaz Web inicial de RedPitaya. Fuente: redpitaya.com

2.2. Instrumentos disponibles en RedPitaya

2.2.1. Osciloscopio

Utiliza las dos entradas RF de RedPitaya para mostrar 2 señales en el dominio temporal. El usuario puede hacer diferentes manipulaciones básicas sobre la visualización de las señales tal como zoom y/o posición vertical u horizontal, además de mediciones automáticas sobre la información presentada (Ver Figura 2.7)

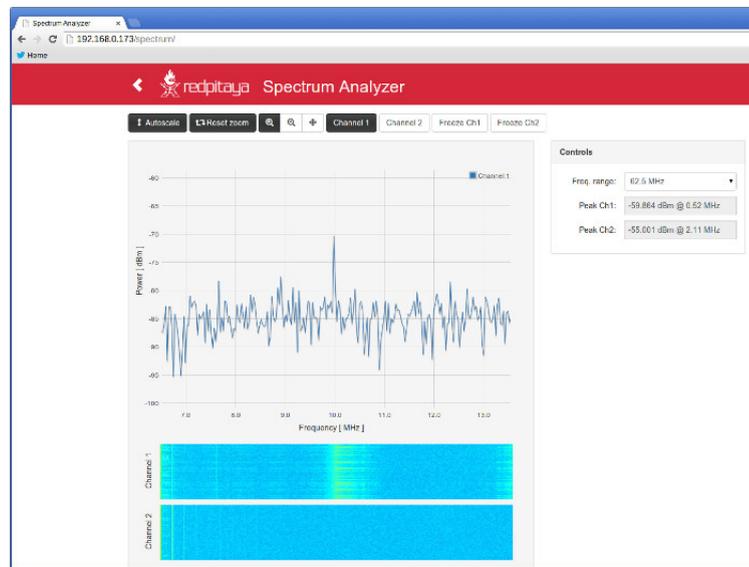


Figura 2.5: Spectrum Analyzer en Google Chrome para PC/Mac. Fuente: redpitaya.com

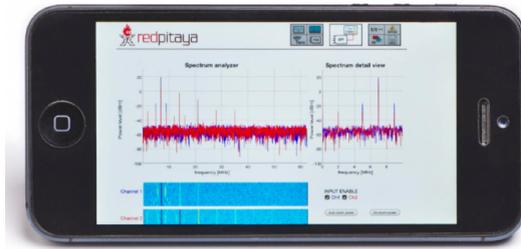


Figura 2.6: Spectrum Analyzer en Navegador Predeterminado iPhone. Fuente: redpitaya.com

2.2.2. Analizador de espectros

Utiliza las dos entradas RF de RedPitaya para mostrar 2 señales en el dominio temporal y un diagrama de cascada para ambas. El usuario solo puede manipular la visualización de la señal estableciendo la frecuencia máxima a visualizar. La interfaz muestra la lectura del pico máximo de potencia en su frecuencia respectiva para cada canal. (Ver Figura 2.5)

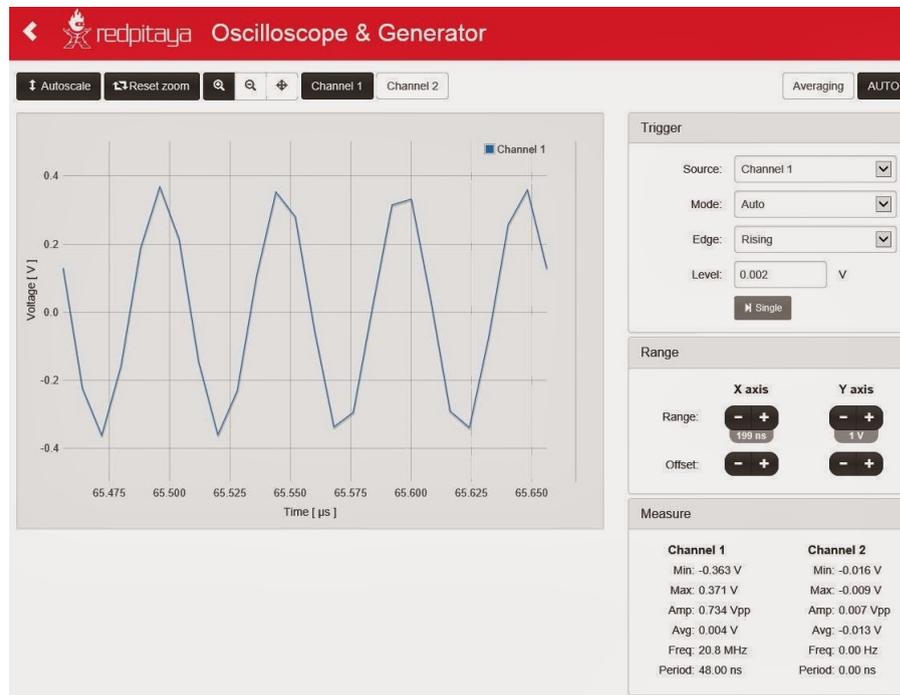


Figura 2.7: Interfaz gráfica de Osciloscopio RedPitaya. Fuente: redpitaya.com

2.2.3. Generador de señales

Es una función extendida (Ver Figuras 2.7 y 2.8) de una versión más reciente de la aplicación de Osciloscopio, permitiendo de esta forma usar la funcionalidad descrita previamente junto con los 2 puertos RF de salida para generar señales de tipo común como: senoidal, triangular, cuadrada, o señales definidas por el usuario mediante archivos “.CSV”

2.2.4. Medidor LCR

Utiliza dos puertos RF de entrada y uno de salida de la RedPitaya para medir el valor de la impedancia del dispositivo bajo prueba (DUT) conectado junto con una resistencia SHUNT (Ver figura 2.9) a lo largo de un rango de frecuencias establecido por el usuario (Ver Figura 2.10). La interfaz puede mostrar valores de impedancia o

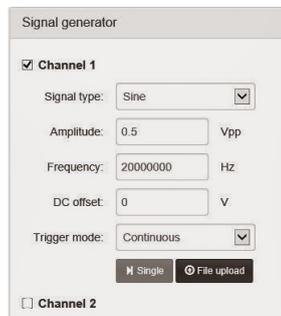


Figura 2.8: controles de generador de señales en aplicación “Osciloscopio RedPitaya”. Fuente: redpitaya.com

admitancia (Magnitud o fase), reactancia, inductancia, capacitancia, resistencia (En serie o paralelo), factor de calidad o factor de disipación.

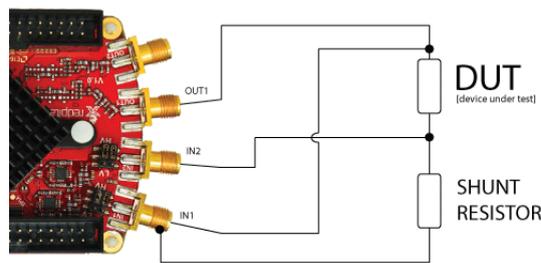


Figura 2.9: Diagrama de conexión para medidor LCR en RedPitaya. Fuente: redpitaya.com

2.3. Software Defined Radio

Radio Definida por Software (SDR) es un sistema de comunicación por radiofrecuencia, donde los componentes típicamente implementados en hardware son implementados mediante procesamiento por software [7]. SDR se considera una tecnología creada para mejorar la interoperabilidad entre diferentes servicios, la cual está compuesta de software y hardware, y puede ser reconfigurada dinámicamente para habilitar comunicaciones entre una amplia variedad de normas de comunicaciones, protocolos y radio enlaces.

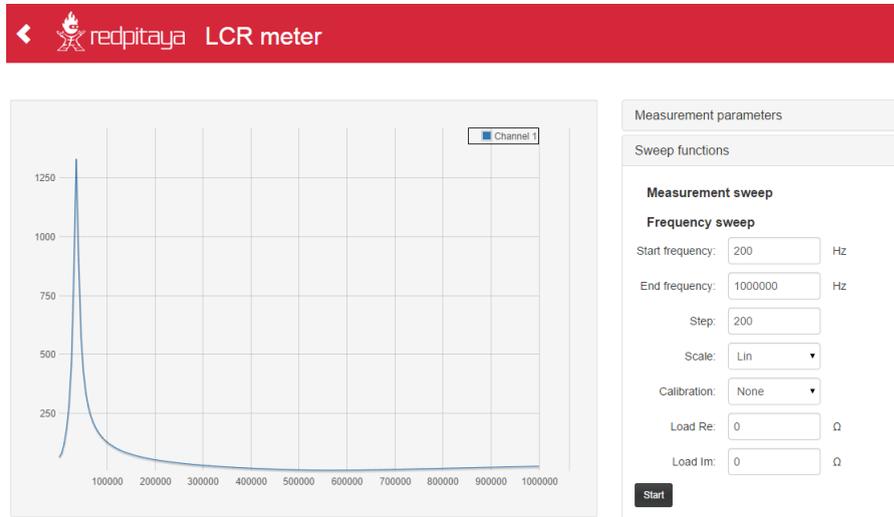


Figura 2.10: Interfaz Web – Medidor LCR RedPitaya . Fuente: redpitaya.com

2.4. Lenguajes de programación

Un lenguaje de programación es un lenguaje formal diseñado para expresar procesos que pueden ser llevados a cabo por máquinas como las computadoras. Pueden usarse para crear programas que controlen el comportamiento físico y lógico para expresar algoritmos con precisión, o como modo de comunicación humana.

2.4.1. HTML

Lenguaje de marcas de hipertexto (HTML) hace referencia al lenguaje de marcado para la elaboración de páginas web. Es un estándar que sirve de referencia para la elaboración de páginas web en sus diferentes versiones, define una estructura básica y un código para la definición de contenido de una página web, como texto, imágenes y videos, entre otros. [8]

2.4.2. CSS

Hoja de estilo en cascada (CSS) es un lenguaje utilizado en la presentación de documentos HTML, tiene como función organizar la presentación y aspecto de una página web. Este lenguaje es principalmente utilizado por parte de los navegadores web de internet y por los programadores web informáticos para elegir multitud de opciones de presentación como colores, tipos y tamaños de letra, orientación y distribución de elementos, entre otros. [8]

2.4.3. JavaScript

JavaScript es un lenguaje de programación interpretado orientado a objetos, basado en prototipos, imperativo y dinámico [9]. Se utiliza principalmente en su forma del lado del cliente, implementado como parte de un navegador web permitiendo mejoras en la interfaz de usuario y páginas web dinámicas, existe una forma de JavaScript del lado del servidor.

2.4.4. JQuery

JQuery es una librería de JavaScript, creada inicialmente para simplificar la manera de interactuar con los documentos HTML, manipular el árbol DOM (Document Object Model), manejar eventos, desarrollar animaciones y agregar interacción con la técnica AJAX a páginas web. [10]

2.4.5. Bootstrap

Bootstrap es un conjunto de herramientas de software libre para diseño de sitios y aplicaciones web basado en distribución de columnas por filas. Contiene plantillas de diseño con tipografía, formularios, botones, cuadros, menús de navegación y otros elementos de diseño basado en HTML y CSS, así como, extensiones de JavaScript opcionales [11]. Desde su versión 2.0 soporta diseño responsivo de páginas

web, lo que permite realizar un diseño único para diferentes plataformas de visualización (PC, Tablet, Smartphone)

2.4.6. AJAX

JavaScript asíncrono y XML (AJAX) es una técnica de desarrollo web para crear aplicaciones interactivas, estas aplicaciones se ejecutan en el cliente, es decir, en el navegador de los usuarios mientras se mantiene la comunicación asíncrona con el servidor en segundo plano. De esta forma es posible realizar cambios sobre las páginas sin necesidad de recargarlas, mejorando la interactividad, velocidad y uso en las aplicaciones.[10]

2.4.7. C

Es un lenguaje orientado a la implementación de Sistemas Operativos, concretamente Unix. C es apreciado por la eficiencia del código que produce y es el lenguaje de programación más popular para crear software de sistemas y/o aplicaciones. Se trata de un lenguaje de tipos de datos estáticos, débilmente tipificado, de medio nivel pero con muchas características de bajo nivel. Dispone de las estructuras típicas de los lenguajes de alto nivel pero, a su vez, dispone de construcciones del lenguaje que permiten un control a muy bajo nivel

2.4.8. FPGA

Una FPGA es un dispositivo semiconductor que contiene bloques lógicos cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada mediante un lenguaje de descripción especializado. La lógica programable de estos semiconductores puede reproducir desde funciones tan sencillas como las realizadas por una puerta lógica o un sistema combinacional hasta complejos sistemas en un chip.

2.5. Elementos circuitales

Los componentes circuitales reales como resistores, inductores y capacitores, a pesar de que están contruidos con materiales y tecnología avanzada, no existen en su forma ideal. En cada uno de ellos se presenta un comportamiento eléctrico donde contribuyen los tres parámetros: resistencia, inductancia y capacitancia. Esto se debe a que siempre están presente en dichos componentes el campo eléctrico y el campo magnético y por consiguiente la corriente de conducción, el almacenamiento de energía eléctrica y de energía magnética. Inclusive un capacitor con dieléctrico de aire, que suele ser considerado como un condensador de alta pureza, tiene inductancia parásita y pérdidas causadas por la resistencia de los conductores. [1]

En cada componente real solamente uno de los parámetros domina, mientras que los otros dos se mantienen residuales y se denominan parámetros parásitos, los cuales en bajas frecuencias son despreciables, pero dignos de tomar en cuenta cuando los componentes se usan en altas frecuencias.

A cualquier frecuencia, una impedancia compleja puede ser descrita por dos cantidades, una real (R) y una imaginaria (X), por lo tanto, puede ser simulada por dos elementos circuitales ideales: una resistencia equivalente conectada en serie a una inductancia o capacitancia equivalente. Para un valor de impedancia determinado existen infinitas configuraciones reales de R , L y C conectadas entre sí, las cuales van a depender de la frecuencia y el tipo de componente. [1]

Así como la impedancia puede ser expresada por dos elementos en esquema serie, la admitancia también puede ser representada por la conductancia y susceptancia, las cuales están conectadas en esquema paralelo.

Cuando la impedancia es representada por dos elementos en esquema serie, se llama impedancia equivalente serie y cuando se representa en función de la admitancia en esquema paralelo se define equivalente paralelo. La relación ente los equivalentes serie y paralelo se obtienen de igualar la impedancia serie al inverso de la admitancia paralelo, a partir de esta relación se pueden deducir las ecuaciones de la figura 2.11.

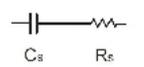
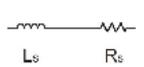
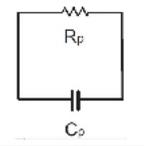
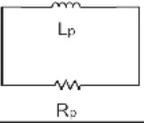
Esquema	Diagrama	Inductancia/Capacitancia	Resistencia	Factor de pérdida
Serie		$C_s = (1 + D^2) C_P$	$R_S = \frac{R_P}{(1 + Q^2)}$	$D = \frac{1}{Q} = \omega R_S C_S$
		$L_S = \frac{L_P}{(1 + D^2)}$	$R_S = \frac{R_P}{(1 + Q^2)}$	$Q = \frac{1}{D} = \frac{\omega L_S}{R_S}$
Paralelo		$C_P = \frac{C_S}{(1 + D^2)}$	$R_P = R_S (1 + Q^2)$	$D = \frac{1}{Q} = \frac{1}{\omega R_P C_P}$
		$L_P = (1 + D^2) L_S$	$R_P = R_S (1 + Q^2)$	$Q = \frac{1}{D} = \frac{R_P}{\omega L_P}$

Figura 2.11: Equivalentes serie-paralelo. Fuente: [1]

2.6. Transformada Discreta de Fourier (TDF)

El aumento en la utilización de métodos digitales para ayudar en cálculos y para aplicaciones de procesamiento de señales ha provocado un interés creciente en una versión discreta de la transformada de Fourier. La TDF se define como la secuencia de N muestras de valor complejo en el dominio de la frecuencia dada por:

$$F_D(n\Omega) = \sum_{k=0}^{N-1} f(kT) e^{-j\Omega T n k}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad \text{Donde } \Omega = 2\pi/(NT) \quad (2.1)$$

Al utilizar aproximaciones numéricas a la transformada de Fourier, es necesario restringir el intervalo de observación a un valor finito. Por lo tanto se utiliza una función truncada con las siguientes características

$$\check{f}(t) = \begin{cases} f(t) & 0 \leq t < NT \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\check{f}(n\Omega) \cong \sum_{k=0}^{N-1} f(kT) e^{-jn\Omega kt} T \quad (2.3)$$

por lo tanto:

$$\check{f}(n\Omega) \cong \text{TF}_D(n\Omega) \quad (2.4)$$

Entre las comparaciones que existen con respecto a la transformada de Fourier continua es que la señal $f(t)$ se trunca en el intervalo $(0, NT)$, además dentro de este intervalo la señal $f(t)$ está disponible como una secuencia de N valores igualmente espaciados y se extiende en forma periódica dando lugar a frecuencias armónicas discretas $\Omega = 2\pi/(NT)$ lo que implica que los espectros calculados son periódicos a $N\Omega$. [12]

2.7. Transformada de Fourier Rápida (FFT)

El cálculo de la DFT requiere N^2 multiplicaciones lo que hace que el tiempo de cálculo resultante se vuelva excesivo cuando N se hace muy grande. La clave de los métodos de cálculo más eficientes es el empleo de toda la simetría posible de los exponentes complejos antes de realizar las multiplicaciones. La Transformada de Fourier Rápida ofrece reducciones significativas en el tiempo de cálculo debido que es un algoritmo que permite al usuario calcular la DFT con un tiempo mínimo. Este algoritmo calcula N componentes de frecuencia discretas a partir de N muestras. La FFT viene definida por las siguientes expresiones matemáticas:

$$F_D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) W^k \quad (2.5)$$

donde:

$$W^l = e^{-j2\pi l/N}, \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (2.6)$$

La ecuación 2.6 describe un fasor de magnitud unitaria y ángulo de fase de $\theta_l = -2\pi l/N$. Se considera que las componentes de frecuencia positiva están en $(0, N/2)$ y las de frecuencia negativa se hallan en $(N/2, N)$. Esta simetría también se puede utilizar para las muestras del tiempo en tiempos positivos y negativos, además como resultado de la extensión periódica los puntos de muestra 0 y N son idénticos en ambos dominios. Para funciones de valor real las componentes de frecuencia positiva son conjugadas complejas de las componentes de frecuencia negativa. [12]

En seguida se presentan algunos puntos que son útiles al procesar funciones del tiempo con la FFT. Nótese que la mayoría son el resultado de las consideraciones previas de la DFT y la transformada de Fourier.

- Se elige el número de muestras N tal que $N = 2^r$, con r entero. Este número puede incluir ceros aumentados.
- Para N muestras en el tiempo existen N frecuencias discretas.
- La componente de frecuencia más alta (esto es, $n = N/2$) es $(2T)^{-1}$ Hz; ésta se puede aumentar disminuyendo el espaciamiento entre muestras en el tiempo.
- El espaciamiento entre componentes de frecuencia es $(NT)^{-1}$ Hz; éste puede disminuir añadiendo ceros aumentados a la secuencia de muestras.
- La relación exacta de los valores de la FFT dependen de las constantes de multiplicación particulares asignadas en el algoritmo; un procedimiento común es dividir entre N de tal forma que los valores calculados sean $1/N$ veces los de la DFT.

Capítulo III

Procedimientos de la investigación

Con el fin de cumplir con los objetivos específicos planteados en la investigación, y por consiguiente, cumplir el objetivo general; el desarrollo de la investigación fue dividido en cuatro fases, las cuales se detallan a continuación:

3.1. Fase I. Revisión bibliográfica del contenido programático y manuales de usuario de los instrumentos utilizados en el laboratorio de la asignatura de Instrumentación Electrónica para determinar los instrumentos a desarrollar.

Se realizó la búsqueda de material bibliográfico relacionado con los equipos de medición utilizados en las prácticas del laboratorio de Instrumentación Electrónica, en primera instancia del contenido programático utilizado en el laboratorio de la asignatura, a partir de esta previa investigación se determinó los instrumentos de medición utilizados en las prácticas, por consiguiente se obtuvo el siguiente listado de los equipos a desarrollar:

- Osciloscopio digital Tektronix TDS380 [13]

- Analizador de espectro HP 8590 [14]
- Medidor de impedancias Fluke PM6306 [15]
- Generador de funciones aleatorias Tektronix CFG250
- Medidor de distorsión armónica total HP 332A [16]

A partir de esta selección se procedió a la revisión bibliográfica de los manuales de usuario de cada uno de estos instrumentos de medición a fin de conocer las funciones y configuraciones básicas que describen su funcionamiento, mediante el cual se procedió a la selección de los múltiples controles y parámetros de adquisición básicos que se implementarán mediante funciones en cada una de las interfaces graficas digitales.

Además se recurrió a la búsqueda de antecedentes, libros, artículos y algunos otros documentos que suministraron información de utilidad para la comprensión del funcionamiento de los equipos; entre los cuales se puede nombrar el trabajo de ascenso «Fundamentos Teóricos - Prácticos de Instrumentación Electrónica»[1] realizado por la Profesora- Ingeniero Grecia Romero, donde se describen a detalle cada uno de los instrumentos utilizados en la teoría y práctica de la asignatura, especificando su funcionamiento y tópicos de medición de cada dispositivo. También se utilizó como referencia bibliográfica el trabajo de ascenso del Profesor Antonio S. Fedon Novira [17] el cual enumera los fundamentos, descripción, interpretación y procedimientos de medición del Osciloscopio.

3.2. Fase II. Revisión bibliográfica de los manuales de usuario y desarrolladores de RedPitaya para determinar los lenguajes de programación a utilizar para el desarrollo de las interfaces de los instrumentos y algoritmos de medición.

