



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES**  
**Y REDES**

**“DESARROLLO DE UN ALGORITMO EN MATLAB PARA LA**  
**OPTIMIZACIÓN DE LA RESOLUCIÓN DE UNA TARJETA USRP B210**  
**PARA APLICACIONES SDRADAR”**

Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES**

**AUTOR: JULIO CÉSAR MEJÍA CANDO**

**TUTOR: Dr. PAÚL DAVID MORENO AVILÉS Ph.D.**

**Riobamba-Ecuador**

**2017**

**@2017, Julio César Mejía Cando**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**EN TELECOMUNICACIONES Y REDES**

El Tribunal certifica que: El trabajo de titulación: “DESARROLLO DE UN ALGORITMO EN MATLAB PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RESOLUCIÓN DE UNA TARJETA USRP B210 PARA APLICACIONES SDRADAR”, de responsabilidad del señor Julio César Mejía Cando, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

Ing. Washington Luna  
**DECANO FACULTAD DE  
INFORMÁTICA Y  
ELECTRÓNICA**

\_\_\_\_\_

Ing. Franklin Moreno  
**DIRECTOR DE ESCUELA DE  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
EN TELECOMUNICACIONES Y  
REDES**

\_\_\_\_\_

Dr. David Moreno Ph.D.  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

\_\_\_\_\_

Ing. Edwin Altamirano  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

Yo, Julio César Mejía Cando declaro ser el autor del presente trabajo de titulación: “DESARROLLO DE UN ALGORITMO EN MATLAB PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RESOLUCIÓN DE UNA TARJETA USRP B210 PARA APLICACIONES SDRADAR”, que fue elaborado en su totalidad por mi persona, bajo la dirección del Dr. David Moreno Ph.D., haciéndome totalmente responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación y el patrimonio de la misma pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

Julio César Mejía Cando

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación se la dedico a mis padres Julio y Rosita que siempre me han brindado su apoyo, confianza, además de todos los buenos momentos que hemos compartido, en especial a mi “mamá Rosita” por su lucha y buen ejemplo que me ha impulsado a cumplir este objetivo en mi vida, a mis hermanos Marcelo y Mónica que siempre han estado presentes en todos mis logros, por inculcarme el valor y el sacrificio del trabajo conjuntamente decirles mil gracias por todo y los quiero mucho. También dedico este logro a mí cuñada Paulina que siempre ha estado presta a ofrecerme su ayuda y a mi sobrina Dayannita Paola por todos esos momentos llenos de risas que hemos vivido, por tu inocencia, vivacidad y cariño.

*Julio César*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a la Escuela de Ingeniería en Electrónica Telecomunicaciones y Redes y a todos los docentes que han compartido todos sus conocimientos inculcando valores éticos de profesionalismo en mi persona. Al Ing. David Moreno tutor del presente trabajo de titulación por la confianza brindada desde el inicio de esta investigación, de igual manera al Ing. Edwin Altamirano por su disposición.

A mis amigos de siempre: Damaris, Sula, Gaby, Diego, Washo y Cristian de igual manera les agradezco por su apoyo y amistad. Al final pero no menos importante a Katy que ha sido participe en el transcurso de esta carrera, ayudándome en muchas ocasiones para llegar a cumplir esta meta, y a todos decirles muchas gracias.

*Julio César*

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xvi
RESUMEN .....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>6</b>
<b>1 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Sistema Radar.....</b>	<b>6</b>
<i>1.1.1 Definición .....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2 Principio de funcionamiento .....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.3 Ecuación del Radar .....</i>	<i>8</i>
<i>1.1.4 Clasificación del sistema radar .....</i>	<i>9</i>
<i>1.1.4.1 Según el número de antenas .....</i>	<i>9</i>
<i>1.1.4.2 Según el blanco .....</i>	<i>9</i>
<i>1.1.4.3 Según su forma de onda .....</i>	<i>9</i>
<i>1.1.4.4 Según su aplicación.....</i>	<i>9</i>
<i>1.1.5 Análisis del sistema radar.....</i>	<i>10</i>
<i>1.1.5.1 Resolución del sistema .....</i>	<i>10</i>
<i>1.1.5.2 Distancia máxima del análisis de señal.....</i>	<i>10</i>
<i>1.1.5.3 Radar OFDM .....</i>	<i>11</i>
<i>1.1.5.4 Radar de Onda Continua (CW).....</i>	<i>12</i>
<i>1.1.5.5 Radar FMCW.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.6 Bandas de frecuencia asignada a radar.....</i>	<i>16</i>
<b>1.2 Software Defined Radio (SDR).....</b>	<b>18</b>
<i>1.2.1 Origen .....</i>	<i>18</i>
<i>1.2.2 Arquitectura SDR.....</i>	<i>19</i>
<i>1.2.3 Proceso de transmisión y recepción de señal con tecnología SDR.....</i>	<i>20</i>
<i>1.2.4 SDRadar .....</i>	<i>20</i>

<b>1.3</b>	<b>Tarjeta USRP</b> .....	21
<b>1.3.1</b>	<b>Modelos USRP</b> .....	22
<b>1.3.2</b>	<b>USRP B210</b> .....	22
<b>1.3.2.1</b>	<i>Estructura física de la tarjeta USRP B210</i> .....	23
<b>1.3.2.2</b>	<i>Estructura funcional de la tarjeta USRP B210</i> .....	24
<b>1.4</b>	<b>Software para procesamiento de señales</b> .....	25
<b>1.4.1</b>	<b>MATLAB</b> .....	25
<b>1.4.1.1</b>	<i>MATLAB y USRP B210</i> .....	26
<b>1.4.2</b>	<b>GNU RADIO</b> .....	26
<b>1.4.2.1</b>	<i>GNURadio y USRP B210</i> .....	27
 <b>CAPÍTULO II</b> .....		<b>28</b>
<b>2</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	28
<b>2.1</b>	<b>Desarrollo del trabajo de titulación</b> .....	28
<b>2.2</b>	<b>Análisis de la tarjeta USRP B210</b> .....	28
<b>2.2.1</b>	<i>Características USRP B210</i> .....	29
<b>2.2.2</b>	<i>Limitaciones USRP B210</i> .....	30
<b>2.2.2.1</b>	<i>Conectividad</i> .....	30
<b>2.2.2.2</b>	<i>Transmisión/Recepción</i> .....	30
<b>2.2.2.3</b>	<i>Configuración (Software)</i> .....	31
<b>2.2.2.4</b>	<i>Velocidad máxima</i> .....	31
<b>2.2.2.5</b>	<i>Potencia de salida</i> .....	32
<b>2.2.2.6</b>	<i>Sincronización TX/RX USRP B210</i> .....	32
<b>2.2.3</b>	<i>Análisis para implementación de modulación</i> .....	33
<b>2.2.4</b>	<i>Desarrollo del algoritmo en MATLAB</i> .....	35
<b>2.2.4.1</b>	<i>Método para optimizar la resolución de la tarjeta USRP B210</i> .....	35
<b>2.2.4.2</b>	<i>Diagrama de bloques del algoritmo realizado en MATLAB</i> .....	37
<b>2.2.4.3</b>	<i>Determinación de zonas para mediciones y valores mínimo/máximo para localización de objetivo</i> .....	39
<b>2.2.4.4</b>	<i>Proceso para calcular el número de muestras tomadas</i> .....	40
 <b>CAPÍTULO III</b> .....		<b>52</b>
<b>3</b>	<b>EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	52
<b>3.1</b>	<b>Análisis para determinar el número de muestras tomadas</b> .....	52
<b>3.1.1</b>	<i>Elección de número de mediciones “n” para cada valor de espacio de ancho de banda “m”</i> .....	52
<b>3.1.2</b>	<i>Elección de número de muestras “n” y espacio de ancho de banda “m”</i> .....	66



<b>3.2 Evaluación del algoritmo</b> .....	69
<b>3.2.1 Ejecución del algoritmo</b> .....	69
3.2.1.1 <i>Corrección de resolución</i> .....	69
3.2.1.2 <i>Limitaciones del algoritmo</i> .....	74
<b>3.2.2 Evaluación del algoritmo según zonas determinadas y discusión de resultados</b> .....	76
3.2.2.1 <i>Evaluación zona 1</i> .....	76
3.2.2.2 <i>Evaluación zona 2</i> .....	78
3.2.2.3 <i>Discusión de resultados</i> .....	79
<b>CONCLUSIONES</b> .....	80
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	81
<b>GLOSARIO</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Rango de frecuencias asignado a radares.....	18
<b>Tabla 1-2:</b> Características USRP B210 .....	29
<b>Tabla 2-2:</b> USB 2.0 vs. USB 3.0 .....	30
<b>Tabla 3-2:</b> Resolución USRP B210.....	32
<b>Tabla 4-2:</b> Incógnitas para implementar en el algoritmo .....	36
<b>Tabla 5-2:</b> Zonas según el margen de error .....	39
<b>Tabla 6-2:</b> Valor mínimo/máximo en detección de objetivos.....	39
<b>Tabla 7-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 0.1$ MHz, $n = 2-20$ .....	41
<b>Tabla 8-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 0.2$ MHz, $n = 2-20$ .....	41
<b>Tabla 9-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 0.3$ MHz, $n = 2-20$ .....	42
<b>Tabla 10-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 0.4$ MHz, $n = 2-20$ .....	42
<b>Tabla 11-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 0.5$ MHz, $n = 2-20$ .....	43
<b>Tabla 12-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 0.6$ MHz, $n = 2-20$ .....	43
<b>Tabla 13-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 0.7$ MHz, $n = 2-20$ .....	44
<b>Tabla 14-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 0.8$ MHz, $n = 2-20$ .....	44
<b>Tabla 15-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 0.9$ MHz, $n = 2-20$ .....	45
<b>Tabla 16-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 1$ MHz, $n = 2-20$ .....	45
<b>Tabla 17-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 1.1$ MHz, $n = 2-20$ .....	46
<b>Tabla 18-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 1.2$ MHz, $n = 2-20$ .....	46
<b>Tabla 19-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 1.3$ MHz, $n = 2-20$ .....	47
<b>Tabla 20-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 1.4$ MHz, $n = 2-20$ .....	47
<b>Tabla 21-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 1.5$ MHz, $n = 2-20$ .....	48
<b>Tabla 22-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 1.6$ MHz, $n = 2-20$ .....	48
<b>Tabla 23-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 1.7$ MHz, $n = 2-20$ .....	49
<b>Tabla 24-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 1.8$ MHz, $n = 2-20$ .....	49
<b>Tabla 25-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 1.9$ MHz, $n = 2-20$ .....	50
<b>Tabla 26-2:</b> Objetivos en las zonas determinadas para $m = 2$ MHz, $n = 2-20$ .....	50
<b>Tabla 1-3:</b> Elección del valor de “n” para cada “m” según objetivos detectados en la zona 1 ...	66
<b>Tabla 2-3:</b> Número de muestras “n” para “m = 0.5” según valor mínimo .....	68
<b>Tabla 3-3:</b> Valores elegidos para encontrar la optimización de la resolución de la tarjeta USRP B210.....	69
<b>Tabla 4-3:</b> Resolución correspondiente a cada zona determinada .....	72
<b>Tabla 5-3:</b> Nuevo número de objetivos detectados.....	74

<b>Tabla 6-3:</b> Limitaciones algoritmo .....	74
<b>Tabla 7-3:</b> Porcentaje de mediciones de acuerdo al número de objetivos encontrados en la zona. 1 y 2. ....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Principio de funcionamiento de un radar .....	8
<b>Figura 2-1:</b> Señal Transmitida - Reflejada .....	11
<b>Figura 3-1:</b> Señal OFDM .....	11
<b>Figura 4-1:</b> Señal transmitida .....	12
<b>Figura 5-1:</b> Señal recibida .....	13
<b>Figura 6-1:</b> Señal Chirp (Up) .....	14
<b>Figura 7-1:</b> Señal transmitida .....	15
<b>Figura 8-1:</b> Señal recibida .....	15
<b>Figura 9-1:</b> Detección del objetivo .....	16
<b>Figura 10-1:</b> Bandas de frecuencias usadas para los radares .....	17
<b>Figura 11-1:</b> Relación entre radio cognitiva y SDR .....	19
<b>Figura 12-1:</b> Arquitectura SDR .....	20
<b>Figura 13-1:</b> Diagrama de bloques USRP .....	21
<b>Figura 14-1:</b> Estructura física USRP B210 .....	23
<b>Figura 15-1:</b> Diagrama de bloques USRP .....	24
<b>Figura 16-1:</b> Logo MATLAB .....	25
<b>Figura 17-1:</b> Logo GNURadio .....	26
<b>Figura 1-2:</b> Proceso para el desarrollo del proyecto .....	28
<b>Figura 2-2:</b> Relación de $k$ con el tiempo máximo y ancho de banda .....	34
<b>Figura 3-2:</b> Diferencia de frecuencia y tiempo de señal transmitida y señal recibida .....	34
<b>Figura 4-2:</b> Método para optimización de resolución .....	36
<b>Figura 5-2:</b> Diagrama de bloques para encontrar los valores de “n” y “m” .....	38
<b>Figura 1-3:</b> Diagrama de bloques del sistema SDRadar .....	76

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b> Análisis para $m = 0.1$ MHz y $n = 2-20$ .....	53
<b>Gráfico 2-3:</b> Análisis para $m = 0.2$ MHz y $n = 2-20$ .....	53
<b>Gráfico 3-3:</b> Análisis para $m = 0.3$ MHz y $n = 2-20$ .....	54
<b>Gráfico 4-3:</b> Análisis para $m = 0.4$ MHz y $n = 2-20$ .....	55
<b>Gráfico 5-3:</b> Análisis para $m = 0.5$ MHz y $n = 2-20$ .....	55
<b>Gráfico 6-3:</b> Análisis para $m = 0.6$ MHz y $n = 2-20$ .....	56
<b>Gráfico 7-3:</b> Análisis para $m = 0.7$ MHz y $n = 2-20$ .....	57
<b>Gráfico 8-3:</b> Análisis para $m = 0.8$ MHz y $n = 2-20$ .....	57
<b>Gráfico 9-3:</b> Análisis para $m = 0.9$ MHz y $n = 2-20$ .....	58
<b>Gráfico 10-3:</b> Análisis para $m = 1$ MHz y $n = 2-20$ .....	59
<b>Gráfico 11-3:</b> Análisis para $m = 1.1$ MHz y $n = 2-20$ .....	59
<b>Gráfico 12-3:</b> Análisis para $m = 1.2$ MHz y $n = 2-20$ .....	60
<b>Gráfico 13-3:</b> Análisis para $m = 1.3$ MHz y $n = 2-20$ .....	61
<b>Gráfico 14-3:</b> Análisis para $m = 1.4$ MHz y $n = 2-20$ .....	61
<b>Gráfico 15-3:</b> Análisis para $m = 1.5$ MHz y $n = 2-20$ .....	62
<b>Gráfico 16-3:</b> Análisis para $m = 1.6$ MHz y $n = 2-20$ .....	63
<b>Gráfico 17-3:</b> Análisis para $m = 1.7$ MHz y $n = 2-20$ .....	63
<b>Gráfico 18-3:</b> Análisis para $m = 1.8$ MHz y $n = 2-20$ .....	64
<b>Gráfico 19-3:</b> Análisis para $m = 1.9$ MHz y $n = 2-20$ .....	65
<b>Gráfico 20-3:</b> Análisis para $m = 2$ MHz y $n = 2-20$ .....	65
<b>Gráfico 21-3:</b> Análisis para elección de “n” y “m” .....	67
<b>Gráfico 22-3:</b> Análisis para $m = 0.5$ MHz y $n = 2-20$ según valor mínimo .....	68
<b>Gráfico 23-3:</b> Comparación resolución 1m vs. Resolución 6m .....	70
<b>Gráfico 24-3:</b> Corrección de resolución .....	71
<b>Gráfico 25-3:</b> Corrección de resolución aplicando promedio de valores mínimo/máximo .....	73
<b>Gráfico 26-3:</b> Limitaciones algoritmo .....	75
<b>Gráfico 27-3:</b> Detección de objetivo en zona 1 sin aplicar algoritmo de corrección.....	77
<b>Gráfico 28-3:</b> Radargrama para detección del objetivo en zona 1 con una resolución de 6 metros .....	77
<b>Gráfico 29-3:</b> Resultado de medición de objetivo de 93 metros aplicando algoritmo .....	77
<b>Gráfico 30-3:</b> Detección de objetivo en zona 2 sin aplicar algoritmo de corrección.....	78
<b>Gráfico 31-3:</b> Radargrama para detección del objetivo en zona 2 con una resolución de 6 metros .....	78

**Gráfico 32-3:** Resultado de medición de objetivo de 51 metros aplicando algoritmo .....79

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1-1</b>	Ecuación del radar .....	8
<b>Ecuación 2-1</b>	Resolución del sistema .....	10
<b>Ecuación 3-1</b>	Distancia máxima teórica .....	10
<b>Ecuación 4-1</b>	Distancia máxima práctica.....	11
<b>Ecuación 5-1</b>	Señal transmitida .....	12
<b>Ecuación 6-1</b>	Señal recibida.....	12
<b>Ecuación 7-1</b>	Detección del objetivo.....	13
<b>Ecuación 8-1</b>	Señal chirp transmitida .....	14
<b>Ecuación 9-1</b>	Función de la frecuencia.....	14
<b>Ecuación 10-1</b>	Rapidez con la que cambia la frecuencia .....	14
<b>Ecuación 11-1</b>	Pendiente con ancho de banda .....	14
<b>Ecuación 12-1</b>	Señal chirp recibida.....	15
<b>Ecuación 13-1</b>	Detección del objetivo señal chirp.....	16
<b>Ecuación 1-2</b>	Resolución USRP B210.....	31
<b>Ecuación 2-2</b>	Teorema de muestreo de nyquist .....	35

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** Datasheet USRP B210

**ANEXO B:** Código para determinar valores de número de mediciones y espacio de ancho de banda del valor máximo

**ANEXO C:** Medidas realizadas con la USRP B210

**ANEXO D:** Algoritmo para mejorar la resolución de la tarjeta USRP B210



## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo principal desarrollar un algoritmo en MATLAB que permite optimizar la resolución de una tarjeta periférica universal de software de radio (USRP) B210, analizando las limitaciones y características de la misma para desarrollar aplicaciones de radar definidos por software (SDRadar). En el desarrollo del algoritmo se utilizó un radar de onda continua modulada en frecuencia (FMCW) implementando una señal chirp, considerando que 25 MHz es el máximo ancho de banda que la tarjeta puede proporcionar dando como resultado una resolución de 6 metros. El método utilizado que optimizó la resolución de la tarjeta es transmitir un determinado número de señales con distintos anchos de banda dando como resultado una resolución diferente, detectando y almacenando el objetivo en una matriz. Se estableció que con 14 mediciones a un espacio de ancho de banda de 0.5 MHz entre cada señal, es lo más óptimo para mejorar la resolución de la tarjeta. Considerando las limitaciones que el algoritmo presenta, como la determinación de dos zonas con un número de muestras de 94 objetivos de 6 a 100 metros: donde la primera zona está limitada por un error de medición de  $e < 1 m$ , en la segunda zona con un error de medición  $1m \leq e < 2 m$  con 69,15% y 30,85% de objetivos detectados respectivamente, determinando así su efectividad y confiabilidad. De los resultados obtenidos se recomienda emplear el algoritmo en aplicaciones SDRadar como detección de objetivos, aplicaciones topográficas o en un radar de apertura sintética (SAR).

**PALABRAS CLAVES:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TELECOMUNICACIONES>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <RESOLUCIÓN PARA APLICACIONES SDRADAR>, <PERIFÉRICO UNIVERSAL DE SOFTWARE DE RADIO (USRP) >, <RADAR DEFINIDO POR SOFTWARE (SDR)>, <ONDA CONTINUA MODULADA EN FRECUENCIA (FMCW)>.

## ABSTRACT

The main objective of the present work was to develop a MATLAB algorithm that allows the optimization of the resolution of a Universal software radio peripheral (USRP) B210, analyzing the limitations and characteristics of it to develop software defined radar applications (SDRadar). In the development of the algorithm was implemented a frequency-modulated continuous wave (FMCW) radar by implementing a chirp signal, considering that 25 MHz is the maximum bandwidth the card can provide resulting in a resolution of a 6 meters. The method used to optimize the resolution of the card is to transmit a certain number of signals with different bandwidth resulting in a different resolution, detecting and storing the target in a matrix. It was established that with 14 measurements at a bandwidth space of a 0.5 MHz between each signal, it is the most optimal to improve the resolution of the card. Considering the limitations that the algorithm presents, such as the determination of two zones with a number of samples of 94 targets from 6 to 100 meters: where the first zone is limited by a measurements error of  $e < 1$  m, in the second zone with a measurements error  $1m \leq e < 2m$  with 69,15% and 30,85% of objectives detected respectively, thus determining its effectiveness and reliability. From the results obtained it is recommended to use the algorithm in SDRadar applications such as objective detection, topographic applications or in a synthetic aperture radar (SAR).

**KEYWORDS:** <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <TELECOMMUNICATION>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <RESOLUTION FOR APPLICATIONS SDRADAR>, <UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL (USRP)>, SOFTWARE DEFINED RADAR (SDRADAR)>, <FREQUENCY-MODULATED CONTINUOUS WAVE (FMCW)>.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas radares fueron diseñados para ambientes bélicos y hasta la actualidad se han ido aplicando en diferentes áreas como: la meteorología, control de velocidad marítima/aérea, radares doppler, entre otros, ayudando a otros estudios relacionados con necesidades presentes en la sociedad, para lo cual es importante contar con sistemas tecnológicos confiables.

La tecnología Software Defined Radio (SDR) se presenta como una alternativa para diseñar prototipos a bajo coste, siendo confiable y adaptable a diferentes necesidades. En otras investigaciones se han analizado las capacidades de aplicar tecnología SDR para sistemas radares, siendo aceptadas este tipo de propuestas.

Uno de los inconvenientes de la tecnología SDR, es el ancho de banda que proporcionan para ser aplicados en sistemas SDRadar (Radar Definido por Software), siendo una característica importante que depende de la capacidad de detección de dos objetivos o blancos en el rango, o más conocida como resolución.

La USRP (Periférico Universal de Software de Radio) B210, es una tarjeta con tecnología SDR que cuenta con características propias dadas por su fabricante ETTUS RESEARCH, las cuales serán analizadas en el presente trabajo de investigación, siendo importante saber cuál es la mejor resolución que las tarjetas pueden proporcionar para ser aplicadas en sistemas SDRadar.

Investigando y analizando las características operativas de la USRP B210, se desarrolla un algoritmo en MATLAB que permite optimizar la resolución de la tarjeta, mediante un método cuantitativo, se escoge la mejor opción; evaluando la confiabilidad del algoritmo mediante simulaciones.

Se espera que el presente trabajo ayude a otras investigaciones con aportes tecnológicos a la carrera de Ing. Electrónica, en Telecomunicaciones y Redes.

## ANTECEDENTES

En 1888, Heinrich Rudolf Hertz demuestra que las ondas electromagnéticas se reflejan en las superficies metálicas (Menéndez, 2015). Investigaciones y estudios posteriores llevados a cabo de científicos e ingenieros, impulsados por el ambiente bélico de la Segunda Guerra mundial, aportan de una u otra manera al desarrollo de lo que actualmente se conoce como sistema radar.

En la actualidad los sistemas radares ya no solo se los usa en aplicaciones militares, meteorológicas, aeronáuticas, marítimas, por la cual existen investigaciones y estudios en los que se pretende emplear los radares [7, 13] pero al ser investigaciones los equipos utilizados se espera que no lleguen a un precio elevado, bajo este argumento, SDRadar un sistema de radar versátil, donde la mayor parte del procesamiento, como la generación de señal, filtrado, modulación y demodulación, etc. es realizado por un software, que se presenta como una tecnología para realizar la mayor parte de prototipos a bajo coste, aunque ya se han realizado investigaciones las cuales son implementadas con FPGA (Field Programmable Gate Array) [14, 26] sofisticados no garantizan la reducción de costos.

Bajo el concepto de SDRadar se han creado las tarjetas USRP que son transceptores confiables capaces de generar prototipos de radio configurados por medio de una computadora común, los cuales son distribuidos por diferentes empresas como es el caso de la NI (National Instrument) y la ETTUS RESEARCH, a esto se incluye que cada una de estas tarjetas presentan diferentes características y a su vez limitaciones en resolución por el rango de ancho de banda que vienen establecidas por su fabricante.

Merchán en su trabajo de investigación “Diseño e implementación de un sistema radar utilizando sistema SDR a través de tecnología USRP para aplicaciones topográficas”, presenta una propuesta de un radar utilizando una tarjeta USRP B210, se analiza y se investiga otras propuestas [1, 3, 6, 19] que permitan desarrollar el algoritmo que optimice la resolución de dichas tarjetas.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

El problema se origina de investigaciones académicas con falta de acceso a dispositivos de alto costo, que cuentan con alta resolución para desarrollar sistemas SDRadar, por lo cual se consideró la necesidad de desarrollar un algoritmo en MATLAB que permita optimizar la resolución de la tarjeta USRP B210 para aplicaciones SDRadar, ya que esta tarjeta se encuentra disponible en los laboratorios de Electrónica de la ESPOCH.

## **SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

- ¿Cuáles son las limitaciones que presenta la tarjeta USRP B210 con respecto a la resolución máxima que puede proporcionar para aplicaciones SDRadar y cuáles serán los parámetros que serán evaluados para desarrollar el algoritmo en MATLAB que permita optimizar la resolución de la tarjeta?
- ¿Qué beneficios presenta el radar FMCW para ser implementada en el algoritmo?
- ¿Cómo corrige la resolución el algoritmo desarrollado en MATLAB y cuáles son las limitaciones que presenta el mismo?
- ¿Cómo será evaluada la confiabilidad del algoritmo?

## **JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

Las tarjetas USRP son una plataforma usada para el desarrollo de prototipos de sistemas de comunicaciones SDRadar y radio frecuencia (RF) (National Instruments, 2017), pero la limitación que presentan debido a sus características propias de fabricación restringen en cierto grado realizar investigaciones o aplicaciones radar en la que se necesita de una buena resolución.

Aunque existen equipos con mejores características para el desarrollo de prototipos de sistemas radares que brindan una resolución más óptima como es el caso de las VNA (Vector Network Analyzer), donde su valor es elevado, por lo tanto tener accesibilidad a estos equipos resulta difícil y al ser USRP B210 una plataforma con bajo costo se la puede adquirir, ya que están disponibles en los laboratorios de Electrónica de la ESPOCH resulta beneficioso desarrollar un algoritmo que optimice la resolución mediante MATLAB.

Con la elaboración del algoritmo en MATLAB se espera impulsar el campo investigativo en la escuela de Electrónica de la ESPOCH en el área de tele detección, elaborando prototipos que se ajusten a las necesidades de la comunidad.

## **JUSTIFICACIÓN APLICATIVA**

En el presente trabajo se analiza las limitaciones que presenta la USRP B210 con respecto al ancho de banda, potencia, sincronización, etc., para poder implementar un sistema SDRadar, así mismo conocer cuál es la mejor resolución que la tarjeta USRP proporciona.

Una vez conocidas las limitaciones de la USRP B210 y en específico el máximo ancho de banda con el que se puede generar una señal chirp, se desarrolla el algoritmo en MATLAB como una solución de ingeniería para optimizar la resolución, siendo el principal procedimiento enviar un cierto número de señales a diferente ancho de banda para poder estimar la posición del objetivo. Se analiza cual es el número de señales y espacio de ancho de banda entre cada señal generada que permita optimizar la resolución.

Por medio de simulaciones se analiza y evalúa los resultados, para mencionar que aplicaciones SDRadar se pueden beneficiar del algoritmo desarrollado, gracias a la multi-aplicabilidad de las tarjetas USRP B210.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Desarrollar un algoritmo en MATLAB para la optimización de la resolución de una tarjeta USRP B210 para aplicaciones SDRadar.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar cuáles son las limitaciones que presenta la tarjeta USRP B210 con respecto a la resolución máxima que puede brindar para aplicaciones SDRadar.
- Estudiar qué tipo de modulación será la ideal para ser implementada en el algoritmo
- Realizar el algoritmo basado en simulación de escenarios en MATLAB que permitan un desarrollo óptimo.
- Ejecutar pruebas del algoritmo implementado a la tarjeta USRP B210 que determinen la funcionalidad del mismo.
- Comparar y validar los resultados obtenidos en la ejecución de pruebas para establecer aplicaciones SDRadar que podrán ser usados con la tarjeta USRP B210 mediante el algoritmo desarrollado en MATLAB.

## CAPÍTULO I

### 1 MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Sistema Radar

Antes de conocer el término radar, científicos estudiaban el comportamiento de las ondas de radio y para años posteriores quienes seguían con esta línea investigativa debían comprender todos los aspectos básicos como los planteados por James Maxwell que con sus aportes hoy son base de la física moderna, de la misma manera para el año de 1886 Heinrich Hertz contribuyó experimentalmente lo propuesto por Maxwell, obteniendo que la propagación de ondas de radio viajan a la velocidad de la luz el cual fue un resultado importante.

Hertz continuó con su línea investigativa aportando avances, como la invención de un dispositivo que medía la velocidad de las ondas de radio, otro aporte fue la demostración que las ondas electromagnéticas pueden rebotar o ser reflejadas en ciertos materiales.

Siendo el año de 1904 Christian Hülmesyer ingeniero alemán, basándose en las investigaciones de Hertz inventa el “Telemobinoscopio”, un aparato diseñado para medir el tiempo de ida y regreso de las ondas electromagnéticas al chocar en un objeto, sistema usado en barcos pero no tuvo mucho impacto debido a su corto alcance. Aunque años más tarde existieron ingenieros (Albert Taylor y Leo Young) quienes mejoran el invento de Hülmesyer llegando a un alcance de 25 millas.

Fue durante el período de la Segunda Guerra Mundial que se dio un aceleramiento a investigaciones del radar, por la necesidad de prevenir bombardeos. Es aquí donde Inglaterra da surgimiento a “Chain Home”, un sistema diseñado para vigilancia aérea. Luego para la década de los años 40 Gran Bretaña y EEUU aportan sus conocimientos y utilizando el magnetrón pueden aplicar el radar en frecuencias de microondas y ya no solo en frecuencias bajas como (HF) y VHF.

Es importante reconocer que durante el período de la Segunda Guerra Mundial el mundo pudo evidenciar un importante adelanto tecnológico como el invento de la computadora, en el área militar referente a armamentos y equipos de guerra. Todos estos inventos de guerra más tarde pudieron ser usados en aplicaciones civiles, evolucionando el mundo y sus necesidades.



### ***1.1.1 Definición***

Radar que proviene del acrónimo Radio Detection and Ranging, que es un sistema de comunicación conformado por un transmisor un canal o medio y un receptor. El transmisor propaga una onda electromagnética a través de un medio no guiado (aire), el cual es detectada por el receptor que procesa la señal para estimar la posición como aplicación básica.

A pesar de los usos militares que le dieron al radar, actualmente se ha visto necesario aplicarlo en distintas áreas como la meteorología o el control de tráfico aéreo/marítimo.

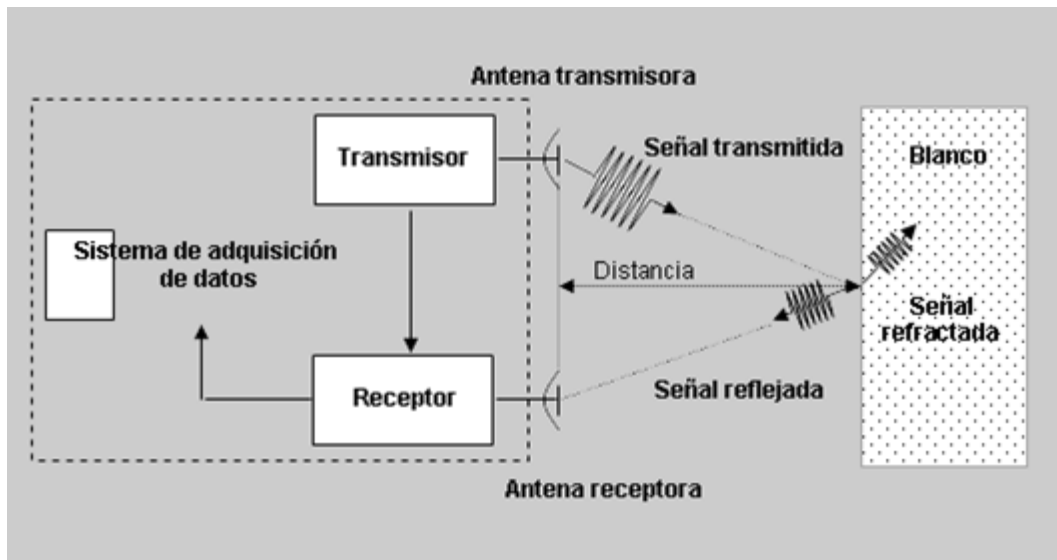
### ***1.1.2 Principio de funcionamiento***

Para comprender el principio de funcionamiento del radar es primordial entender dos conceptos: el eco y el efecto Doppler.

- **Eco:** Cumple el fenómeno de la reflexión, donde una onda al chocar con un objetivo, una parte regresa o se refleja y la otra parte se dispersa.
- **Efecto Doppler:** Consiste en la variación de frecuencia de una onda al ser emitida o recibida por un objeto en movimiento. (Gómez y Salar, 2009)

Teniendo en cuenta los conceptos mencionados se puede decir que en un sistema radar el transmisor irradia una onda electromagnética a través de una antena, la cual es propagada en el espectro electromagnético, chocando en un blanco reflejando su señal e interceptada por la antena del receptor para posteriormente procesar los datos recibidos y determinar la posición del blanco o velocidad a la cual viaja el objetivo.

Se puede apreciar en la Figura 1-1 el principio de funcionamiento de un radar, donde se observa que la señal reflejada es atenuada con respecto a la señal transmitida esto debido a la distancia que recorre la onda, para lo cual es necesario que el sistema radar cuente con un buen amplificador de potencia tanto en transmisión como en recepción.



**Figura 1-1:** Principio de funcionamiento de un radar

Fuente: <http://www.umag.cl/investigacion/dpa/radar/sistemas/ecuaciones/figura-02.gif>

### 1.1.3 Ecuación del Radar

Como los radares como funciones principales tienen rastrear, buscar/encontrar y representar la imagen del objetivo, ante todo esto el radar se ve limitado por la intensidad de la señal que el receptor recibe además de otras señales o ruido que se mezclan con la señal original.

En la Ecuación 1-1 se asume que el transmisor y receptor se encuentran en el mismo lugar, también algunos aspectos diferentes a los principios básicos de funcionamiento de un radar.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

Donde:

- $P_r$ : Es la potencia de receptor
- $P_t$ : Es la potencia transmitida
- $G_t$ : Es la ganancia de la antena de transmisión
- $G_r$ : Es la ganancia de antena de recepción
- $\lambda$ : Es la longitud de onda portadora en metros
- $\sigma$ : Es la sección transversal del radar (RCS)
- $R$ : Es el rango o distancia del radar al blanco en metros

Como se observa en la Ecuación 1-1 la potencia  $P_r$  es muy pequeña debido a que es proporcional a la cuarta potencia de la distancia.

### **1.1.4 Clasificación del sistema radar**

#### **1.1.4.1 Según el número de antenas**

- **Monoestático:** Se los conoce por tener en posición estática tanto el receptor como el transmisor y a su vez comparten una antena con un circulador.
- **Biestático:** Estos radares se diferencian del monoestático ya que cuentan con dos antenas, una para recepción y otra para transmisión separados una de la otra de forma estática.
- **Multiestático:** En este tipo de radares se usa una antena para transmisión y varias antenas para recepción de forma estática.

#### **1.1.4.2 Según el blanco**

- **Radar de Vigilancia Primario (PSR):** PSR acrónimo de Primary Surveillance Radar, utilizado en control de tráfico aéreo ya que la duración de la onda transmitida es corta y al chocar en un objetivo es reflejada para ser procesada y determinar la distancia.
- **Radar de Vigilancia Secundario (SSR):** SSR acrónimo de Secondary Surveillance Radar, a diferencia de los radares PSR estos son usados en aviación, ya que el receptor cuenta con un transponder porque el transmisor envía una señal codificada solicitando la información del receptor en forma codificada determinando así si se trata de un avión amigo o enemigo.

#### **1.1.4.3 Según su forma de onda**

- **Radar de Onda Continua:** Transmite una señal sin interrupciones, el propósito de estos radares es para medir fenómenos físicos como el efecto Doppler, el cual se puede aplicar para medir la velocidad de automóviles en marcha.
- **Radar de Onda Pulsada:** Transmite periódicamente un pulso que puede ser modulado o no. (Álvarez y Shagñay, 2015, pág. 23)

#### **1.1.4.4 Según su aplicación**

Debido a las principales funciones del radar (búsqueda, detección) se puede aplicar en diversas necesidades de teledetección, una de las aplicaciones más comunes se cita a continuación:

- **Radares Para Aplicaciones Militares:** Por motivos de la guerra en sus inicios el radar fue aplicado a búsqueda, detección de enemigos, entre otros fines militares. Se hace un paréntesis para incluir que el radar doppler es utilizado para medir la velocidad radial del blanco.
- **Radares Para Aplicaciones Comerciales:** Estos radares tienen otras aplicaciones con fines meteorológicos, control de navegación aérea, control de navegación marítima y control vehicular.

### 1.1.5 *Análisis del sistema radar*

El análisis de los sistemas radar fundamentalmente consta de los siguientes aspectos:

#### 1.1.5.1 *Resolución del sistema*

En sistemas radar se requiere encontrar objetivos en un rango determinado a lo que se llama resolución. En otros términos la resolución es una medida usada por el radar para diferenciar entre dos objetivos en el rango (Charvat, 2014 pág. 75). La Ecuación 2-1 es usada para calcular la resolución del sistema.

$$\Delta R = \frac{c}{2 * B} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Donde:

c: Es la velocidad de la luz

B: Es el ancho de banda

De la Ecuación 2-1 se observa que el ancho de banda B es inversamente proporcional a la resolución  $\Delta R$ , por lo que a mayor ancho de banda B tenemos una resolución más pequeña.

#### 1.1.5.2 *Distancia máxima del análisis de señal*

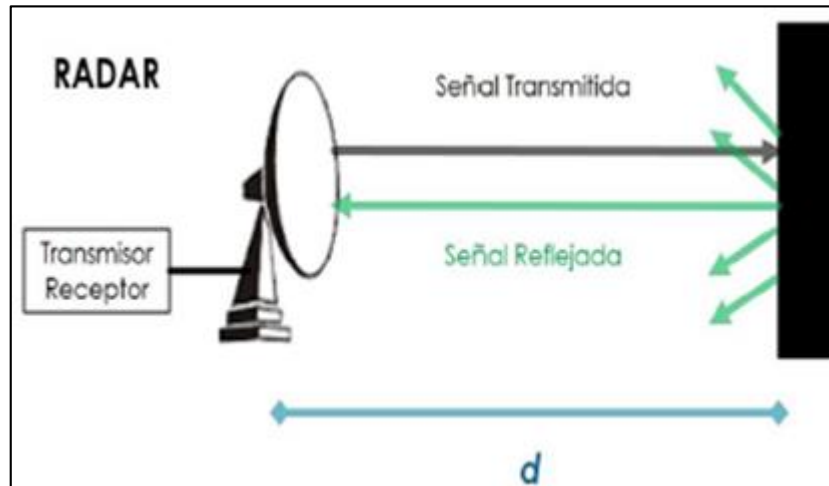
La máxima distancia de la señal recibida del sistema radar es analizada y depende del tiempo final  $t_f$  como se muestra en la Ecuación 3-1 (Ver Figura 2-1.) (Barberán y Domínguez, 2016, pág. 35)

$$d_{\text{maxteorica}} = \frac{c * t_f}{2} \quad \text{Ecuación 3-1}$$

La distancia en escenarios reales es reducida a la mitad. (Ecuación 4-1)

$$d_{\text{maxpractica}} = \frac{c \cdot t_r}{4}$$

**Ecuación 4-1**



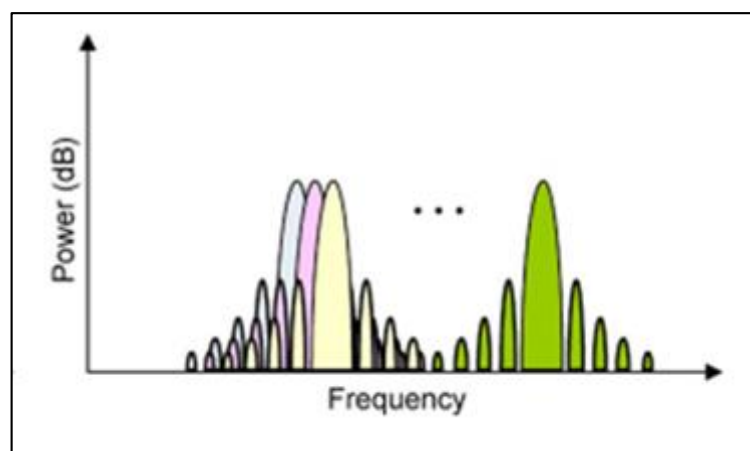
**Figura 2-1:** Señal Transmitida - Reflejada

Fuente: (Barberán y Domínguez, 2016)

### 1.1.5.3 Radar OFDM

El radar de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), es una técnica de modulación para la transmisión multiportadora. Debido a su propiedad de ortogonalidad que cumple los canales pueden ser separados entre sí, logrando un ancho de banda estrecho.

En la figura 3-1 se muestra una señal OFDM.



**Figura 3-1:** Señal OFDM

Fuente: [ftp://193.204.59.9/Guccione/sistemi%20di%20telecomunicazioni/OFDM\\_Tutorial\\_1.pdf](ftp://193.204.59.9/Guccione/sistemi%20di%20telecomunicazioni/OFDM_Tutorial_1.pdf)

#### 1.1.5.4 Radar de Onda Continua (CW)

- **Señal transmitida**

La señal transmitida se muestra en la Ecuación 5-1.

$$V(t)=V_o \text{ Cos } (2\pi ft+\varphi_o) \quad \text{Ecuación 5-1}$$

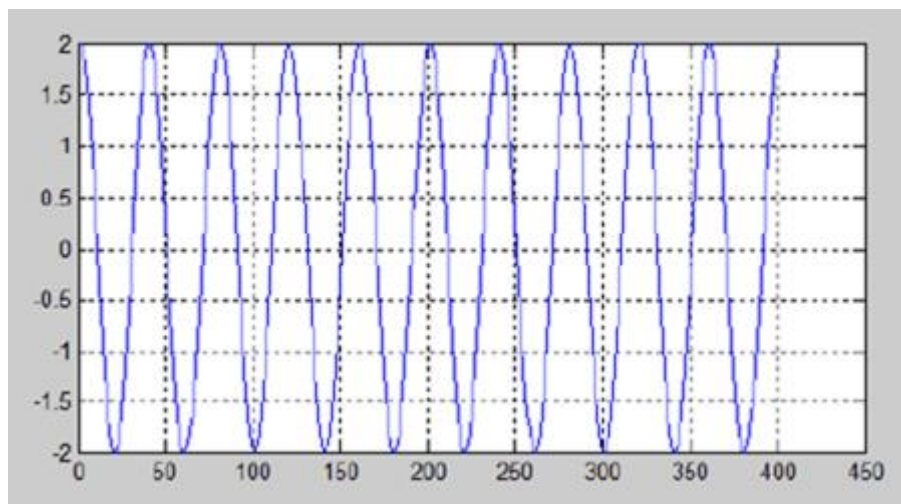
Donde:

$f$ : Es la frecuencia

$t$ : Es el tiempo

$\varphi_o$ : Es el ángulo de desfase

En la Figura 4-1 se representa la señal transmitida, considerando  $\varphi_o = 0$  y la amplitud  $V_o = 2$ .



**Figura 4-1:** Señal transmitida

Fuente: (Álvarez y Shagñay, 2015)

- **Señal recibida**

La onda que se transmite, se propaga en el espacio libre, choca contra un objeto, el mismo que refleja la onda y genera un desfase y un retardo de tiempo, cuyos valores se describen en la Ecuación 6-1. (Álvarez y Shagñay, 2015, pág. 31)

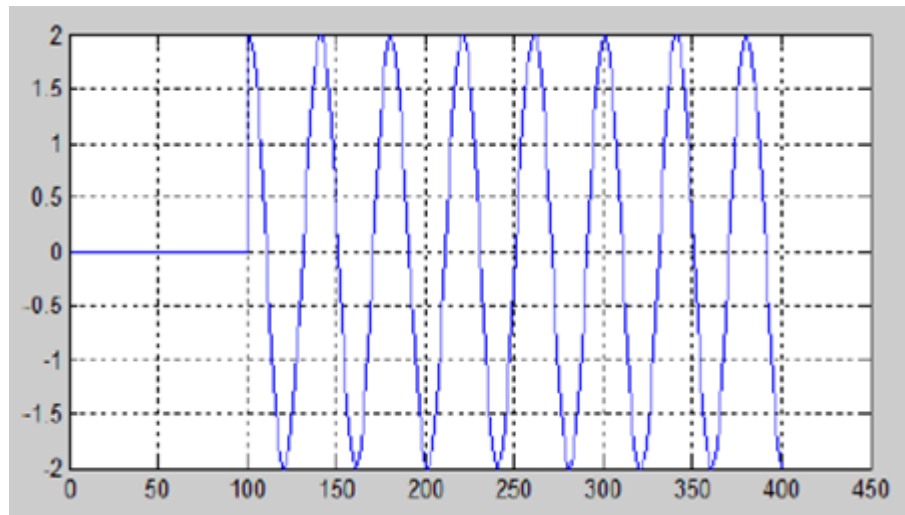
$$V(t)=V_o K \text{ Cos } (2\pi f(t-2t_r) +\varphi_o)\mu(t-2t_r) \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Donde:

$t_r$ : Es el retardo de la señal

$\phi_o$ : Es el desfase generado por la señal reflejada

En la Figura 5-1 se muestra la señal recibida con un tiempo de retardo  $t_r$  producto del tiempo de ida y regreso de la señal.



**Figura 5-1:** Señal recibida

Fuente: (Álvarez y Shagñay, 2015)

- **Detección del objetivo**

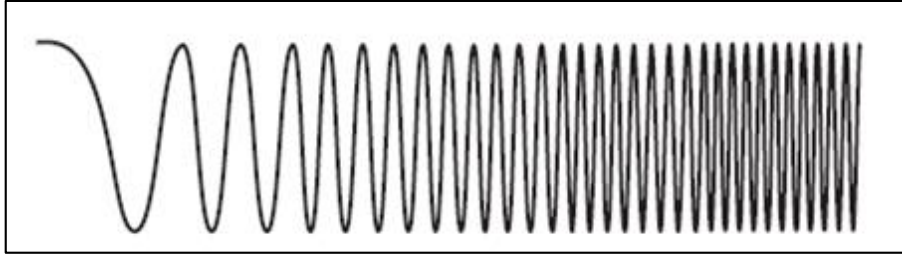
Para detectar el objetivo se realiza la multiplicación de la señal transmitida con la señal recibida, considerando un punto de origen se detecta al objetivo. La Ecuación 7-1 corresponde a la multiplicación de las Ecuaciones 5-1 y 6-1.

$$V_f(t) = V_o \cos(2\pi ft + \phi_o) \cdot V_o K \cos(2\pi f(t - 2t_r) + \phi_o) \mu(t - 2t_r) \quad \text{Ecuación 7-1}$$

#### 1.1.5.5 Radar FMCW

Fue desarrollado originalmente para los altímetros del radar de los aviones a mediados de los años 30. Hoy en día, FMCW es útil en aplicaciones en las que se deben realizar mediciones de tiempo de alta resolución de banda ancha con transmisores de baja potencia. Las aplicaciones incluyen radar de automóviles, imágenes de corto alcance y muchas otras. (Charvat, 2014)

Estos tipos de radares generan una señal chirp (Ver Figura 6-1) que cambia su frecuencia en un periodo determinado de tiempo. La frecuencia de la señal chirp puede variar desde una frecuencia baja a una alta (up-chirp) o desde una frecuencia alta a una baja (low-chirp). (Álvarez y Shagñay, 2015, pág. 34)



**Figura 6-1:** Señal Chirp (Up)

Fuente: (Richard, 2010)

- **Señal transmitida**

La señal transmitida se muestra en la Ecuación 8-1.

$$V(t) = V_o \text{ Cos } (2\pi f(t)t + \phi_o) \quad \text{Ecuación 8-1}$$

$f(t)$ : Se representa en la Ecuación 9-1 y representa a la función de la frecuencia que varía en el tiempo.

$$f(t) = \frac{k}{2} t + f_o \quad \text{Ecuación 9-1}$$

En la Ecuación 10-1 se representa a  $k$  que es la rapidez que cambia la frecuencia.

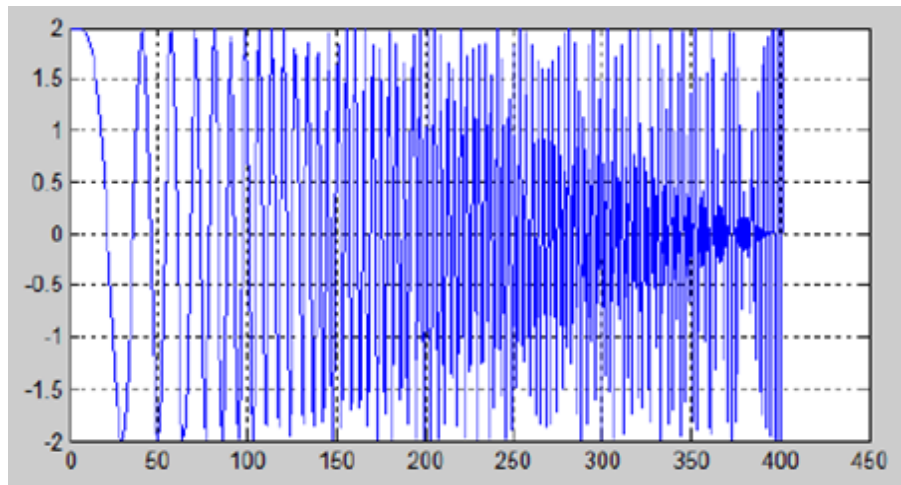
$$k = \frac{f_o - f_i}{2} \quad \text{Ecuación 10-1}$$

$f_i$ : Es la frecuencia inicial y  $f_o$  es la frecuencia final, por lo tanto restando  $f_o - f_i$  nos da como resultado el ancho de banda  $B$  del sistema, y reemplazando el ancho de banda  $B$  en la Ecuación 10-1 Obtenemos la Ecuación 11-1.

$$k = \frac{B}{2} \quad \text{Ecuación 11-1}$$



En la Figura 7-1 se muestra la señal transmitida.



**Figura 7-1:** Señal transmitida

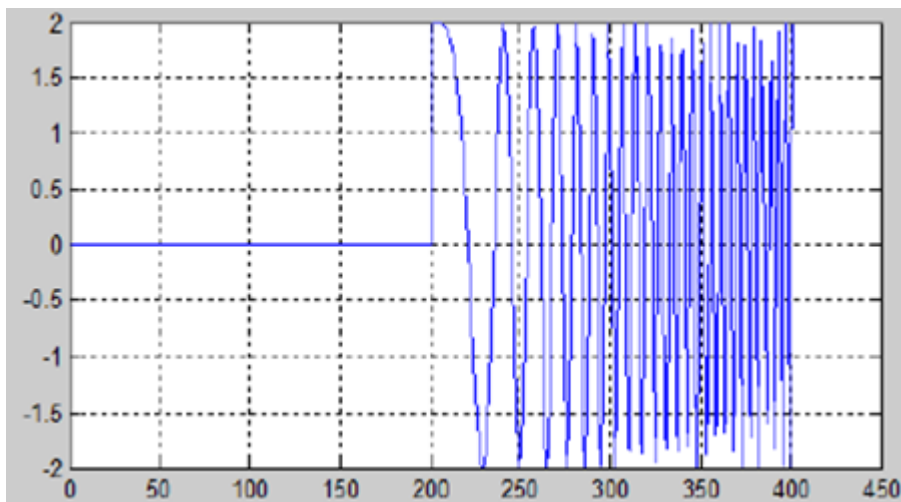
Fuente: (Álvarez y Shagñay, 2015)

- **Señal recibida**

La señal recibida es una señal similar a la transmitida, pero retardada en el tiempo. La Ecuación 12-1 muestra su descripción considerando que no existen pérdidas en el espacio. (Álvarez y Shagñay, 2015, pág. 35)

$$V_r(t) = V_o \text{Cos}(2\pi(\frac{k}{2}(t-2t_r) + f_o)(t-2t_r) + \phi_o)\mu(t-2t_r) \quad \text{Ecuación 12-1}$$

En la Figura 8-1 se muestra la señal recibida.