Se realizó la búsqueda de material bibliográfico relacionado con los manuales de usuario y desarrolladores de RedPitaya con el fin de determinar el funcionamiento y las características propias de la tarjeta RedPitaya. Como se mencionó en el capítulo II, el hardware de adquisición (ADC) y generación (DAC) es controlado por el módulo FPGA de la tarjeta mediante parámetros establecidos por controladores desarrollados y compilados en C y ejecutados en la Red Pitaya, los cuales se encargan de la comunicación entre hardware e interfaz de usuario, ya sea consola de comandos o interfaz gráfica web. En este trabajo especial de grado se escogió la interfaz grafica web como interfaz de usuario puesto que permite mostrar una apariencia parecida a los instrumentos físicos disponibles en los laboratorios, y a su vez hacer más intuitivo el uso de las mismas.

Como base se tiene que toda interfaz desarrollada con páginas web debe iniciar con el lenguaje de programación HTML, el mismo permite la definición de la estructura visual estática, es decir, la distribución de los elementos del sitio web; para mostrar dinámicamente los datos adquiridos a través de la RedPitaya es necesario un lenguaje que permita el procesado e inserción de los datos en la estructura visual definida en HTML, por lo que se recurrió al lenguaje de programación Javascript para este fin, además mediante este lenguaje se puede establecer la comunicación con RedPitaya utilizando la librería AJAX.

El uso de Javascript para manipular la estructura definida por HTML (DOM) requiere largas y numerosas líneas de programación a medida que surgen más elementos que manejar, como por ejemplo la realización de gráficas, actualización de interfaz según controles seleccionados, entre otros. Para mejorar la eficiencia del

desarrollo de las interfaces se optó por hacer uso de la librería jQuery, que simplifica la manipulación del DOM mediante operaciones con javascript.

Observando las características que poseen las interfaces actuales de RedPitaya, se determinó que para mantener un diseño Responsivo; el cual es un diseño que puede ser visualizado en diferentes dispositivos y tamaños manteniendo una apariencia similar sin necesidad de diseñar el mismo sitio web múltiples veces para diferentes tamaños de pantalla; se puede usar las herramientas ofrecidas por Bootstrap, que no solo permite realizar un diseño único para múltiples plataformas, sino también mejora el aspecto visual y dinámico de la interfaz gracias a su integración con el lenguaje CSS y la librería jQuery

En resumen, los lenguajes utilizados para el desarrollo de las interfaces en este trabajo especial de grado, y sus funciones son:

Tabla 3.1: Lenguajes de programación seleccionados

Lenguaje	Función
HTML	Estructura general de la interfaz
Javascript	Procesamiento de datos y manejo de funciones de interfaz grafica
AJAX	Comunicación con RedPitaya
jQuery	Manipulación simple de la estructura HTML
Bootstrap	Mejora visual y soporte multiplataforma
CSS	Apariencia

Gracias a que los lenguajes a utilizar para el desarrollo de las interfaces de los instrumentos son ampliamente usados en el diseño y programación de páginas web, existe una amplia gama de opciones de herramientas de desarrollo que soportan los lenguajes de programación más usados para dicha tarea, entre las que se pueden nombrar Atom, Notepad++, NetBeans, Brackets. Este último entorno de programación fue seleccionado tanto por su integración con todos los lenguajes a usar, como por su simplicidad en uso y existencia de herramientas adicionales que ayudan en gran medida en el desarrollo, además de ser una herramienta gratuita con una comunidad que brinda soporte a través de foros en línea.

3.3. Fase III. Desarrolle los módulos de programación para la emulación del comportamiento de los controles y cálculo de mediciones disponibles de los instrumentos utilizados en el laboratorio de Instrumentación Electrónica.

Los controles diseñados para todas las aplicaciones desarrolladas en este trabajo especial de grado se utilizan para manipular el valor de variables utilizadas a lo largo de la ejecución de la aplicación correspondiente para establecer los parámetros de adquisición de RedPitaya y/o manipular la visualización de los datos, visualización de la interfaz o cálculo de medidas. A pesar de que se desarrollaron las aplicaciones para un mismo entorno de ejecución multiplataforma (Navegadores web), los controles desarrollados poseen diferencias entre sí en cuanto a funcionalidad y/o fin de los mismos, por lo tanto, a continuación se detallará el desarrollo de los controles y cálculos utilizados para cada aplicación particular.

3.3.1. Osciloscopio + Generador.

Debido a que la aplicación contiene múltiples variables de valor numérico controladas por el usuario que pueden ser manipuladas de manera continua, se desarrolló una función que altere el valor de la variable a modificar de acuerdo al cambio de un control general (Perilla), esta función modifica una variable específica según el control actualmente seleccionado. Los controles que pueden ser seleccionados para manipularse mediante la perilla de control general son:

- Escalas Verticales
- Escala Horizontal
- Desplazamientos Verticales
- Desplazamiento Horizontal

- Ajuste de calibración
- Cursores Verticales
- Cursores Horizontales
- Marcadores

Otros controles usados para establecer valores numéricos determinados por el usuario se definieron de forma tal que el valor es escrito manualmente debido a que no es necesario una variación continua del valor correspondientes a dichos controles, de manera tal que sus funciones de asignación verifican previamente que no contiene errores y puede ser guardado, o si debe ser corregido, ya sea por el usuario o directamente por la función. Los controles cuyos valores deben ser definidos directamente por el usuario son:

- Nivel de Trigger
- Amplitud del generador
- Frecuencia del generador
- Voltaje DC del generador

Los controles de guardado, agregar o quitar medidas, agregar o quitar marcadores, autoescala, revertir desplazamientos, reiniciar cursores, revertir ajustes de escala vertical, «adquirir» del trigger, ejecutan las acciones respectivas en sus funciones de llamado debido a que realizan manipulaciones directas sobre variables de visualización de la interfaz, visualización de los datos, o parámetros de adquisición.

Las funciones que procesan la información adquirida por Red Pitaya y la presentan en la interfaz gráfica para ser visualizada por el usuario se ejecutan de manera secuencial y periódica, tomando en cuenta todos los parámetros establecidos previos a la ejecución de las mismas. En general, el ciclo de refrescamiento de datos, procesado y presentación de los mismos empieza con la comunicación entre la interfaz y la RedPitaya. Debido a que la comunicación se establece mediante AJAX,

método que es asíncrono, es necesario condicionar cada paso de la comunicación a ejecutarse solo cuando se complete el anterior, lo cual se puede apreciar en la función «updateGraphData()» del código fuente de Osciloscopio + Generador. Esta función realiza todo el proceso mostrado en el diagrama de la figura 3.1 de forma macro, ya que internamente hace llamado a funciones que realizan las tareas de manera más específica. La función «send_params()» se encarga de realizar el paso uno del diagrama, llevando a cabo el proceso de verificación de parámetros establecidos y posteriormente comunicarse con RedPitaya para enviárselos, cuando se complete esa etapa de la comunicación. La función «send_petition()» realiza la petición de los datos adquiridos por RedPitaya según los parámetros enviados previamente, después de recibirlos, realiza los pasos 3,4 y 5 del diagrama; donde el paso 5 es detallado por el diagrama de la figura 3.2. Seguidamente, se ejecuta la función «graficar()» que efectúa un llamado secuencial de diferentes funciones que realizan los pasos restantes del diagrama y al completarlos establece un tiempo de espera para empezar de nuevo todo el ciclo.

Las operaciones matemáticas realizadas sobre los dos canales adquiridos por RedPitaya se muestran al usuario con la mayor escala vertical establecida entre ambos canales. Esto se debe a que la mayor escala supone la mejor visualización para los voltajes más altos adquiridos, de forma que el resultado de la operación sea comparable con los valores más significativos.

Los procesos de escalamiento vertical y horizontal realizados en el paso 6 del diagrama de la figura 3.1 se detallan en el diagrama de la figura 3.3. Debido a que la visualización de las señales y respectivos marcadores y cursores se realiza dentro de una grilla de 10x10 unidades (ver figura 3.4), es necesario normalizar los valores adquiridos por RedPitaya para que coincidan con las escalas por unidad seleccionadas por el usuario para cada canal, para esto se debe verificar la unidad en que estén los valores devueltos por la tarjeta.

Para la escala horizontal, los valores devueltos por RedPitaya pueden estar expresados en tres unidades de tiempo diferentes; 0: microsegundos ($1e-6$ segundos), 1: milisegundos ($1e-3$ segundos) ó 2: segundos; dependiendo de la longitud del

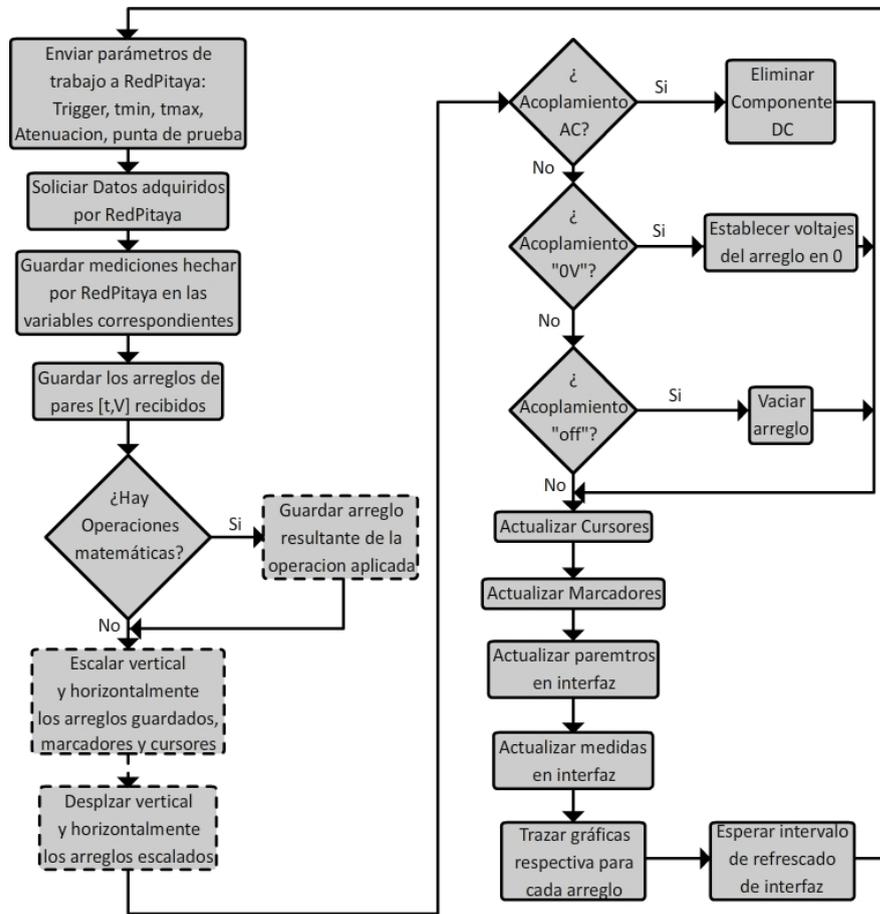


Figura 3.1: Diagrama de proceso de actualización de datos de la interfaz de osciloscopio. Fuente: propia

rango de tiempo a visualizar según la escala horizontal seleccionada por el usuario. Tomando en cuenta la unidad de tiempo en que RedPitaya devuelve los valores correspondientes al eje horizontal, estos se llevan a segundos y se normalizan dividiendo entre el valor numérico de la escala horizontal seleccionada por el usuario expresada en segundos (Ver ecuación 3.1).

$$\text{Tiempo}_{\text{norm}}[n] = \frac{\text{Tiempo}_{\text{no norm}}[n] * \text{Unidad de tiempo}}{\text{Escala}_{\text{horizontal}}} \quad (3.1)$$

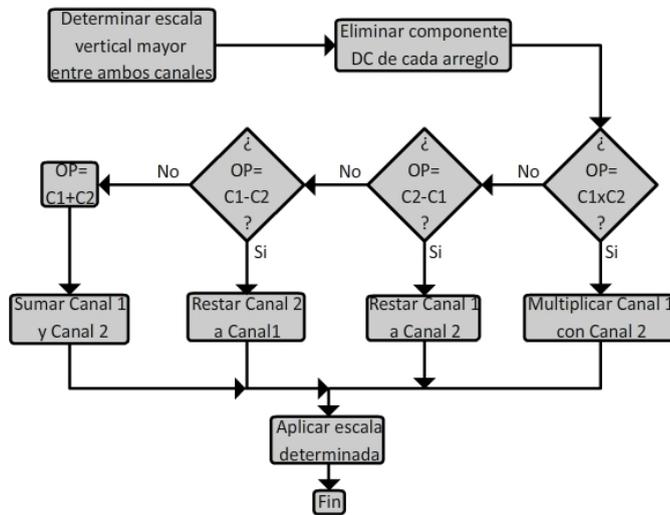


Figura 3.2: Diagrama de proceso de operaciones matemáticas de Osciloscopio. Fuente: propia

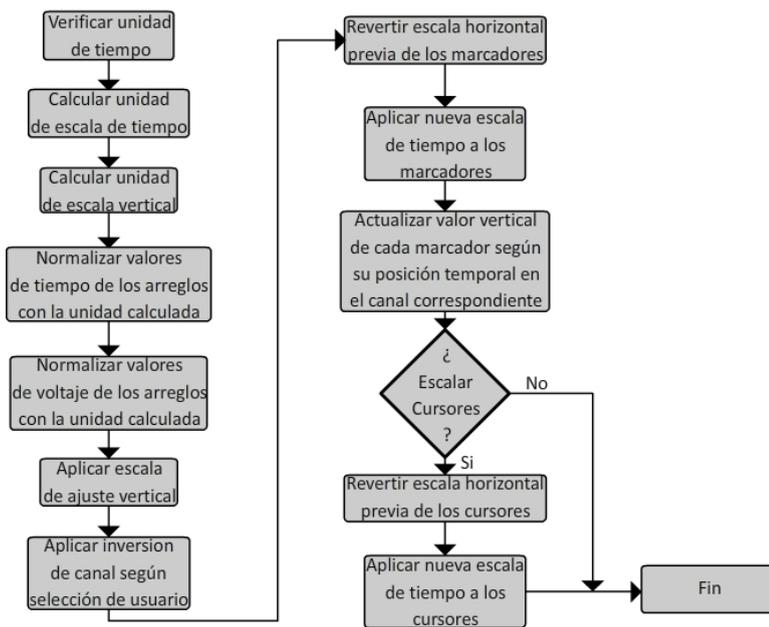


Figura 3.3: Diagrama de proceso de escalamiento de señales en Osciloscopio. Fuente: propia

Los valores de la escala vertical devueltos por RedPitaya están en unidades de voltaje, por lo que para normalizarlos solo es necesario dividir cada elemento correspondiente al voltaje del arreglo entre el valor de escala de voltaje por división

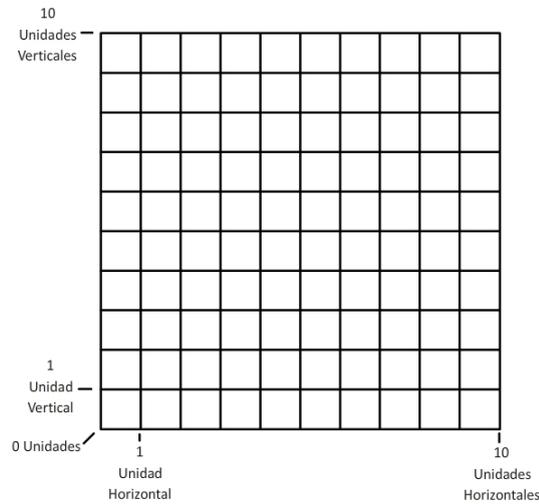


Figura 3.4: Grilla de Osciloscopio. Fuente: propia

seleccionado por el usuario, expresado directamente en voltios. Seguidamente se procede a aplicar el ajuste de escala vertical que esta expresado en forma porcentual para amplificar o atenuar digitalmente los valores de voltaje independientemente de su escala. Finalmente se aplica la inversión de canal; según sea la elección del usuario; multiplicando por (-1) (ver ecuación 3.2).

$$\text{Volt}_{\text{norm}}[n] = \frac{\text{Volt}_{\text{no norm}}[n]}{\text{Escala}_{\text{vertical}}} * (\text{Inv canal}) \quad (3.2)$$

A diferencia de los pares de valores tiempo/voltaje obtenidos en cada ciclo a través de RedPitaya, los valores correspondientes a los marcadores y cursores mantienen la normalización aplicada en el ciclo anterior, por lo tanto, para el caso de los marcadores, es necesario revertir la normalización aplicada en el ciclo anterior, esto se logra realizando una operación inversa a la mostrada en la ecuación 3.1 con la escala de tiempo utilizada en el ciclo anterior para posteriormente realizar la misma operación regular de dicha figura pero con la nueva escala de tiempo establecida para el ciclo actual, una vez ajustados los valores de tiempos, se ejecuta una función que obtiene el valor de voltaje correspondiente al tiempo en que se sitúa cada marcador, de esta forma cada uno se mantiene sobre el trazo de la señal correspondiente a su canal.

De forma similar ocurre con los cursores, en este caso el escalamiento depende del tipo de cursor; para los cursores verticales se aplica el mismo proceso de reversión de normalización y posterior normalización, descrito en el párrafo anterior para los marcadores, y para el caso de los cursores horizontales, se toman las escalas de voltaje para dicho proceso.

Estos procesos de escalamiento en cursores y marcadores verifican que las escalas hayan variado entre ciclos para llevarse a cabo y de esta manera ahorrar tiempo y recursos del dispositivo en cálculos innecesarios.

Los pasos del diagrama de la figura 3.1 referentes a la actualización de marcadores, cursores, parámetros y medidas en interfaz se encargan de mostrar en la interfaz los valores correspondientes a la posición de los marcadores y cursores, configuración actual de los parámetros de canal y trigger, y medidas seleccionadas por el usuario. Estas últimas son calculadas en cada ciclo, ya sea por RedPitaya; como es en el caso de voltajes máximo, mínimo y DC, periodo y frecuencia; o por la aplicación; como en los casos de Tiempo de subida, bajada y voltaje RMS (ver ecuación 3.3).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (V_{[n]}^2)} ; N : \text{Longitud de la serie o arreglo} \quad (3.3)$$

Para el cálculo del tiempo de subida se consideró que dentro del rango de un periodo de la señal, la misma puede tener una fase aleatoria, por lo que es posible que la pendiente de subida sea adquirida en partes diferentes como se muestra en la figura 3.5. Tomando este factor en cuenta, se desarrolló un algoritmo que considere dicho corrimiento sumando los tiempos de ambas partes (Azul) para obtener el tiempo total de subida. Este algoritmo se desarrolló de esta forma considerando que la señal de estudio es periódica y que su frecuencia es estable a lo largo del período usado para el cálculo del tiempo de subida. Para el tiempo de bajada se mantuvieron las mismas consideraciones y se realizaron los cálculos

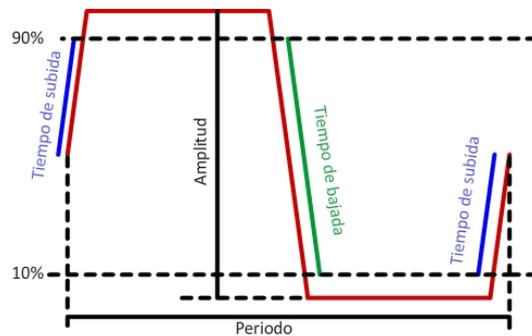


Figura 3.5: Tiempo de subida/bajada. Fuente: propia

Una vez realizados todos los cálculos y ajustes previamente descritos, se procede a trazar las gráficas correspondientes a cada canal, marcadores y cursores mediante el uso de la librería de «jQuery Plot» para luego esperar un período de tiempo para empezar de nuevo todo el proceso (Figura 3.1)

Los controles usados para manipular los parámetros del generador verifican los valores introducidos o seleccionados por el usuario y los guardan en variables, las cuales son utilizadas para comunicar los parámetros establecidos a RedPitaya durante el paso 1 del diagrama de la figura 3.1, por lo tanto, todos los ajustes que realice el usuario se reflejarán una vez culmine el proceso de envío de parámetros mencionado. El archivo que contiene la función definida por el usuario es enviado mediante un proceso de comunicación diferente al paso uno de l diagrama de la figura 3.1, ya que a diferencia de éste, se envía un archivo de extensión .CSV y no parámetros numéricos.

3.3.2. Medido LCR.

Para el medidor LCR se plantearon dos tipos de mediciones: Múltiples mediciones para una misma frecuencia (Barrido de mediciones) y Múltiples mediciones a diferentes frecuencias (Barrido de frecuencias); estos dos tipos de mediciones tienen parámetros comunes entre sí, para los cuales se diseñaron controles que funcionen para ambos casos, estos controles son:

- Amplitud de señal a aplicar
- Medidas por paso
- DC Bias
- Resistencia Shunt
- Escala de Eje Y
- Actualizar gráfica
- Calibración
- Medir
- Configuración

Los controles de Amplitud de señal a aplicar, Medidas por paso, DC Bias, Resistencia Shunt, son definidas manualmente por el usuario, por lo que se encargan de verificar que el formato del valor insertado sea correcto y que este dentro de los rangos de operación permitidos, en caso contrario se alertará al usuario para que éste corrija dicho valor. Los valores definidos para estos controles tienen la misma utilidad para ambos tipos de barrido, y son usados para definir parámetros a enviar a RedPitaya para el proceso de medición.

El control de Escala de eje Y contiene una lista de valores predefinidos, de la cual el usuario puede seleccionar uno, a partir del cual se visualizarán en la interfaz diferentes formatos de los datos medidos.

Los controles de «Calibración» y «Medir» llaman al mismo proceso, con la diferencia de que cuando se usa el primero, se activa un parámetro que indica que el proceso se realiza para medidas de calibración, de forma tal que los datos obtenidos de las mediciones se guarden en variables correspondientes para cálculos posteriores (Ver figura 3.6) mientras que cuando se usa el control «Medir», se verifica que previamente se ha realizado una calibración para usarla posteriormente en la compensación de impedancia introducida por circuitería al calcular los valores solicitados por usuario a partir de las medidas realizadas.