**Figura 8-1:** Señal recibida

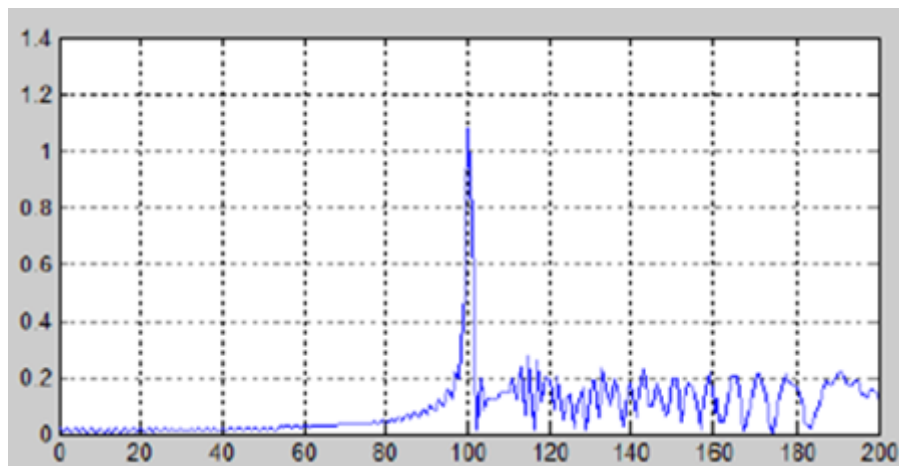
Fuente: (Álvarez y Shagñay, 2015)

- **Detección del objetivo**

La multiplicación de las dos señales chirp permite mostrar la posición del objetivo detectado (ver Ecuación 13-1), para esto es necesario de la utilización de la Transformada de Fourier Rápida (FFT), la misma que permite pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. (Barberán y Domínguez, 2016, pág. 36)

$$V_f(t)=(V_o \text{ Cos}(2\pi f(t)t+\varphi_o))*(V_o \text{ Cos}(2\pi(\frac{k}{2}(t-2t_r)+f_o)(t-2t_r)+\varphi_o)\mu(t-2t_r)) \quad \text{Ecuación 13-1}$$

Luego de aplicar la FFT se obtiene la posición del objetivo como se muestra en la Figura 9-1.



**Figura 9-1:** Detección del objetivo

Fuente: (Álvarez y Shagñay, 2015)

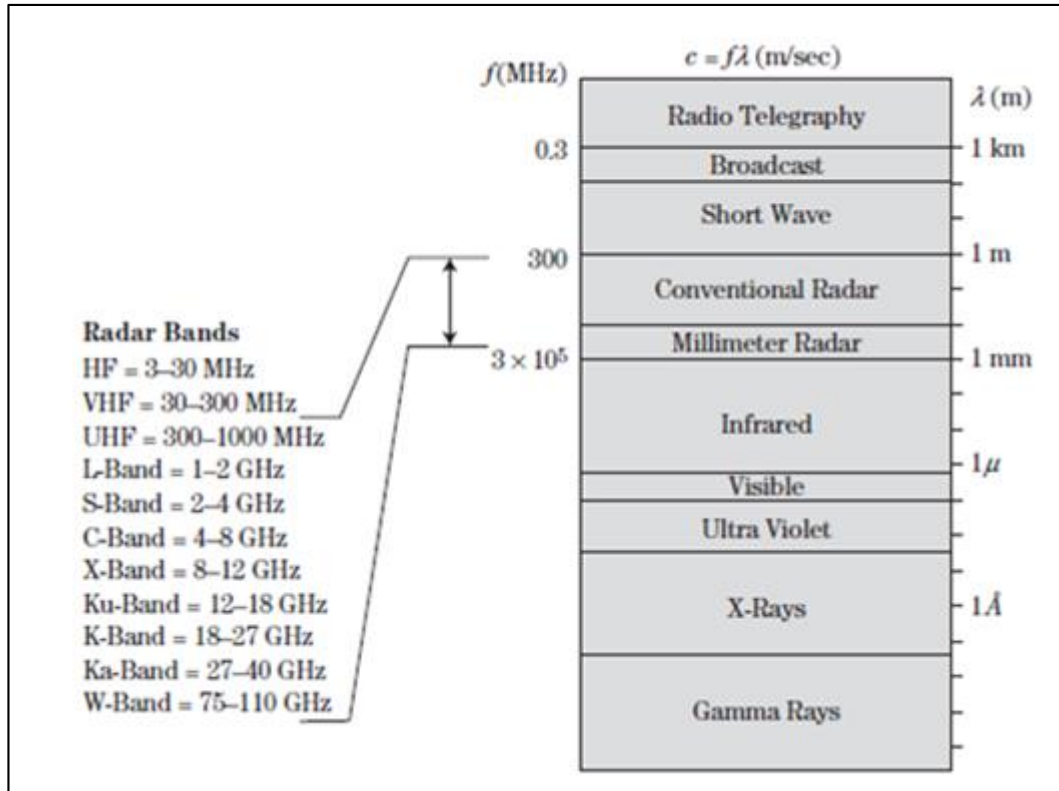
El pico más alto representa la posición del objetivo como se puede observar en la Figura 9-1.

### **1.1.6 Bandas de frecuencia asignada a radar**

Se han asignado frecuencias específicas para utilizar el espectro electromagnético de acuerdo a las aplicaciones radar. La frecuencia de funcionamiento del radar se elige considerando algunos factores comerciales tales como: resolución espacial, propagación, materiales de penetración, interferencias electromagnéticas, interferencias de radiofrecuencia y limitaciones de ancho de banda. Las frecuencias de operación de los Radares son desde 220 MHz a 35 GHz, aunque debido a su aplicación la frecuencia puede variar en los 2 MHz en radares de tierra de alta frecuencia o en radares milimétricos en los cuales trabajan en frecuencias mayores a 94 GHz. Las bandas de

operación de los sistemas radar se pueden ubicar dentro del espectro electromagnético. (Merchán, 2016, pág. 32)

En la Figura 10-1 se muestra la asignación de frecuencias para radar.



**Figura 10-12:** Bandas de frecuencias usadas para los radares

Fuente: (Richard, 2010 pág. 8)

De acuerdo a la Figura 10-1 las bandas para radares corresponden:

VHF, UHF, L: Son utilizadas para radares de exploración y búsqueda.

L, S, C: Utilizadas para búsqueda y seguimiento de objetos.

C, X: Para controlar incendios y obtener imágenes.

X, Ku, K, Ka, W: Utilizadas para la detección de misiles.

Para mejor apreciación se muestra en la Tabla 1-1 la asignación de rangos de frecuencias para radares.

**Tabla 1-1:** Rango de frecuencias asignado a radares

<b>Designación de Frecuencias</b>	<b>Rango de frecuencias en GHz(estándar IEEE)</b>	<b>Rango de frecuencias en GHz(estándar IEEE)</b>
<b>HF</b>	0.003 – 0.03	A
<b>VHF</b>	0.03 – 0.3	A<0.25; B>0.25
<b>UHF</b>	0.3 – 1.0	B<0.5; C>0.5
<b>L_Band</b>	1.0 – 2.0	D
<b>S_Band</b>	2.0 – 4.0	E<3.0; F>3.0
<b>C_Band</b>	4.0 – 8.0	G<6.0; H>6.0
<b>X_Band</b>	8.0 – 12.5	I<10.0; J>10.0
<b>Ku_Band</b>	12.5 – 18.0	J
<b>K_Band</b>	18.0 – 26.5	J<20.0; K>20.0
<b>Ka_Band</b>	26.5 – 40.0	K
<b>V &amp; W o MMW</b>	Normal > 34.0	

Fuente: (Bassem, 2013 pág. 4)

## 1.2 Software Defined Radio (SDR)

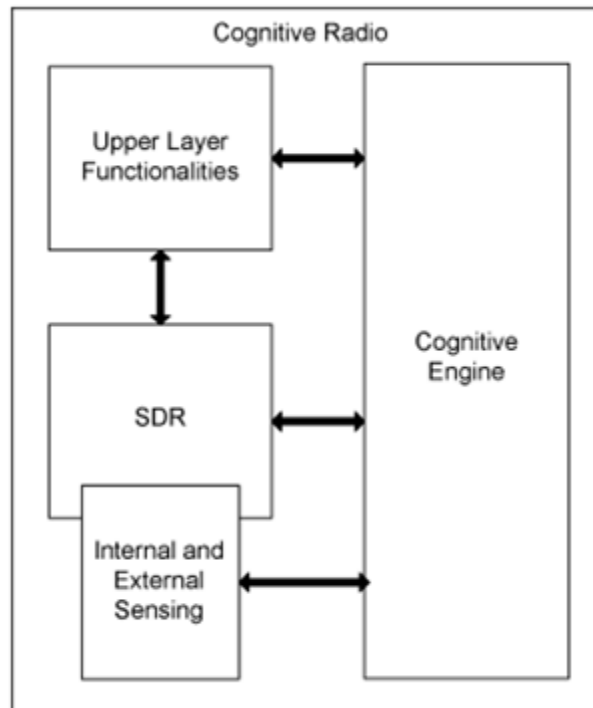
### 1.2.1 Origen

Guglielmo Marconi dio inicio a la transmisión por radio, donde las comunicaciones inalámbricas por radio han evolucionado desde los primeros sistemas que contaban con hardware analógico y funcionalidad limitada hasta potentes sistemas con hardware digital sofisticado. Con el transcurso del tiempo se ha tenido un fuerte crecimiento en la introducción de robustos procesadores, que a su vez preceden el desarrollo de las estructuras de SDR y hardware virtuales en desarrollo.

Debido a la diversidad de sistemas con estándares inalámbricos independientes, SDR se presenta como una solución para la interoperabilidad y conectividad multi-estandar. Es por estos motivos que salen al mercado dispositivos inalámbricos cada vez más sofisticados, un ejemplo claro son los teléfonos celulares que en sus inicios fueron diseñados para comunicaciones de voz, y a través del tiempo se integraron más servicios como mensajes de texto hasta acceso a internet, GPS, cámara, reproductor de música, agenda electrónica en fin, un sin número de aplicaciones.

La radio cognitiva es el principal responsable de toda esta evolución tecnológica porque se necesita de dispositivos con capacidades cognitivas como aprendizaje, detección y razonamiento (Arslan, 2007 pág. 110). Así SDR es una tecnología eficaz para realizar radios cognitivas. A todo esto se le puede incluir el precio accesible a estos dispositivos empleados para investigaciones y aplicaciones personalizadas.

En la Figura 11-1 se muestra la relación entre radio cognitiva y SDR.



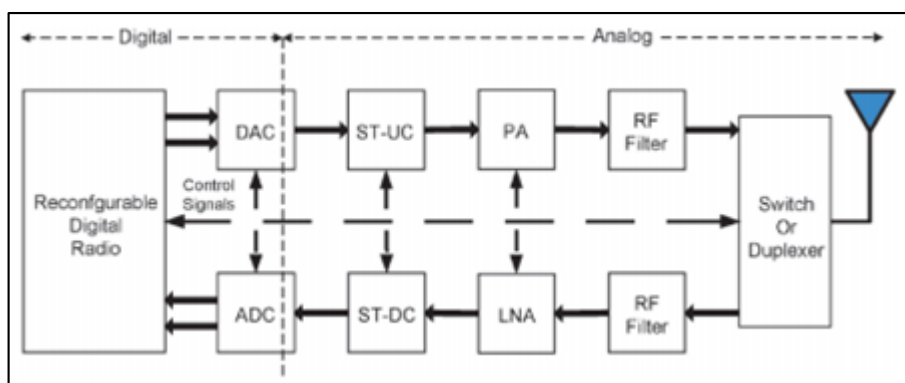
**Figura 11-1:** Relación entre radio cognitiva y SDR

Fuente: (Arslan, 2007 pág. 111)

### 1.2.2 Arquitectura SDR

Existe una arquitectura ideal para SDR que son: radio configurable, radio sintonizable por software junto con el sintonizador de impedancia incorporado y sistema de antena sintonizables por software. Pero debido a limitaciones actuales como tamaño, coste, potencia, rendimiento, tiempo de procesamiento, conversores de datos, realizar un SDR ideal es costoso.

Ante las limitaciones que implica una SDR ideal, se implementan tecnologías para la radio digital configurable como Digital Signal Processor (DSP) o FPGAs. En la Figura 12-1 se muestra la arquitectura SDR.



**Figura 12-1:** Arquitectura SDR

Fuente: (Arslan, 2007 pág. 113)

### 1.2.3 Proceso de transmisión y recepción de señal con tecnología SDR

Partiendo como ejemplo se genera una señal OFDM en forma de muestras digitales en fase (I) y cuadratura (Q), luego se aplica interpolación, filtrado digital, algoritmo de potencia máxima/media (PAPR) y conversión de frecuencia intermedia (IF) a la señal compleja I/Q antes del Convertidor Digital Analógico (DAC). Posteriormente el DAC convierte la señal digital a la forma de onda analógica correspondiente, para ser enviada por el Front-End a través de una antena.

En el receptor la señal RF recibida se filtra eliminando señales no deseadas. Enseguida la señal es amplificada usando un amplificador de bajo ruido (LNA), para luego seguir el proceso inverso de la etapa de transmisión y obtener la señal.

### 1.2.4 SDRadar

Bajo el concepto de radio cognitiva y SDR, SDRadar es la última tendencia en el desarrollo de radar. Para manejar técnicas de procesamiento de señales de radar mejoradas, los radares avanzados deben ser capaces de generar diversos tipos de formas de onda, tales como moduladas en frecuencia o codificadas en fase, para realizar múltiples funciones. La adopción de un sistema de Radio Definido por Software facilita todas estas capacidades. (Constanzo, 2013).

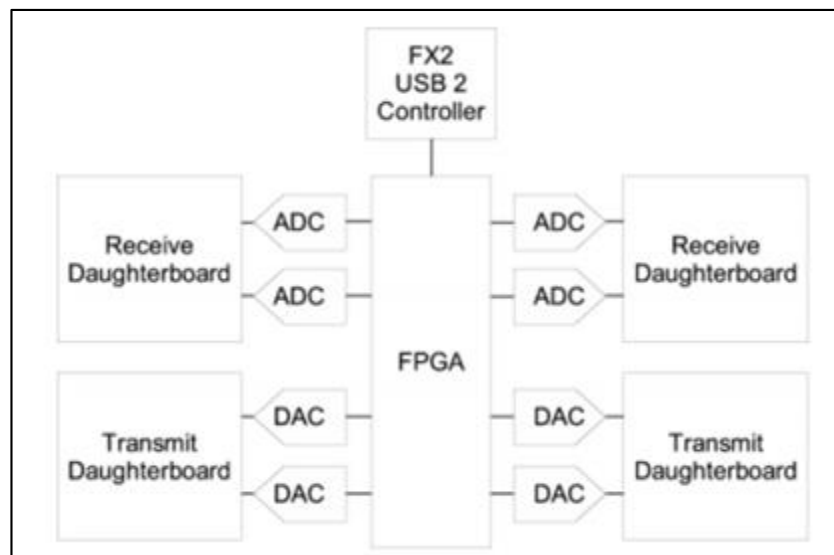
Para aplicaciones de radares básicos SDRadar es un gran apoyo ya que se puede desarrollar operaciones como modulación, demodulación, filtrado entre otras que aportan la elaboración de un radar cognitivo, que se puede aplicar a diferentes necesidades y requerimientos, siendo usado en investigaciones universitarias y doctorales, por las ventajas que se citan a continuación:

- Capacidad para crear "radares multipropósito" (Constanzo et al, 2013a, p. 417)
- Capacidad para reutilizar el hardware (Constanzo et al, 2013b, p. 417)
- Fácil implementación del procesamiento de la señal (Constanzo et al, 2013c, p. 417)
- Reducción considerable de los costes de producción (Constanzo et al, 2013d, p. 417)

SDRadar se reduce entonces a un módulo de menor tamaño y peso que los sistemas radares convencionales, el cual sería configurado con la funcionalidad radar deseado. (Patiño et al, 2014 pág. 18)

### 1.3 Tarjeta USRP

La USRP es un hardware que cumple con las características SDR, básicamente es una tarjeta que incorpora convertidores AD / DA, algunas formas de front-end RF y un FPGA encargado del procesamiento de la señal. Para el diseño de radio y programación de software depende de las características de los componentes de hardware de la USRP (tarjeta madre y tarjetas secundarias) que su costo varía según su potencialidad. En la Figura 13-1 se aprecia el sistema de bloques de una USRP con una tarjeta madre y cuatro tarjetas hijas.



**Figura 13-1:** Diagrama de bloques USRP

Fuente: <http://astro.square7.ch/Datenblaetter/gnuradiodoc-4.pdf>

Es importante tomar en cuenta las características que cada USRP tienen respecto a la tarjeta madre y tarjetas secundarias que cuentan, ya que de estas depende para poder ejecutar un prototipo de la mejor manera.

### ***1.3.1 Modelos USRP***

Existen dos empresas que se han encargado al diseño de tarjetas USRP que se mencionan a continuación:

- **National Instruments:** Esta empresa encargada al desarrollo de productos (hardware y software), ofrecen una alternativa para diseñar prototipos como la serie de USRP NI-292x, que presentan la ventaja de trabajar junto a LabVIEW, simplificando la complejidad de diseño.
- **Ettus Research <sup>TM</sup>:** Esta empresa es el mayor distribuidor de plataformas de radio por software, incluyendo USRP. ETTUS cuenta con cuatro series: serie X-xxx, serie N-xxx, serie B-xxx, y la serie E-xxx. Cada serie cuenta con características propias por ejemplo la serie B-xxx de la cual se desarrolla el presente trabajo, es denominada así por usar la comunicación Bus.

### ***1.3.2 USRP B210***

Según Macario “La tarjeta B210 USRP basa su funcionamiento en la tecnología de radio definido por software (SDR), la cual ha sido utilizada para aplicaciones militares por más de 20 años, y ahora se encuentra disponible para más personas por la reducción de los costos en la tecnología utilizada” (Macario y Treviño, 2016, pág. 26).

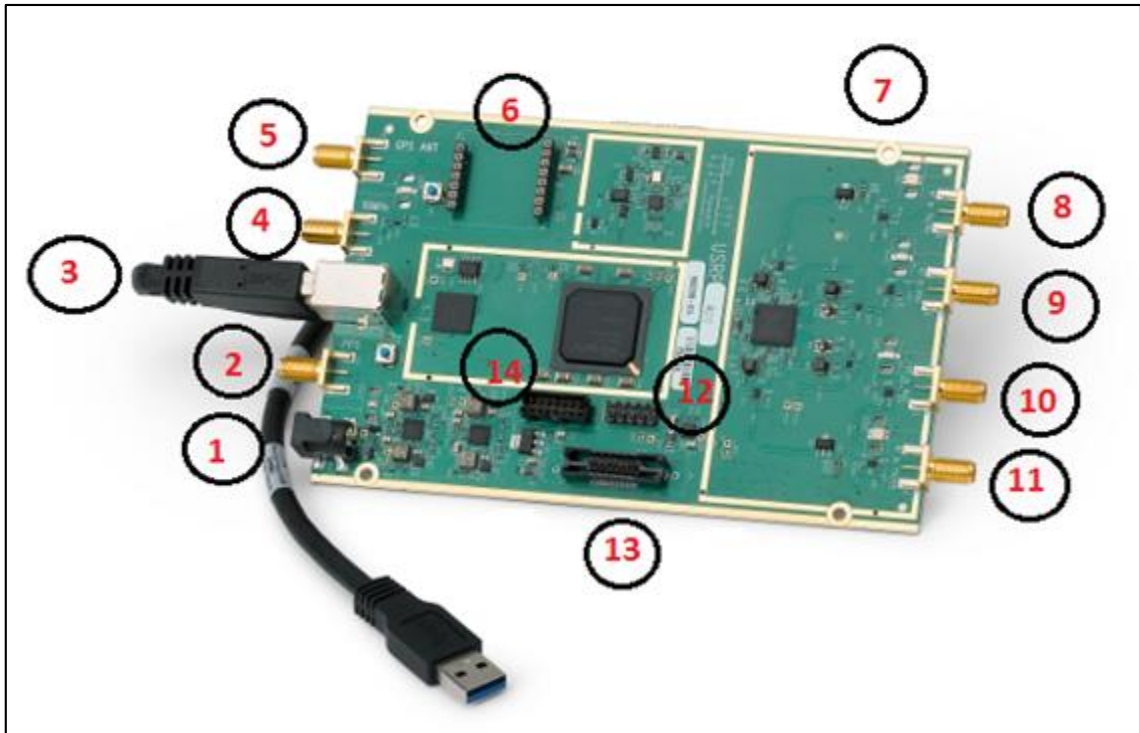
USRP B210 es un transceptor (transmisor y receptor) desarrollada por ETTUS, se la puede configurar por software a código abierto lo cual permite tener la accesibilidad necesaria. USRP Hardware Driver (UHD) hace posible la interacción entre el computador y B210.

En el apartado 1.4 se analiza dos software usadas para el procesamiento de señales y configuración de la USRP B210, pudiendo operar estas en los sistemas operativos Windows, MAC o LINUX.



### 1.3.2.1 Estructura física de la tarjeta USRP B210

USRP B210 tiene un diseño físico ordenado, sus ocho puertos están ubicados estratégicamente, así mismo cuenta con entradas adicionales exclusivas para antenas GPS. Lo novedoso de esta tarjeta es que para la comunicación USRP-PC se la hace mediante USB 3.0, de muy alta velocidad comparado con USB 2.0. La dimensión de la tarjeta es de 15.5 x 10 cm y tiene un peso de 350 g. En la Figura 14-1 se observa la estructura física de la USRP B210.



**Figura 14-1:** Estructura física USRP B210

**Fuente:** <https://www.ettus.com/product/details/UB210-KIT>

**Realizado por:** Julio C. Mejía, 2017

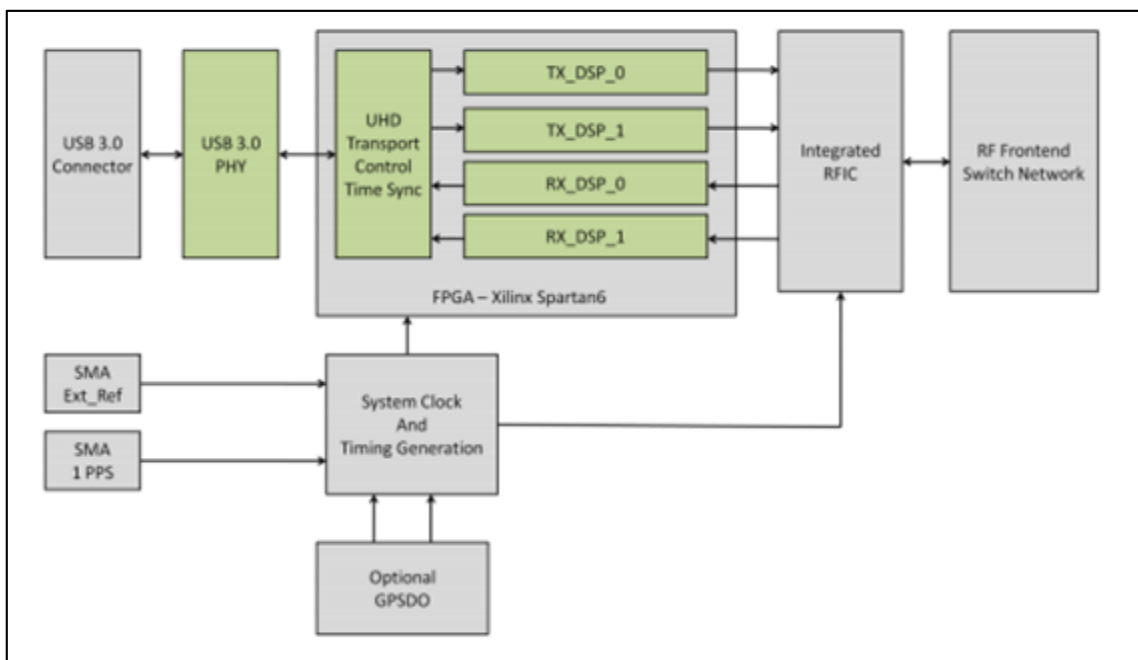
- 1) Alimentación externa para 6v o 3v
- 2) Entrada externa PPS
- 3) Puerto USB 3.0
- 4) Entrada externa 10 MHz
- 5) Antena GPS
- 6) Socket GPSDO
- 7) Ranura para sujetar la tarjeta
- 8) TX/RX canal 2
- 9) RX2 canal 2
- 10) RX2 canal 1

- 11) TX/RX canal 1
- 12) GPIO Header
- 13) Conector Mictor
- 14) JTAG Header

Se recomienda que cuando se usa una antena GPS externa o un GPSDO, se conecte una fuente de alimentación externa, y en los demás casos el puerto USB 3.0 alimenta la tarjeta.

### 1.3.2.2 Estructura funcional de la tarjeta USRP B210

Para entender mejor la estructura funcional de la USRP B210 se muestra en la Figura 15-1, y a continuación se explica las etapas de cada bloque.



**Figura 15-1:** Diagrama de bloques USRP

**Fuente:** [https://www.ettus.com/content/files/b200-b210\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.ettus.com/content/files/b200-b210_spec_sheet.pdf)

El puerto USB 3.0 es la conexión entre USRP-PC, cabe mencionar que para optimizar todos los recursos es necesario tener el puerto USB 3.0 en la PC. El bloque de unidad lógica USB 3.0 PHY representa la conexión física real con la unidad lógica de la USRP.

En el bloque FPG se realiza todo el proceso de programación y tratamiento de la señal, podemos decir que la FPGA es el “corazón” de la USRP, ya que mediante sus bloques lógicos se puede llevar a cabo la construcción desde un simple a un avanzado sistema, y junto al UHD permite que trabaje a la par con USRP.

El bloque RFIC usado en comunicaciones inalámbricas, integra los dos canales de transmisión y recepción hasta el bloque RF Front-End que no es más que circuitos entre la antena y la etapa mezcladora.

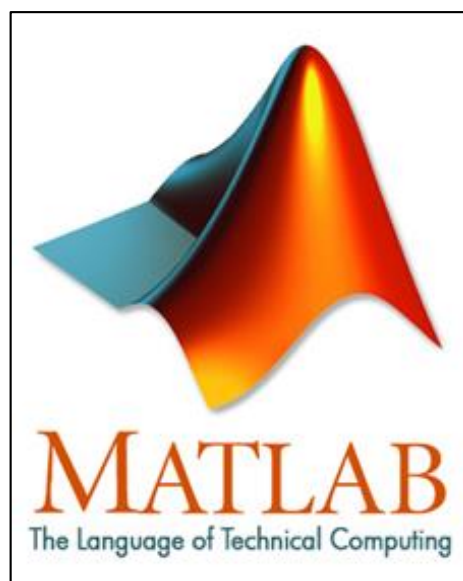
También se incluyen bloques adicionales como relojes externos a 10 MHz, o GPSDO que se lo usa trabajar con más de una USRP, además de darle usos para OpenBTS, y más aplicaciones que usen GPS. Cabe mencionar que al usar los bloques adicionales de entrada como GPS o GPSDO se necesita de alimentación externa a la tarjeta.