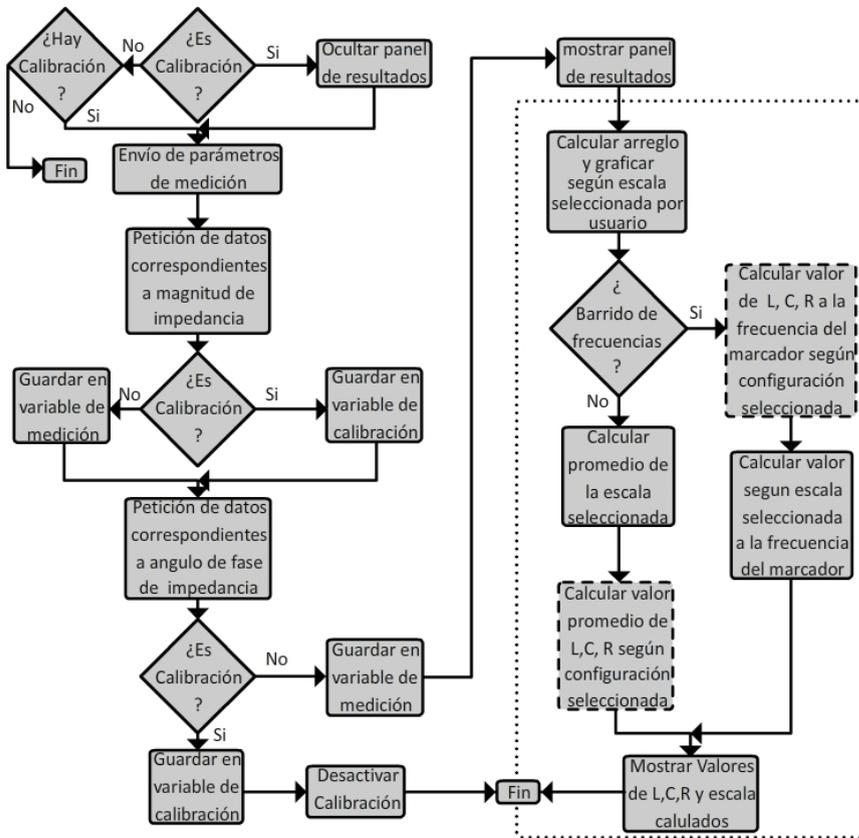


Figura 3.6: Diagrama de proceso de Actualización de datos de interfaz de medidor LCR. Fuente: propia

Una vez finalizada la recepción de datos, en caso de ser medición de impedancia de dispositivo desconocido (Medición de DUT), se muestra el panel de resultados y se actualiza la gráfica según la escala de eje «Y» seleccionada por el usuario. Dependiendo del tipo de medición realizada, se calculan de formas diferentes los valores a ser mostrados en el panel de resultados.

Para el caso de «Barrido de mediciones», todas las mediciones se realizan sobre una misma frecuencia, la cual debe ser asignada por el usuario mediante el control correspondiente, por lo tanto los resultados mostrados al usuario serán calculados en base al promedio de todas las medidas realizadas, dicha cantidad de medidas es definida por el usuario a través de un control para dicho fin. En base al promedio de magnitud y fase de impedancia de DUT e impedancia de circuitería,

se calculan los valores según escala y tipo de configuración seleccionada por el usuario.

Para el caso de «Barrido de frecuencias», el usuario establece las frecuencias de inicio y fin mediante los controles correspondientes, y define a través del control de saldos en frecuencia la cantidad de mediciones a realizar a lo largo del rango de frecuencias establecido. El usuario puede controlar la posición de un marcador a lo largo del rango de frecuencias medidas a través de una perilla, dependiendo de la posición (frecuencia) del marcador se mostrará al usuario el valor correspondiente por medio de interpolación lineal, y de igual forma se calculará los valores a la frecuencia correspondientes a la configuración seleccionada a partir de los valores de magnitud y fase del DUT previamente medidos.

El control «Actualizar gráfica» realiza el proceso delimitado por la línea punteada en el diagrama de la figura 3.6 en caso de que el usuario haya seleccionado una escala de eje «Y» diferente.

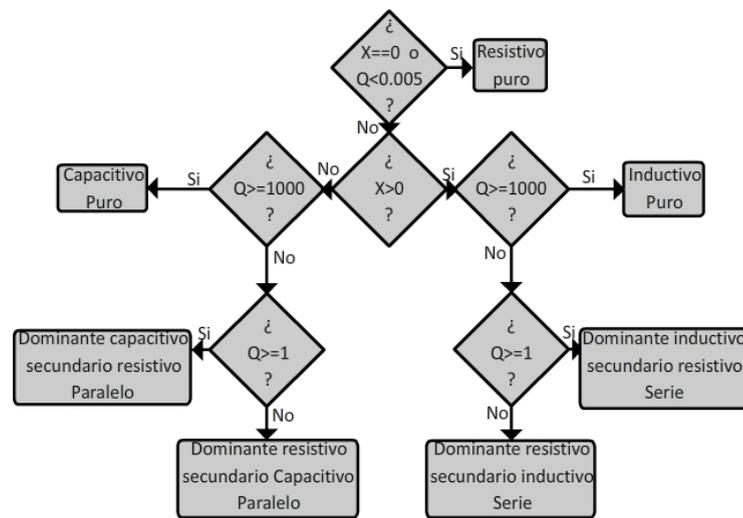


Figura 3.7: Diagrama de proceso de determinación de parámetros dominante y secundario en configuración automática. Fuente: propia

Mediante el control «Configuración» el usuario establece que tipo de configuración circuital desea visualizar como resultado. Este control posee tres opciones: Auto, Serie y Paralelo, donde para cada una se calcula el elemento dominante y el secundario del equivalente circuital según el factor de calidad y la admitancia

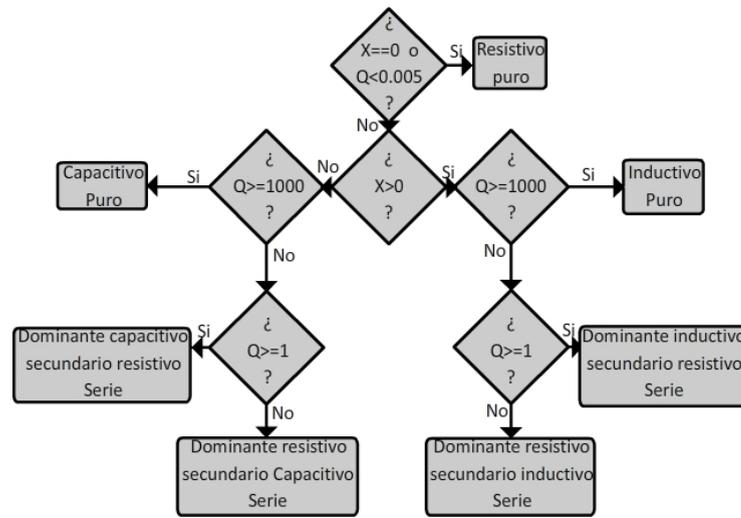


Figura 3.8: Diagrama de proceso de determinación de parámetros dominante y secundario en configuración serie. Fuente: propia

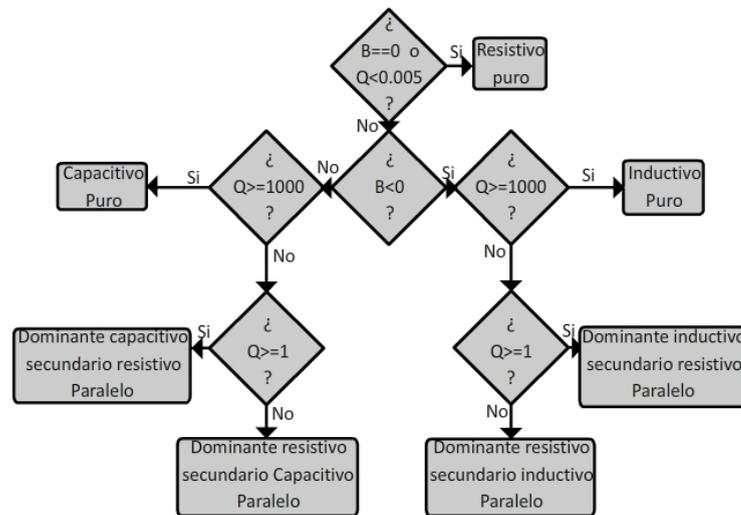


Figura 3.9: Diagrama de proceso de determinación de parámetros dominante y secundario en configuración paralelo. Fuente: propia

o susceptancia a la frecuencia medida. Las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 muestran los criterios y pasos a seguir para la determinación de los tipos de elementos concentrados equivalentes (R y, C o L) según la configuración seleccionada, una vez determinados estos elementos, se calcula su valor a partir de las ecuaciones de la figura 2.11 (Cap II) para posteriormente mostrarlos al usuario a través de la interfaz.

3.3.3. Analizador de espectros y medidor de distorsión armónica total.

Para la visualización de las señales se disponen de controles de selección de frecuencias, ancho de banda de resolución, nivel de referencia y piso de ruido. Mediante los controles de selección de frecuencia, el usuario puede establecer las frecuencias de inicio y fin a visualizar, o la frecuencia central y el ancho de banda (*span*) a mostrar en pantalla. Una vez que el usuario aplique las nuevas frecuencias a visualizar, estas pasan por un proceso que verifica que las mismas están dentro de los límites del instrumento (0 Hz – 62.5 MHz); en caso contrario se restablecen las frecuencias al valor previo a la modificación por parte del usuario (ver figura 3.10); posteriormente se compara la frecuencia final con la frecuencia máxima visible; la cual está directamente asociada al ancho de banda de resolución (ver tabla 3.2); para aumentar la frecuencia máxima en el caso de que sea necesario (ver figura 3.11)

Tabla 3.2: Ancho de banda de resolución y frecuencia máxima

Frecuencia máxima	62.5 MHz	7.8 MHz	976 kHz	61 kHz	7.6 kHz	953 Hz
BW,de resolución	30.52 kHz	3.81 kHz	476.6 Hz	61 Hz	29.78 Hz	0.46 Hz

Como se mencionó anteriormente, el ancho de banda de resolución está directamente asociado con la frecuencia máxima visible (tabla 3.2), por lo tanto, cuando el usuario utiliza el control de selección de ancho de banda de resolución, es necesario verificar que la frecuencia máxima sea mayor a la frecuencia final en pantalla, de lo contrario se modifican automáticamente los valores de frecuencias final, centro y *span* para cumplir con este límite (ver figura 3.12).

Para la visualización horizontal se tienen los controles de «nivel de referencia» y «piso de ruido» y selección de tipo de escala (dbm, mV, mW), donde el nivel de referencia establece el límite superior de la gráfica y el piso de ruido el límite inferior. Al igual que con los controles de frecuencia, cuando el usuario establece los valores de los controles mencionados en este párrafo, estos son analizados para

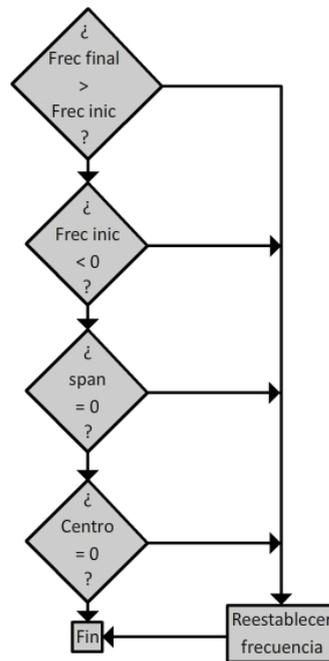


Figura 3.10: Diagrama de proceso de verificación de frecuencias asignadas por usuario. Fuente: propia

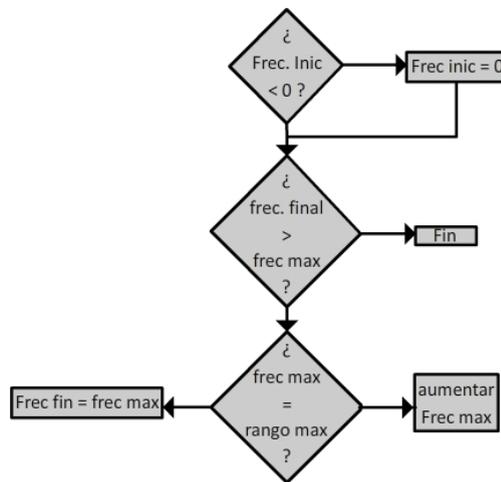


Figura 3.11: Diagrama de proceso de verificación de frecuencias máxima según ancho de banda de resolución y frecuencia final. Fuente: propia

verificar que sean correctos. El nivel de referencia se puede ajustar a diferentes escalas verticales según la selección del usuario. El piso de ruido se ajusta directamente a la escala en que trabaja el nivel de referencia.

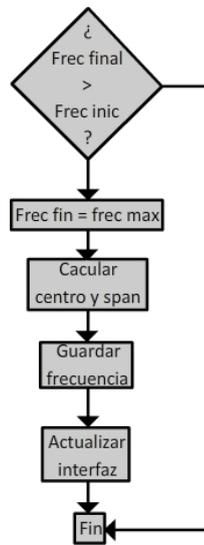


Figura 3.12: Diagrama de proceso de verificación de frecuencias al cambiar ancho de banda de resolución. Fuente: propia

Una vez establecidos las configuraciones de visualización, los mismos se usan para establecer los parámetros de adquisición de RedPitaya y posteriormente solicitar los datos adquiridos de cada canal. El proceso de comunicación con RedPitaya es igual al de «Osciloscopio y Generador» con la diferencia de los parámetros a enviar. Cuando se reciben los datos adquiridos, estos se guardan en arreglos para ser usados en los cálculos necesarios para mostrar en pantalla los valores a la escala y rango de frecuencias seleccionada por el usuario

Todos los valores numéricos establecidos manualmente por el usuario, se cuenta con un control que permite deshacer los cambios hechos por el usuario al valor previo a la aplicación de los mismos, dicho valor ya ha sido verificado y por lo tanto es correcto.

Para facilitar el análisis de las señales, se cuenta con controles que permiten agregar marcadores a cada canal y seleccionar el que se desee manipular. Una vez seleccionado el marcador, éste se podrá desplazar mediante el uso de una perilla de control para una variación continua de la posición del marcador. Para agregar un marcador se debe seleccionar previamente el canal, de igual forma si se desean eliminar todos los marcadores de un canal. El primer marcador de cada

canal puede ser utilizado para asignar la frecuencia central mediante el uso del control «marcador central».

Se dispondrá de una tabla de marcadores, la cual se visualizará según la selección del usuario y la existencia de marcadores en la gráfica. También se tiene la función de buscar picos, la cual desplaza el marcador seleccionado al punto de la serie el cual sea mayor al punto anterior y posterior, esta función se puede utilizar a través de los controles de «Buscar pico», «Buscar a la izquierda» y «Buscar a la derecha», donde el primero busca el primer pico de izquierda a derecha a partir de la frecuencia inicial, y los últimos dos controles buscaran a la izquierda o derecha de la posición actual del marcador respectivamente.

Para el cálculo de la distorsión armónica total (THD) el usuario determina la frecuencia fundamental usando el marcador 1 del canal a analizar, luego mediante el control de «THD» ejecuta la función que realiza el cálculo y lo muestra en pantalla. Esta función busca secuencialmente los voltajes máximos alrededor de los múltiplos de la frecuencia fundamental disponibles en la señal medida (según límite de frecuencia), la ventana de búsqueda es de 5 muestras (ver figura 3.13), donde la muestra central es el múltiplo de la frecuencia, por lo que el ancho de banda de la ventana depende del ancho de banda de resolución (ver tabla 3.3). Una vez obtenidos los valores de voltaje máximo disponibles, se aplica la ecuación 3.4 para obtener el resultado solicitado por el usuario

Tabla 3.3: Ancho de banda de ventana de búsqueda de armónicos Vs Ancho de banda de resolución

BW de ventana de búsqueda	122.07 kHz	15.23 kHz	1.91 kHz	119.14 Hz	14.84 Hz	1.86 Hz
BW de resolución	30.52 kHz	3.81 kHz	476.6 Hz	61 Hz	29.78 Hz	0.46 Hz

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2}} * 100 \% \quad (3.4)$$

Para el cálculo del índice de modulación AM, el usuario establece la frecuencia de la portadora usando el marcador 1 del canal seleccionado para realizar la

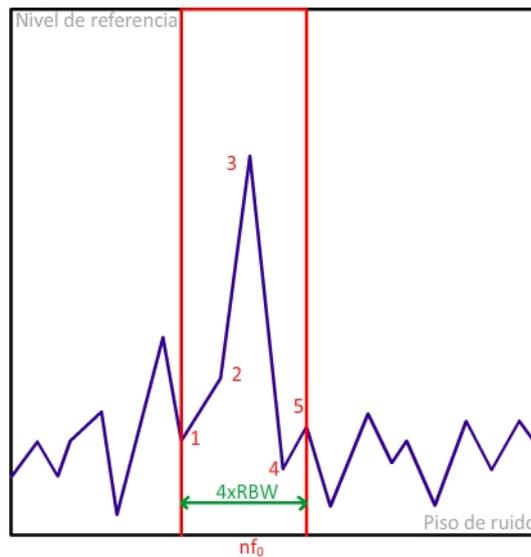


Figura 3.13: Ventana de búsqueda de armónicos de THD. Fuente: propia

medición, y la frecuencia de una de las bandas laterales con el marcador 2 (Se sobreentiende que el usuario está midiendo una señal AM de gran portadora, por lo que deben haber dos bandas laterales separadas de igual forma de la frecuencia portadora), una vez seleccionada se usa el botón «Índice de modulación AM» y se obtiene la medida utilizando la ecuación 3.5 .

$$m = 2\sqrt{\frac{P_m}{P_c}}, 100 \quad (3.5)$$

Para el cálculo de la relación de potencia promedio de canal vs potencia pico, se realiza una búsqueda de la mayor potencia dentro del ancho de banda establecido alrededor de la frecuencia central determinada por el marcador 1 del canal donde se realiza la medición, subsecuentemente se calcula el promedio de las potencias dentro del ancho de banda mencionado para obtener mediante una relación logarítmica, la relación entre ambos valores en unidades de decibelios.

3.4. Fase IV. Diseño de las interfaces gráficas que emulan la apariencia y funcionamiento de los instrumentos utilizados en el laboratorio de Instrumentación Electrónica.

3.4.1. Osciloscopio + Generador UC.

En la ventana principal de la aplicación de Osciloscopio (figura 3.14) se muestra como está conformada la interfaz gráfica, la cual posee el título en la parte superior de la interfaz, posee una grilla cuadrículada de 10x10 ubicada en la parte izquierda y un de total de 10 paneles desplegados en la parte derecha de la interfaz; por defecto el panel de Controles Básicos está desplegado al iniciar.

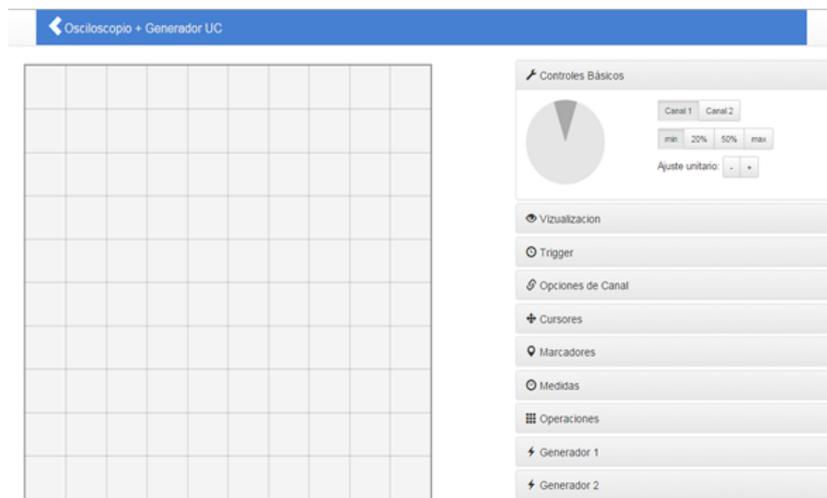


Figura 3.14: Interfaz Web – Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia

Mediante los 10 paneles; cada uno de ellos desplegados; se logra acceder a todas las opciones disponibles para el estudio, adquisición y generación de señales, las cuales son:

- **Controles Básicos:** Este panel (figura 3.15) incluye la perilla control general, el valor porcentual de variación, ajuste unitario y la selección del canal a utilizar mediante botones.

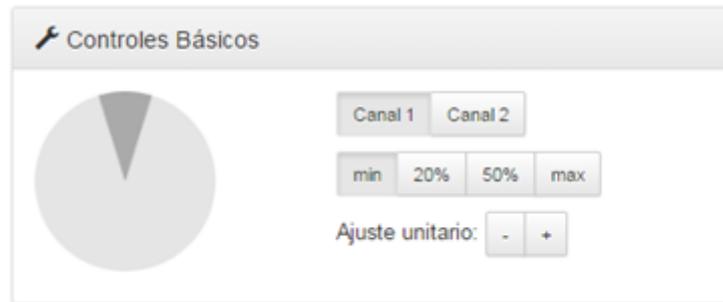


Figura 3.15: Controles Básicos. Fuente: propia

Por cada paso que se gire la perilla, se realizara una variación cuyo valor es el porcentaje seleccionado a la escala (Vertical u horizontal) donde la variación mínima es un 2 % de la escala a trabajar, y la máxima es 100 %. Al hacer click en ajuste unitario realiza la misma variación que un paso de la perilla al valor porcentual seleccionado.

- Visualización:** Esta opción permite al usuario seleccionar la escala a modificar sea vertical (1) u horizontal (2), utilizar la función de autoescala (3), desplazamiento de la señal en el tiempo (4) o amplitud (5), ajustar la calibración del eje vertical (6) e invertir la señal a visualizar (7), todas estas opciones son establecidas mediante botones tal como se puede observar en la figura 3.16.