#### **1.4 Software para procesamiento de señales**

Existen varios software libres y pagados que se utiliza para el procesamiento y tratamiento de señales, pero USRP B210 entre sus características soporta dos de los cuales se describe a continuación:

##### **1.4.1 *MATLAB***

MATLAB de la abreviatura “Laboratorio de Matrices”, es un potente software utilizado para procesamiento de señales e imágenes en el área de comunicaciones, de la misma manera se lo utiliza en el campo de las finanzas, robótica e ingeniería, gracias a las características que otorga como la programación de vectores, matrices y POO (programación orientada a objetos).



**Figura 16-1:** Logo MATLAB

**Fuente:** <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

Este software cuenta con IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) que lo hace amigable en el desarrollo de scripts. El lenguaje “m” es propio de MATLAB, añadiendo que se puede crear interfaz de usuario o GUI, y se puede trabajar en conjunto con otros programas que no usen el lenguaje “m”. Permite crear algoritmos simples o complejos que trabajan con archivos .txt o .dat, en fin se le puede dar un diverso uso a este software en el ámbito de las comunicaciones.

MATLAB se puede instalar en sistemas operativos como Unix, Windows, MAC OS, Linux y se da soporte en su página oficial.

#### *1.4.1.1 MATLAB y USRP B210*

Es importante mencionar que es posible trabajar en conjunto con MATLAB y USRP B210, ya que existe una librería que se puede instalar en MATLAB para generar formas de ondas (chirp, OFMD, etc.) o poder diseñar algoritmos y transmitir y/o recibir señales de RF en tiempo real, como también usarlo para mediciones de señales como osciloscopio o analizador de espectros.

Una de las desventajas al usar USRP B210 con MATLAB es el tiempo de procesamiento y carga computacional que se genera, siendo una molestia en los usuarios si pretenden realizar un prototipo que ocupe USRP al máximo.

#### *1.4.2 GNU RADIO*

GNURadio como su eslogan dice es un “software libre y de código abierto” usado para investigaciones académicas o comerciales para implementar sistemas SDR, se la puede utilizar para realizar simulaciones o bien con una USRP para aplicaciones inalámbricas a bajo costo.



**Figura 17-1:** Logo GNURadio

**Fuente:** <https://www.gnuradio.org/>

Este software cuenta con un entorno gráfico amigable, donde su principal característica es realizar todo un procesamiento de señal sea este complejo o no. Sus bloques están desarrollados principalmente en Python y el procesamiento en C++, existen bloques de filtro, sincronización, ecualización, codificadores, decodificadores y muchas librerías desarrolladas exclusivamente para TDT o radar.

Con GNURadio solo se trata con datos digitales en banda base, y cuando se requiere enviar señales a cierta frecuencia se debe utilizar un hardware como USRP.

Una de las ventajas de usar GNURadio es que al ser un software de código abierto, se puede crear propios bloques según las necesidades con ventaja de programarlos en lenguaje Python. Está diseñado y listo para distribuciones como Mac Os, Windows o Linux, es recomendable usar Linux por las diversas características que este sistema operativo presenta.

#### *1.4.2.1 GNURadio y USRP B210*

Gracias a GNURadio se puede implementar todo prototipo usando la tarjeta USRP B210 siendo esta una de sus fortalezas. Se puede hacer transmisores, receptores y transceptores según las necesidades de cada diseño. Cuenta con múltiples ejemplos que vienen con la instalación para así empezar en el mundo de la radio frecuencia.

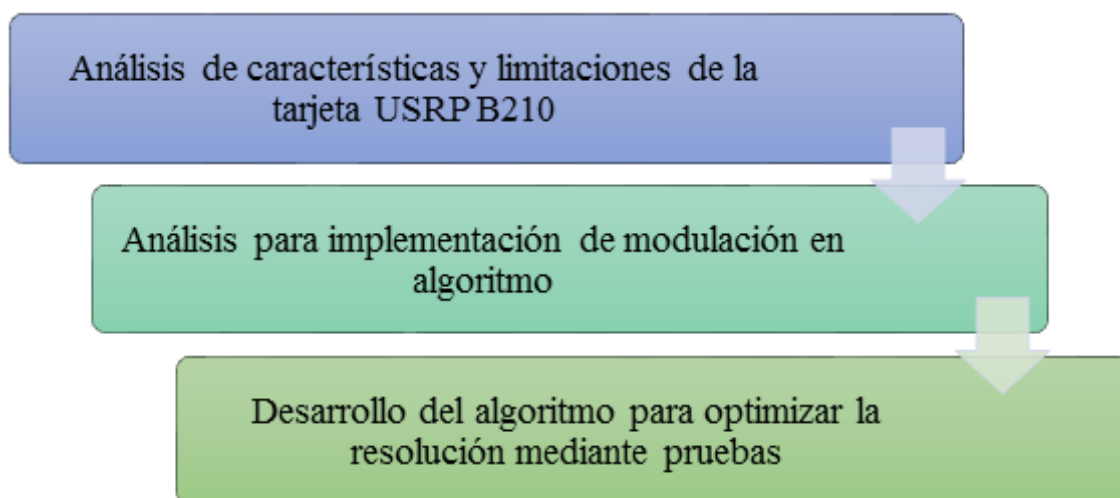
Lo que hace posible la comunicación GNURadio con USRP B210 son los sumideros UHD (controlador de hardware USRP), se los encuentra en bloques listos para configurarlos (potencia, frecuencia, ganancia, etc.)

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1 Desarrollo del trabajo de titulación

En la figura 1-2, se describe el procedimiento a seguir para el desarrollo de la investigación.



**Figura 1-2:** Proceso para el desarrollo del proyecto

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

En el presente capítulo primero se estudió las características que se encuentran en el datasheet de la tarjeta USRP B210 [10], así mismo se investigó las limitaciones basándose en estudios previos, para encontrar cual es la mejor resolución que la tarjeta otorga para sistemas SDRadar, posteriormente se analizó qué tipo de modulación es aplicable al algoritmo. Con todos los datos establecidos y estudiados se propone un método para optimizar la resolución de la tarjeta mediante un algoritmo ejecutado en un script de MATLAB, realizando pruebas para optimizar la resolución del sistema.

#### 2.2 Análisis de la tarjeta USRP B210

La tarjeta USRP B210 diseñada por ETTUS RESEARCH, está disponible en los laboratorios de Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, razón por la cual se ha escogido este modelo de USRP para elaborar la optimización de la resolución.

Para desarrollar el algoritmo que permite optimizar la resolución de la tarjeta USRP B210, es necesario considerar algunos aspectos como se detalla a continuación:

### 2.2.1 Características USRP B210

Según el datasheet de la tarjeta que se encuentra disponible en la página oficial [9] de la compañía se encuentran las características que se detallan en la tabla 1-2.

**Tabla 1-2:** Características USRP B210

Características	Descripción
Frecuencia de operación	70 – 6000 MHz
Ancho de banda	56 MHz
Transmisión/Recepción	2 TX & 2 RX, Half dúplex o full dúplex
Potencia	>10 dB
Conectividad	USB 3.0
Configuración	MATLAB, GNU Radio
FPGA	Xilins Spartan 6 XC6SLX150
Velocidad máxima	50 Mbits/s

**Fuente:** (Merchán, 2016 pág. 44)

**Realizado por:** Julio C. Mejía, 2017

En la página oficial de ETTUS se describe a la USRP B210 como una plataforma completamente integrada en una placa con una tarjeta madre y tarjetas hijas, diferenciándose de otros modelos que se debe comprar por separado las tarjetas secundarias.

Se puede trabajar en diferentes rangos de frecuencia desde 70 MHz a 6 GHz, que la hace deseada en diversas aplicaciones, otra característica importante de la tarjeta es que puede ser reprogramable por la FPGA que usa, con alta velocidad de transmisión de datos por su puerto de conectividad USB 3.0.

Se da soporte completo al software del controlador de hardware USRP (UHD), que le permite trabajar en conjunto sin problemas con GNU Radio, lista para ser aplicado a investigaciones académicas o fines comerciales.

El transceptor de conversión directa AD931 RFIC con que está integrado en la tarjeta USRP proporciona hasta 56 MHz de ancho de banda teórico, este dato es importante para obtener la

resolución del sistema, a continuación se analiza las limitaciones de la USRP, para obtener el ancho de banda aplicado a prototipos reales o físicos que puede trabajar la tarjeta.

## 2.2.2 Limitaciones USRP B210

Pese a tener un ancho de banda de 56 MHz como se muestra en la tabla 1-2, este valor es teórico, razón que lleva a consultar con otras investigaciones, para obtener el ancho de banda real que trabaja la tarjeta y desarrollar el algoritmo en MATLAB.

En los siguientes apartados se describen las limitaciones que interfieren en la construcción de prototipos SDRadar.

### 2.2.2.1 Conectividad

La tarjeta para ser configurada por software necesita de una conexión por medio de un puerto USB 3.0, que corresponde a una velocidad de 3.2 Gbps equivalente a 56 MHz (Requena y Beltrán, 2015, pág. 97). Es necesario mencionar que para la construcción de prototipos SDRadar con USRP B210 se usa el mismo puerto USB para transmisión y recepción lo cual divide su capacidad al puerto.

Cabe mencionar que las tarjetas B210 también pueden trabajar a través de un puerto USB 2.0, pero la velocidad (480 Mbps equivalente a 8 MHz) es menor en comparación al puerto USB 3.0, por lo que es recomendable usar el puerto USB 3.0 para aplicaciones SDRadar, ya que así se optimiza todos los recursos de la tarjeta y la computadora.

En la tabla 2-2 se hace una comparación de USB 2.0 con USB 3.0

**Tabla 2-1:** USB 2.0 vs. USB 3.0

	USB 2.0	USB 3.0
Velocidad (Gbps)	0.48	3.2
Ancho de banda (MHz)	8	56

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

### 2.2.2.2 Transmisión/Recepción

Una de las principales características que incorpora la USRP B210 es que cuentan con dos canales para transmisión y dos canales para recepción, para una comunicación half dúplex o full dúplex,



pero cuando se diseña un sistema SDRadar monoestático o biestático uno de los inconvenientes de usar la USRP B210 como transceptor es el uso de recursos computacionales, ya que se usaría un solo canal para transmitir y recibir, forzando al máximo la capacidad de la tarjeta.

### 2.2.2.3 Configuración (Software)

Como se muestra en la tabla 1-2, USRP B210 presenta dos opciones de configuración a través de software, por medio de MATLAB y GNU RADIO.

Para configuración de software con MATLAB existen paquetes desarrollados por ETTUS que hacen posible la comunicación MATLAB-USRP B210, pero una desventaja que presenta esta comunicación es que MATLAB al ser un potente software ocupa recursos computacionales (MathWorks, 2017), añadiendo a esto que USRP B210 en si ya necesita de la conectividad USB 3.0 otorgando más carga computacional al sistema.

Para reducir la carga computacional que produce un sistema SDRadar, GNU RADIO es una alternativa a este problema ya que al ser un conjunto de herramientas de desarrollo de software libre y de código abierto que proporciona bloques de procesamiento de señales para implementar radios de software (GNURADIO, 2017), reduce notablemente el uso de recursos computacionales. Aunque existen distribuciones de GNU RADIO para sistemas operativos como Linux, Windows o MAC, es recomendable usar LINUX ya que por características este sistema operativo es más robusto, rentable y rápido (Mejía et al, 2012 pág. 210).

### 2.2.2.4 Velocidad máxima

En otras investigaciones se han analizado sobre como la velocidad máxima influye en el ancho de banda para sistemas SDRadar [6, 19], en este caso para USRP B210 se tiene una velocidad máxima de 50 Mbits/s pero al USRP usar muestras complejas I/Q, el ancho de banda B con el cual se puede trabajar es de 25 MHz.

Reemplazando el valor de ancho de banda en la ecuación 2-1 se obtiene:

$$\Delta R = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 25 \text{ MHz}} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

$$\Delta R = 6 \text{ m}$$

El valor de  $\Delta R$  es la capacidad que tiene el radar para distinguir un blanco en múltiplos de 6m. La tabla 3-2 detalla cómo se puede distinguir un blanco de acuerdo a la resolución.

**Tabla 3-2:** Resolución USRP B210

Distancia del blanco (m)	Distancia dada por el software (m)
$0 < d \leq 6$	6
$6 < d \leq 12$	12
$12 < d \leq 18$	18

**Fuente:** (Potentialities of USRP Based Software Defined Radar Systems, 2013)

#### 2.2.2.5 Potencia de salida

Es importante que los sistemas de comunicaciones como los sistemas SDRadar cuenten con una potencia de salida adaptable a los diferentes escenarios, necesitando una menor potencia cuando se requiera cubrir una distancia corta y de más potencia a distancias mayores, aplicado como una técnica para cubrir distancias.

Como se indica en la tabla 1-2, la USRP B210 puede irradiar una potencia  $> 10$  db, pero estudios han demostrado su inconsistencia al momento de ser ejecutada en tiempo real y Saraguro en su estudio recomienda que las antenas estén separadas a pocos centímetros por sus problemas en potencia, dificultando la implementación para SDRadar ya que se necesita de una buena potencia para cubrir diferentes escenarios. [19, 21]

Para solucionar este problema se simula retardos en el receptor para procesar los datos recibidos, que se necesita para el desarrollo del sistema.

#### 2.2.2.6 Sincronización TX/RX USRP B210

Como se analizó en el apartado 1.1.5.5, para realizar el análisis de la señal es necesario establecer un punto de referencia para transmisión, y a partir de este punto con los datos procesados del receptor, detectar uno o más objetivos. Por lo tanto es necesario que el transmisor y el receptor de la USRP B210 se encuentren sincronizados.

Uno de los problemas que la USRP B210 presenta es la inestabilidad en la sincronización entre transmisor y receptor usando la tarjeta como transceptor, ya que el transmisor se activa en tiempos diferentes al receptor sea antes o después y no se puede obtener un punto de referencia para calibrar la tarjeta.

Ante los problemas de sincronización de la tarjeta, el fabricante ha incluido una solución, se trata de un puerto de entrada en la tarjeta para GPSDO, que es un GPS controlado por un oscilador de cristal permitiendo crear sistemas útiles para aplicaciones que requieren de una mejor precisión en frecuencia y tiempo (ETTUS RESEARCH, 2010).

En el desarrollo del presente trabajo debido al costo elevado de GPSDO, no se utiliza esta alternativa para solucionar el problema de sincronización, siendo reemplazando por simulaciones para el diseño del sistema.

### ***2.2.3 Análisis para implementación de modulación***

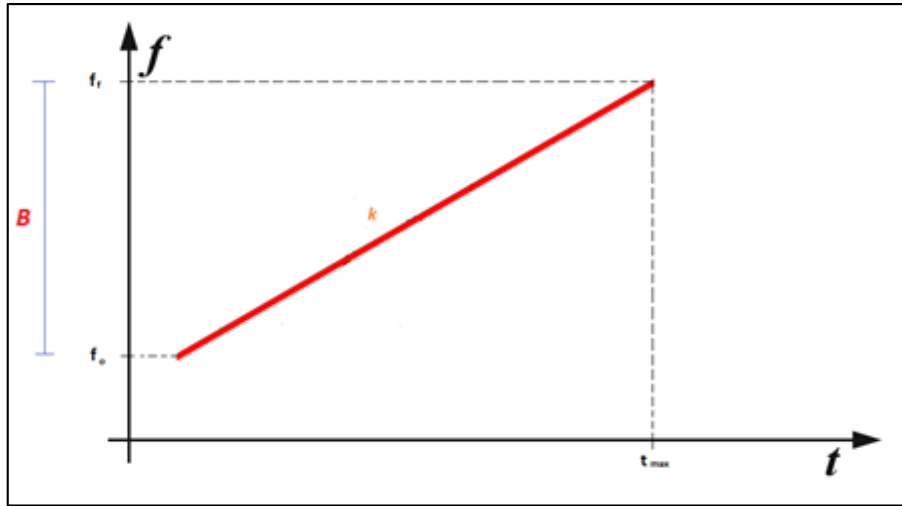
Se analiza cómo funciona un radar FMCW y todas sus características, para ser aplicado en el desarrollo del algoritmo en MATLAB.

Los radares FMCW fueron utilizados y diseñados en 1930 para los altímetros del radar de aviones, las aplicaciones que se dan actualmente a estos radares es para realizar mediciones de tiempo de alta resolución de banda ancha con transmisores de baja potencia (Charvat, 2014 pág. 69). Esta es la razón por la cual se utiliza este tipo de radar para implementar en el algoritmo para optimizar la resolución de la USRP B210.

La ventaja que presenta el radar FMCW es tener una referencia en tiempo que permite medir la distancia de objetivos fijos. Pero la distancia que se mide depende de la resolución del sistema, el cual depende del ancho de banda de la señal.

En la ecuación 10-1 se muestra la constante  $k$ , la cual depende de la frecuencia inicial y la frecuencia final, en un tiempo máximo. Por lo tanto si aumentamos el valor del ancho de banda también aumenta el valor de  $k$  pero sin variar el tiempo máximo. En la figura 2-2 se muestra la relación de  $k$  con el tiempo máximo y el ancho de banda.

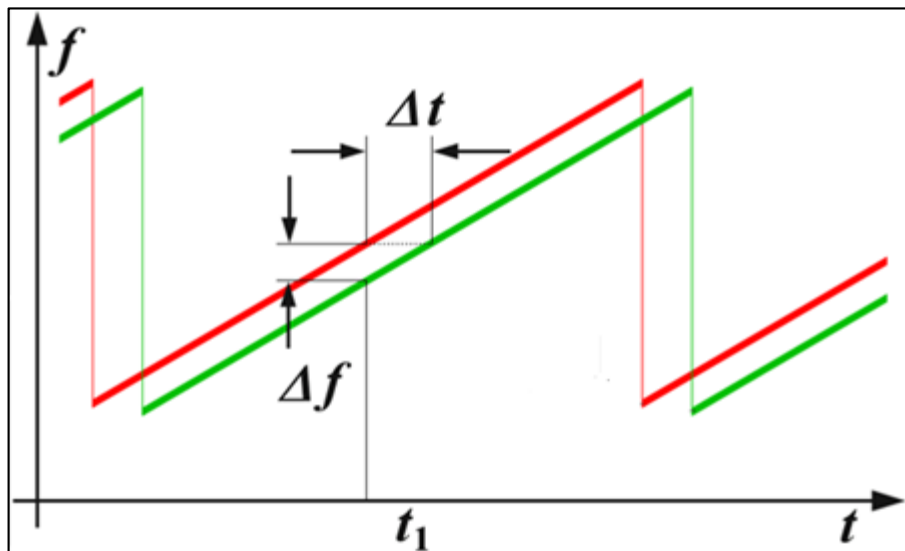
En la ecuación 3-1 se analiza la distancia máxima a la que el radar FMCW puede trabajar, la cual depende del tiempo máximo como se observa en la figura 2-2.



**Figura 2-1:** Relación de  $k$  con el tiempo máximo y ancho de banda

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

Como se observa en la figura 2-2 la señal que se genera aumenta o disminuye periódicamente la frecuencia, entonces cuando la señal irradiada o transmitida choca en un objetivo se produce una señal eco con una frecuencia diferente a la transmitida que es captado por el receptor, con el retardo de frecuencia se obtiene un retardo o desplazamiento de tiempo  $\Delta t$ . Para obtener la distancia del objetivo se miden la diferencia de frecuencia  $\Delta f$  entre la señal transmitida y la señal recibida. En la figura 3-2 se muestra como se produce la diferencia de frecuencia y tiempo, de la señal transmitida/recibida.



**Figura 3-2:** Diferencia de frecuencia y tiempo de señal transmitida y señal recibida

Fuente: [http://www.radartutorial.eu/02.basics/pic/fmcw\\_prinzip.print.png](http://www.radartutorial.eu/02.basics/pic/fmcw_prinzip.print.png)

Las características que presenta este tipo de radar es:

- Simplifica el diseño del transmisor (Charvat, 2014a, pág. 69)
- Procesamiento sencillo de la señal
- Sistema a bajo coste (Charvat, 2014b, pág 69)
- En el dominio del tiempo la señal se presenta como un “chirp”
- En el dominio de la frecuencia se representa como una rampa lineal
- La medición de la distancia se obtiene comparando la señal transmitida o de referencia con la señal recibida o señal eco (Wolff, 2017a)
- Capacidad para medir simultáneamente el rango del objetivo y su velocidad (Wolff, 2017b)
- Alta exactitud de la medición del alcance (Wolff, 2017c)

Es importante mencionar que para representar la función de la señal chirp del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, se debe cumplir con el teorema de muestreo de Nyquist, el cual menciona que la frecuencia de muestreo  $f_s$  debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima  $f_{max}$  (ver ecuación 2-2).

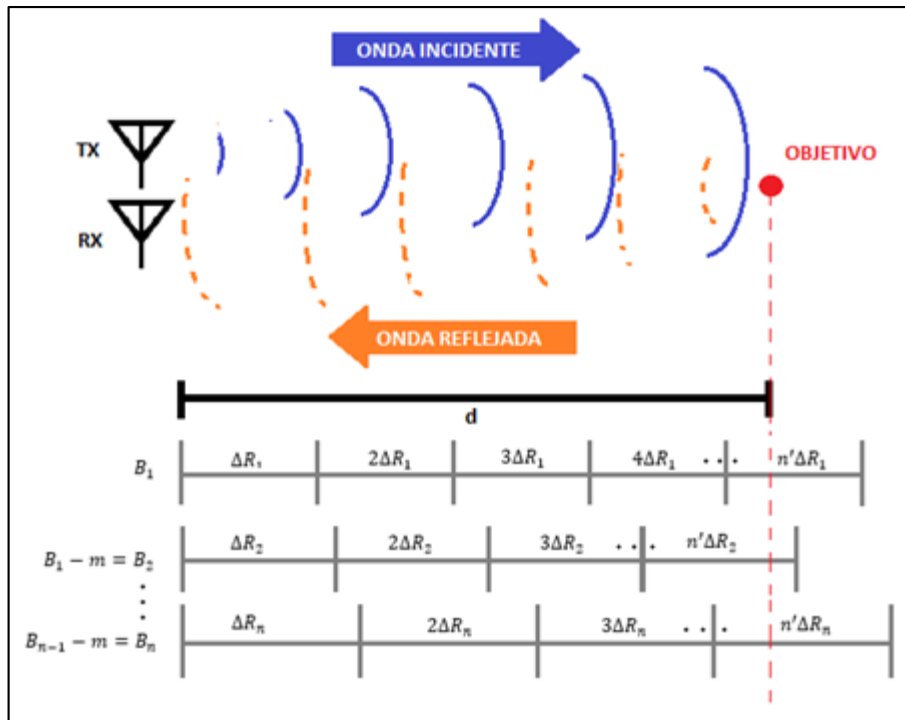
$$f_s > 2f_{max} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

#### **2.2.4 Desarrollo del algoritmo en MATLAB**

Para el desarrollo del algoritmo, se parte en base al análisis de las limitaciones de la tarjeta y principalmente del estudio de la velocidad máxima de la tarjeta, donde se determinó que el ancho de banda con el cual la tarjeta puede trabajar es de  $B = 25$  MHz, el cual da como resultado una resolución de  $\Delta R = 6$  m.

##### **2.2.4.1 Método para optimizar la resolución de la tarjeta USRP B210**

El objetivo del algoritmo es mejorar el ancho de banda de  $B = 25$  MHz que da una resolución de  $\Delta R = 6$  m, cuyo método es primeramente tomar “n” mediciones a diferente ancho de banda “m” que permitan acotar la mejor resolución de distancia, como se muestra en la figura 4-2.



**Figura 4-2:** Método para optimización de resolución

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

Como se puede observar en la figura 4-2, el ancho de banda  $B_1$  crea una resolución  $\Delta R_1$ , llegando hasta un múltiplo  $n'$  de la resolución correspondiente al ancho de banda  $B_1$ , donde la señal transmitida choque con el objetivo y sea reflejada al receptor. Este es el proceso normal para determinar la distancia del objetivo.

Para realizar la optimización de la resolución, se deberá transmitir " $n$ " señales con diferente ancho de banda, separados a un valor " $m$ " entre cada ancho de banda, que da como resultado " $n$ " mediciones para ser procesadas.

En la tabla 4-2 se muestran las incógnitas y su significado según la figura 4-2, que son importantes para el desarrollo del algoritmo en MATLAB.

**Tabla 4-2:** Incógnitas para implementar en el algoritmo

Incógnitas	Representación
<b>n</b>	Numero de muestras/mediciones
<b>n'</b>	Múltiplo de resolución
<b>m</b>	Espacio de ancho de banda entre cada señal generada

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

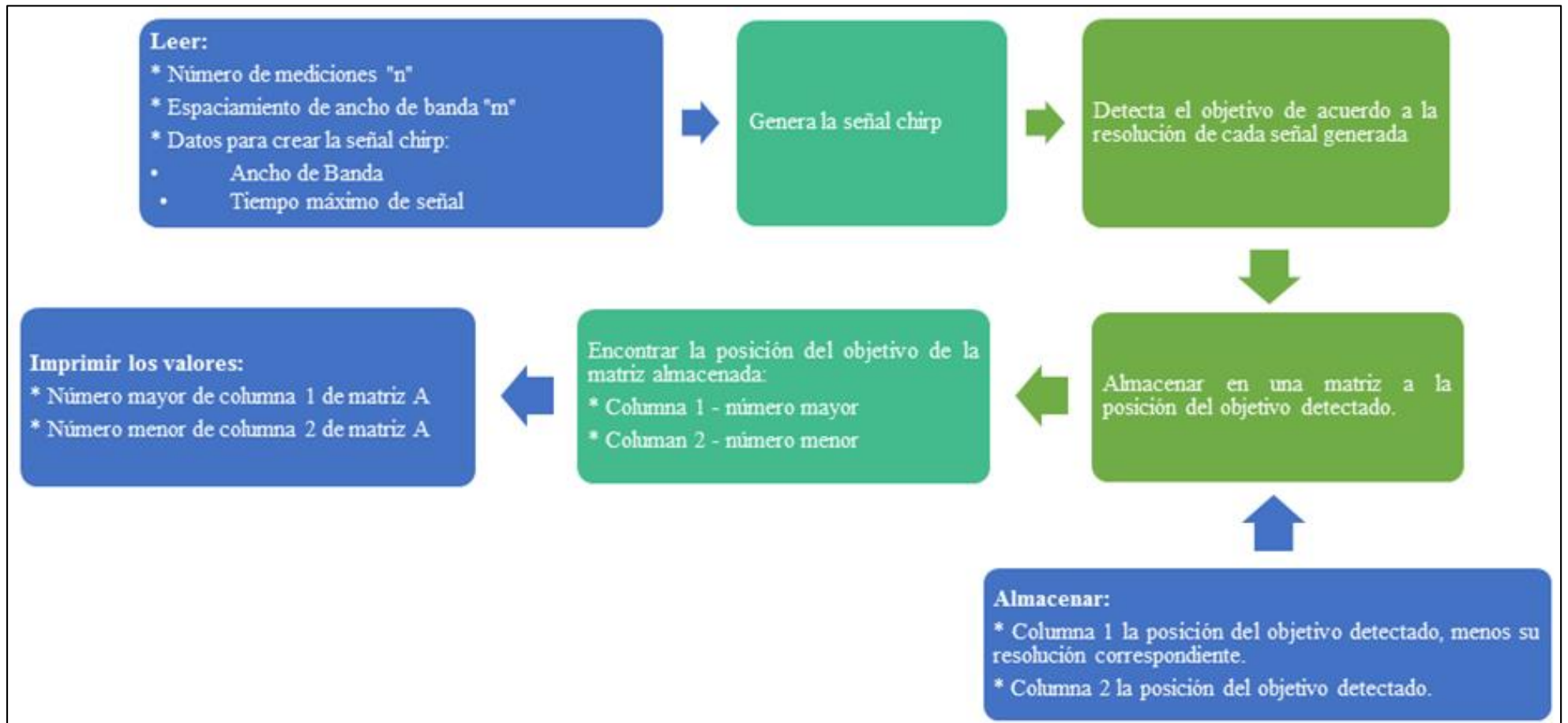
Una vez obtenidos “n” y “m” y aplicando estos valores al algoritmo se obtendrán dos valores como respuesta, un valor mínimo y un valor máximo que indican que el objetivo se encuentra entre estos valores.