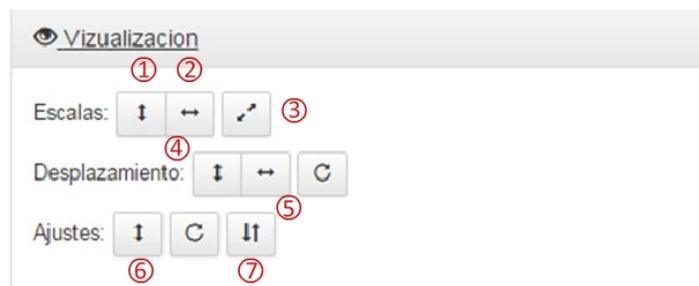


Figura 3.16: Opciones de Visualización. Fuente: propia

- Trigger:** Este panel incluye todo lo relacionado a la sincronización de la señal de entrada, posee varios botones según la figura 3.17, el cual definen el modo de adquisición, la pendiente ascendente o descendente, y el nivel del mismo.

Mediante el botón (1) se puede ajustar nivel de *Trigger* según la posición del cursor horizontal 1. En caso de usar el modo de sincronización «Una vez», la adquisición se realizara cada vez que se haga click sobre el boton «Adquirir».



Figura 3.17: Panel de configuración del Trigger. Fuente: propia

- Opciones de Canal:** En la figura 3.18 se puede apreciar las diferentes opciones de acoplamiento DC, AC, 0V y Off, además de la selección del tipo de punta 1x o 10x que se vaya a utilizar y ajustar la ganancia del canal «low voltage» o «high voltage» según la configuración de hardware utilizada en los jumpers de RedPitaya.



Figura 3.18: Opciones de Canal. Fuente: propia

- Cursores:** La interfaz de osciloscopio brinda cuatro cursores, dos verticales y dos horizontales, estos se activan (1) y desactivan (2) mediante botones (figura 3.19), y se ajustan sus posiciones a través de la perilla del panel de Controles Básicos. Además proporcionan una tabla que indica la posición (tiempo o

voltaje) para cada cursor activado. Se puede centrar cada cursor seleccionado mediante el botón (3) o todos los cursores visibles mediante el botón (4). En caso de seleccionar la opción de «Ajustar Cursores» estos mantendrán sus posiciones relativas (Tiempo voltaje) si se realiza un cambio en escalas o desplazamientos, de lo contrario los cursores mantendrían sus posiciones en pantalla a pesar de los cambios en la visualización de la señal.



Figura 3.19: Panel de cursores. Fuente: propia

- Marcadores:** Se encarga de suministrar marcadores para el estudio puntual de la señal; estos se podrán activar (1) y desactivar (2) mediante los botones. Cada marcador se ajusta mediante la perilla del panel de Controles Básicos. Los marcadores podrán ser seleccionados mediante las listas desplegadas (3 y 4) según el canal en que fueron agregados, de manera que puedan ser desplazados a través del uso de la perilla o eliminados con el botón (2). Con el uso del botón «Tabla» se genera una tabla debajo de la gráfica con todos los marcadores visibles y sus valores respectivos. Si se desea eliminar todos los marcadores del canal seleccionado, se hace uso del botón (5) (figura 3.20).
- Medidas:** Este panel incluye las medidas básicas en un osciloscopio las cuales son la determinación del voltaje máximo, mínimo, pico-pico, DC y RMS, además de las mediciones de frecuencia, período, tiempo de subida y bajada de las señales bajo estudio. Estas medidas serán visualizadas en la parte inferior de la gráfica. Para eliminar una medida, se debe seleccionar la misma en la lista desplegable (1) y usar el botón (2), o para eliminarlas todas el botón (3).



Figura 3.20: Panel de marcadores. Fuente: propia

Estas medidas se realizan sobre el canal seleccionado en el panel de controles básicos (figura 3.21).



Figura 3.21: Panel de medidas. Fuente: propia

- **Operaciones:** en este panel se incluyen las diferentes operaciones matemáticas, cuando se utilizan los dos canales de entrada del osciloscopio. También se incluye la opción de guardado de gráficos (1), datos (2) y mediciones (3) para su posterior análisis y/o estudio de la señal (figura 3.22).
- **Generador 1 y 2:** Este panel permite la configuración de parámetros para la generación de funciones de diferentes tipos, entre los cuales se pueden generar señales senoidales, cuadrada, triangular o definidas, ajustando la amplitud, frecuencia y voltaje DC. Teniendo como limitante generar funciones hasta 50 MHz y una amplitud máxima de 2 volts. Posee la opción de generar una señal definida por usuario a partir de un archivo *.CSV que debe ser enviado a RedPitaya mediante el botón «Subir Archivo», el cual describe los



Figura 3.22: Operaciones matemáticas y opciones de guardado. Fuente: propia

voltajes de una señal cuadrada a lo largo de un período según la frecuencia establecida en la interfaz (figura 3.23).

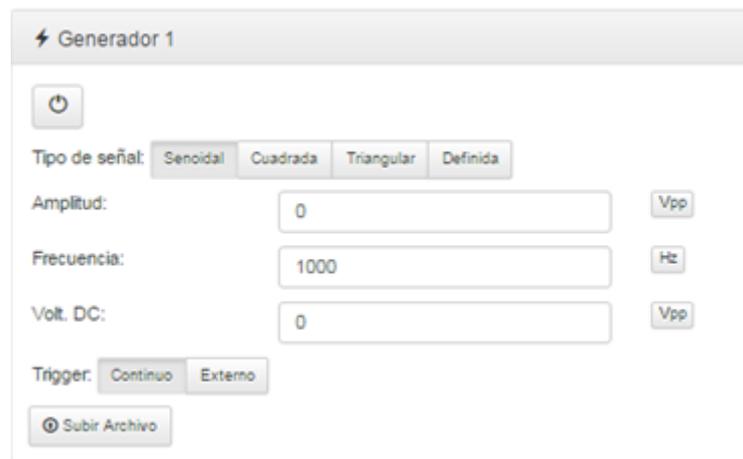


Figura 3.23: Panel Generador de funciones. Fuente: propia

3.4.2. Medidor LCR UC.

En la ventana principal de la aplicación de Medidor LCR (figura 3.24) se muestra como está conformada la interfaz gráfica, la cual posee el título en la parte superior de la interfaz, posee una grilla; cuyas cuadrículas dependen de las escalas de los datos mostrados; ubicada en la parte izquierda y un de total de 4 paneles desplegables en la parte derecha de la interfaz.

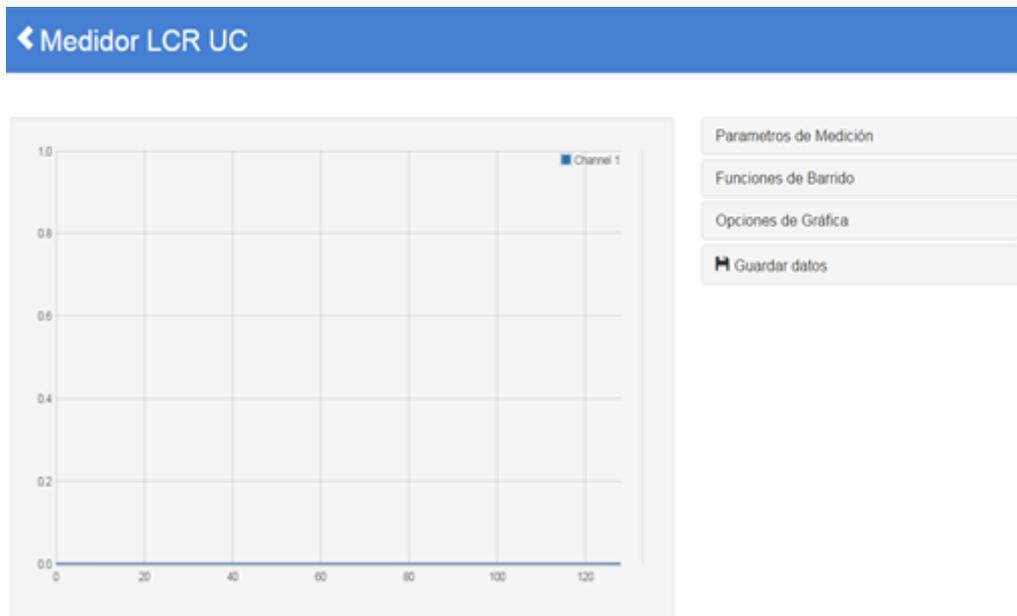
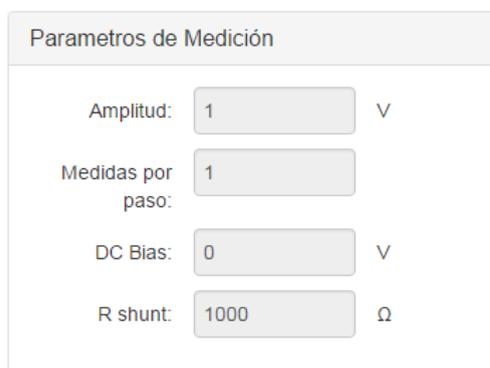


Figura 3.24: Interfaz Web – Medidor LCR UC. Fuente: propia

Con los 4 paneles (cada uno de ellos desplegable) se logra acceder a todas las opciones disponibles para el estudio de impedancias desconocidas mediante Red-Pitaya, estos paneles son:

- **Parámetros de Medición:** Este panel está dispuesto para ajustar la señal que se le aplicará al circuito; conformado por el dispositivo bajo prueba (DUT) y la resistencia shunt utilizada; con los parámetros de amplitud, medidas por paso y DC BIAS, además de establecer el valor de la resistencia SHUNT que se utilizará en el proceso de medición. Véase figura 3.25.
- **Funciones de Barrido:** Este panel cuenta con dos subpaneles desplegable, los cuales son:
 - **Barrido de Mediciones:** Se seleccionan las opciones de medición (figura 3.26) para el estudio en una frecuencia fija ajustable y el número de mediciones que realizara el estudio para dicha frecuencia
 - **Barrido en Frecuencia:** Este panel posee las opciones de ajustes del barrido en frecuencia del dispositivo bajo prueba, como son el ajuste de



Parámetros de Medición

Amplitud: 1 V

Medidas por paso: 1

DC Bias: 0 V

R shunt: 1000 Ω

Figura 3.25: Parámetros de Medición. Fuente: propia



Funciones de Barrido

Barrido de Mediciones

Frecuencia: 1000 Hz

Cantidad de mediciones: 10

Escala: Lin

Carga Re: 0 Ω

Carga Im: 0 Ω

Medir Calibrar

Figura 3.26: Opciones de Barrido de Mediciones - LCR. Fuente: propia

la frecuencia inicial y final, el número de medidas por frecuencia. Véase figura 3.27.

Para ambos casos se tienen los botones de medir y calibrar, los cuales ejecutan las funciones descritas en la sección de medidor LCR de la fase 3

- **Gráficos:** Este panel (figura 3.28) proporciona la selección de resultados trazados en el eje Y el cual puede ser uno de los siguientes: magnitud de la impedancia ($|Z|$) o fase, magnitud de la admitancia ($|Y|$) o fase, reactancia en serie (X_s), inductancia en serie (L_s), capacitancia en serie (C_s), resistencia en

Barrido de Frecuencia

Frecuencia Inicial: 200 Hz

Frecuencia Final: 10000 Hz

Salto en Frecuencia: 10

Escala: Lin

Carga Re: 0 Ω

Carga Im: 0 Ω

Medir Calibrar

Figura 3.27: Opciones de Barrido de Frecuencia - LCR. Fuente: propia

serie (R_s) o reactancia en paralelo (X_p), inductancia en paralelo (L_p), capacitancia en paralelo (C_p) y resistencia en paralelo (R_p), además el factor calidad (Q) o de disipación (D).

Opciones de Gráfica

Eje Y: |Z| / Ohm

Actualizar Gráfica

Figura 3.28: Opciones de escala - LCR. Fuente: propia

- **Guardar:** Este panel ofrece las opciones de guardado de gráficos obtenidos (1), pares datos ordenados de la señal visualizada (2) o valores característicos del dispositivo bajo prueba (3) (figura 3.29).

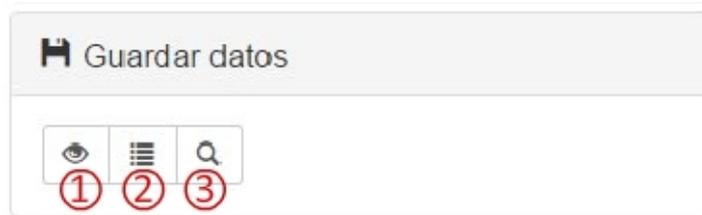


Figura 3.29: Panel de guardado - LCR. Fuente: propia

3.4.3. Analizador de Espectro y medidor de THD - UC

En figura 3.30 se muestra como está conformada la interfaz de la aplicación, la cual posee el título en la parte superior de la interfaz, posee una grilla cuadriculada; cuya proporción de cada cuadrícula depende de los rangos a visualizar; ubicada en la parte izquierda y un de total de 5 paneles desplegable en la parte derecha de la interfaz.

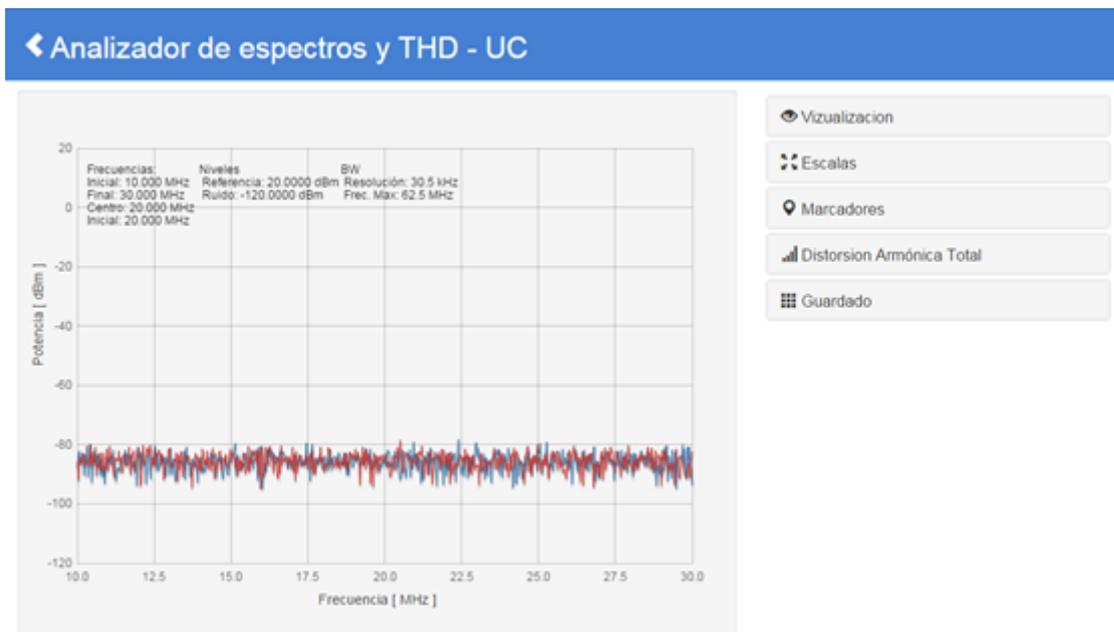


Figura 3.30: Interfaz Web – Analizador de Espectros y THD – UC. Fuente: propia

Estos paneles desplegable disponibles en la aplicación son los siguientes:

- **Visualización:** Este panel dispone de las opciones que permiten al usuario visualizar u ocultar un canal y congelar la lectura (Mantener la gráfica en pantalla sin adquirir nuevos datos), el ajuste del ancho de banda de resolución y especifica la frecuencia máxima a la cual la aplicación puede trabajar según la resolución seleccionada. Véase figura 3.31.



Figura 3.31: Panel de visualización - Analizador de espectros. Fuente: propia

- **Escalas:** Este panel incluye las opciones de selección de frecuencia inicial y final o central y span para ser establecidas por el usuario, además se incluye el botón Mrk 1 donde su función es ajustar la frecuencia central de acuerdo a la ubicación del marcador 1 del canal seleccionado en el panel de marcadores (Este botón ejecuta el control «Marcador central» descrito en la fase anterior). También se disponen las opciones de ajuste del nivel de referencia y la selección de la unidad en potencia (dBm, mV, mW) en el espectro. Vease figura 3.32.
- **Marcadores:** Mediante este panel (figura 3.33) se acceden a las opciones de activación y desactivación de marcadores en el canal 1 o canal 2 ajustándolos a través de la perilla de mando y mostrando los resultados de la posición de los mismos a través de una tabla, además se incluye la búsqueda del valores pico y el ajuste del piso de ruido del espectro. Para agregar un marcador se selecciona el canal donde se desea y se presiona el botón «+», para eliminarlos o manipularlos se procede de la misma forma en que se manipulan los marcadores del «Osciloscopio + generador». El botón «Tabla» muestra una tabla debajo de la gráfica, con los valores correspondientes a cada marcador



Figura 3.32: Panel de configuración de frecuencias y referencia - Analizador de espectros. Fuente: propia

visible. El botón «Centrar» posiciona el marcador seleccionado en el centro del rango de frecuencias a visualizar (Frecuencia central).



Figura 3.33: Panel de Marcadores - Analizador de espectros. Fuente: propia

- **Distorsión Armónica Total:** Este panel incluye la función de cálculo de THD mediante la selección de la frecuencia fundamental definida por el primer marcador del canal seleccionado. El resultado de cálculo se mostrara en este mismo panel, Ver figura 3.34.



Figura 3.34: Panel de función de cálculo de THD - Analizador de espectros. Fuente: propia

- **Mediciones:** Este panel incluye las funcione de cálculo de índice de modulación AM y relación de potencia pico y potencia promedio del canal, permitiendo seleccionar el canal donde se realizará la medición. Para el cálculo de la relación de potencia pico y potencia promedio del canal se tiene un cuadro para especificar el ancho de banda dentro del cual se realizara el promedio y búsqueda de potencia pico. Los resultados obtenidos se muestran directamente debajo de los controles asociados a cada medición, Ver figura 3.35.
- **Guardar:** Ofrece opciones de guardado de gráficos (1), pares datos ordenados de las señales medidas (2) y parametros usados en el estudio (3) (Ver figura 3.36).



Figura 3.35: Panel de mediciones - Analizador de espectros



Figura 3.36: Panel de guardado - Analizador de espectros. Fuente: propia

Capítulo IV

Análisis, interpretación y presentación de los resultados

Luego de la realización de todas las tareas necesarias para el cumplimiento de los objetivos planteados, el resultado obtenido son las diferentes interfaces gráficas capaces de emular los diferentes dispositivos disponibles en el laboratorio de la asignatura Instrumentación Electrónica, con el fin de aportar a el laboratorio nuevas tecnologías para la capacitación de los estudiantes de manera equitativa e interactiva.

4.1. RedPitaya: interfaz de entrada

Las diferentes interfaces gráficas digitales son aplicaciones instaladas en la tarjeta de desarrollo RedPitaya, donde el acceso a estas aplicaciones viene dado mediante cualquier dispositivo que soporte la carga de páginas web como lo son las computadores fijas o portátiles, tabletas y teléfonos inteligentes; a través de la introducción de la dirección IP asociada a RedPitaya se podrá acceder a las aplicaciones de osciloscopio con generador de funciones aleatorias, analizador de espectro y medidor LCR. Véase figura [4.1](#).



Figura 4.1: Interfaz de entrada - RedPitaya. Fuente: propia

Una vez el usuario tenga acceso a cualquiera de las aplicaciones suministradas, en el caso que se vaya a estudiar las características propias de la señal en el dominio del tiempo o en la frecuencia este debe introducir la señal bajo estudio en uno de los dos puertos de entrada. Si el usuario desea generar alguna función aleatoria, este debe conectarse en uno de los dos puertos de salida de la misma tarjeta.

En el caso de utilizar la aplicación de medidor LCR se debe hacer uso de la circuitería externa suministrada (ver figura 4.22), además de conectar; adecuadamente guiándose por la ilustración impresa en el circuito externo; las dos entradas y la salida OUT 1 a la tarjeta RedPitaya para que la aplicación LCR realice el proceso de cálculo interno de forma adecuada y arroje resultados propios del dispositivo bajo prueba.

4.2. Resultados y comparaciones entre la interfaz gráfica Osciloscopio + Generador UC mediante el uso de RedPitaya y el Osciloscopio digital Tektronix TDS380:

Prueba 1: Señal medida de tipo senoidal de frecuencia 5 KHz y amplitud de 1,47V producida por el generador de funciones marca Tektronix.

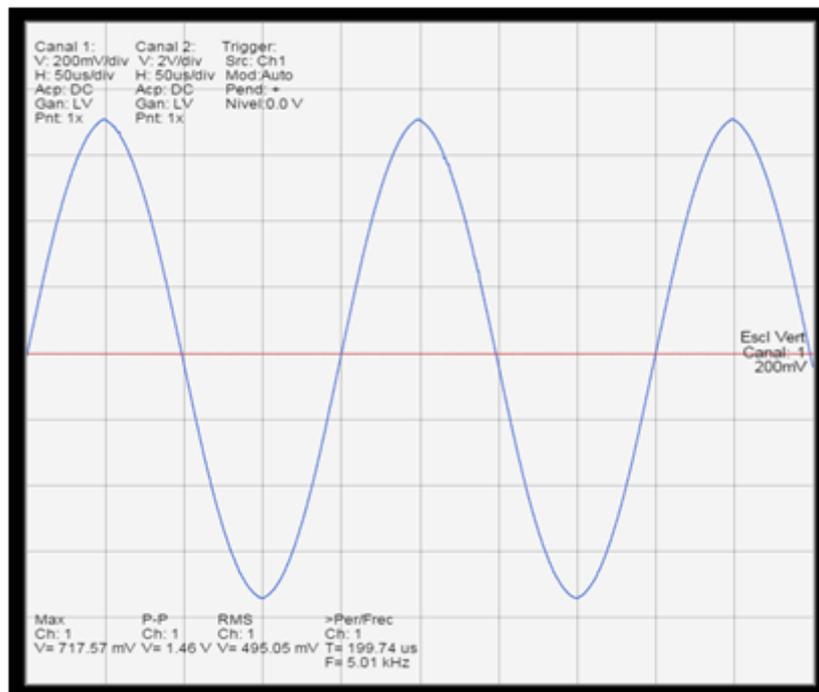


Figura 4.2: Señal medida a través de la aplicación Osciloscopio + Generador UC.
Fuente: propia

Para esta prueba se tomó una señal senoidal y se le solicitó para ambos instrumentos las medidas de frecuencia, voltaje máximo, RMS y pico-pico, obteniendo en ambos casos resultados ciertamente iguales o muy parecidos, véase figura 4.2 donde podemos apreciar la interfaz virtual configurada con la escala horizontal 50us/div y la vertical 200mV/div, obteniendo medidas de frecuencia de 5.01KHz, periodo 199.74us, valor RMS 495.05mV, valor pico-pico 1.46 V y valor máximo 717.57mV respectivamente. Visualizando la figura 4.3 podemos apreciar una frecuencia de

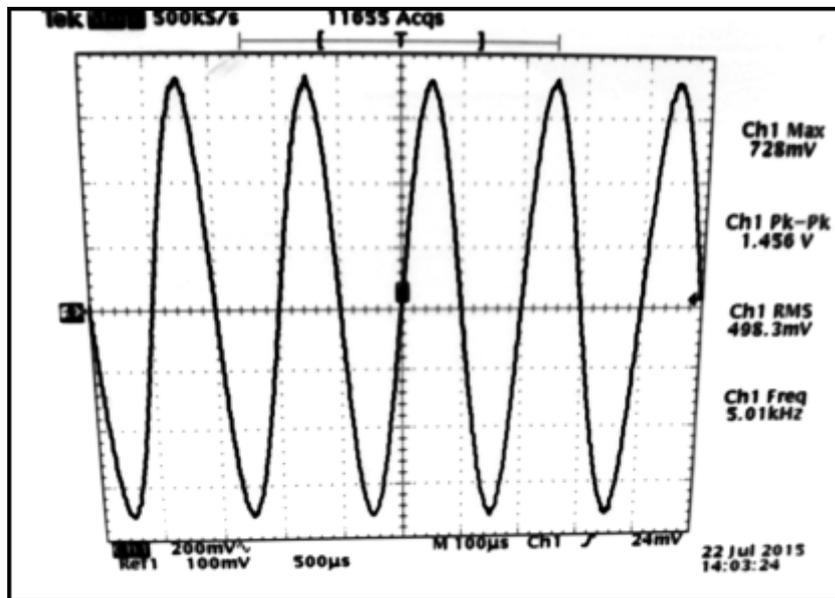


Figura 4.3: Señal medida a través de Osciloscopio Tektronix TDS380. Fuente: propia

5.01KHz, valor RMS 498.3mV, valor pico-pico 1.456 V y valor máximo 728mV cumpliendo de esta manera con los resultados esperados de gráfica y medición. Además también se le solicitaron las mediciones de voltaje mínimo, DC, tiempo de subida y bajada, para el cual los resultados en ambos equipos fueron muy aproximados, véase tabla 4.1 y figuras 4.4 y 4.5.

Tabla 4.1: Tabla comparativa de medidas adquiridas - Osciloscopio + Generador - UC

	Aplicación Osciloscopio + Generador - UC	Osciloscopio Tektronix TDS380	Error porcentual entre mediciones(%)
Frecuencia	5.01KHz	5.01KHz	0 %
Valor pico-pico	1.46 V	1.456 V	0.27 %
Valor RMS	495.05 mV	498.3 mV	0.65 %
Valor Máximo	717.57 mV	728 mV	1.4 %
Valor Mínimo	-745.47 mV	-740 mV	0.73 %
DC	-3.57 mV	-3.904 mV	8.93 %
Tiempo de Subida	61.440 us	58 us	5.76 %
Tiempo de Bajada	60.928 us	58 us	4.92 %

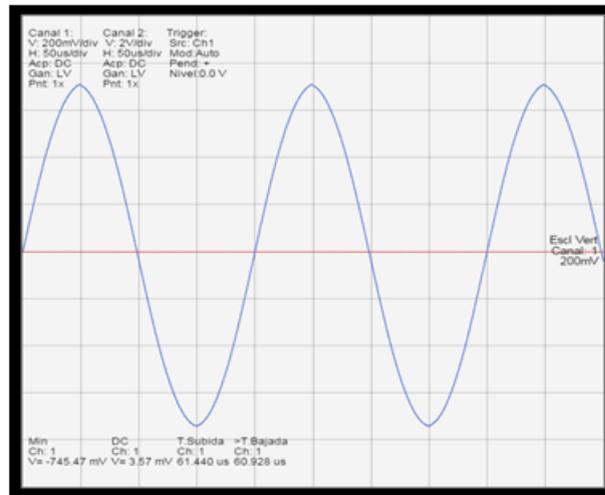


Figura 4.4: Otras mediciones con la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia

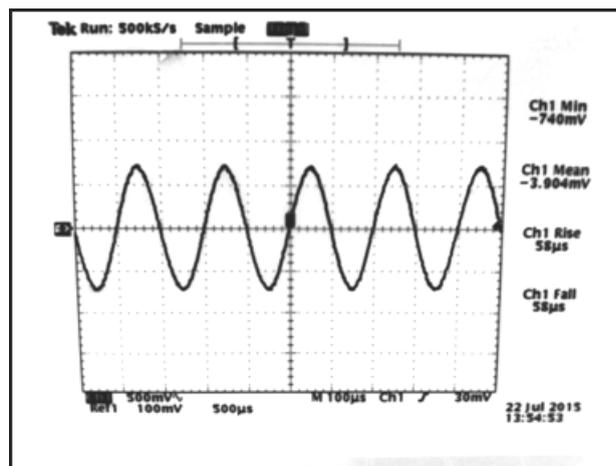


Figura 4.5: Mediciones de Osciloscopio Tektronix TDS380. Fuente: propia

Prueba 2: Visualización simultanea de los dos canales disponibles en la interfaz grafica con diferentes tipos de onda.

Se puede visualizar en las figuras 4.6 y 4.7 la medición de dos señales de diferentes tipos de ondas; el canal 1 para ambos dispositivos contiene una señal cuadrada en la entrada de frecuencia de 5KHz y voltaje pico-pico de 1V, mediante las opciones de adquisición se puede apreciar que las mediciones obtenidas para ambos

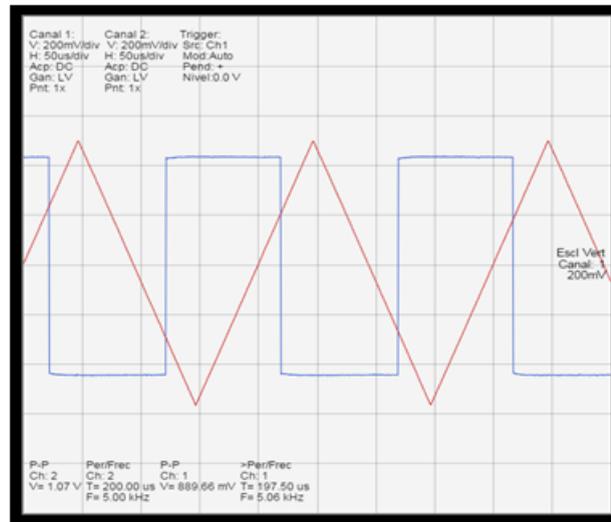


Figura 4.6: Onda cuadrada y Triangular vista desde la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia

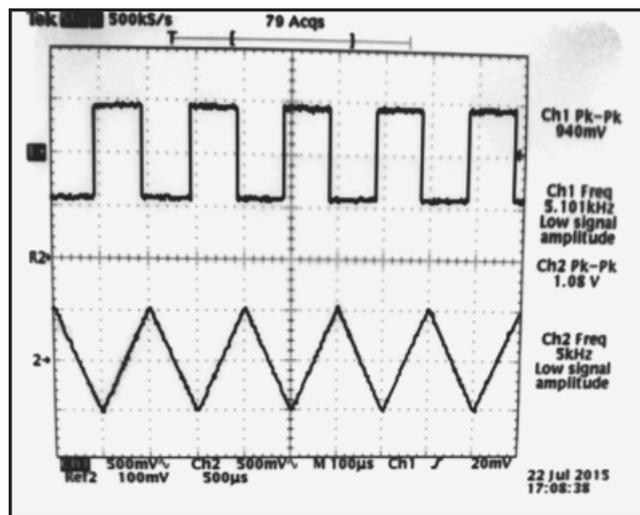


Figura 4.7: Onda cuadrada y Triangular vista desde Osciloscopio Tektronix TDS380. Fuente: propia

casos son muy parecidas entre la aplicación y el osciloscopio digital Tektronix (véase tabla 4.2), verificando así la precisión que posee la aplicación del osciloscopio creada mediante la adquisición de datos de la tarjeta RedPitaya. De igual manera se utilizó el canal 2 pero esta a su vez se le introdujo una señal de tipo triangular.

Tabla 4.2: Tabla comparativa de medidas adquiridas en dos canales - Osciloscopio + Generador - UC

	Aplicación Osciloscopio + Generador - UC		Osciloscopio Tektronix TDS380		Error porcentual entre mediciones(%)	
	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2
Frecuencia	5.06 KHz	5 KHz	5.101 KHz	5 KHz	0.81 %	0 %
Valor pico-pico	889.66 mV	1.07 V	940 mV	1.08 V	5.51 %	0.93 %

Prueba 3: Uso de cursores y marcadores.

Para esta prueba se habilitaron las opciones propias de los cursores y marcadores, además de la inclusión de las tablas suministradas por la aplicación. En la figura 4.8 podemos observar la activación simultánea de los cursores verticales y horizontales, para el cual se le incluye su correspondiente tabla indicando la posición de cada cursor.

Entre las ventajas que posee la aplicación de osciloscopio de RedPitaya sobre el osciloscopio digital Tektronix es la forma en que se puede utilizar los cursores horizontales y verticales simultáneamente, tal y como se puede visualizar en la figura 4.8 , además de proporcionar tabla de resultados (Ver figura 4.9).

En el caso de la activación de los marcadores, véase figura 4.10, se puede apreciar que el comportamiento de los mismos es de manera precisa ubicando los puntos del gráfico seleccionado por el usuario tanto en el canal 1 como el canal 2, además de incluir su correspondiente tabla, véase figura 4.11. Esta opción es una ventaja frente al osciloscopio digital Tektronix debido a que este equipo en particular no posee opciones de marcadores.

Prueba 4: Operaciones matemáticas. Se utilizaron dos señales de tipo senoidal ambas con la misma frecuencia de 5KHz pero con una variación en amplitud, el canal 1 (señal azul) posee una amplitud de aproximadamente 800mv pico-pico mientras en canal 2 (señal roja) posee una amplitud de 1V pico-pico. Al efectuar las diferentes operaciones matemáticas CH1+CH2, CH1-CH2 y CH1xCH2 se puede observar que los resultados obtenidos por la aplicación son análogos con los

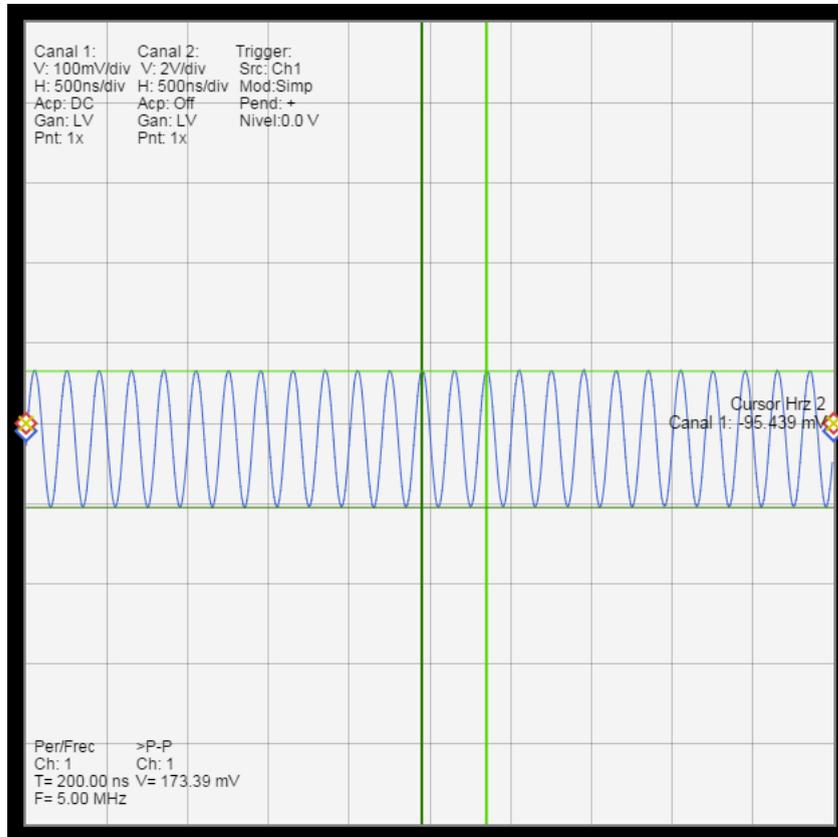


Figura 4.8: Cursores de la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia

resultados que muestra el osciloscopio digital Tektronix, véase figuras 4.12, 4.13 y 4.14, donde la señal resultante a la diferentes operaciones (Señal purpura) cumple con los resultados esperados.

Prueba 5: Utilización de puntas de pruebas 1x y 10x.

Mediante esta prueba se puso en funcionamiento las opciones disponibles por la aplicación para el escalamiento de la señal de entrada de acuerdo con el tipo de punta que se vaya a utilizar. Entre los resultados podemos observar el tipo de configuración (1x o 10x) para el cual la interfaz es capaz de mostrar y escalar de acuerdo a las especificaciones de las puntas de prueba utilizadas (ver figura 4.15). Véase las figuras 4.16 y 4.17 donde se utilizan los dos canales disponibles con horizontal de 500us y vertical de 500mV para la visualización de la misma señal, para el canal 1

Marcadores canal 1		
Marcador	Tiempo	Voltaje
1.1	97.280 us	371.200 mV
1.2	294.912 us	370.500 mV

Marcadores canal 2		
Marcador	Tiempo	Voltaje
2.1	151.552 us	495.000 mV
2.2	351.232 us	494.600 mV

Figura 4.11: Tabla Marcadores de la aplicación Osciloscopio + Generador UC.
Fuente: propia

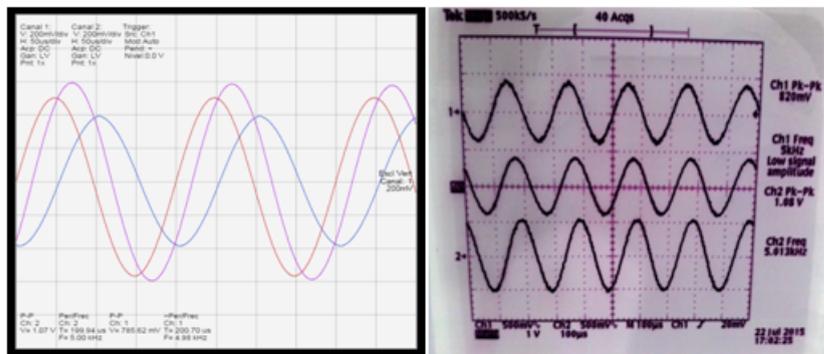


Figura 4.12: Operación matemática CH1+CH2. Fuente: propia

a la selección de punta 10x podemos obtener una visualización análoga al canal 2 debido que se compensa la señal de entrada.

Prueba 6: Generación de una señal de tipo senoidal (figura 4.18) para comprobar el funcionamiento del Generador de funciones.

Para esta prueba se generó una señal de tipo senoidal de frecuencia 1KHz y amplitud de 1V a través de la aplicación de Generador 1, la cual fue medida por

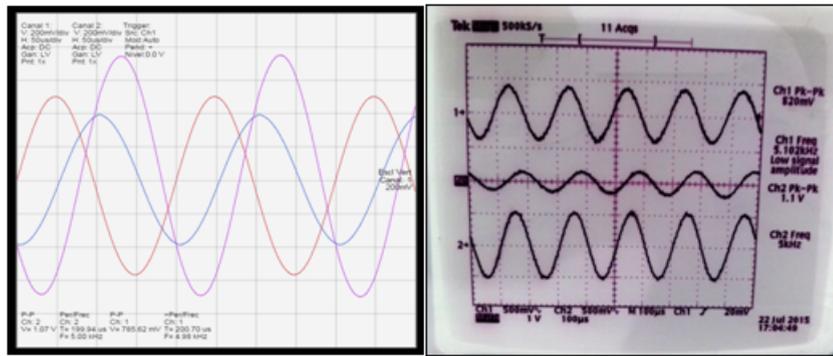


Figura 4.13: Operación matemática CH1-CH2. Fuente: propia

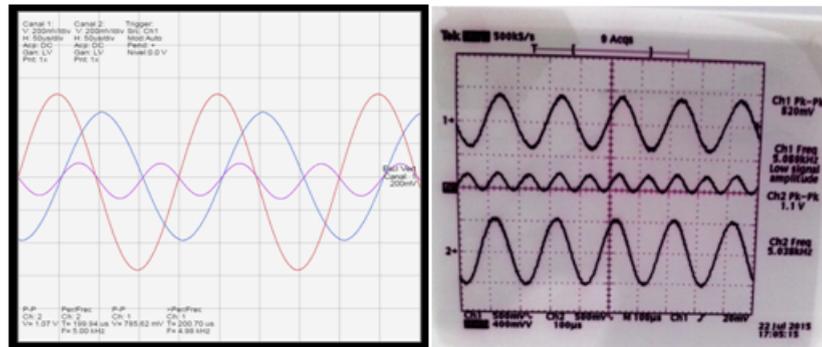


Figura 4.14: Operación matemática CH1xCH2. Fuente: propia



Figura 4.15: Puntas de prueba de 1x y 10x usadas en la prueba 5. Fuente: propia

la misma aplicación de Osciloscopio y el osciloscopio digital Tektronix TDS380 obteniendo resultados análogos entre los instrumentos de medición y acorde con el

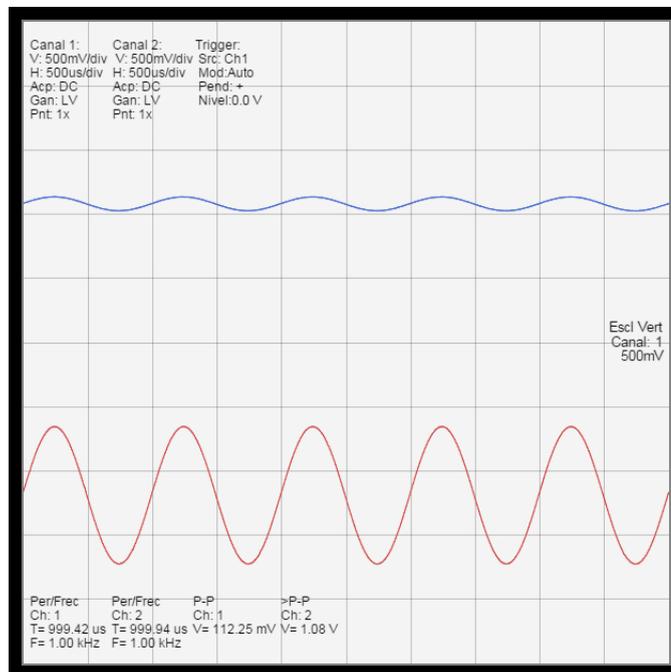


Figura 4.16: Adquisición con configuración de 1x en canal 1 y 1x en canal 2. Fuente: propia

tipo de señal generada. Véase figura 4.19 donde se visualiza para ambos dispositivos una frecuencia aproximada de 5KHz y voltaje pico-pico cercano a 1.5 V.

Tabla 4.3: Tabla comparativa de señal medida de 5kHz – Osciloscopio + Generador - UC

	Aplicación Osciloscopio + Generador UC	Osciloscopio Tektronix TDS380	Error porcentual entre mediciones (%)
Frecuencia	5 KHz	5.01KHz	0.19 %
Valor pico-pico	1.48 V	1.456 V	1.65 %
Valor Máximo	725.57 mV	728 mV	0.33 %
Valor RMS	513.05 mV	498.3 mV	2.96 %
Periodo	200 us	199.6 us	0.2 %

Prueba 7: Señal medida de tipo senoidal y frecuencia 50MHz.