La mejor resolución que se puede obtener con la USRP B210 es de  $\Delta R = 6 \text{ m}$ , por lo tanto las "n" señales transmitidas tendrán una resolución  $\Delta R > 6 \text{ m}$ . En el siguiente apartado se analiza el proceso para encontrar el valor de las incógnitas "n" y "m" para realizar la optimización de la resolución.

La señal generada es una señal chirp ya que se pretende estimar la distancia de un objetivo, y como se analizó en el apartado 2.2.3 este tipo de radar (FMCW) se adapta a las necesidades del presente trabajo de titulación.

#### *2.2.4.2 Diagrama de bloques del algoritmo realizado en MATLAB*

En la figura 5-2 se muestra el diagrama de bloques del algoritmo realizado en MATLAB para encontrar las incógnitas mostradas en la tabla 4-2.



**Figura 5-2:** Diagrama de bloques para encontrar los valores de “n” y “m”

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017



2.2.4.3 *Determinación de zonas para mediciones y valores mínimo/máximo para localización de objetivo*

Como el objetivo del presente trabajo de titulación es optimizar la resolución de la USRP B210, se toma en cuenta que el mayor error de medición es de 6 metros, y se fijan zonas limitadas por un margen de error “e” para una mejor interpretación como se muestra en la tabla 5-2.

**Tabla 5-2:** Zonas según el margen de error

Zonas	Margen de error (m)
1	$e < 1$
2	$1 \leq e < 2$
3	$2 \leq e < 3$
4	$3 \leq e < 4$
5	$4 \leq e < 5$
6	$5 \leq e \leq 6$

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

Los valores mínimo/máximo indican que el objetivo detectado se encuentra entre estos valores que son resultado del algoritmo desarrollado en MATLAB para optimizar la resolución..

Cuando se detecta un objetivo según el valor de la resolución del sistema, se da como respuesta de detección de objetivo un valor múltiplo de la resolución. En la tabla 6-2 se muestra los valores mínimo/máximo correspondientes a la resolución de la tarjeta USRP B210.

**Tabla 6-2:** Valor mínimo/máximo en detección de objetivos

Distancia del blanco (m)	Distancia dada por el software (m)	Valor mínimo	Valor máximo
$0 < d \leq 6$	6	0	6
$6 < d \leq 12$	12	6	12
$12 < d \leq 18$	18	12	18

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

En la tabla 6-2 se puede observar que cuando la distancia dada por el software, de acuerdo a la resolución del sistema se obtiene un valor mínimo y un valor máximo, mostrando que el objetivo se encuentra entre el valor mínimo y valor máximo correspondiente.

#### *2.2.4.4 Proceso para calcular el número de muestras tomadas*

Se analiza el procedimiento para encontrar los valores de las incógnitas mostradas en la tabla 4-2 " $m$ " y " $n$ ", que se determinó en el método para optimizar la resolución de la tarjeta USRP B210. Para el análisis se simulan 100 objetivos, que representan a objetivos simulados situados desde 1 a 100 metros de distancia de la antena transmisora.

Se simulan diversos escenarios para encontrar el valor de las incógnitas  $n$  y  $m$ . Se necesita encontrar el valor de las incógnitas en un punto que permita mayor precisión de medida del objetivo. Los valores de " $m$ " están dado en MHz y " $n$ " en números de mediciones.

El proceso que se hace para encontrar los valores de " $m$ " y " $n$ " es según el valor máximo ya que se estima encontrar un mayor número de objetivos en la zona 1, y una vez se encuentre el valor de " $m$ " se seleccionará un solo valor de " $n$ " comparando el valor mínimo con el valor máximo.

- Para  $m = 0.1$  MHz,  $n=2-20$

**Tabla 7-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 0.1$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<b>1</b>	33	33	36	39	41	46	49	54	56	60	62	65	70	70	72	74	76	76	79	
<b>2</b>	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	15	14	12	12	11	10	9	10	9	
<b>3</b>	17	17	17	17	17	17	17	15	14	12	11	10	9	9	8	8	7	7	6	
<b>4</b>	17	17	17	17	17	14	12	10	9	8	8	7	6	6	6	5	5	5	4	
<b>5</b>	17	17	14	11	9	7	6	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	
<b>6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 0.2$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 8-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 0.2$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<b>1</b>	33	39	46	54	60	65	70	74	76	79	80	81	82	83	84	84	84	86	86	
<b>2</b>	16	16	16	16	16	14	12	10	10	9	8	9	8	8	7	8	9	8	8	
<b>3</b>	17	17	17	15	12	10	9	8	7	6	6	5	5	4	4	4	4	3	3	
<b>4</b>	17	17	14	10	8	7	6	5	5	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	
<b>5</b>	17	11	7	5	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
<b>6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 0.3$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 9-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 0.3$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<b>1</b>	36	46	56	65	72	76	79	81	83	84	84	87	87	86	87	87	87	87	87	
<b>2</b>	16	16	16	14	11	10	9	9	8	7	8	7	7	8	7	8	8	8	9	
<b>3</b>	17	17	14	10	8	7	6	5	4	4	4	3	3	3	3	2	2	2	2	
<b>4</b>	17	14	9	7	6	5	4	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	
<b>5</b>	14	7	5	4	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
<b>6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 0.4$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 10-22:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 0.4$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<b>1</b>	39	54	65	74	80	82	84	85	88	88	88	88	88	88	88	88	87	85	85	
<b>2</b>	16	16	14	10	8	8	7	7	6	6	6	7	7	8	8	8	9	11	12	
<b>3</b>	17	15	10	8	6	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	
<b>4</b>	17	10	7	5	4	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	
<b>5</b>	11	5	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
<b>6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 0.5$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 11-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 0.5$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	38	55	66	76	81	84	88	88	89	91	90	90	90	89	88	88	87	85	84	
2	19	21	17	12	9	7	6	6	5	4	5	6	6	7	8	9	10	12	13	
3	17	12	8	6	5	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
4	17	8	6	4	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	9	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 0.6$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 12-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 0.6$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	41	58	71	78	81	85	85	86	86	86	86	84	83	83	83	82	81	82	76	
2	21	21	15	12	10	9	9	9	9	10	10	12	14	14	14	15	16	15	21	
3	17	10	7	5	4	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	
4	14	7	5	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	7	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 0.7$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 13-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 0.7$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras "n"																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	42	59	72	79	85	85	86	87	88	88	87	87	83	81	78	74	73	70	66	
2	22	21	15	12	9	9	9	9	8	8	10	10	14	16	19	23	24	28	32	
3	18	11	7	4	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	12	6	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	6	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 0.8$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 14-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 0.8$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras "n"																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	43	59	69	76	80	82	83	85	83	84	82	81	79	74	71	68	66	64	61	
2	24	22	19	15	13	12	12	10	12	12	14	15	17	22	25	29	32	34	37	
3	18	11	7	5	4	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	
4	10	5	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	5	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 0.9$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 15-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 0.9$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	41	59	70	79	83	86	88	86	85	83	79	76	74	71	68	65	61	57	51	
2	25	24	19	13	10	8	7	9	11	13	17	20	22	26	29	32	36	40	45	
3	19	10	6	5	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	
4	10	5	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
5	5	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 1$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 16-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 1$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	43	61	72	80	85	86	85	85	83	85	82	79	76	73	69	67	61	56	53	
2	25	24	17	13	9	9	10	11	13	11	14	17	21	24	28	30	34	39	41	
3	18	9	6	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	
4	10	4	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	
5	4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 1.1$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 17-23:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 1.1$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	42	61	73	81	82	84	83	80	76	75	73	70	65	60	59	56	51	49	49	
2	25	23	17	12	12	11	13	16	20	21	23	27	32	37	38	40	45	47	47	
3	18	10	6	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	3	3	
4	11	4	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	
5	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 1.2$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 18-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 1.2$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	43	60	75	80	83	81	83	83	80	77	73	71	67	64	58	53	49	43	43	
2	24	25	17	14	12	14	13	13	16	19	24	26	30	33	39	44	46	50	50	
3	17	9	5	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	3	4	4	
4	11	4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	
5	5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017



- Para  $m = 1.3$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 19-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 1.3$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	44	63	77	83	87	88	87	85	83	80	75	69	66	66	62	60	56	53	53	
2	23	21	14	11	8	8	10	12	14	18	23	29	31	31	34	33	34	36	36	
3	17	9	5	3	3	2	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5	6	7	7	
4	11	5	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	2	2	2	
5	5	2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 1.4$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 20-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 1.4$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	41	58	71	78	81	83	83	80	77	74	70	65	61	56	51	47	45	45	45	
2	22	22	17	13	12	11	12	16	20	23	26	31	35	40	42	45	46	46	46	
3	18	10	6	5	4	3	3	2	2	2	3	4	4	3	4	5	6	6	6	
4	12	6	4	2	2	2	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	
5	6	4	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 1.5$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 21-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 1.5$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	39	55	68	75	77	77	77	75	72	68	67	61	55	50	45	39	39	39	39	
2	22	22	16	12	12	13	14	16	21	25	26	32	38	40	44	46	46	46	46	
3	17	10	7	6	5	4	4	4	3	3	3	4	3	4	5	9	9	9	9	
4	13	7	5	3	3	3	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	
5	7	5	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	
6	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 1.6$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 22-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 1.6$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	39	55	67	73	76	76	73	71	69	63	60	55	49	44	40	40	40	40	40	
2	21	20	15	12	12	13	17	22	24	30	32	36	41	43	43	43	43	43	43	
3	18	12	7	7	5	5	5	3	3	3	5	5	5	7	11	11	11	11	11	
4	12	8	6	4	4	3	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	
5	8	4	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	
6	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 1.7$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 23-24:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 1.7$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	39	56	66	73	74	75	76	74	69	61	55	50	47	41	41	41	41	41	41	
2	20	21	16	14	14	14	15	19	24	31	37	40	41	45	45	45	45	45	45	
3	17	11	8	6	5	5	4	3	3	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	
4	13	7	5	4	4	3	2	2	2	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	
5	9	4	4	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	
6	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 1.8$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 24-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 1.8$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	41	57	68	72	74	74	71	69	65	61	58	50	45	45	45	45	45	45	45	
2	21	20	15	14	14	16	20	23	28	29	31	37	41	41	41	41	41	41	41	
3	17	11	8	6	5	4	4	4	3	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	
4	13	7	5	4	3	3	3	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
5	7	4	3	3	3	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 1.9$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 25-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 1.9$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	41	60	68	75	78	78	76	70	65	61	58	57	57	57	57	57	57	57	57	57
2	20	19	16	12	13	13	16	22	27	29	27	25	25	25	25	25	25	25	25	25
3	17	10	7	6	3	3	3	3	5	6	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
4	13	6	5	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5	8	4	3	3	3	3	2	2	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

- Para  $m = 2$  MHz,  $n = 2-20$

**Tabla 26-2:** Objetivos en las zonas determinadas para  $m = 2$  MHz,  $n = 2-20$

Zonas	Número de muestras “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	40	58	69	72	77	77	75	72	66	59	52	45	45	45	45	45	45	45	45	45
2	21	20	16	15	12	14	18	20	25	31	35	38	38	38	38	38	38	38	38	38
3	17	10	7	5	5	4	3	4	6	6	7	11	11	11	11	11	11	11	11	11
4	13	7	4	4	3	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	7	4	3	3	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

Como se puede observar desde la tabla 7-2 a la tabla 26-2, se toma 19 mediciones para estimar cuantos objetivos se pueden detectar en cada zona determinada. Un punto importante de los datos obtenidos es que el número de objetivos en cada zona se estabiliza a cierto número de mediciones.

Se puede apreciar que mientras aumenta el valor de “m”, es menor el número de objetivos medidos en la primera zona y lo óptimo del algoritmo es tener el mayor número de objetivos en la primera zona a un menor número de mediciones, ya que esto significaría menos carga computacional y mayor efectividad de detección de objetivos.

## CAPÍTULO III

### 3 EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizó cual es el valor de las incógnitas “n” y “m” determinando qué valor representó una mayor efectividad a un menor número de mediciones con más objetivos detectados en la primera zona. Posteriormente se analizó cómo el algoritmo corrige la resolución del sistema SDRadar y cuáles son las limitaciones que presenta, para finalmente realizar simulaciones que comprueben la efectividad del algoritmo realizado en MATLAB.

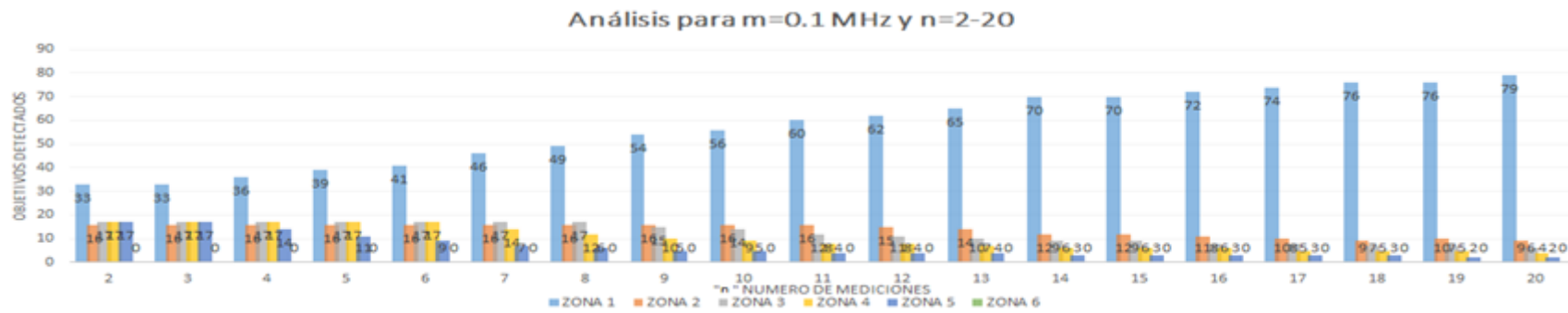
#### 3.1 Análisis para determinar el número de muestras tomadas

Para determinar el valor de las incógnitas se representa en forma gráfica los valores de la tabla 7-2 a la tabla 26-2, para encontrar el mayor número de objetivos en la primera zona a un menor número de mediciones de cada una de las tablas. Por lo tanto de cada una de las tablas se determinó un solo valor de “n” y “m”, para luego en conjunto evaluar todos los valores determinados y escoger el que permita optimizar la resolución con mayor efectividad.

##### 3.1.1 *Elección de número de mediciones “n” para cada valor de espacio de ancho de banda “m”*

A continuación se grafican los valores de cada tabla (tabla 7-2 hasta tabla 26-2), seleccionando un solo valor de “n” de cada tabla:

- Selección de "n" para "m = 0.1 MHz"



**Gráfico 1-3:** Análisis para m = 0.1 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 1-3 que corresponde a la tabla 7-2, la optimización se da a n = 20 con m = 0.1 MHz.

- Selección de "n" para "m = 0.2 MHz"

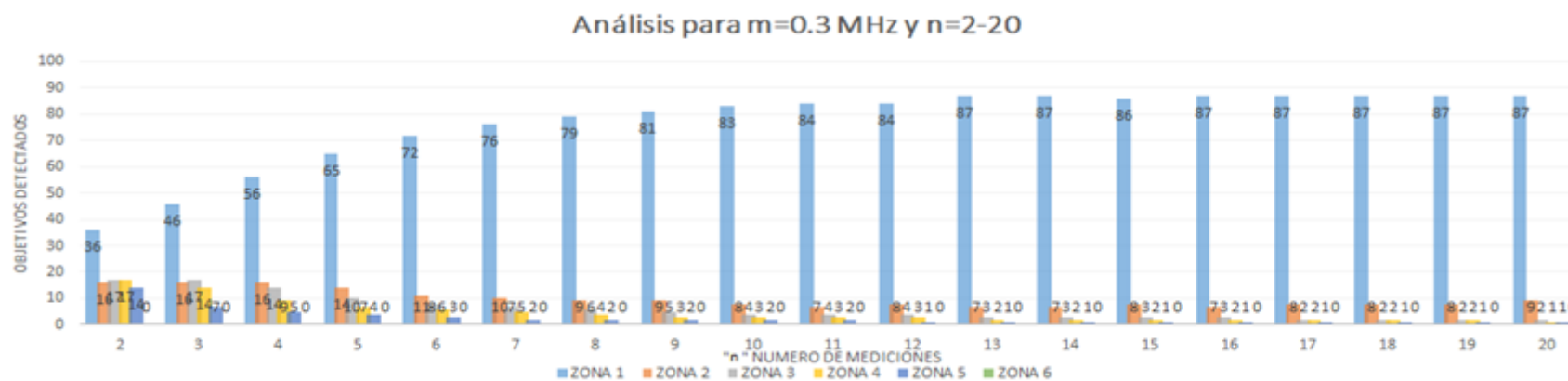


**Gráfico 2-3:** Análisis para m = 0.2 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 2-3 que corresponde a la tabla 8-2, la optimización se da a  $n = 19$  con  $m = 0.2$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 0.3 MHz"



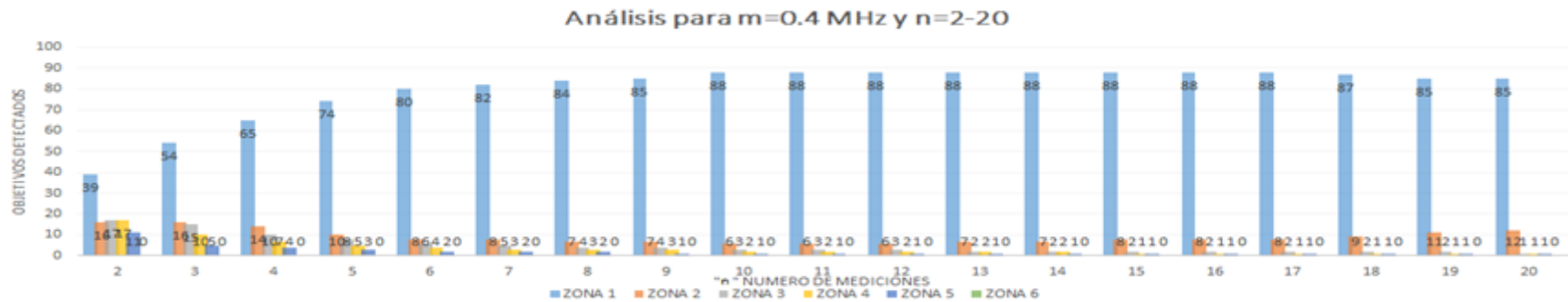
**Gráfico 3-3:** Análisis para  $m = 0.3$  MHz y  $n = 2-20$

**Realizado por:** Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 3-3 que corresponde a la tabla 9-2, la optimización se da a  $n = 13$  con  $m = 0.3$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 0.4 MHz"



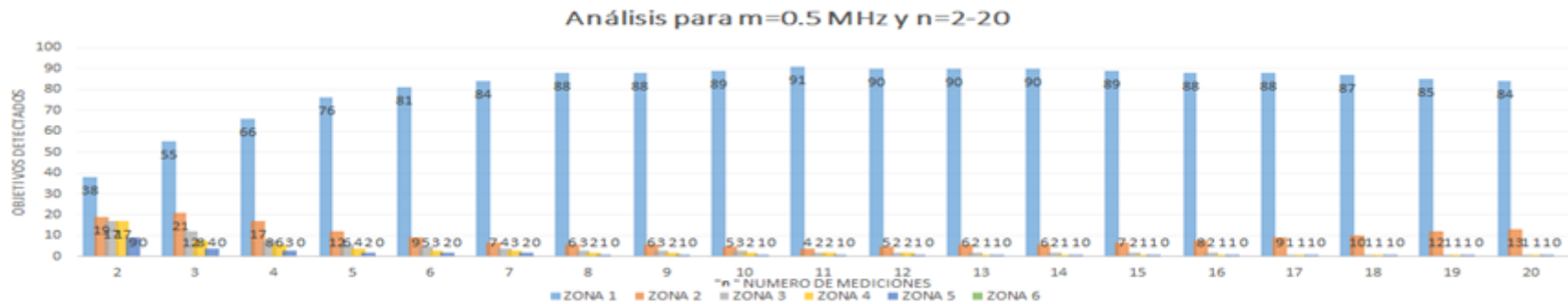


**Gráfico 4-3:** Análisis para m = 0.4 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 4-3 que corresponde a la tabla 10-2, la optimización se da a n = 13 con m = 0.4 MHz.

- Selección de "n" para "m = 0.5 MHz"

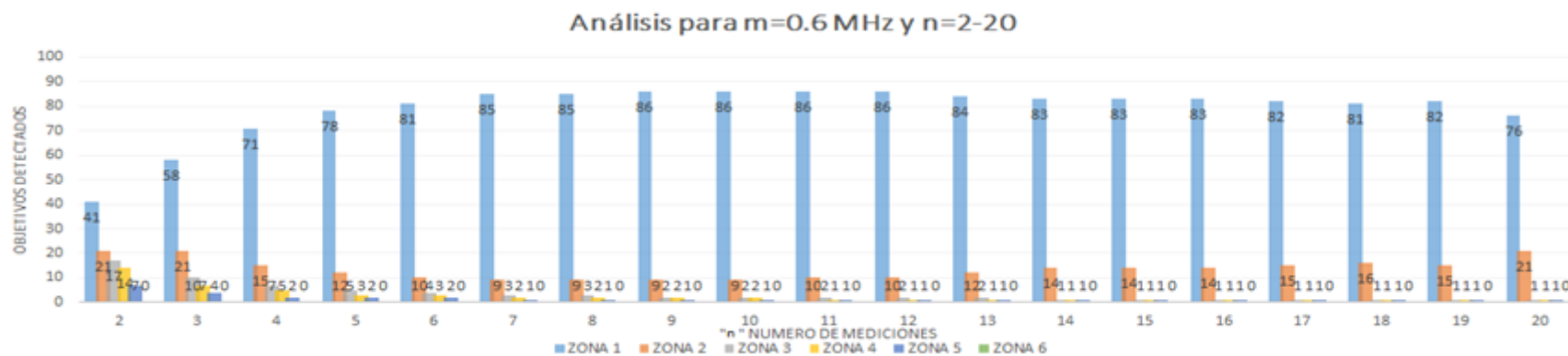


**Gráfico 5-3:** Análisis para m = 0.5 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 5-3 que corresponde a la tabla 11-2, la optimización se da a  $n = 11$  con  $m = 0.5$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 0.6 MHz"

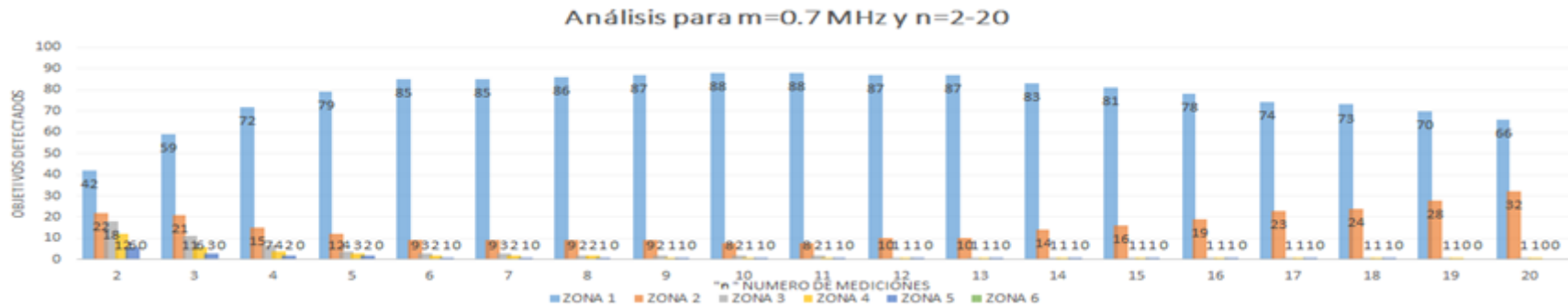


**Gráfico 6-3:** Análisis para  $m = 0.6$  MHz y  $n = 2-20$

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 6-3 que corresponde a la tabla 12-2, la optimización se da a  $n = 11$  con  $m = 0.6$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 0.7 MHz"

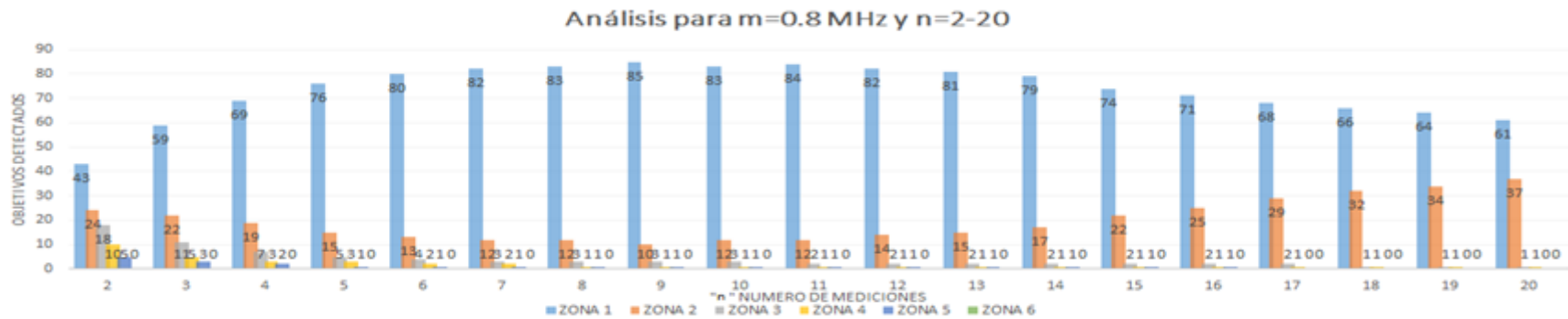


**Gráfico 7-3:** Análisis para  $m = 0.7$  MHz y  $n = 2-20$

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 7-3 que corresponde a la tabla 13-2, la optimización se da a  $n = 10$  con  $m = 0.7$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 0.8 MHz"