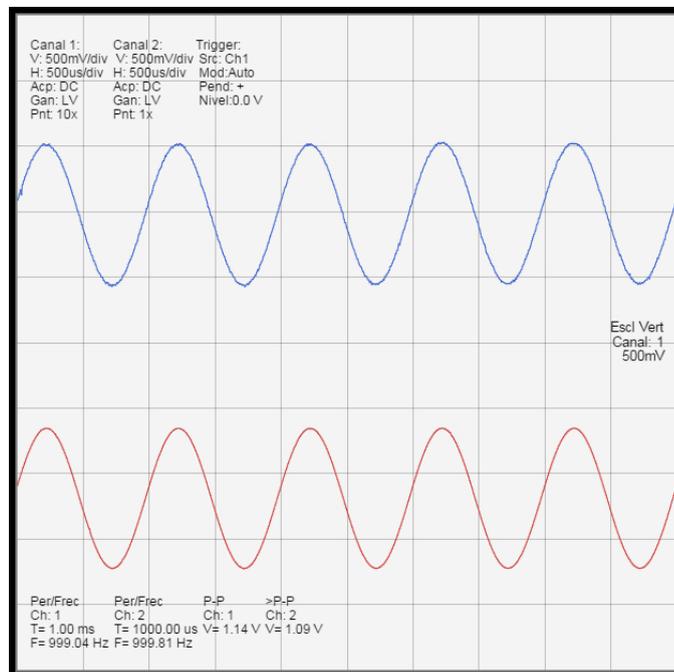


Figura 4.17: Adquisición con configuración de 10x en canal 2 y 1x en canal 1. Fuente: propia



Figura 4.18: Generación de señal senoidal desde la aplicación Osciloscopio + Generador UC. Fuente: propia

Para esta prueba se utilizó el generador de señales HP 8647A, donde se fijó la frecuencia de 50MHz y una amplitud de 1V aproximado para posteriormente ser

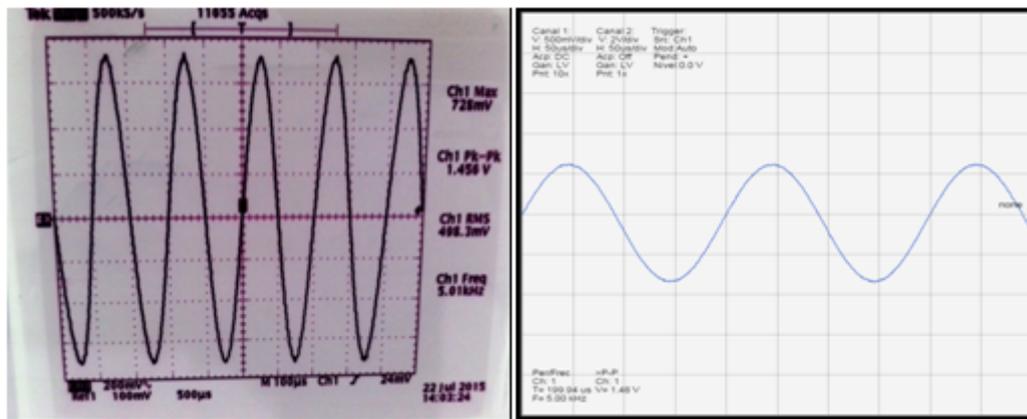


Figura 4.19: Comparación de adquisición de señal generada por Osciloscopio + Generador UC (100us/div - 50us/div). Fuente: propia

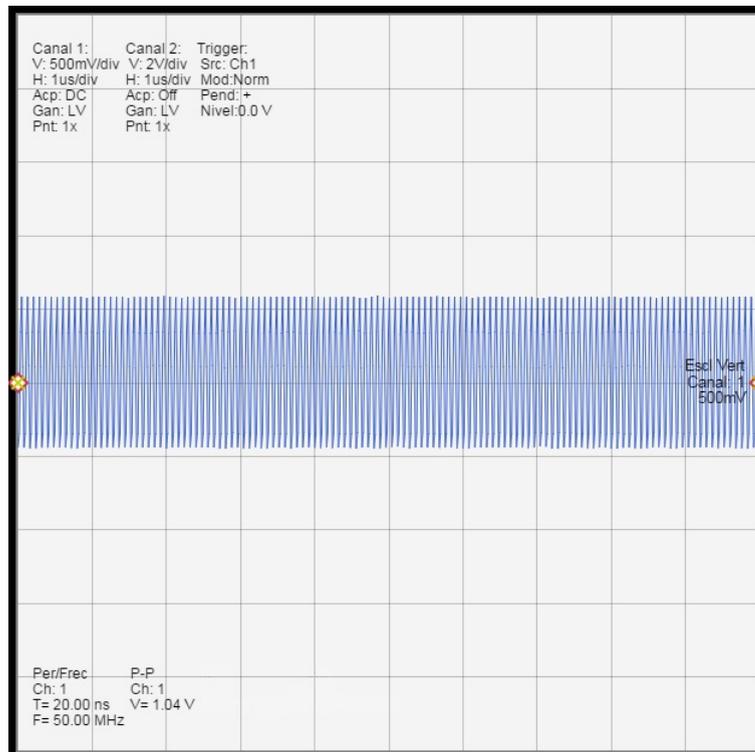


Figura 4.20: Señal medida de 50MHz – Osciloscopio + Generador – UC. Fuente: propia

medida a través de la aplicación Osciloscopio de RedPitaya con el fin de obtener

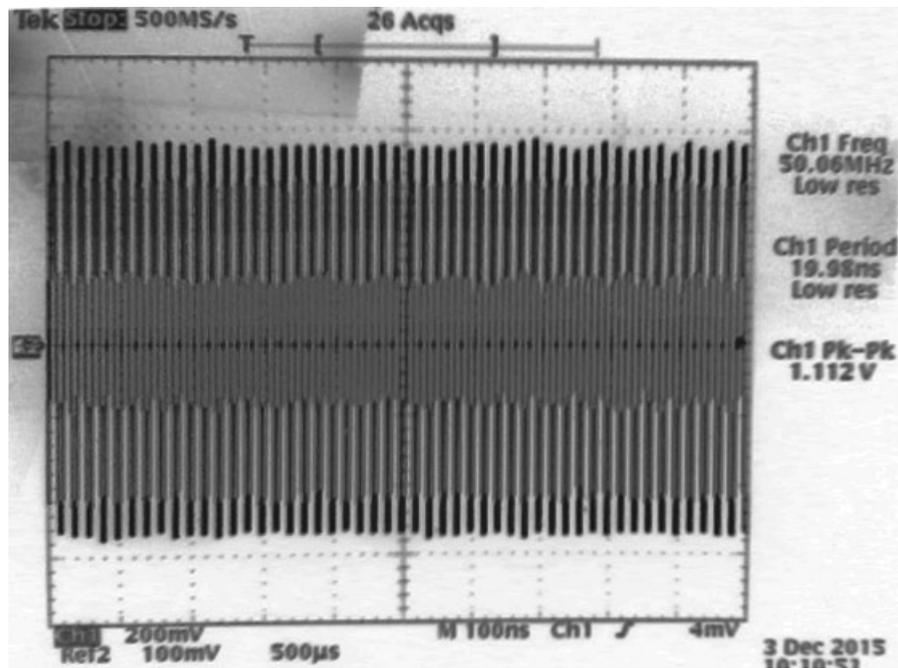


Figura 4.21: Señal medida de 50MHz – Osciloscopio Tektronix TDS380. Fuente: propia

el máximo rendimiento de la aplicación. Esta señal a su vez fue medida en el osciloscopio digital disponible en el laboratorio para verificar dicha medición, tales resultados son comparables entre sí según los gráficos y mediciones obtenidos.

Tabla 4.4: Tabla comparativa de señal medida de 50MHz – Osciloscopio + Generador - UC

	Aplicación Osciloscopio + Generador UC	Osciloscopio Tektronix TDS380	Error porcentual entre mediciones(%)
Frecuencia	50 MHz	50.06 MHz	0.12, %
Periodo	20 ns	19.98 ns	0.1 %
Valor pico-pico	1.04 V	1.112 V	6.5 %

4.3. Resultados y comparaciones entre la interfaz gráfica Medidor LCR UC mediante el uso de RedPitaya y el RCL METER (FLUKE) PM6306:

Los resultados obtenidos a través de la aplicación Medidor LCR UC se basaron en el cálculo de diferentes tipos de elementos pasivos ya conocidos, determinando su impedancia característica y comparandolos con las mediciones RCL METER (FLUKE) PM6306, para el cual se tomaron elementos pasivos con características previamente estudiadas para así comprobar y comparar los resultados obtenidos.

Prueba 1: Comprobación del circuito externo (ver figura 4.22), ajustado para el funcionamiento eficaz a través de la aplicación Medidor LCR UC para el procedimiento de medición del DUT.



Figura 4.22: Circuitería externa utilizada en la aplicación Medidor LCR UC. Fuente: propia

Se comprobó el funcionamiento mediante pruebas de continuidad y medición de impedancia propia (aprox. 5Ω) donde el resultado obtenido fue exitoso. Vale destacar que este dispositivo externo trabaja con el método volt-ampere para el cálculo de impedancias desconocidas.

Prueba 2: Medición y comprobación de una resistencia de valor $100K\Omega$ (figura 4.23) medida a la frecuencia fija de 5KHz.



Figura 4.23: Resistencia de valor 100KΩ. Fuente: propia

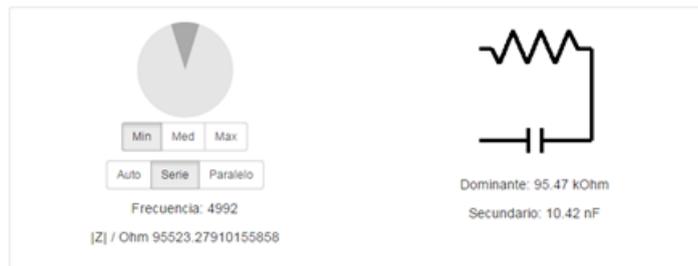


Figura 4.24: Equivalente Serie de la Resistencia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia



Figura 4.25: Equivalente Paralelo de la Resistencia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia

Los diferentes resultados obtenidos (véase figura 4.24,4.25 y 4.26) podemos apreciar la exactitud que posee la aplicación de Medidor LCR UC en cuanto a la medición de impedancias debido a que los mismos resultados son comparados de forma efectiva con mediciones realizadas en el RCL METER FLUKE. Las diferencias observadas en las mediciones de ambos equipos se pueden asociar a los elementos parásitos introducidos por la circuitería externa utilizada para adaptar los elementos a medir en los puertos de adquisición y generación de Red Pitaya.



Figura 4.26: Resistencia medida a través del RCL METER (FLUKE) PM6306. Fuente: propia

Prueba 3: Medición y comprobación de una capacitancia de valor 10nF (figura 4.27) medida a la frecuencia fija de 5KHz.



Figura 4.27: Capacitancia de valor 10nF. Fuente: propia

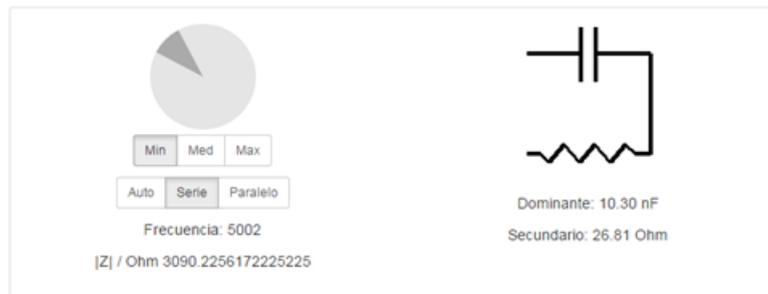


Figura 4.28: Equivalente Serie de la Capacitancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia

A través de los resultados obtenidos en las diferentes interfaces de medición, véase figuras 4.28, 4.29 y 4.30, podemos destacar que la aplicación Medidor LCR UC posee un comportamiento análogo al equipo RCL METER FLUKE PM6306 del laboratorio, donde las medidas obtenidas están acorde con los resultados esperados. Debemos destacar que la resistencia acoplada obtenida para ambos casos (serie

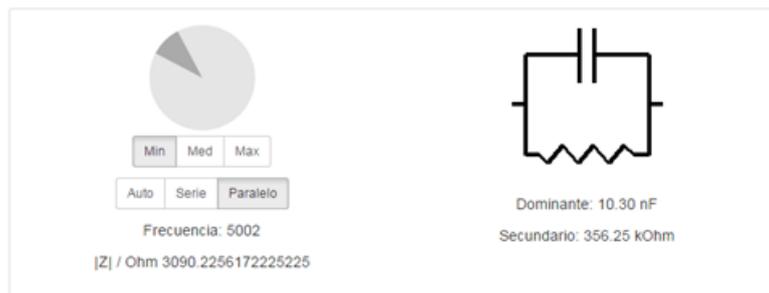


Figura 4.29: Equivalente Paralelo de la Capacitancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia



Figura 4.30: Capacitancia Serie y Paralelo medida a través del RCL METER (FLUKE) PM6306. Fuente: propia

y paralelo) difiere en los resultados debido a las características propias del circuito externo utilizado para desarrollar la medición a través de la aplicación.

Prueba 4: Medición y comprobación de una inductancia de valor 4,7uH (figura 4.31) medida a la frecuencia fija de 5KHz.



Figura 4.31: Inductor de valor 4,7uH. Fuente: propia



Figura 4.32: Equivalente Serie de la Inductancia medida en la aplicación LCR.
Fuente: propia



Figura 4.33: Equivalente Paralelo de la inductancia medida en la aplicación LCR.
Fuente: propia



Figura 4.34: Inductancia Serie y Paralelo medida a través del RCL METER (FLUKE) PM6306. Fuente: propia

A partir de los resultados obtenidos en los procesos de medición (figura 4.32, 4.33 y 4.34) podemos concluir que la aplicación Medidor RLC aplicada para el cálculo de

valores inductivos en elementos pasivos es precisa ya esta mide valores característicos próximos y de manera acertada (ver tabla 4.5) , permitiendo así una considerable aproximación de los dispositivos bajo prueba. Además podemos destacar que los valores resistivos acoplados al inductor medido tanto en serie como en paralelo a través de la aplicación son relativamente idénticos a los resultados obtenidos por el RCL METER (FLUKE) PM6306. Vale destacar que el resultado que se obtiene para tal comparación es de la configuración en serie debido a que el modelo característico de una inductancia es de forma serie.

Observando las tablas de resultados y errores porcentuales (4.5 y 4.6) obtenidas a partir de las diferentes pruebas realizadas con el Medidor LCR – UC y RCL METER FLUKE PM6306, se puede determinar que el error porcentual tomando como referencia el RCL METER FLUKE es lo suficientemente bajo para catalogar como aceptable las medidas obtenidas a partir del Medidor LCR – UC, a pesar de los errores obtenidos en las medidas de capacitancias, los cuales pueden ser debidos a elementos residuales aportados por la circuitería externa utilizada para las mediciones.

Tabla 4.5: Resultados de mediciones de elementos pasivos a 1 kHz

	Aplicación LCR UC - RedPitaya				RCL METER FLUKE PM6306			
	Serie		Paralelo		Serie		Paralelo	
	Prim	Sec	Prim	Sec	Prim	Sec	Prim	Sec
Resistencia (100 K Ω)	95.47 K Ω	10.42 nF	95.57 K Ω	10.69 pF	96.766 K Ω	No aplica	96.766 K Ω	No aplica
Capacitancia (10 nF)	10.30 nF	26.81 Ω	10.30 nF	356.25 K Ω	9.8887 nF	8.715 Ω	9.8887 nF	1.189 M Ω
Inductor (4.7 uH)	268.07 m Ω	4.26 uH	334.78 m Ω	21.35 uH	0.2244 Ω	4.90 uH	0.3301 Ω	15.30 uH

Prueba 5: Mediciones de dispositivos pasivos (resistencia, capacitor e inductancia) a la frecuencia de 1MHz.

Para esta prueba se utilizaron los mismos elementos pasivos utilizados en las pruebas anteriores con el fin de determinar su comportamiento cuando se incrementa el rango de medición hasta 1 MHz. Estos elementos son la resistencia de

Tabla 4.6: Error porcentual entre mediciones a 1 kHz obtenidas por la aplicación LCR UC y el RCL METER FLUKE PM6306

	Error porcentual entre mediciones (%)			
	Serie		Paralelo	
	Dominante	Secundario	Dominante	Secundario
Resistencia (100 K Ω)	1.3 %	No aplica	1.2 %	No aplica
Capacitancia (10 nF)	4.07 %	67.5 %	4.07 %	108 %
Inductor (4.7 uH)	19 %	13 %	1.4 %	33 %

100K Ω , capacitor de 10nF e inductor de 4.7 uH respectivamente.



Figura 4.35: Equivalente Serie de la Resistencia medida en la aplicación LCR.
Fuente: propia



Figura 4.36: Equivalente Paralelo de la Resistencia medida en la aplicación LCR.
Fuente: propia



Figura 4.37: Resistencia serie y paralelo medida a través del RCL METER (FLUKE) PM6306. Fuente: propia

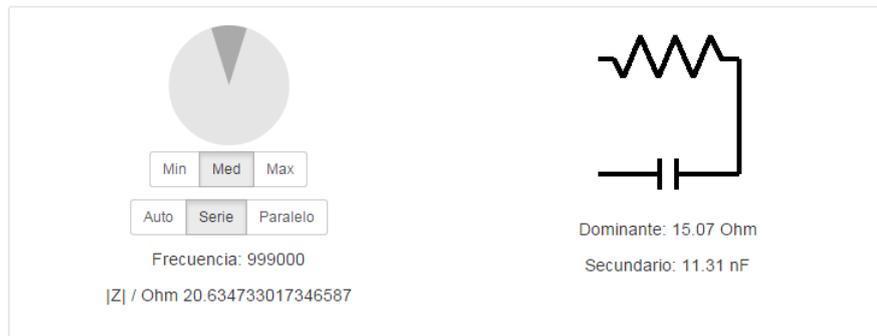


Figura 4.38: Equivalente Serie de la Capacitancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia



Figura 4.39: Equivalente Paralelo de la Capacitancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia

De acuerdo a los resultados obtenidos podemos apreciar que las mediciones entre la aplicación medidor LCR - UC de RedPitaya y el medidor RCL FLUKE (ver tablas 4.7 y 4.8) son considerablemente parecidas, mediante el cual se proporciona



Figura 4.40: Capacitancia serie y paralelo medida a través del RCL METER (FLUKE) PM6306. Fuente: propia

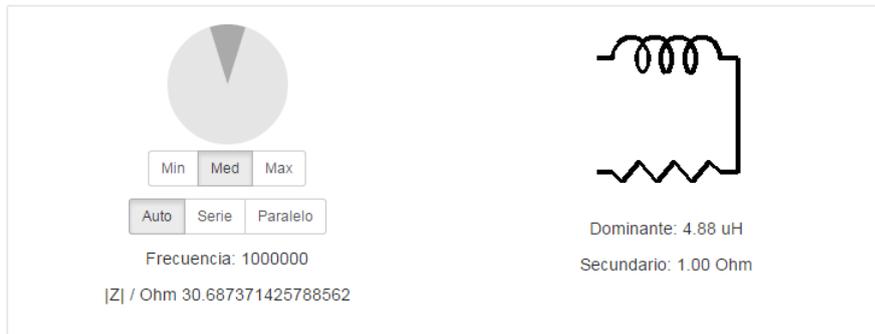


Figura 4.41: Equivalente Serie de la Inductancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia



Figura 4.42: Equivalente Paralelo de la Inductancia medida en la aplicación LCR. Fuente: propia

una tabla con dichas mediciones y errores porcentuales, a excepción de la capacitancia medida para la cual existe una diferencia en cuanto a el equivalente serie-paralelo y por ende a los valores obtenidos para este elemento.



Figura 4.43: Inductancia serie y paralelo medida a través del RCL METER (FLUKE) PM6306. Fuente: propia

Tabla 4.7: Resultados de mediciones de elementos pasivos a 1 MHz

	Aplicación LCR UC - RedPitaya				RCL METER FLUKE PM6306			
	Serie		Paralelo		Serie		Paralelo	
	Prim	Sec	Prim	Sec	Prim	Sec	Prim	Sec
Resistencia (100 KΩ)	99.06 KΩ	2.32 mH	94.79 KΩ	114.64 mH	97.6 KΩ	24.18 pF	97.5 KΩ	0.22 pF
Capacitancia (10 nF)	15.07 Ω	11.31 nF	28.25 Ω	5.27 nF	8.87 nF	1089 Ω	8.77 nF	3.479 Ω
Inductor (4.7 uH)	4.88 uH	1 Ω	4.89 uH	941.71 Ω	4.84 uH	0.589 Ω	4.84 uH	1.581 Ω

Tabla 4.8: Error porcentual entre mediciones a 1 MHz obtenidas por la aplicación LCR UC y el RCL METER FLUKE PM6306

	Error porcentual entre mediciones (%)			
	Serie		Paralelo	
	Dominante	Secundario	Dominante	Secundario
Resistencia (100 KΩ)	1.496 %	Error de fase	2.78 %	Error de fase
Capacitancia (10 nF)	27.5 %	98.6 %	39.9 %	98.6 %
Inductor (4.7 uH)	0.83 %	69.78 %	0.83 %	72.93 %

4.4. Resultados y comparaciones entre la interfaz grafica Analizador de Espectro/THD mediante el uso de RedPitaya y el Analizador de Espectro HP 8590:

Prueba 1: Señal medida en la frecuencia de tipo senoidal de frecuencia 1 KHz producida por el generador de funciones marca Tektronix.

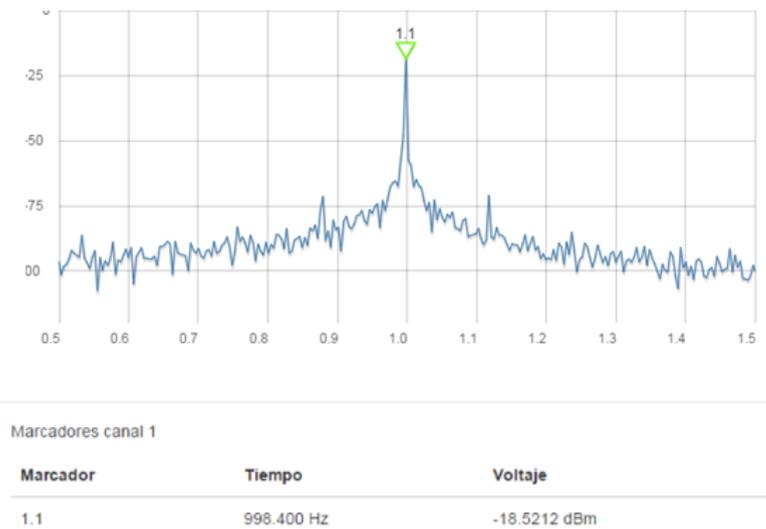


Figura 4.44: Espectro de la señal medida en la aplicación Analizador de Espectro, entre 0.5 y 1.5 KHz. Fuente: propia

Mediante los resultados obtenidos para esta prueba podemos apreciar la similitud que presenta la aplicación Analizador de Espectro de RedPitaya comparado con el analizador de espectro HP 8590, véase figura 4.44 y 4.45, para el cual las mediciones del espectro de frecuencia de la señal bajo estudio se comprobaron mediante el posicionamiento del cursor que verifica la frecuencia y amplitud correspondiente a la señal generada, dando como error 1.82 % en la medición de la potencia en ambos equipos. Vale destacar que el espectro visualizado en la aplicación se ve limitado por el ancho de banda de resolución de acuerdo a la tasa de muestreo del convertidor analógico-digital de la tarjeta RedPitaya (Ver tabla 3.2);

Prueba 2: Comprobar los diferentes tipos de escalas verticales disponibles por la aplicación.