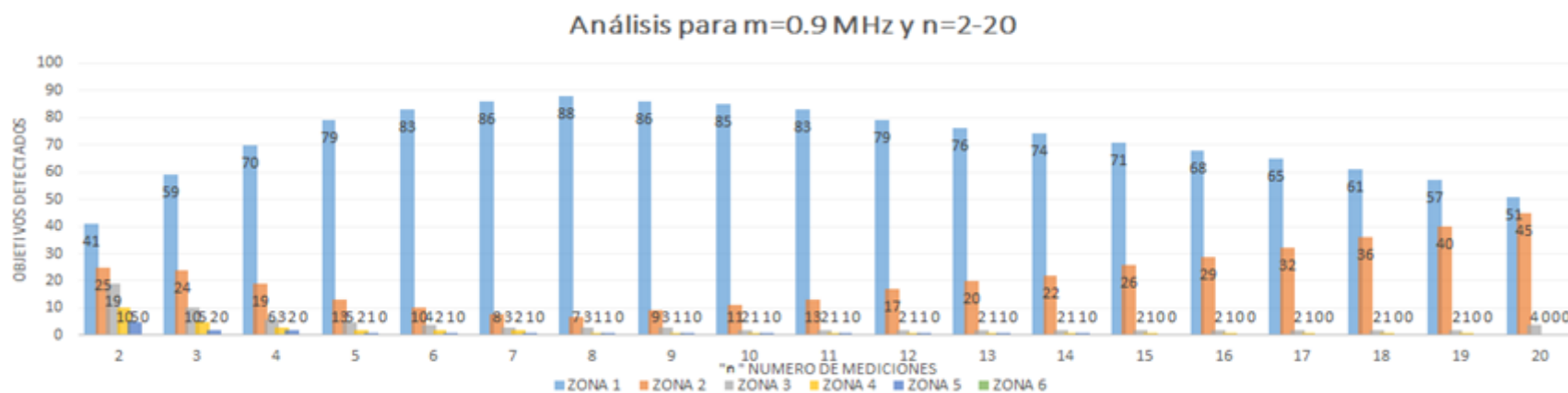


**Gráfico 8-3:** Análisis para  $m = 0.8$  MHz y  $n = 2-20$

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 8-3 que corresponde a la tabla 14-2, la optimización se da a  $n = 9$  con  $m = 0.8$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 0.9 MHz"

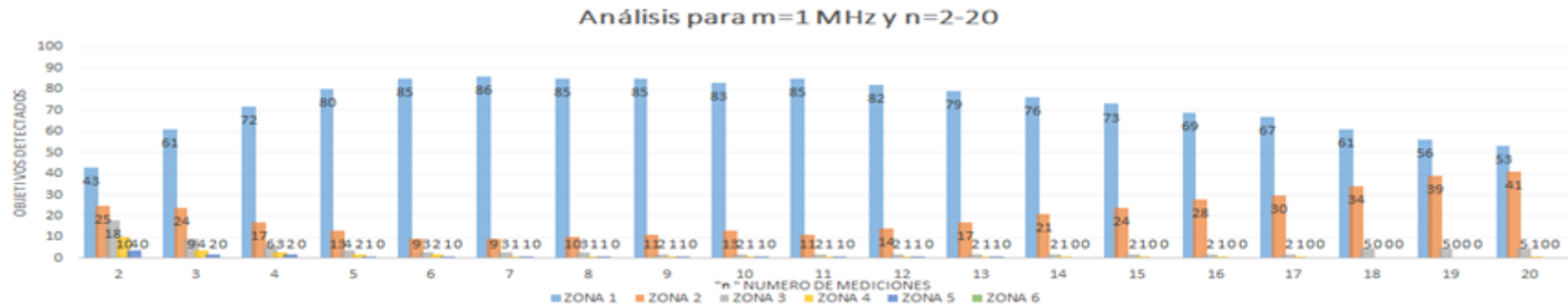


**Gráfico 9-3:** Análisis para  $m = 0.9$  MHz y  $n = 2-20$

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 9-3 que corresponde a la tabla 15-2, la optimización se da a  $n = 8$  con  $m = 0.9$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 1 MHz"

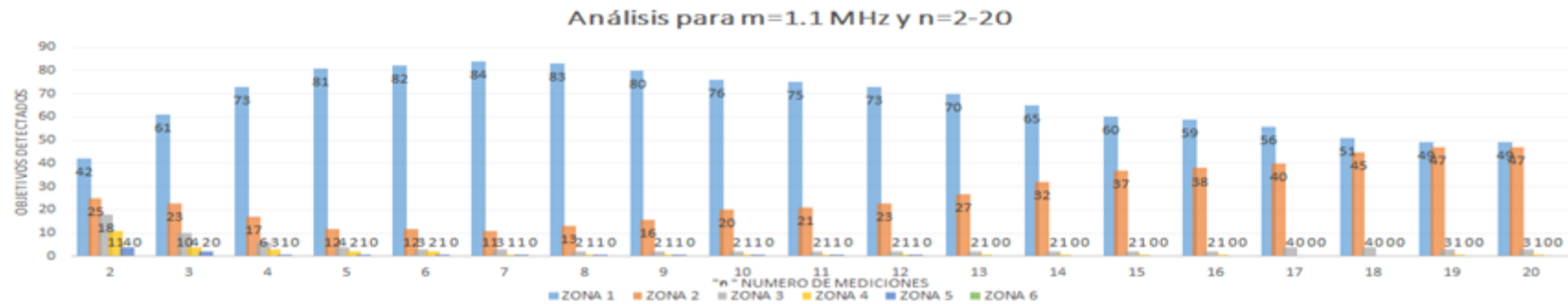


**Gráfico 10-3:** Análisis para m = 1 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 10-3 que corresponde a la tabla 16-2, la optimización se da a n = 7 con m = 1 MHz.

- Selección de "n" para "m = 1.1 MHz"

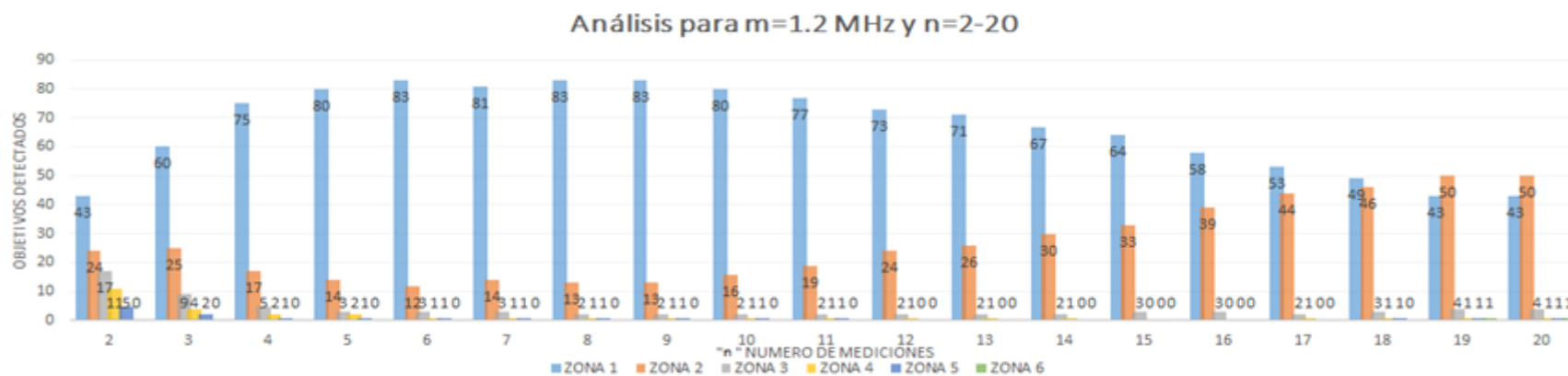


**Gráfico 11-3:** Análisis para m = 1.1 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 11-3 que corresponde a la tabla 17-2, la optimización se da a  $n = 7$  con  $m = 1.1$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 1.2 MHz"

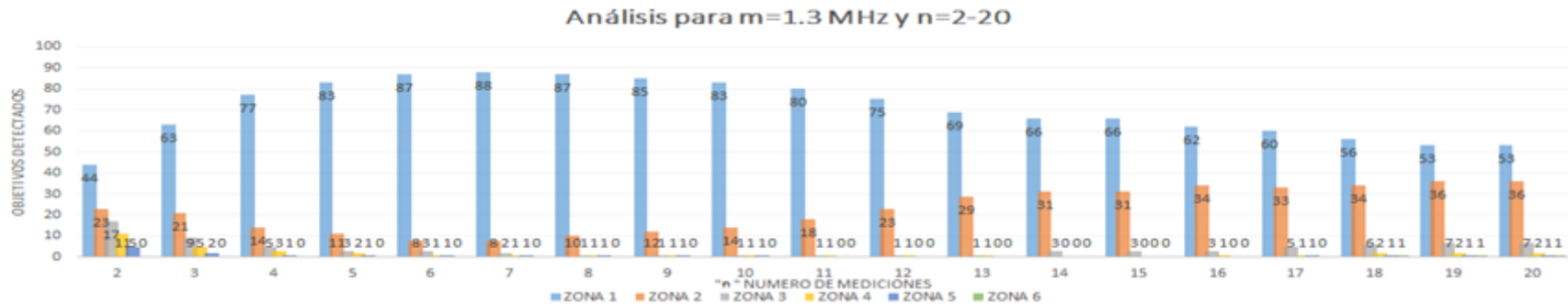


**Gráfico 12-3:** Análisis para  $m = 1.2$  MHz y  $n = 2-20$

**Realizado por:** Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 12-3 que corresponde a la tabla 18-2, la optimización se da a  $n = 8$  con  $m = 1.2$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 1.3 MHz"

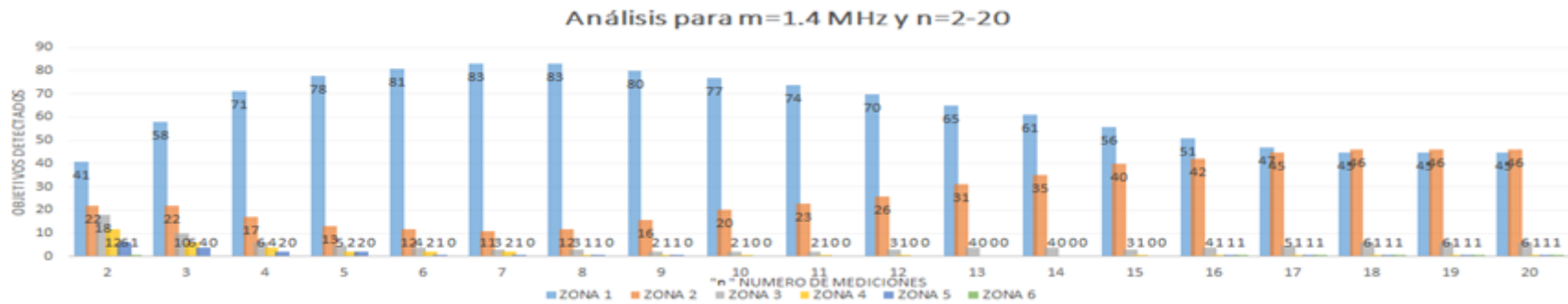


**Gráfico 13-3:** Análisis para m = 1.3 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 13-3 que corresponde a la tabla 19-2, la optimización se da a n = 7 con m = 1.3 MHz.

- Selección de "n" para "m = 1.4 MHz"

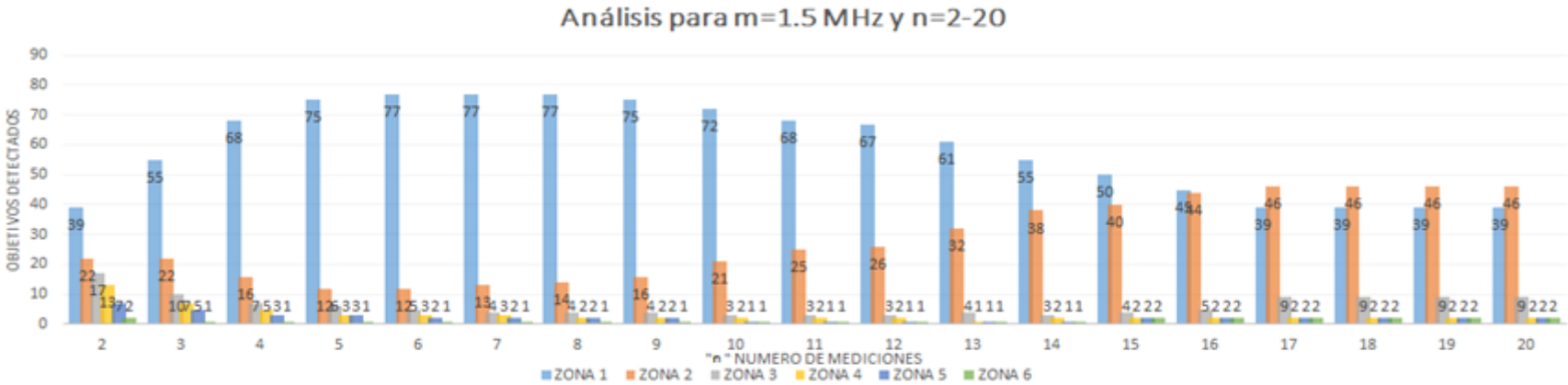


**Gráfico 14-3:** Análisis para m = 1.4 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 14-3 que corresponde a la tabla 20-2, la optimización se da a  $n = 8$  con  $m = 1.4$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 1.5 MHz"



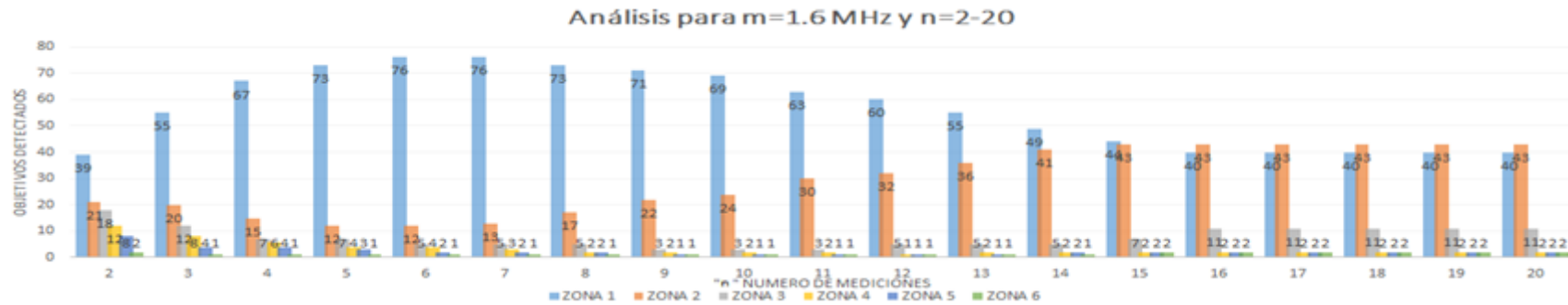
**Gráfico 15-3:** Análisis para  $m = 1.5$  MHz y  $n = 2-20$

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 15-3 que corresponde a la tabla 21-2, la optimización se da a  $n = 8$  con  $m = 1.5$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 1.6 MHz"



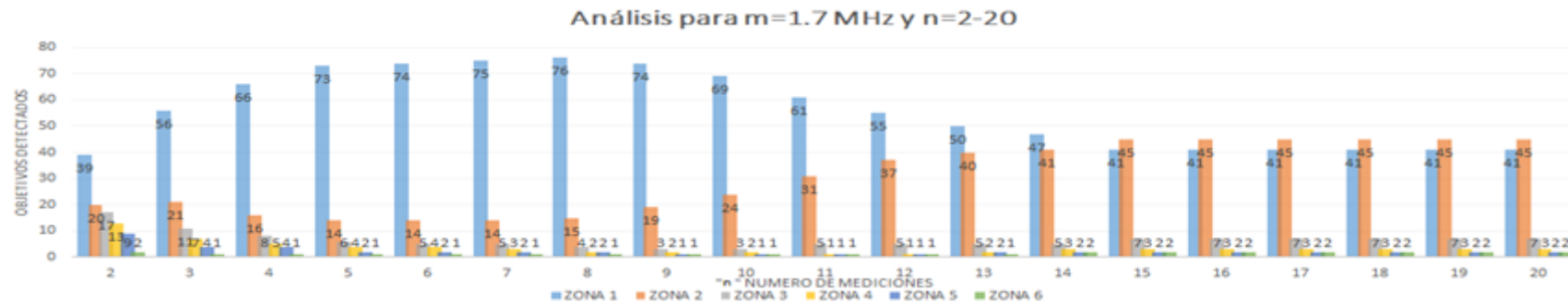


**Gráfico 16-3:** Análisis para m = 1.6 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 16-3 que corresponde a la tabla 22-2, la optimización se da a n = 7 con m = 1.6 MHz.

- Selección de "n" para "m = 1.7 MHz"

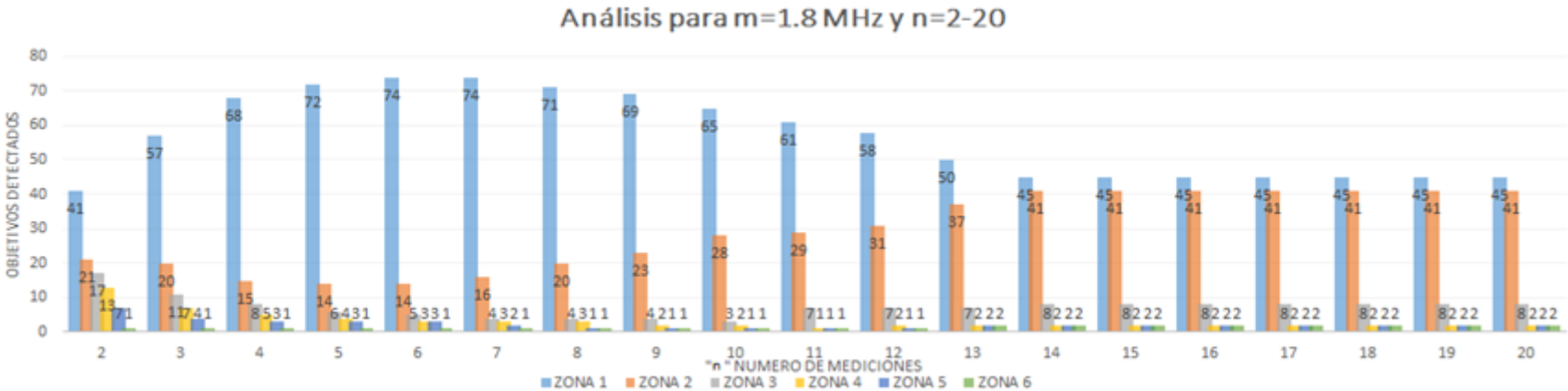


**Gráfico 17-3:** Análisis para m = 1.7 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 17-3 que corresponde a la tabla 23-2, la optimización se da a  $n = 8$  con  $m = 1.7$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 1.8 MHz"

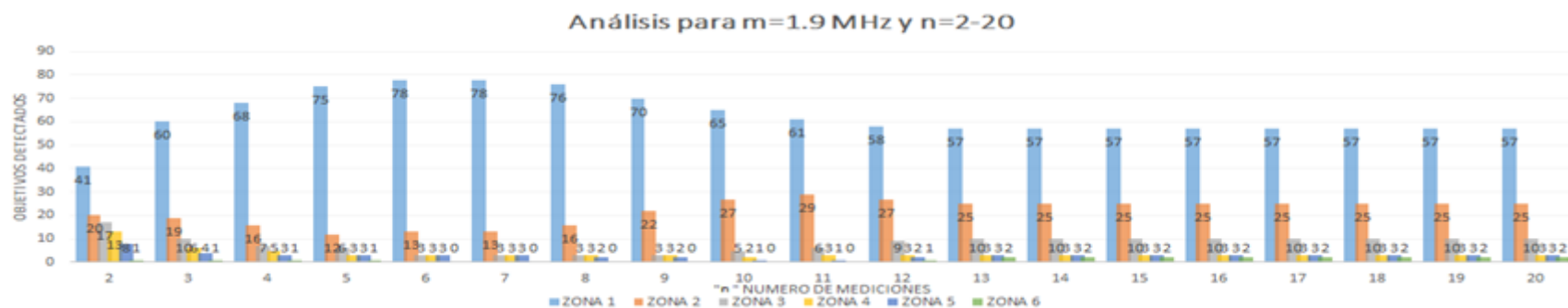


**Gráfico 18-3:** Análisis para  $m = 1.8$  MHz y  $n = 2-20$

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 18-3 que corresponde a la tabla 24-2, la optimización se da a  $n = 7$  con  $m = 1.8$  MHz.

- Selección de "n" para "m = 1.9 MHz"

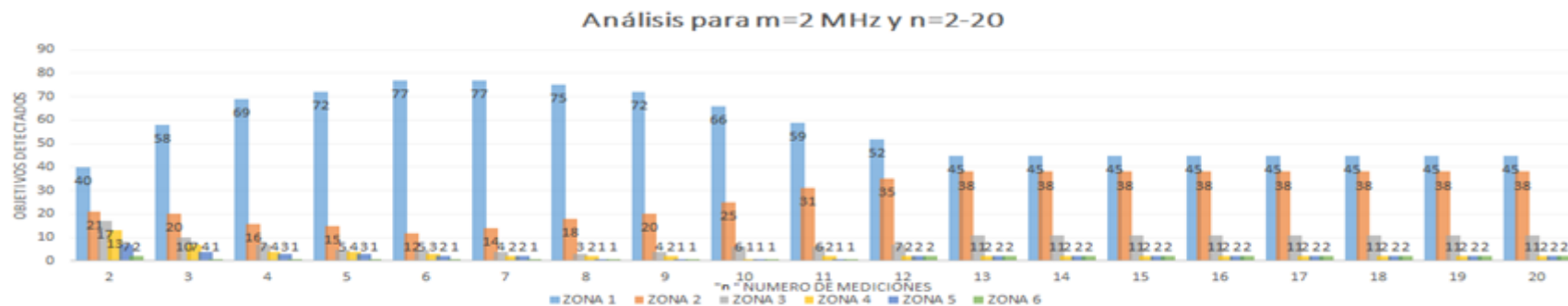


**Gráfico 19-3:** Análisis para m = 1.9 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 19-3 que corresponde a la tabla 25-2, la optimización se da a n = 6 con m = 1.9 MHz.

- Selección de "n" para "m = 2 MHz"



**Gráfico 20-3:** Análisis para m = 2 MHz y n = 2-20

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

De acuerdo al gráfico 20-3 que corresponde a la tabla 26-2, la optimización se da a  $n = 7$  con  $m = 2\text{MHz}$ .

### 3.1.2 Elección de número de muestras “n” y espacio de ancho de banda “m”

A partir de las tablas 7-2 a la 26-2 se eligió el valor máximo del número de muestras “n” y el espacio de ancho de banda “m”, para realizar una elección final, permitiendo cumplir el objetivo de optimización de resolución. En la tabla 1-3 se muestra el resumen del apartado anterior para posteriormente realizar la elección final.

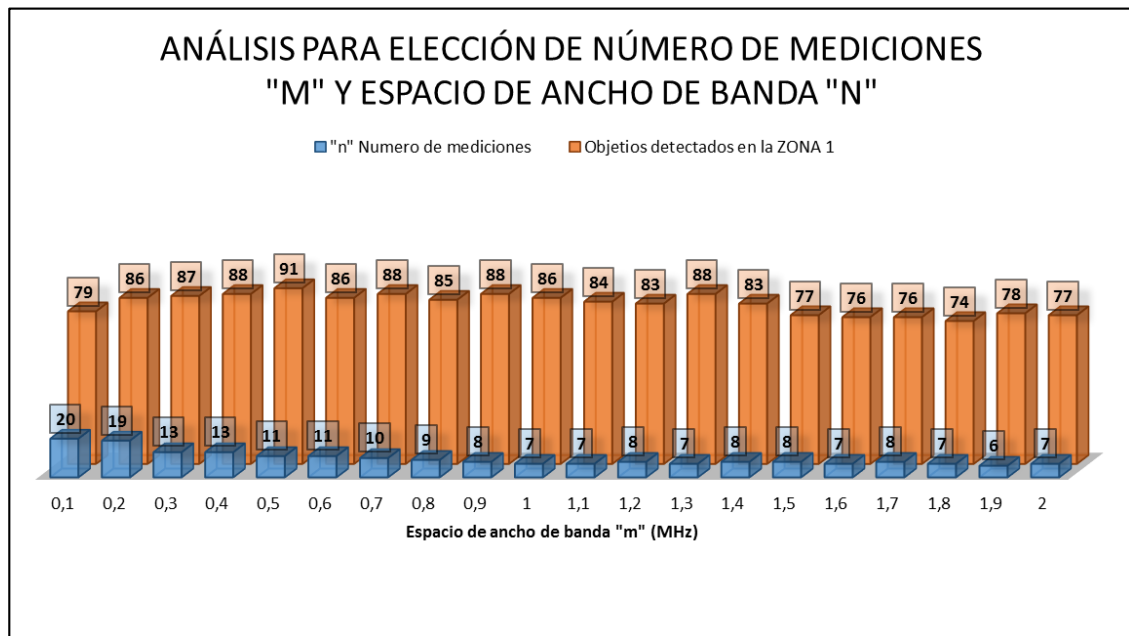
**Tabla 1-3:** Elección del valor de “n” para cada “m” según objetivos detectados en la zona 1.

<b>Espacio de ancho de banda “m” (MHz)</b>	<b>Número de mediciones “n”</b>	<b>Objetivos detectados en la Zona 1</b>
0.1	20	79
0.2	19	86
0.3	13	87
0.4	13	88
0.5	11	91
0.6	11	86
0.7	10	88
0.8	9	85
0.9	8	88
1	7	86
1.1	7	84
1.2	8	83
1.3	7	88
1.4	8	83
1.5	8	87
1.6	7	76
1.7	8	76
1.8	7	74
1.9	6	78
2	7	77

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

Para elegir cual es el valor de “n” y “m” que permitan optimizar la resolución del algoritmo se necesita un menor número de mediciones con un mayor número de objetivos encontrados en la zona 1, ya que esto implicaría una mayor efectividad con menor carga computacional.

Se muestra de manera gráfica los valores de la tabla 1-3, para determinar el valor de “n” y “m”.



**Gráfico 21-3:** Análisis para elección de “n” y “m”

**Realizado por:** Julio C. Mejía. 2017

Según en el gráfico 20-3 el menor valor de número de muestras que da mayor número de objetivos detectados en la zona 1 es  $n = 11$  para un espacio de ancho de banda de  $m = 0.5$ .

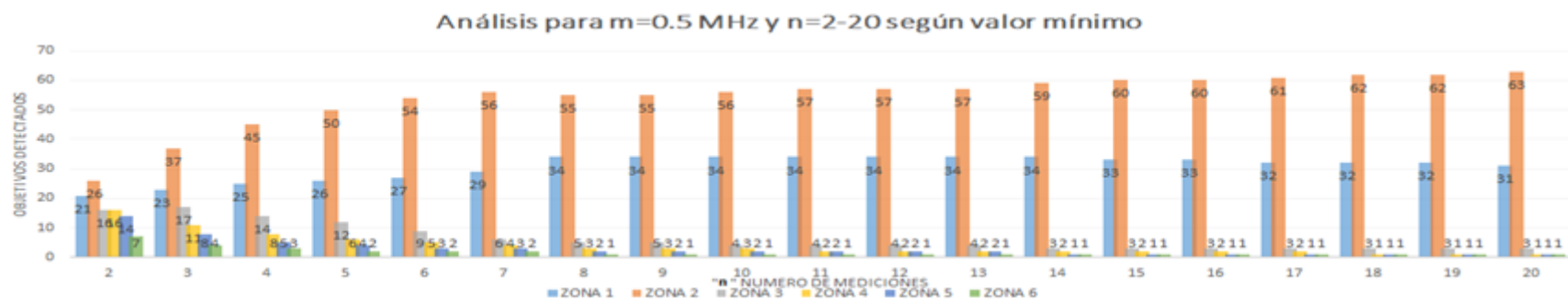
Los valores de “n” y “m” son para el valor máximo, pero ahora se analiza según la tabla 2-3 el número de objetivos detectados en las zonas determinadas según el valor mínimo para  $m = 0.5$  ya que con este número de espacio de ancho de banda se encuentra el mayor número de objetivos detectados en la zona 1.

**Tabla 2-3:** Número de muestras “n” para “m = 0.5” según valor mínimo

Zonas	Número DE MUESTRAS “n”																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	21	23	25	26	27	29	34	34	34	34	34	34	34	33	33	32	32	32	31	
2	26	37	45	50	54	56	55	55	56	57	57	57	59	60	60	61	62	62	63	
3	16	17	14	12	9	6	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	
4	16	11	8	6	5	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	
5	14	8	5	4	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	
6	7	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

Según el gráfico 5-3 correspondiente al análisis para  $m = 0.5$  según valor máximo, la mejor opción para “n” es  $n = 11$  ya que hay un mayor número de objetivos detectados en la zona 1, pero según la tabla 2-3 y el gráfico 22-3 a  $n = 11$  existen dos objetivos detectados en la zona 5, y a  $n = 14$  solo se detecta un objetivo en la zona 5.



**Gráfico 22-3:** Análisis para  $m = 0.5$  MHz y  $n = 2-20$  según valor mínimo

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

Una vez analizado el gráfico 5-3 se determina que la mejor opción para encontrar el número de mediciones para optimizar la resolución de la tarjeta USRP B210 es  $n = 11$ , comparando según el valor mínimo se obtienen dos objetivos en la zona 5 (gráfico 22-3), pero para  $n = 14$  se detecta un solo objetivo en la zona 5, y haciendo relación al gráfico 5-3 a  $n = 14$  existen noventa objetivos detectados en la zona 1 según el valor máximo, tan solo un objetivo más en la zona 1 según el valor mínimo.

Haciendo relación al análisis anterior la optimización del algoritmo se da a  $n = 14$  con  $m = 0.5$  MHz, según los valores mínimo/máximo.

**Tabla 3-3:** Valores elegidos para encontrar la optimización de la resolución de la tarjeta USRP B210

Número de mediciones “n”	Espacio de ancho de banda “m” (MHz)
14	0.5

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

### 3.2 Evaluación del algoritmo

Para evaluar el algoritmo y comprobar su funcionalidad, primeramente se ejecutó el mismo para demostrar cómo se realizó la corrección de la resolución y determinar las limitaciones existentes, posteriormente se evaluó con simulaciones.

#### 3.2.1 Ejecución del algoritmo

Con los valores encontrados de “n” y “m” en la elección de número de muestras y espacio de ancho de banda se aplicó al algoritmo y se demuestran los siguientes puntos:

##### 3.2.1.1 Corrección de resolución

Para comparar la diferencia que existe entre una resolución de 6 m en relación a una resolución de 1 m se representa en la figura 23-3.

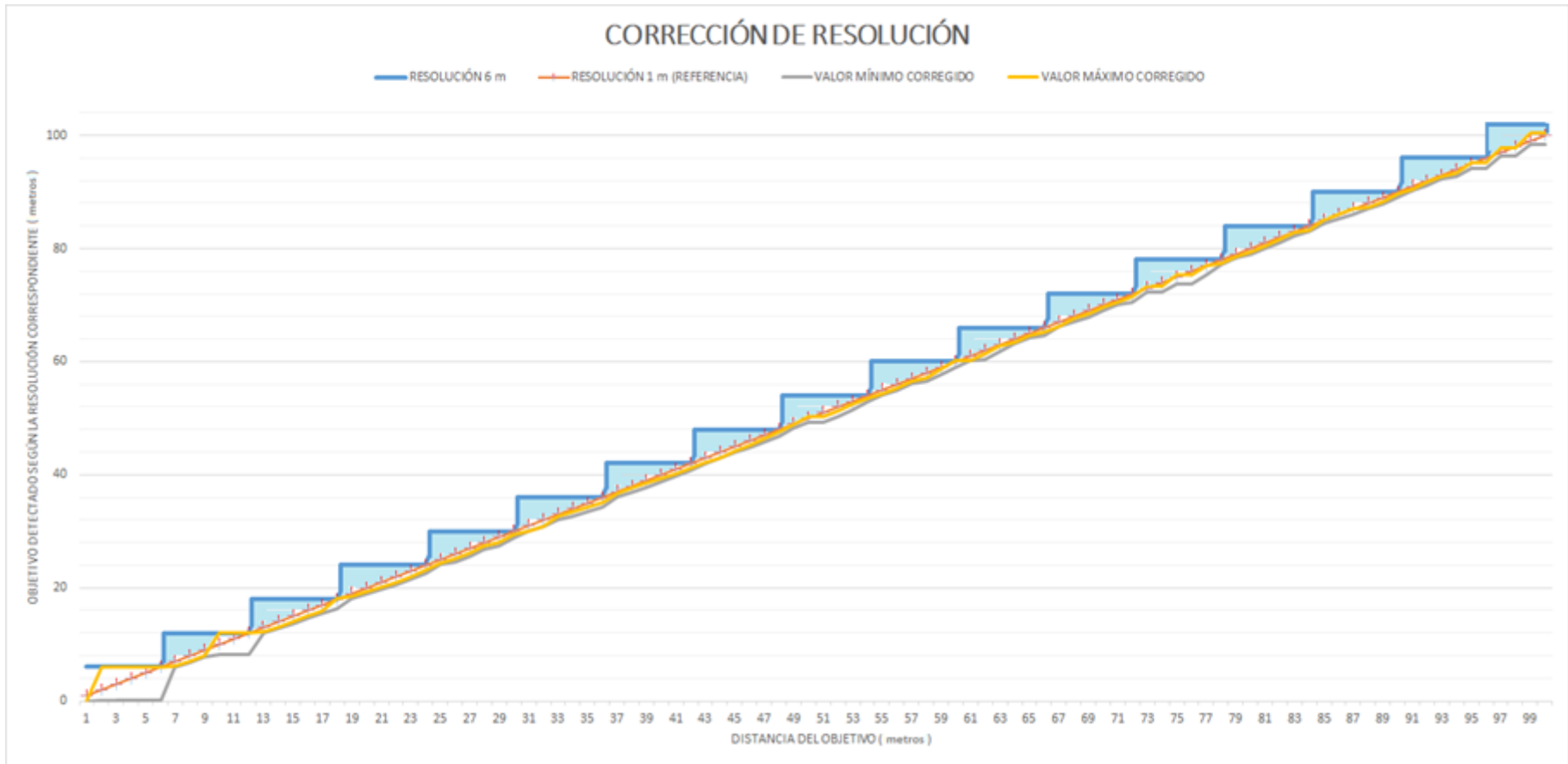


**Gráfico 23-3:** Comparación resolución 1m vs. Resolución 6m

**Realizado por:** Julio C. Mejía. 2017

Como se puede observar la resolución de 1 metro tiende a una pendiente en comparación a una resolución de 6 metros. Aplicando los valores de “n” y “m” se muestra la corrección que realiza el algoritmo en el gráfico 23-3.





**Gráfico 24-3:** Corrección de resolución

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

En el gráfico 24-3 se observan cuatro líneas; la línea azul es la resolución a mejorar del sistema  $\Delta R = 6$  m, la línea roja es una referencia de una resolución de  $\Delta R = 1$  m que se la gráfica para poder estimar resultados, la línea gris y amarilla es el valor mínimo y máximo respectivamente corregido de acuerdo a cada punto, en cambio el área de color celeste es toda la corrección de resolución realizada con el algoritmo.

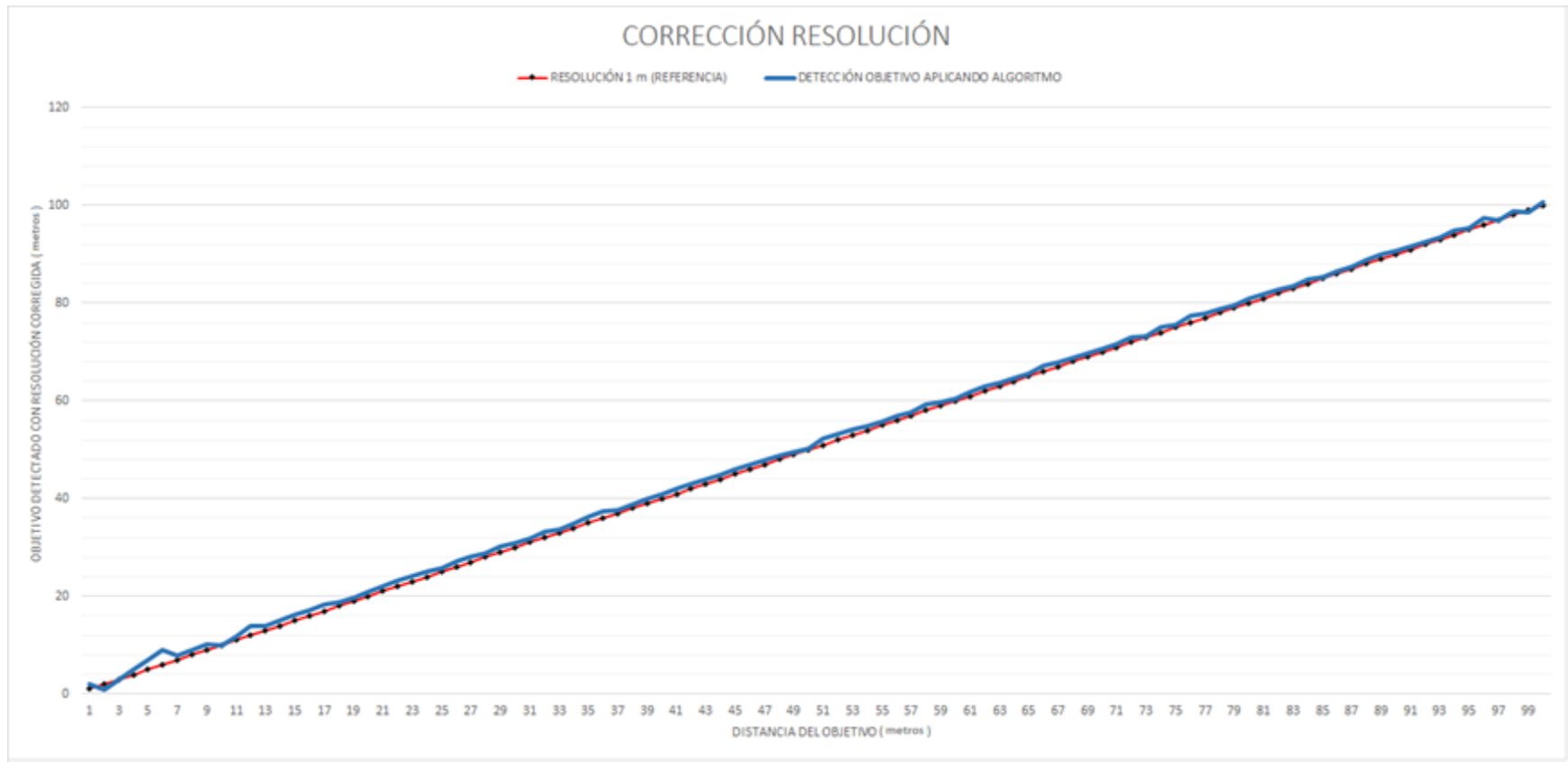
Una vez obtenidos los valores mínimos y máximos de cada objetivo detectado se hizo un promedio para imprimir el resultado de ubicación de cada objetivo, dando como resultado un margen de error  $e < 2$ . Para interpretar de mejor manera los resultados se determinan dos zonas como se muestra en la tabla 4-3, y la resolución dependiendo de cada zona.

**Tabla 4-3:** Resolución correspondiente a cada zona determinada

Zonas	Margen de error (m)	Resolución $\Delta R$ (m)
1	$e < 1$	1
2	$1 \leq e < 2$	2

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

Con el promedio obtenido entre el valor mínimo y máximo de cada objetivo los resultados se muestran en el gráfico 25-3.



**Gráfico 25-3:** Corrección de resolución aplicando promedio de valores mínimo/máximo

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

### 3.2.1.2 Limitaciones del algoritmo

Ya que la mejor resolución del sistema es de  $\Delta R = 6$  m, y las demás mediciones que se realizan tienen un menor ancho de banda en la señal generada aumentando el valor de la resolución en cada medida, es así que el algoritmo optimiza la resolución a partir de seis metros de distancia. Mediante este análisis se restan los objetivos detectados de los primeros seis metros, y se obtiene un nuevo número de objetivos detectados en dos zonas como se analizó en el apartado anterior. (Ver tabla 5-3)

**Tabla 5-3:** Nuevo número de objetivos detectados

Zonas	Número de objetivos detectados
1	65
2	29
<b>TOTAL</b>	94

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

Ahora el total de muestras se reduce de 100 a 94 ya que se restaron los valores de las primeras seis medidas, y el análisis siguiente se realiza con el nuevo número de muestras.

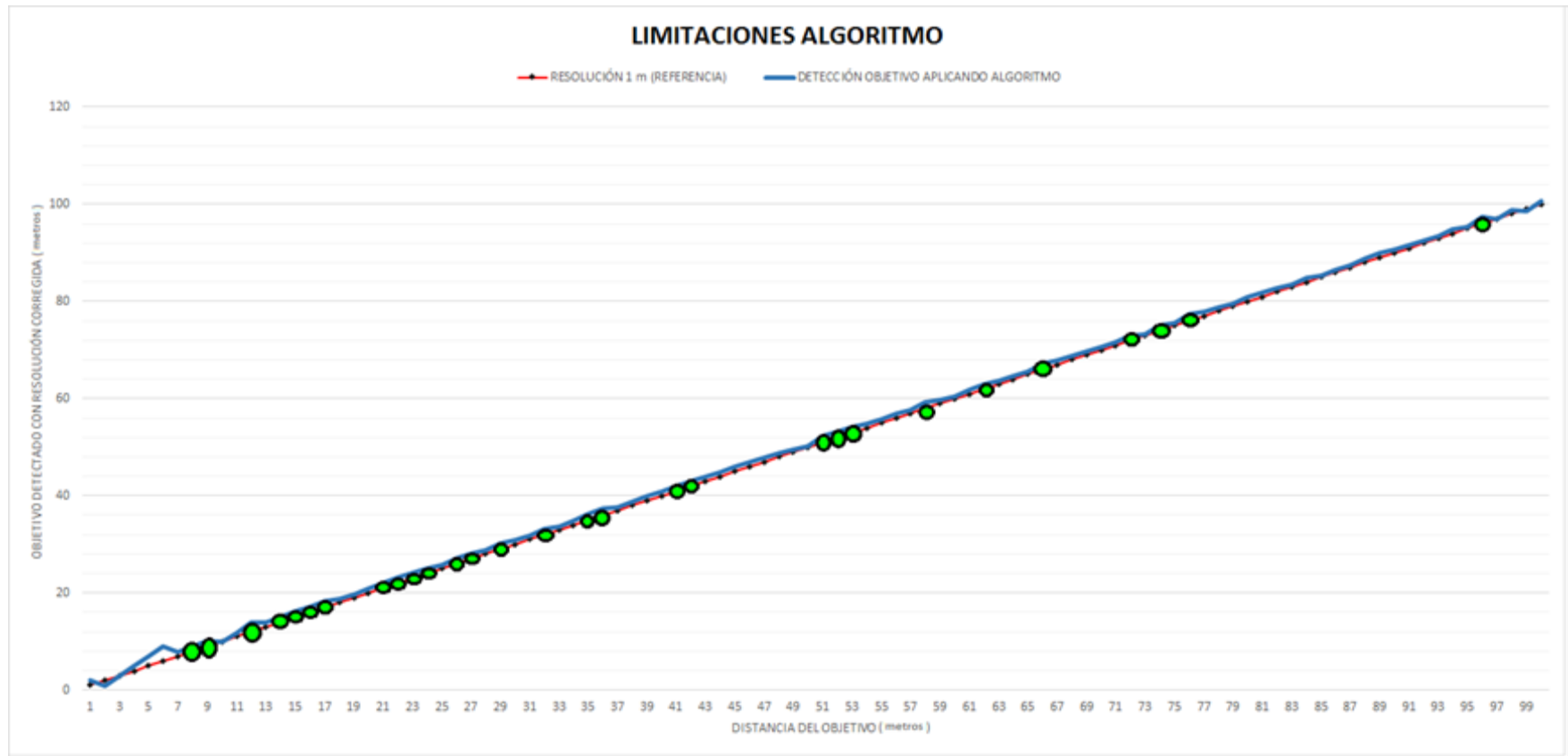
En el gráfico 26-3 se muestra como la corrección del algoritmo en comparación con la medida de referencia (resolución de 1 metro) hacen casi una línea paralela, que permite demostrar la optimización del algoritmo con 14 mediciones “n” y 0.5 de espacio de ancho de banda “m” entre cada señal transmitida.

En el gráfico 26-3 los objetivos detectados en la zona 2 se representan en color verde y los objetivos restantes (representados sin color) están en la zona 1. En la tabla 6-3 se muestra en resumen las limitaciones del algoritmo desarrollado en MATLAB.

**Tabla 6-3:** Limitaciones algoritmo

Zona	Margen de error “e” (m)	Representación (color)	Número de objetivos	Distancia del objetivo (m)
2	$1 \leq e < 2$	Verde	29	8, 9, 12, 14-17, 21-24, 26, 27, 29, 32, 35, 36, 41, 42, 51-53, 58, 62, 66, 72, 74, 76, 96
1	$e < 1$	Sin color	65	Valores restantes

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017



**Gráfico 26-3:** Limitaciones algoritmo

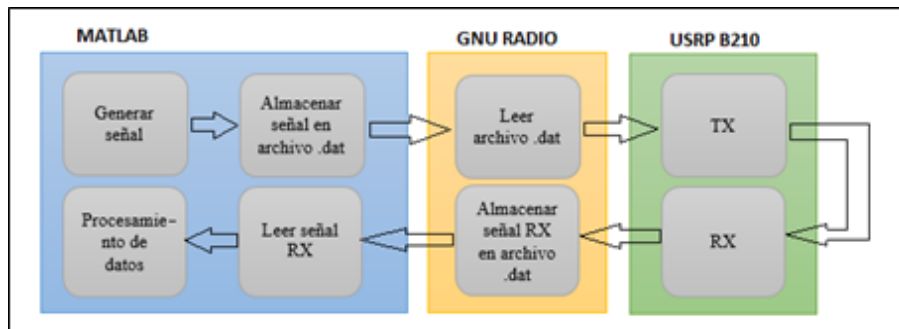
Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

El tiempo de procesamiento de datos de las medidas realizadas dependerá de la capacidad de la computadora que se use, ya que así se optimizaría el tiempo de respuesta del algoritmo.

### 3.2.2 Evaluación del algoritmo según zonas determinadas y discusión de resultados

Como se mencionó en el apartado anterior la evaluación de resultados se realiza para dos zonas, basándose en la tabla 6-3 se simula en MATLAB la detección de un objetivo por cada zona.

El sistema SDRadar propuesto consta con las siguientes etapas como se muestra en la figura 1-3.



**Figura 1-3:** Diagrama de bloques del sistema SDRadar

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

Como se puede analizar en la figura 1-3, el sistema propuesto se lo realizó con la ayuda de MATLAB para generar la señal y procesar los datos recibidos de las siguientes etapas realizadas con GNU RADIO y USRP para poder estimar la distancia del objetivo. Se propuso este sistema para reducir la carga computacional que requiere implementar un sistema SDRadar.

El problema de la tarjeta USRP B210 para implementar un sistema SDRadar son la deficiencia en potencia y sincronización, por lo cual se usa un cable que conecta el transmisor con el receptor reemplazando las antenas para solucionar el problema de potencia, además se simula el retardo correspondiente a cada distancia del objetivo en MATLAB para solucionar el problema de sincronización.

#### 3.2.2.1 Evaluación zona 1

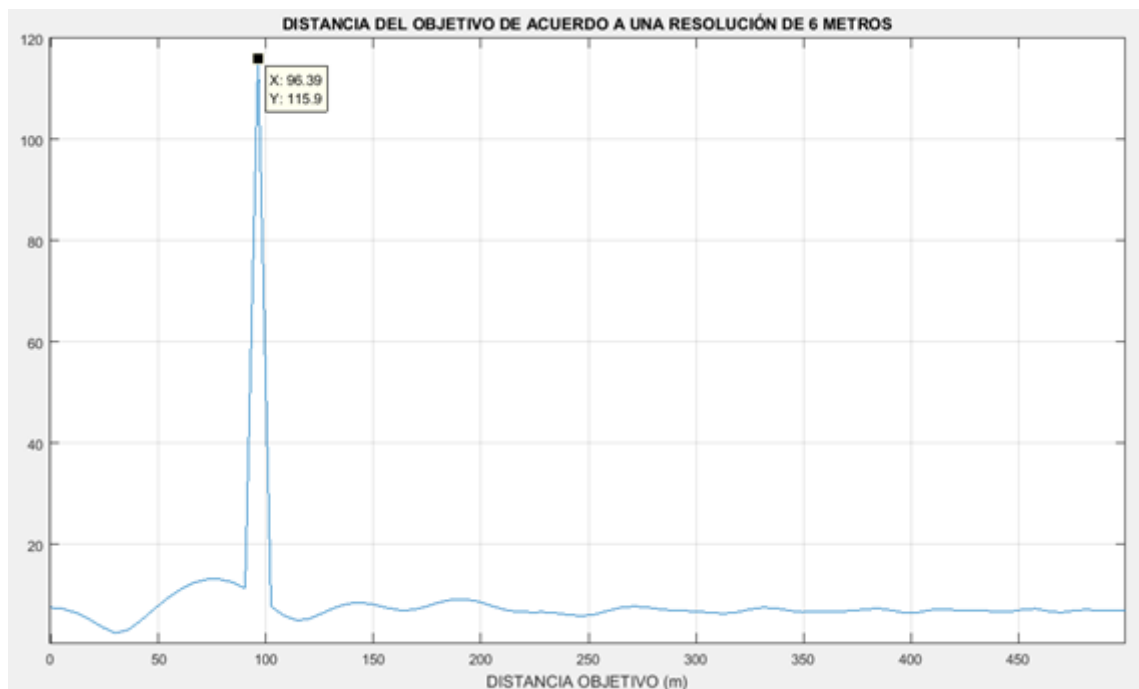
Se simuló en MATLAB la distancia de 93 metros del objetivo a encontrar como se muestra en el gráfico 27-3. Tomando en cuenta que la distancia simulada no es múltiplo de la resolución de la tarjeta  $\Delta R = 6$  m, por lo tanto sin aplicar el algoritmo la detección del objetivo tendrá un error en su medida.

```
Command Window
ingrese la distancia del objetivo en un rango de 6 a 100 metros: 93
El objetivo con respecto a una resolucion de 6m se encuentra a:
 96.3855|
```

**Gráfico 27-3:** Detección de objetivo en zona 1 sin aplicar algoritmo de corrección

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

El gráfico 28-3 muestra el radargrama con la posición del objetivo de acuerdo a la resolución de 6m.