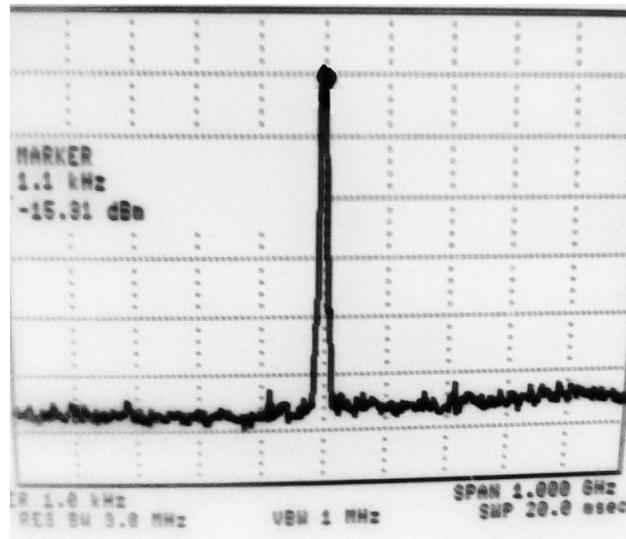


Figura 4.45: Espectro de la señal medida en Analizador de Espectro HP 8590, entre 0.5 y 1.5 KHz. Fuente: propia

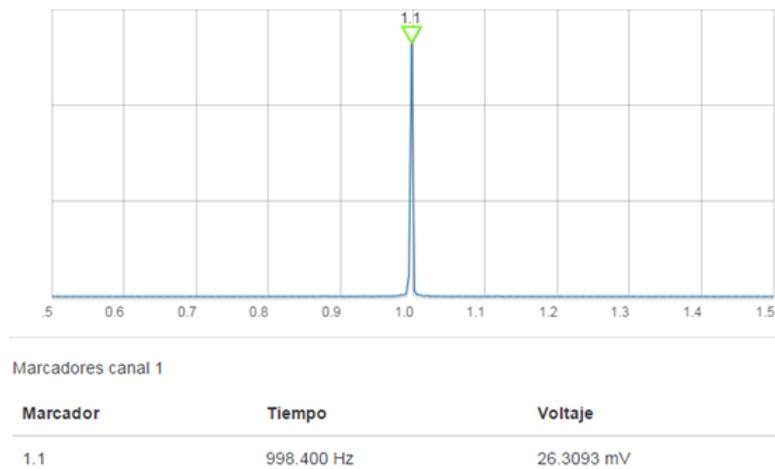


Figura 4.46: Espectro de frecuencia con escala vertical en mV. Fuente: propia

Se comprobaron las diferentes escalas verticales (mV, mW) además de dBm proporcionadas por la aplicación se llegó a verificar las unidades de escalamiento según las especificaciones del usuario, ver figura 4.46 y 4.47 donde se aprecia en ambos casos que para todo el contenido espectral solo se observa un solo pico ubicado a la frecuencia fundamental 1 KHz de amplitud 26.3093 mV ó 0.0141 mW respectivamente; vale destacar que para las demás frecuencias no existen picos debido a

que estos son valores despreciables para el escalamiento lineal.

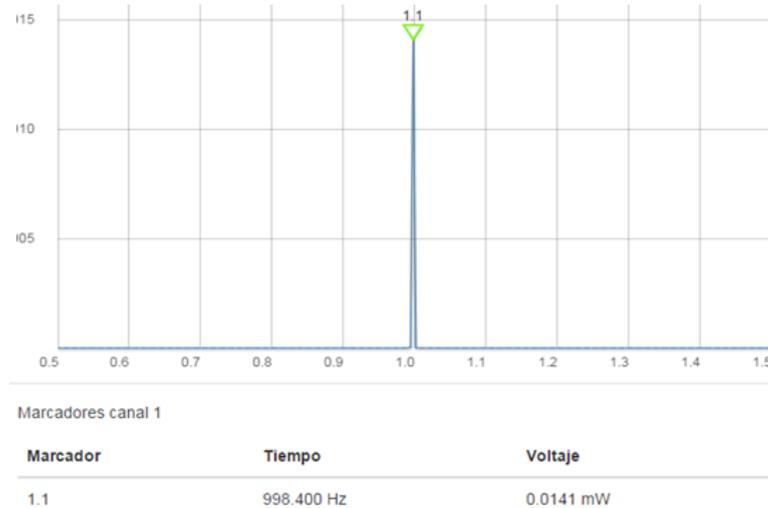


Figura 4.47: Espectro de frecuencia con escala vertical en mW. Fuente: propia

Prueba 3: Verificación y comprobación de cálculo de THD.

Para esta prueba se utilizó una señal senoidal de frecuencia fundamental 500KHz (figura 4.48), la cual se realizó el cálculo de la distorsión armónica total propia de la señal para compararla con el analizador de distorsión HP 332A dispuesto en el laboratorio. Los resultados obtenidos son los esperados debido que se puede observar que el resultado THD de la aplicación grafica en de 1,65



Figura 4.48: Generador de funciones a 500 KHz. Fuente: propia

Se realizó el estudio de una segunda señal a una frecuencia superior al límite del Analizador de Distorsión HP 332A (600 KHz). La señal generada mediante el generador de funciones fue de tipo senoidal a 2 MHz (Ver figura 4.52) y se procedió a realizar la medición de la distorsion armonica total estableciendo la frecuencia principal y usando la función de medición de THD (Ver figura 4.53)

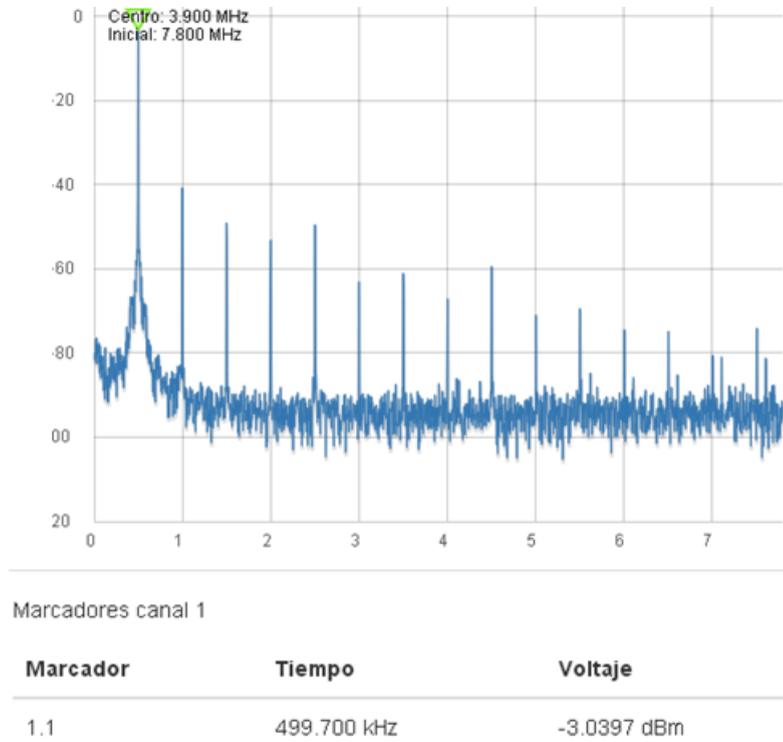


Figura 4.49: Espectro de la señal de frecuencia fundamental 500KHz. Fuente: propia



Figura 4.50: Resultado THD para la señal medida en la figura 4.49 mediante Analizador de espectros y medidor de THD - UC. Fuente: propia

Obteniendo el resultado de la figura 4.54 se comprueba que la función de medición de THD funciona a frecuencias superiores a las que puede trabajar el Analizador de Distorsión HP 332A

Prueba 4: Funcionamiento y tabla de marcadores.



Figura 4.51: Resultado THD para la señal medida en la figura 4.49 mediante el Analizador de Distorsión HP 332A. Fuente: propia



Figura 4.52: Generador de funciones a 2MHz. Fuente: propia

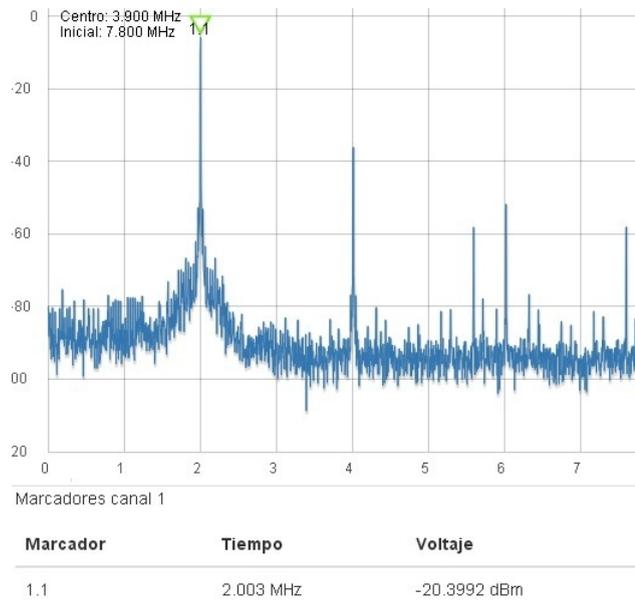


Figura 4.53: Espectro de la señal senoidal generada de frecuencia fundamental 2MHz. Fuente: propia

Para esta prueba se utilizó una señal senoidal de frecuencia 2MHz donde se observó todo el contenido espectral producido por la misma; debido a que esta señal



Figura 4.54: Resultado THD medido con la aplicación Analizador de Espectros y medidor de THD – UC. Fuente: propia

generada por naturaleza posee armónicos múltiples de la frecuencia fundamental se optó por la ubicación de marcadores en cada múltiplo comprobando así que los mismos son inferiores al pico fundamental y verificando el funcionamiento propio de los marcadores (Ver figuras 4.55, 4.56 y 4.57); los resultados obtenidos y comparados se pueden visualizar en la tabla 4.9.

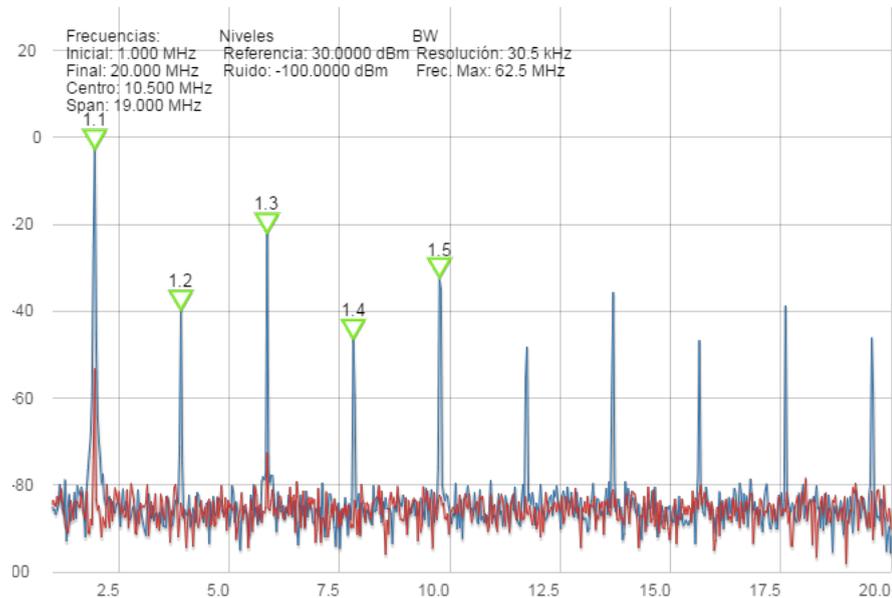


Figura 4.55: Posicionamiento de marcadores en el espectro en el Analizador de espectros y medidor de THD - UC. Fuente: propia

Según los resultados obtenidos mediante las respectivas comparaciones entre la función de marcadores de la aplicación Analizador de Espectro y medidor de THD – UC y los marcadores disponibles en el Analizador de Espectro HP 8590, ambos

Marcadores canal 1		
Marcador	Frecuencia	Potencia
1.1	1.953 MHz	-2.5281 dBm
1.2	3.906 MHz	-39.7470 dBm
1.3	5.890 MHz	-27.2631 dBm
1.4	7.843 MHz	-46.6310 dBm
1.5	9.827 MHz	-65.0187 dBm

Figura 4.56: Tabla de marcadores de la aplicación Analizador de Espectro y medidor de THD - UC. Fuente: propia

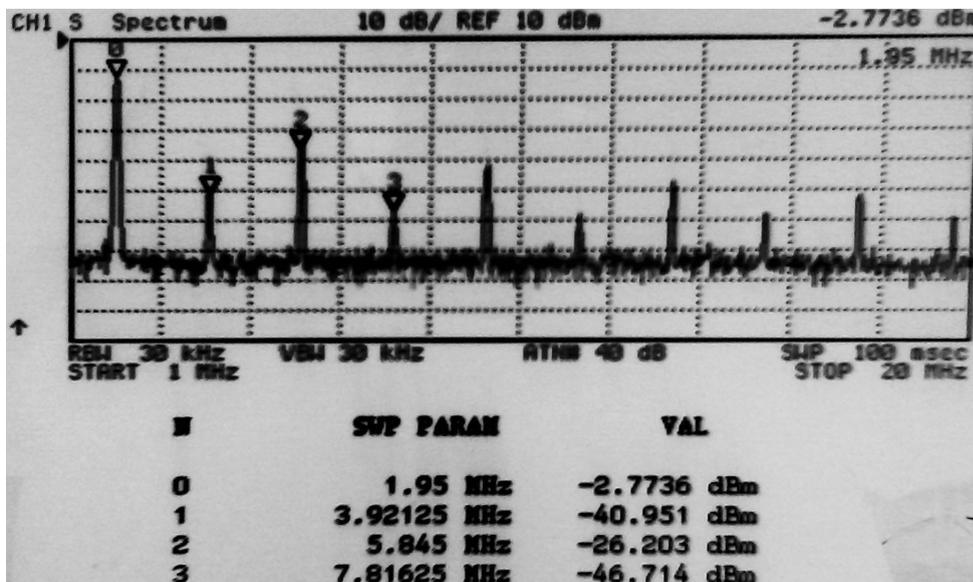


Figura 4.57: Tabla de marcadores del Analizador de Espectro HP 8590A. Fuente: propia

presentan un comportamiento análogo en el posicionamiento de los mismos referidos a la frecuencia y amplitud de cada marcador además de suministrar dichos valores en una tabla para su posterior estudio, esto se puede evidenciar en las figuras 4.56 y 4.57. También podemos mencionar la ventaja que presenta la aplicación

Tabla 4.9: Tabla comparativa - medidas de marcadores

Marcador	Frecuencia	Aplicación Analizador de Espectro - THD UC	Analizador de Espectro HP 8590	Error porcentual entre mediciones (%)
1	1.953 MHz	-2.5281 dBm	-2.7736 dBm	8.85 %
2	3.906 MHz	-39.7470 dBm	-40.951 dBm	2.94 %
3	5.890 MHz	-27.2631 dBm	-26.203 dBm	4.04 %
4	7.843 MHz	-46.6310 dBm	-46.714 dBm	0.17 %
5	9.827 MHz	-65.0187 dBm	No aplica	No aplica

en cuanto al número de marcadores que se pueden utilizar simultáneamente debido a que ésta permite virtualmente infinitos marcadores (Tantos como sea posible sin afectar el rendimiento de la aplicación), frente al HP 8590 que solo dispone de 4 marcadores.

Prueba 5: Ancho de Banda de resolución

Para comprobar el comportamiento del instrumento Analizador de Espectros y medidor de THD – UC se generó una señal senoidal a 2 MHz y se estudió en dicho instrumento y en el Analizador de Espectro HP 8590 para comparar los resultados

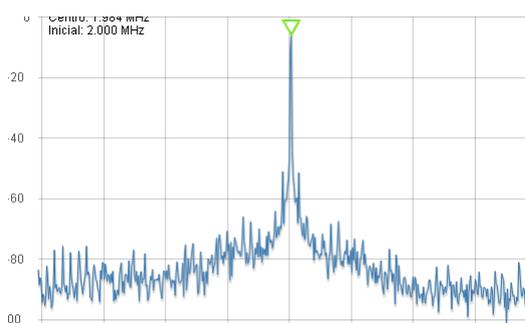


Figura 4.58: Señal a 2 MHz con RBW = 3.8 KHz - Analizador de Espectros y medidor de THD – UC. Fuente: propia

A partir de las figuras 4.58, 4.59, 4.60 y 4.61 se puede apreciar que al aumentar el ancho de banda de resolución, la frecuencia a la que cada instrumento detecta el pico se ve desplazada ligeramente de la posición a la que fue detectado a un ancho de banda de resolución menor. De igual manera ambos ensanchan la apertura del

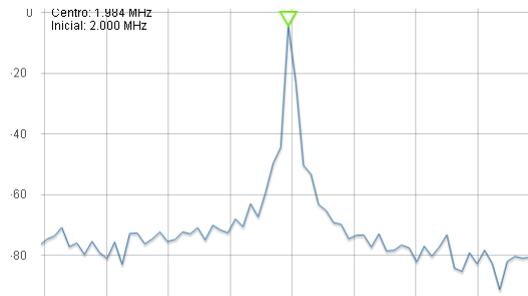


Figura 4.59: Señal a 2 MHz con RBW = 30.5 KHz - Analizador de Espectros y medidor de THD – UC. Fuente: propia

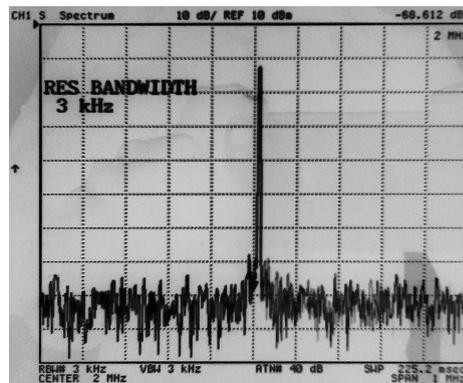


Figura 4.60: Señal a 2 MHz con RBW = 3 KHz - Analizador de Espectro HP 8590. Fuente: propia

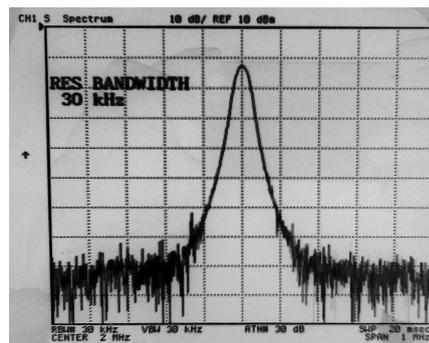


Figura 4.61: Señal a 2 MHz con RBW = 30 KHz - Analizador de Espectro HP 8590. Fuente: propia

ancho de banda del pico detectado debido al aporte de las componentes en las frecuencias abarcadas por ancho de banda de resolución más grande.

Prueba 6: Índice de modulación AM

Para esta prueba se utilizó un generador vectorial RF para obtener una señal AM de gran portadora con características específicas. Se realizaron 3 pruebas a una misma frecuencia de portadora, pero a diferentes frecuencias de modulación e índices de modulación.

Tabla 4.10: Pruebas de índice de modulación

Prueba	Frecuencia de Portadora	Frecuencia modulante	Índice de modulación
1	50 MHz	250 kHz	0.3
2	50 MHz	450 kHz	0.5
3	50 MHz	100 kHz	0.8

A partir de las pruebas realizadas, se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras

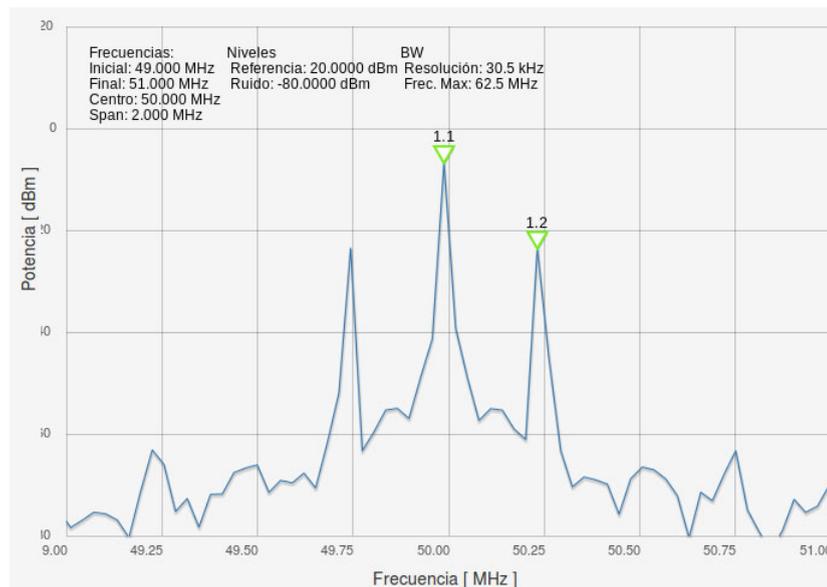


Figura 4.62: Señal AM de 50 MHz con modulante de 250 kHz e índice de modulación de 0.3

A partir de las pruebas y comparaciones realizadas se puede observar que las mediciones obtenidas se aproximan a los parámetros establecidos en el generador. Las diferencias apreciadas se pueden atribuir a que se está trabajando cerca de la frecuencia máxima de RedPitaya.



Figura 4.63: Comparación 1 de Generador Vectorial Vs Índice de modulación en Analizador de espectros UC

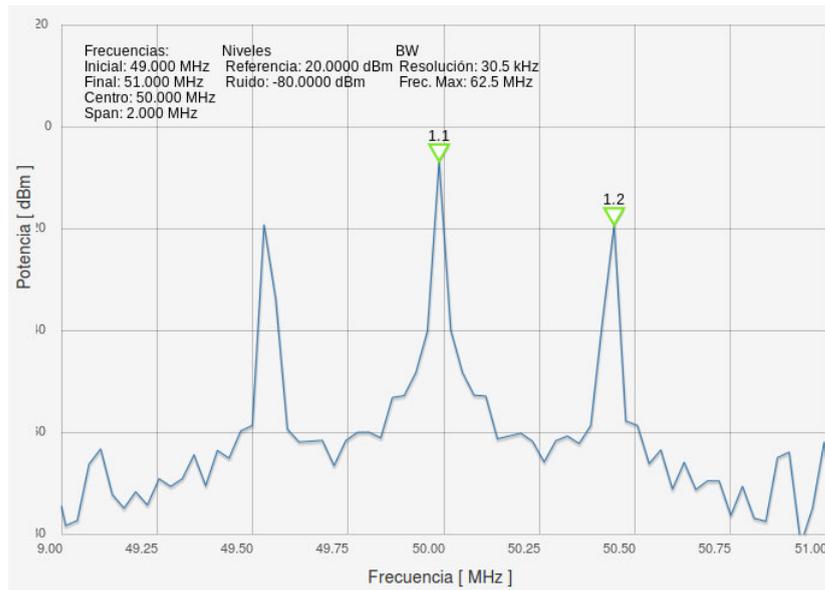


Figura 4.64: Señal AM de 50 MHz con modulante de 450 kHz e índice de modulación de 0.5

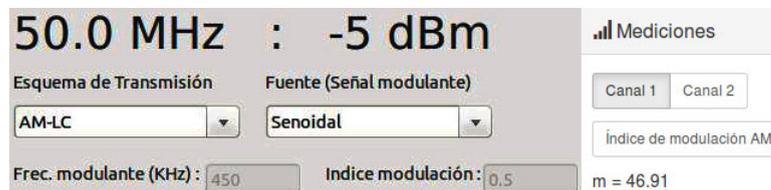


Figura 4.65: Comparación 2 de Generador Vectorial Vs Índice de modulación en Analizador de espectros UC

Prueba 7: Relación de potencia promedio de canal vs potencia pico

Para esta prueba se utilizó una señal AM de gran portadora a a -5 dBm y 50

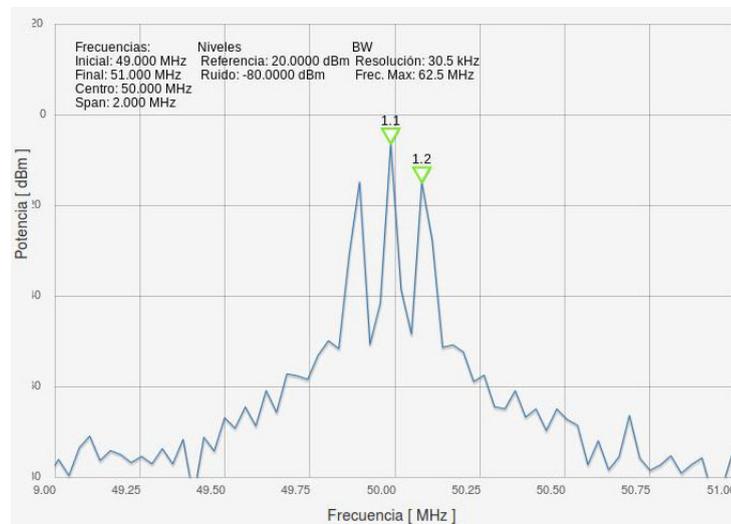


Figura 4.66: Señal AM de 50 MHz con modulante de 100 kHz e índice de modulación de 0.8

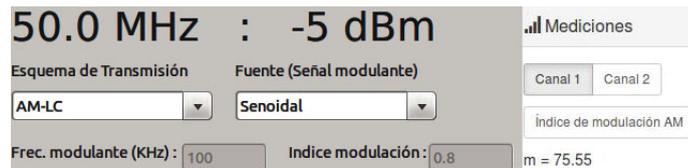


Figura 4.67: Comparación 3 de Generador Vectorial Vs Índice de modulación en Analizador de espectros UC

MHz con una modulante de 100 kHz y un índice de modulación de 0.25. Se midió la relación alrededor de la portadora dentro de un ancho de banda de 2 MHz.

Prueba 8: Señal medida de tipo senoidal y frecuencia 50MHz.

Mediante los resultados obtenidos para esta prueba podemos apreciar la similitud que presenta la aplicación Analizador de Espectro de RedPitaya comparado con el analizador de espectro HP 8590, véase figura 4.70 y 4.71, para el cual las mediciones del espectro de frecuencia de la señal bajo estudio se comprobaron mediante el posicionamiento del cursor que verifica la frecuencia y amplitud de la misma, dando un error porcentual de 4.25 % en cuanto a la potencia tomando como resultado base la medida obtenida por el analizador de espectro del laboratorio.

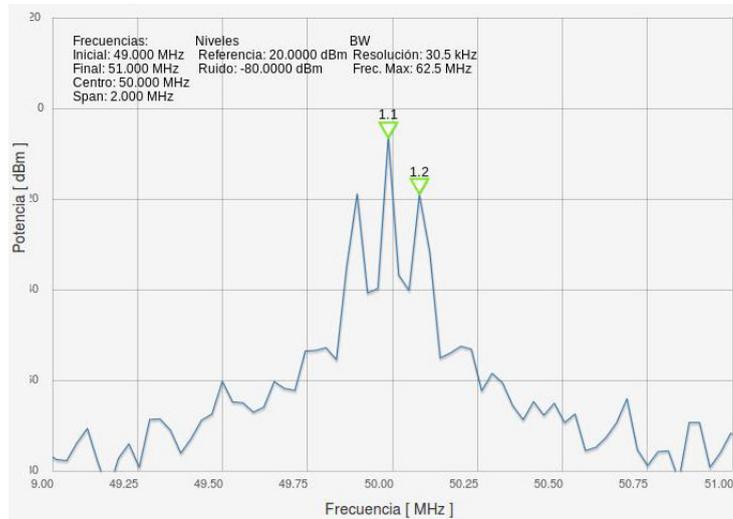


Figura 4.68: Señal AM de 50 MHz con modulante de 100 kHz e índice de modulación de 0.25



Figura 4.69: Relación de potencia promedio de canal vs potencia pico

4.5. Comparación de instrumentos del laboratorio de instrumentación electrónica, instrumentos disponibles en RedPitaya e instrumentos desarrollados:

En las tablas 4.11, 4.12 y 4.13 se puede observar y comparar las diferencias existentes entre los instrumentos del laboratorio de instrumentación electrónica, instrumentos disponibles en RedPitaya e instrumentos desarrollados en este trabajo especial de grado

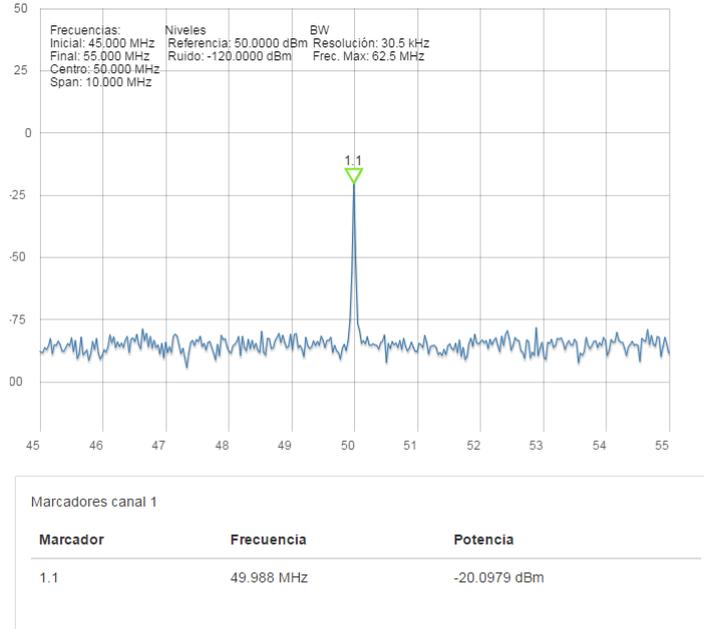


Figura 4.70: Espectro de la señal medida en la aplicación Analizador de Espectro a 50 MHz. Fuente: propia

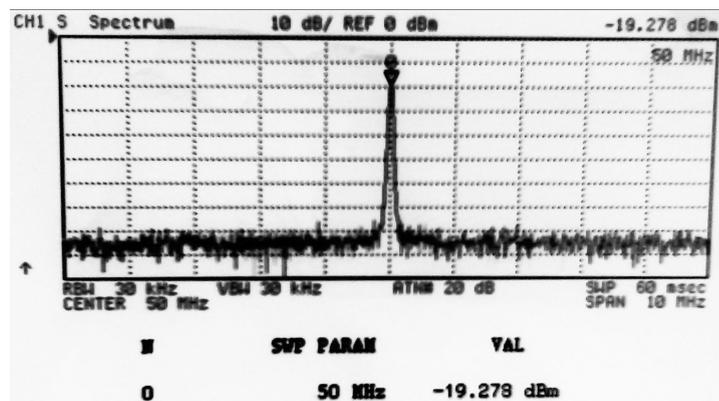


Figura 4.71: Espectro de la señal medida a 50MHz en Analizador de Espectro HP 8590, Fuente: propia

Tabla 4.11: Comparaciones Osciloscopio + Generador UC, Osciloscopio + Generador RedPitaya y osciloscopio Tektronix TDS380

Osciloscopio Tektronix TDS380	Osciloscopio + Generador RedPitaya	Osciloscopio + Generador UC
Frecuencia máxima: 200 MHz	Frecuencia máxima: 50MHz.	Frecuencia máxima: 50 MHz
Perilla ajustable de tiempo y amplitud	Ajuste de tiempo y amplitud mediante botones de selección	Perilla ajustable de tiempo y amplitud
Uso de cursores horizontales y verticales de forma limitada. No posee función de marcadores	No posee funciones de cursores y marcadores	Manejo de cursores de forma independiente. Incluye función de marcadores y su correspondiente tabla
Admite cuatro (4) adquisiciones de medidas simultáneamente	Poca adquisición de medidas que se incluyen en una tabla de mediciones	Admite todas las adquisiciones de medidas en la pantalla de gráfico
No posee generador de funciones aleatorias	Posee dos generadores de funciones aleatorias	Posee dos generadores de funciones aleatorias
No posee opciones de guardado de gráficos ni resultados	No posee opciones de guardado de gráficos ni resultados	Incluye opciones de guardado de gráficos y resultados
Visualización del nivel de referencia	No posee visualización de nivel de referencia	Visualización del nivel de referencia
Operaciones Matemáticas entre los canales	No incluye operaciones matemáticas entre los canales	Incluye la función de Operaciones matemáticas entre los canales
Tasa de muestreo: 2 G muestras/s	Tasa de muestreo: 125 M muestras/s	Tasa de muestreo: 125 M muestras/s
Opción de invertir el canal de medición	No incluye la inversión del canal	Opción de inversión de canal

Tabla 4.12: Comparaciones medidor LCR UC, medidor LCR RedPitaya y RCL METER (FLUKE) PM6306

RCL METER (FLUKE) PM6306	medidor LCR RedPitaya	medidor LCR UC
Frecuencia máxima: 600 KHz	Frecuencia máxima: 1 MHz	Frecuencia máxima: 1 MHz
Opciones de equivalentes AUTO, Serie o Paralelo	No posee las Opciones de equivalentes AUTO, Serie o Paralelo	Opciones de equivalentes AUTO, Serie o Paralelo
No posee opciones de guardado de resultados	No posee opciones de guardado de resultados	Incluye opciones de guardado de resultados
Incluye puertos para conexión de DUTs	No Incluye adaptador para conexión de DUTs	Trabaja con circuitería externa para conexión de DUT

Tabla 4.13: Comparaciones Analizador de Espectro - THD UC, Analizador de Espectro RedPitaya y Analizador de Espectro HP 8590

Analizador de Espectro HP 8590	Analizador de Espectro RedPitaya	Analizador de Espectro THD UC
Frecuencia máxima: 1.8 GHz	Frecuencia máxima: 62,5 MHz	Frecuencia máxima: 62,5 MHz
Rango de ancho de banda de resolución: 1KHz a 3MHz.	Ancho de banda de resolución no configurable	Rango de ancho de banda de resolución: 0,46 Hz a 30,52 KHz
Rango de amplitud: -114 a +30dbm	Rango de amplitud: -120 dBm a +20dBm	Rango de amplitud: -120 dBm a +20dbm.
Posee Opciones de marcadores y búsquedas de picos	No posee Opciones de marcadores y búsquedas de picos	Posee Opciones de marcadores y búsquedas de picos.
Número máximo de marcadores: 4	Número máximo de marcadores: 0	Número máximo de marcadores: 10
Cantidad de puertos de entrada: 1	Cantidad de puertos de entrada: 2	Cantidad de puertos de entrada: 2
Opciones de guardado de resultados mediante un diskette	No posee Opciones de guardado de resultados	Posee Opciones de guardado de resultados e imágenes

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Mediante la revisión bibliográfica del contenido programático del laboratorio de la asignatura de Instrumentación Electrónica se determinó que los instrumentos a desarrollar, necesarios para complementar el uso de los equipos disponibles en el laboratorio son el Generador de Funciones, el Osciloscopio, el Analizador de Espectros, el medidor LCR y el Analizador de Distorsión Armónica Total

Mediante la revisión bibliográfica de los manuales de usuario y desarrolladores de Red Pitaya se determinó que para el desarrollo de las interfaces y funciones planteadas, era necesario el uso de múltiples lenguajes de programación, los cuales fueron: HTML, Javascript, CSS, Bootstrap, Ajax y jQuery

Se desarrollaron diferentes módulos de programación necesarios para la emulación de los controles físicos de los instrumentos de laboratorio; como botones y perillas; así como funciones de cálculo disponibles en instrumentos comunes para adquirir medidas de interés para el usuario

Se desarrollaron diferentes interfaces gráficas para cada instrumento de manera tal que la apariencia mostrada al usuario sea lo más parecida posible a los instrumentos disponibles en el laboratorio, permitiendo un manejo intuitivo de los

instrumentos gracias al comportamiento de los controles, similar a los equipos comunes de laboratorio.

La culminación de los objetivos planteados en este trabajo especial de grado dio como resultado las diferentes interfaces gráficas digitales de cada instrumento enumerado a lo largo de este documento, las cuales emulan cada uno de los instrumentos utilizados en las prácticas del laboratorio de instrumentación electrónica.

A partir de las diferentes pruebas y comparaciones realizadas, se puede concluir que el comportamiento de los instrumentos desarrollados en este trabajo es similar al de los instrumentos utilizados en el laboratorio de la asignatura de instrumentación electrónica, con la salvedad del manejo de los controles de usuario, lo cuales son manipulados mediante dispositivos de interfaz humana (HID: rato, trackpad, etc) o mediante pantallas táctiles. A partir de la proximidad de los valores obtenidos en las mediciones de las diferentes pruebas y comparaciones se puede concluir que los instrumentos desarrollados son aptos para actividades académicas ya que permiten adquirir valores aproximados a los que se obtendrían en un instrumento de laboratorio, garantizando así la experiencia necesaria para brindar al estudiante un aprendizaje sólido en materia de manipulación de instrumentos de medición.

En cuanto a las interfaces gráficas, las opciones de visualización, selección, adquisición, sincronización y guardado de resultados de forma sencilla e interactiva, permiten que el usuario aprenda de manera intuitiva el manejo de los diferentes controles y funciones de cualquiera de las aplicaciones desarrolladas en este proyecto.

Debido a que la adquisición que realiza la tarjeta RedPitaya es de una señal a lo largo de un periodo de tiempo, la visualización del espectro de dicha señal se limita al estudio del dominio de la frecuencia mediante DTFT a través de los algoritmos de procesamiento FFT, por lo que la frecuencia máxima de estudio se ve acotada por la frecuencia máxima de muestreo de la RedPitaya, y el espaciado entre muestras en la frecuencia está ligado directamente a la cantidad de muestras disponibles de la adquisición

5.2. Recomendaciones

Las siguientes son recomendaciones referentes al trabajo realizado con el fin de optimizar el funcionamiento de las aplicaciones actuales y futuras de la tarjeta de desarrollo RedPitaya.

- La adquisición o construcción de una carcasa protectora para integrarla físicamente la tarjeta RedPitaya con la finalidad de proporcionar mayor resistencia a golpes inoportunos y evitar accidentes que afecten su funcionamiento.
- Para aplicaciones que requieran frecuencias mayores a 50MHz se recomienda la adquisición de tarjetas SDR de mayores prestaciones.
- Mejorar las prestaciones de la aplicación de analizador de espectro para la optimización de la función de ancho de resolución a través del desarrollo de un mecanismo de adquisición que permita desplazar y/o filtrar las frecuencias de las señales a estudiar
- Estudiar la posibilidad de adquirir una batería portátil para el uso de la tarjeta de desarrollo RedPitaya en ambientes externos al laboratorio.
- Desarrollar una funcionalidad de multiusuario a fin de que las aplicaciones trabajen de forma independiente a las configuraciones realizadas por cada usuario sin afectar la adquisición.
- Según los manuales de RedPitaya, el trigger automático se usa para llenar el buffer cíclicamente cada vez que el último registro es llenado. Un estudio detallado de este proceso permitiría realizar una adquisición continua de una señal, permitiendo periodos más largos de tiempo para frecuencias de adquisición altas, lo cual sería de utilidad para una aplicación de reflectometría en dominio del tiempo.

Apéndice A

Código de Osciloscopio + Generador UC

El código principal de la aplicación Osciloscopio + Generador - UC puede ser leído a partir del archivo `index.html` de la ruta `/Osciloscopio + Generador - UC/osc+gen3` en el disco incluido en este trabajo especial de grado. Todos los demás archivos incluidos en esta ruta y subdirectorios son dependencias necesarias para la ejecución del código principal.

Apéndice B

Código de Medidor LCR - UC

El código principal de la aplicación Medidor LCR - UC puede ser leído a partir del archivo `index.html` de la ruta `/Medidor LCR - UC/lcr_meter` en el disco incluido en este trabajo especial de grado. Todos los demás archivos incluidos en esta ruta, subdirectorios y la ruta `/Medidor LCR - UC/assets` son dependencias necesarias para la ejecución del código principal.

Apéndice C

Código de Analizador de Espectros y THD - UC

El código principal de la aplicación Analizador de Espectros y THD - UC puede ser leído a partir del archivo `index.html` de la ruta `/Analizador de Espectros y THD - UC/spectrum2` en el disco incluido en este trabajo especial de grado. Todos los demás archivos incluidos en esta ruta, subdirectorios y la ruta `/Analizador de Espectros y THD - UC/assets` son dependencias necesarias para la ejecución del código principal.

Referencias Bibliográficas

- [1] Grecia Romero. Fundamentos teóricos - prácticos de instrumentación electrónica., Mayo 2010. Departamento de Electrónica y Comunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.
- [2] Chandan Bhunia, Saikat Giri, Samrat Kar, Sudarshan Haldar, and Prithwiraj Purkait. A low-cost pc-based virtual oscilloscope. *IEEE Transactions on Education*, 47(2):295, Mayo 2004. ISSN : 0018-9359.
- [3] Santiago Celma, Alfonso Carlosena, and Pedro A. Martinez. Pc-based spectrum analyzer. *IEEE Transactions on Education*, 35(3):204, Agosto 1992. ISSN :0018-9359.
- [4] Jay A Weitzen, Erin Webster, and Alan Rux. University of massachusetts lowell laboratory in a box for first year ece students. In *5th First Year Engineering Experience (FYEE) Conference*. University of Massachusetts Lowell, University of Massachusetts Lowell ECE Department, Agosto 2013. URL <http://fyee.org/fyee2013/papers/1010.pdf>.
- [5] Red Pitaya Team. *Red Pitaya Hardware Specifications*. Red Pitaya, 1.1.1 edition, Abril 2014. URL http://wiki.redpitaya.com/tmp/Red_Pitaya_HW_Specs_V1.1.1.pdf.
- [6] Peter Leban. *Red Pitaya User Manual*. Red Pitaya, Febrero 2014. URL <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/12af/0900766b812aff87.pdf>.

- [7] Kevin Roebuck. *Software-defined radio (SDR): High-impact Technology - What You Need to Know: Definitions, Adoptions, Impact, Benefits, Maturity, Vendors*. Eme-reo Publishing, 2012. URL books.google.co.ve/books?id=wyIPBwAAQBAJ. ISBN 1743046006, 9781743046005.
- [8] J.D. Gauchat. *El gran libro de HTML5, CSS3 y Javascript*. EL GRAN LIBRO DE. Marcombo, 2012. ISBN 9788426717825. URL <https://books.google.com.pe/books?id=szDMLRzwuUC>.
- [9] D. Flanagan. *JavaScript: la guía definitiva*. Anaya Multimedia O Reilly. Anaya Multimedia, 2007. ISBN 9788441522022. URL <https://books.google.com.pe/books?id=mriFGgAACAAJ>.
- [10] L. Van Lancker. *jQuery: el framework JavaScript de la Web 2.0*. Expert IT. Ediciones ENI, 2014. ISBN 9782746091238. URL <https://books.google.com.pe/books?id=ir3SJTQF1R0C>.
- [11] J. Spurlock. *Bootstrap*. O'Reilly Media, 2013. ISBN 9781449344603. URL <https://books.google.com.pe/books?id=LZm7Cxgi3aQC>.
- [12] F.G. Stremmler. *Introducción a los sistemas de comunicación*. Addison-Wesley Longman, 1998. ISBN 9789684443556. URL <https://books.google.com.pe/books?id=TT6QAAAACAAJ>.
- [13] *TDS 340A, TDS 360 and TDS 380 Digital realtime Oscilloscope User Manual*. Tektronix, 1995.
- [14] *HP 8590 E-Series and L-Series spectrum analyzer User Guide*. Hewlett Packard, Julio 1998.
- [15] *Programmable automatic RCL meter PM6303 User Manual*. Fluke, Mayo 1996.
- [16] *331A/332A Distortion Analyzer Operating and Service Manual*. Hewlett-Packard., Abril 1971.
- [17] Antonio S. Fedon Novira. *Trabajos practicos para el laboratorio de mediciones electricas ii*, Marzo 1982.

Anexo A

**Especificaciones de Hardware de
Red Pitaya**