**Gráfico 28-3:** Radargrama para detección del objetivo en zona 1 con una resolución de 6 metros

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

Aplicando el algoritmo desarrollado para optimizar la resolución de la tarjeta USRP B210 el resultado se muestra en el gráfico 29-3, con un error de detección de  $e < 1$  m

```
Command Window
ingrese la distancia del objetivo en un rango de 6 a 100 metros: 93
El objetivo con medicion corregida se encuentra a:
 92.5109
```

**Gráfico 29-3:** Resultado de medición de objetivo de 93 metros aplicando algoritmo

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

### 3.2.2.2 Evaluación zona 2

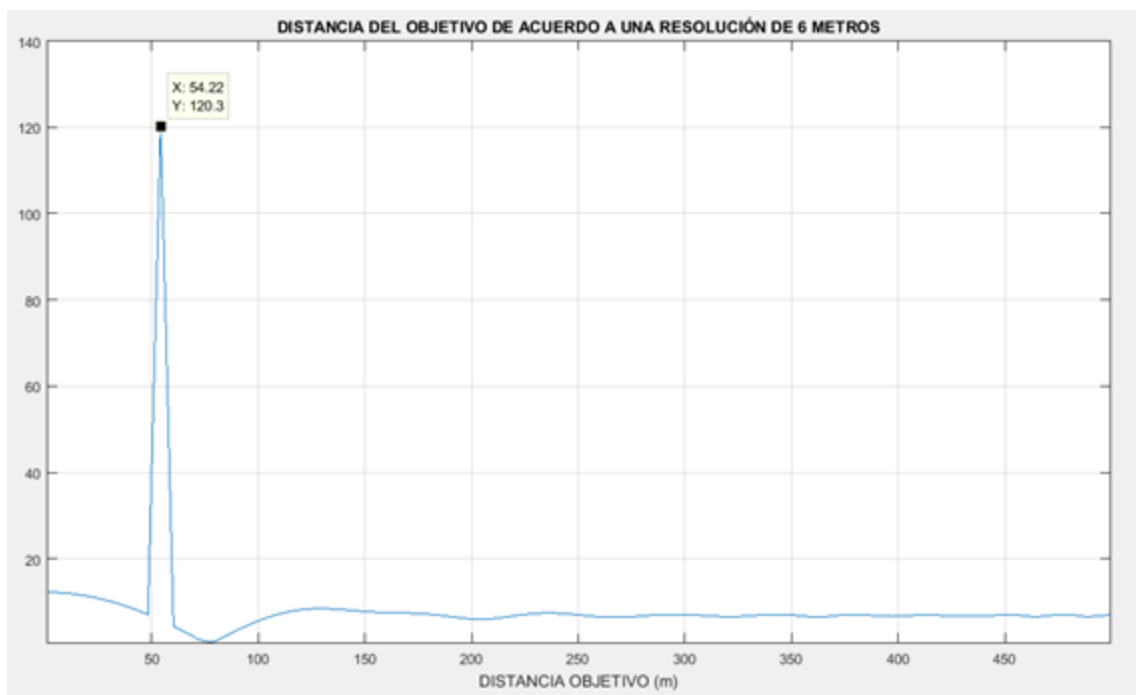
Se simuló en MATLAB la distancia de 51 metros del objetivo a encontrar como se muestra en el gráfico 30-3. Tomando en cuenta que la distancia simulada no es múltiplo de la resolución de la tarjeta  $\Delta R = 6$  m, por lo tanto sin aplicar el algoritmo la detección del objetivo tendrá un error en su medida.

```
Command Window
ingrese la distancia del objetivo en un rango de 6 a 100 metros: 51
El objetivo con respecto a una resolución de 6m se encuentra a:
54.2169
```

**Gráfico 30-3:** Detección de objetivo en zona 2 sin aplicar algoritmo de corrección

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

El gráfico 31-3 muestra el radargrama con la posición del objetivo de acuerdo a la resolución de 6m.



**Gráfico 31-3:** Radargrama para detección del objetivo en zona 2 con una resolución de 6 metros

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

Aplicando el algoritmo desarrollado para optimizar la resolución de la tarjeta USRP B210 el resultado se muestra en el gráfico 32-3, con un error de detección de  $e < 2$  m



```

Command Window
ingrese la distancia del objetivo en un rango de 6 a 100 metros: 51
El objetivo con medicion corregida se encuentra a:
49.7073

```

**Gráfico 32-3:** Resultado de medición de objetivo de 51 metros aplicando algoritmo

Realizado por: Julio C. Mejía. 2017

### 3.2.2.3 Discusión de resultados

De las noventa y cuatro muestras evaluadas en las dos zonas determinadas, se obtuvieron 65 objetivos en la zona 1 con un error  $e < 1$  el cual representa un 69,15% de mediciones, así mismo se obtuvieron 29 objetivos en la zona 2 con un error  $1 \leq e < 2$  igual a 30,85% de mediciones con este error.

En la tabla 7-3 se muestra un resumen de la discusión de resultados de la ejecución del algoritmo desarrollado en MATLAB para optimizar la resolución de una USRP B210.

**Tabla 7-3:** Porcentaje de mediciones de acuerdo al número de objetivos encontrados en la zona. 1 y 2.

Zonas	Margen de error “e” (m)	Número de objetivos encontrados	Porcentaje de medición (%)
1	$e < 1$	65	69,15
2	$1 \leq e < 2$	29	30,85

Realizado por: Julio C. Mejía, 2017

De acuerdo a los resultados obtenidos y por el número de mediciones que se tiene que realizar (14) las posibles aplicaciones que se pueden realizar para SDRadar son: detección de objetivos, medición de distancia, topografía o en radares de apertura sintética. (Charvat, 2014 pág. 69).

## CONCLUSIONES

- Para optimizar la resolución de la tarjeta USRP B210 se desarrolló un algoritmo en MATLAB, analizando con una muestra de 100 compuesta por objetivos simulados desde 1 a 100 metros de distancia a detectar, además tomando en cuenta el mejor ancho de banda que proporciona la tarjeta, se determinó que con  $n = 14$  mediciones sobre el objetivo a detectar con una diferencia entre anchos de banda  $m = 0.5 \text{ MHz}$  de las señales generadas el resultado de optimización es semejante a una resolución de 2 metros.
- El algoritmo desarrollado en MATLAB optimiza la resolución a partir de 6 metros de distancia del objetivo a detectar, por lo cual se reduce la muestra de 100 a 94 compuesta por objetivos simulados situados de 6 a 100 metros de distancia donde se determinan dos zonas: la primera está limitada por un error de medición de  $e < 1 \text{ m}$ , la segunda zona con un error de medición  $1 \text{ m} \leq e < 2 \text{ m}$  con 69,15% y 30,85% de objetivos detectados respectivamente, determinando así su efectividad y confiabilidad.
- Para reducir la carga computacional que un sistema SDRadar comprende se utilizó MATLAB y GNURadio para generar la señal además de procesar los datos obtenidos de la USRP B210 que fue usada como transceptor, concluyendo que por el número de mediciones que se deben realizar el algoritmo desarrollado puede ser empleado en aplicaciones SDRadar como detección de objetivos, aplicaciones topográficas o en un radar de apertura sintética.
- Mediante el análisis realizado se determinó que la tarjeta USRP B210 proporciona un ancho de banda de máximo 25 MHz lo cual corresponde a una resolución de 6 metros, además de tener una baja potencia e inestabilidad en la sincronización entre el transmisor y receptor de la misma para aplicar en escenarios SDRadar.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar una computadora con un procesador de gama alta (i5 o superiores) para aplicar el algoritmo desarrollado y utilizar el puerto USB 3.0 de la tarjeta USRP B210, además del uso de muchos recursos computacionales por la necesidad de ejecutar MATLAB y GNURadio para su desarrollo.
- Es importante analizar el firmware de la tarjeta USRP B210 ya que se puede optimizar recursos y asignar un funcionamiento radar exclusivo a la tarjeta, siempre y cuando se lo haga de manera minuciosa porque el mal manejo del firmware podría acabar con la misma.
- Aunque el problema de falta de potencia de la tarjeta se pudo solucionar reemplazando las antenas de transmisión/recepción por un cable que una estos puertos y la inestabilidad en la sincronización con simulaciones de retardo, se puede diseñar un amplificador de potencia para la tarjeta USRP B210 y utilizar el puerto GPS para sincronizar TX/RX obteniendo una referencia en el dominio del tiempo.
- Se recomienda utilizar el algoritmo en aplicaciones en donde el objetivo se encuentre en posición estática ya que el movimiento del objetivo impediría tomar las 14 mediciones que se requieren para optimizar la resolución de la tarjeta USRP B210.
- Aunque la resolución de la USRP B210 es de seis metros se recomienda investigar otras aplicaciones que no requieran de una resolución sensible ya que en la actualidad el tema de radares está abierto y libre para dar solución a muchos problemas que requieren de tecnología a menor costo.

## GLOSARIO

<b>AD</b>	Corriente Alterna
<b>CW</b>	Onda Continua
<b>ADC</b>	Convertidor Analógico Digital
<b>DAC</b>	Convertidor Digital Analógico
<b>DSP</b>	Procesador de Señal Digital
<b>FFT</b>	Transformada Rápida de Fourier
<b>FMCW</b>	Radar de Onda Continua Modulada en Frecuencia
<b>FPG</b>	Puerta programable de campo
<b>FPGA</b>	Rayo de Puerta Programable
<b>GPIO</b>	Entrada/Salida de Propósito General
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamiento Global
<b>GPSDO</b>	GPS controlado por oscilador de cristal
<b>GUI</b>	interfaz gráfica del usuario
<b>HF</b>	Alta Frecuencia
<b>IDE</b>	Entorno de Desarrollo Integrado
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
<b>IF</b>	Frecuencia Intermedia
<b>JTAG</b>	Grupo de Acción de Prueba Conjunta
<b>LNA</b>	Amplificador de Bajo Ruido
<b>NI</b>	Instrumento Nacional
<b>OFDM</b>	Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal
<b>PAPR</b>	Algoritmo de Potencia Máxima/Media
<b>PHY</b>	Python
<b>POO</b>	Programación Orientada a Objetos
<b>PPS</b>	Pulsos por Segundo
<b>PSR</b>	Radar de Vigilancia Primario
<b>RADAR</b>	Detección y Rango de Radio
<b>RCS</b>	Sección Transversal del Radar
<b>RF</b>	Radio Frecuencia
<b>RFIC</b>	Circuito Integrado de Radiofrecuencia
<b>RX</b>	Receptor
<b>SAR</b>	Radar de Apertura Sintética
<b>SDR</b>	Radio Definido por Software

<b>SDRadar</b>	Radar Definido por Software
<b>SSR</b>	Radar de Vigilancia Secundario
<b>TDT</b>	Televisión Digital Terrestre
<b>TX</b>	Transmisor
<b>UHD</b>	Controlador de hardware USRP
<b>UHF</b>	Frecuencia Ultra Alta
<b>USB</b>	Bus Serie Universal
<b>USRP</b>	Periférico Universal de Software de Radio
<b>VHF</b>	Muy Alta Frecuencia
<b>VNA</b>	Analizador de Redes Vectoriales

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] **ÁLVAREZ, René & SHAGÑAY, Sandra.** *Sistema radar para análisis y reconstrucción de perfiles topográficos a media escala* [en línea] (Tesis Pregrado). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2015. [Consulta: 05 de marzo de 2017]. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/4476/1/98T00071.pdf>
- [2] **ARSLAN, Hüseyin.** *Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems*. Vol. 10. Berlin : Springer, 2007.
- [3] **BARBERÁN MOREIRA, Jeneffer Joselin y DOMÍNGUEZ OROZCO, Rodrigo Fernando.** *Sistema radar para reconstrucción de objetos 3D* [en línea] (Tesis Pregrado). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2016. [Consulta: 10 de marzo de 2017]. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/5412/1/98T00092.pdf>
- [4] **BASSEM, R.** *Radar System Analysis and Design Using MATLAB*. 3 ed. Alabama : CRC Press, 2013.
- [5] **CHARVAT, Gregory.** *Small And Short Range Radar System*. United States of America. 2014.
- [6] **CONSTANZO, Sandra; et al. 2013.** "Potentialities of USRP Based Software Defined Radar Systems". *Progress in Electromagnetism Research B* [en línea], 2013, Vol. 53, págs. 417-435. [Consulta: 06 de enero de 2017]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/257393279\\_Potentialities\\_of\\_USRP-based\\_software\\_defined\\_radar\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/257393279_Potentialities_of_USRP-based_software_defined_radar_systems)
- [7] **DE LA MATA MOYA, David.** *Diseño de detectores robustos en aplicaciones radar* [en línea] (Tesis) (Doctoral). Universidad de Alcalá, Madrid, España. 2012. [Consulta: 16 de abril de 2017]. Disponible en: <http://dspace.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/17143/Dise%C3%B1o%20de%20Detectores%20Robustos%20en%20Aplicaciones%20Radar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] **ETTUS RESEARCH.** *Board Mounted GPSDO (OCXO) Recommended for USRP X300/X310*. [En línea]. Estados Unidos: Ettus Research, 2010. [Consulta: 01 de febrero de 2017]. Disponible en: <https://www.ettus.com/product/details/GPSDO-MINI>.

- [9] **ETTUS RESEARCH.** *USRP B210 (Board Only)*. [En línea]. Estados Unidos: Ettus Research, 2010. [Consulta: 28 de diciembre de 2016]. Disponible en: <https://www.ettus.com/product/details/UB210-KIT>.
- [10] **ETTUS RESEARCH.** *USRP B200/B210 Bus Series*. [En línea]. Estados Unidos: Ettus Research, 2010. [Consulta: 05 de mayo de 2017]. Disponible en: [https://www.ettus.com/content/files/b200-b210\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.ettus.com/content/files/b200-b210_spec_sheet.pdf).
- [11] **GNURADIO.** *Main Page*. [En línea] 2017. [Consulta: 20 de abril de 2017]. Disponible en: [https://wiki.gnuradio.org/index.php/Main\\_Page](https://wiki.gnuradio.org/index.php/Main_Page).
- [12] **GÓMEZ, Fernandez & SALAR, Emilio.** TIPOS DE RADAR. *TIPOS DE RADAR*. [Blog] 25 de mayo de 2009. [Consulta: 30 de abril de 2017]. Disponible en: <http://electromagnetismo2009.blogspot.com/2009/05/3.html>.
- [13] **GUTIERREZ, Carlos & NIETO, Angel.** *Teledeteccion: nociones y aplicaciones*. España, Salamanca : 2006.
- [14] **HERNÁNDEZ, Enrique; et al.** "Uso de FPGA para realizar compresión del pulso de radar". *Científica*, Vol. 9 (2005), (Venezuela) pp 73-81.
- [15] **MACARIO, Manuel Munguia & TREVIÑO, Rodolfo Rubén.** *Diseño de una estación base gsm usando openbits y tarjeta de desarrollo usrp b210*. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. 07, 2016.
- [16] **MATHWORKS.** *System Requirements & Platform Availability*. [En línea]. Estados Unidos: Mathworks, 2017. [Consulta: 16 de febrero de 2017]. Disponible en: [https://www.mathworks.com/products/matlab/choosing\\_hardware.html](https://www.mathworks.com/products/matlab/choosing_hardware.html).
- [17] **MEJÍA, Francis; et al.** *Implementar un DOMAIN controller basado en el protocolo LDAP, que incluya servicios GATEWAY bajo plataformas LINUX, para ser usado en las aulas informáticas educativas gubernamentales del Municipio de Metapán* [en línea] (Tesis Pregrado). Universidad Francisco Gavidia, San Salvador, El Salvador. 2012. [Consulta: 22 de enero de 2017]. Disponible en: <http://ri.ufg.edu.sv/jspui/bitstream/11592/4188/2/371.102-M516i.pdf>
- [18] **MENÉNDEZ, Edgardo.** *Grupo de Aviación de Caza*. [En línea] 25 de julio de 2015. [Consulta: 25 de 03 de 2017]. Disponible en: [http://www.simbolicodecaza.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=178:radar&catid=52:articulos-profesionales-lunes&Itemid=194](http://www.simbolicodecaza.org/index.php?option=com_content&view=article&id=178:radar&catid=52:articulos-profesionales-lunes&Itemid=194).

[19] **MERCHÁN, Christian Vladimir.** *Diseño e implementación de un sistema radar utilizando sistema sdr a través de tecnología usrp para aplicaciones topográficas* [en línea] (Tesis Pregado). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2016. [Consulta: 13 de abril de 2017]. Disponible en:  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6417/1/98T00121.pdf>

[20] **NATIONAL INSTRUMENTS.** *Radio definido por software* [En línea]. Ecuador: National Instruments, 2017. [Consulta: 16 de mayo de 2016]. Disponible en:  
<http://www.ni.com/sdr/esa/>.

[21] **PATIÑO, Mendoza; et al.** *Programación de una plataforma sdr (software defined radio) para la detección de minas antipersonas* [en línea] (Tesis Pregado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. 2014. [Consulta: 03 de noviembre de 2016]. Disponible en:  
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/16514/MendozaPatinoEmeleDeJesus2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[22] **REQUENA CARRIÓN, Jesús & BELTRÁN MOLINA, Ferney A.** *Modulaciones Digitales*. Londres, UK & Bogotá, Colombia : 2015.

[23] **RICHARD, Mark.** *Principles Of Modern Radar*. United States of America : Katie Janelle, 2010.

[24] **SARAGURO SARANGO, Brayann Osmany.** *Implementación de un sistema de transmisiones para televisión digital terrestre en el Ecuador a través de módulos USRP* [en línea] (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2016. [Consulta: 10 de abril de 2017]. Disponible en:  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6386>


[25] **WOLFF, Christian.** *Radar Tutorial*. [En línea] [Consulta: 16 de mayo de 2017]. Disponible en:  
<http://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html>.

[26] **YANG, Yunqiang & FATHY, Aly.** "Development and implementation of a real-time see-through-wall radar system based on FPGA". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47, n° 5 (2009). pp. 1270-1280.



## ANEXOS


### ANEXO A: Datasheet USRP B210



**USRP™ B200/B210  
Bus Series**

**FEATURES**

- RF coverage from 70 MHz – 6 GHz
- GNU Radio, C++ and Python APIs
- USB 3.0 SuperSpeed interface
- Standard-B USB 3.0 connector
- Flexible rate 12 bit ADC/DAC
- Grounded mounting holes



**USRP B200**


- 1 TX & 1 RX, Half or Full Duplex
- Xilinx Spartan 6 XC6SLX75 FPGA
- Up to 56 MHz of instantaneous bandwidth
- USB Bus powered

**USRP B210**

- 2 TX & 2 RX, Half or Full Duplex
- Fully-coherent 2x2 MIMO capability
- Xilinx Spartan 6 XC6SLX150 FPGA
- Up to 56 MHz of instantaneous bandwidth in 1x1
- Up to 30.72 MHz of instantaneous bandwidth in 2x2
- Includes DC power supply
- GPIO capability

**USRP B200/B210 Product Overview**

The USRP B200 and B210 hardware covers RF frequencies from 70MHz to 6 GHz, has a Spartan6 FPGA, and USB 3.0 connectivity. This platform enables experimentation with a wide range of signals including FM and TV broadcast, cellular, Wi-Fi, and more. The USRP B200 features one receive and one transmit channel in a bus-powered design. The USRP B210 extends the capabilities of the B200 by offering a total of two receive and two transmit channels, incorporates a larger FPGA, GPIO, and includes an external power supply. Both use an Analog Devices RFIC to deliver a cost-effective RF experimentation platform, and can stream up to 56 MHz of instantaneous bandwidth over a high-bandwidth USB 3.0 bus on select USB 3.0 chipsets (with backward compatibility to USB 2.0). Because the B200 and B210 are enabled with our USRP Hardware Driver™ (UHD), users can develop their applications and seamlessly port their designs to high-performance or embedded USRPs such as the USRP X310 or USRP E310. UHD is an open-source, cross-platform driver that can run on Windows, Linux, and MacOS. It provides a common API, which is used by several software frameworks, such as GNU Radio. With this software support, users can collaborate with a vibrant community of enthusiasts, students, and professionals that have adopted USRP products for their development. As a member of this community, users can find assistance for application development, share knowledge to further SDR technology, and contribute their own innovations.





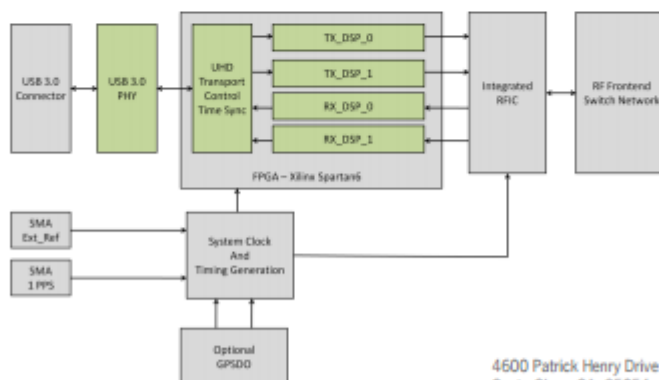
## USRP™ B200/B210 Bus Series

Spec	Typ.	Unit
<b>Power</b>		
DC Input	6	V
<b>Conversion Performance and Clocks</b>		
ADC Sample Rate (max)	61.44	MS/s
ADC Resolution	12	bits
ADC Wideband SFDR	78	dBc
DAC Sample Rate (max)	61.44	MS/s
DAC Resolution	12	bits
Host Sample Rate (16b)**	61.44	MS/s
Frequency Accuracy	±2.0	ppm
W/ GPS Unlocked TCXO Reference	±75	ppb
W/ GPS Locked TCXO Reference	< 1	ppb

Spec	Typ.	Unit
<b>RF Performance(single channel)</b>		
SSB/LO Suppression	-35/50	dBc
3.5 GHz	1.0	deg RMS
6 GHz	1.5	deg RMS
Power Output	>10	dBm
IIP3 (@ typ NF)	-20	dBm
Receive Noise Figure	<8	dB
<b>Physical</b>		
Dimensions	9.7x15.5x1.5	cm
Weight	350	g

\*All specifications are subject to change without notice.

\*\* See benchmark results for sample rates in various configurations.



### About Ettus Research

Ettus Research is an innovative provider of software defined radio hardware, including the original Universal Software Radio Peripheral (USRP) family of products. Ettus Research is a leader in the GNU Radio open-source community, and enables users worldwide to address a wide range of research, industry and defense applications. The company was founded in 2004 and is based in Santa Clara, California. As of 2010, Ettus Research is a wholly owned subsidiary of National Instruments.

4600 Patrick Henry Drive  
Santa Clara, CA 95054

P 408.610.6399 [www.ettus.com](http://www.ettus.com)  
F 866.807.9801



## ANEXO B: Código para determinar valores de número de mediciones y espacio de ancho de banda del valor máximo

```
clear all;
close all;

d=0;
for ii=1:100; %numero de muestras de 1 a 100 metros
d=d+1; %distancia en metros

n=input('ingrese el numero de mediciones n');
m=input('ingrese el espacio de ancho de banda m en MHz');
B=25e6+m;

for k=1:n

    B=B-m; %ancho de banda para generar señal
    c=3e8; %velocidad de la luz
    dm=1000; %distancia maxima (m)
    res=c/(2*B); %valor de resolucion
    tf=(2*dm)/c; %tiempo maximo (s)
    Fs=3*B; %frecuencia de muestreo (Hz)
    Ts=1/Fs; %tiempo de muestreo (s)
    t = 0:Ts:tf;
    A=1;

    senfmcw = phased.FMCWWaveform('SampleRate',Fs,'SweepTime',tf,...
    'SweepBandwidth',B,'SweepDirection','Up',...
    'NumSweeps',1); %funcion para generar señal chirp
    y=(step(senfmcw));
    y=real(y); %señal transmitida
    N=length(y);
    shif=round((d*N)/dm); %Desplazamiento para similar retardo
    ya=[zeros(1,shif),y]; %señal recibida
    ya=ya(1:N);

    %procesamiento de señal para obtener la distancia del objetivo
    p=y.*ya; %multiplicacion señal transmitida/recibida
    ga3=abs(fft(p));
    ga3=ga3(1:N/2);
    x=(Fs*dm)/(2*(B));
    xf = linspace(0,x,length(ga3));
    pos=find(ga3==max(ga3));
    dist=xf(pos); %posicion del objetivo

    %matriz para almacenar valores de posicion de acuerdo a cada medida
    v(k,1)=dist-res;
    v(k,2)=dist;
    v(k,3)=B/1e6;
    v(k,4)=res;
end

%algoritmo para optimizar la resolucion

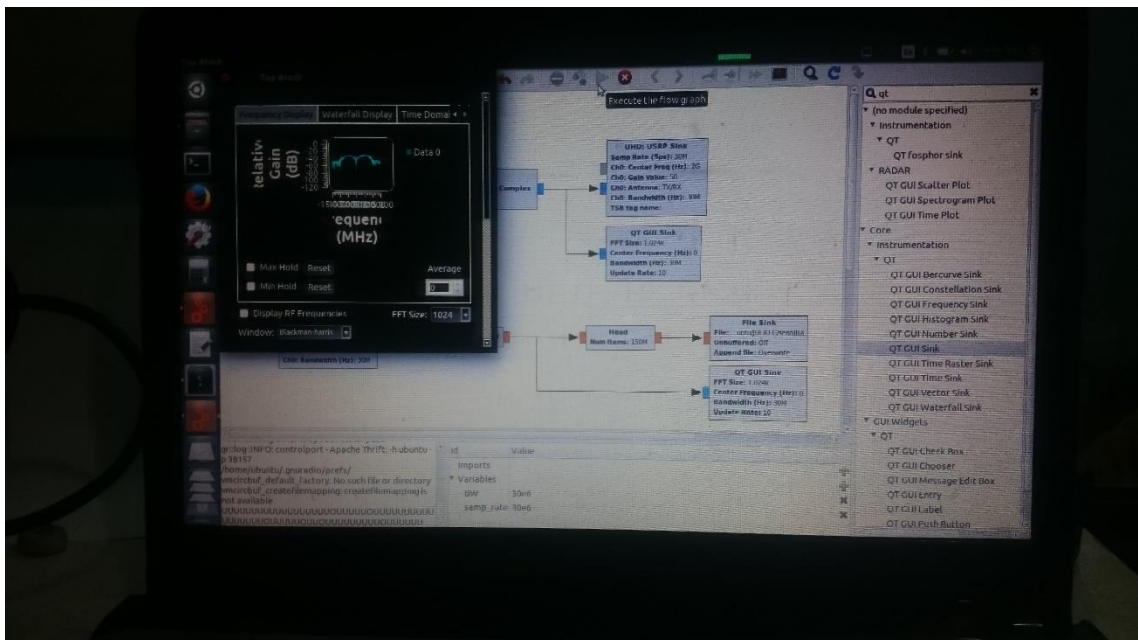
for h=1:n %ciclo para encontrar el mayor valor de la
for i=1:n-h %columna 1 de la matriz v
if v(i,1)< v(i+1,1)
```

```
aux=v(i,1);
v(i,1)=v(i+1,1);
v(i+1,1)=aux;
end
end
end

for h=1:n           %ciclo para encontrar el menor valor de la
for i=1:n-h        %columna 2 de la matriz v
if v(i,2)> v(i+1,2)
aux=v(i,2);
v(i,2)=v(i+1,2);
v(i+1,2)=aux;
end
end
end

%el objetivo encontrado aplicando el algoritmo se almacena en la
%fila 1 de la matriz v
```

## ANEXO C: Medidas realizadas con la USRP B210



## ANEXO D: Algoritmo para mejorar la resolución de la tarjeta USRP B210

```
clear all;
close all;

n=14;
m=0.5e6;
d=input('ingrese la distancia del objetivo para simular retardo');
BW=25e6+m;
fs=3*BW;
dist=1000;
c=3e8;
res=c/(2*BW); %valor de resolucion
tf=(2*dist)/3e8;
Ts=1/fs;
t = 0:Ts:tf;

senfmcw = phased.FMCWWaveform('SampleRate',fs,'SweepTime',tf,...
    'SweepBandwidth',BW,'SweepDirection','Up','NumSweeps',1);
x = (step(senfmcw));
x1=real(x);
write_float_binary(x1, 'senalTX'); %SE ALMACENA SENAL EN ARCHIVO .DAT
shif=(20*length(x1))/100;
N1=length(x1);

y =fopen('senalRX.dat', 'rb'); %LEE SENAL RX ALMACENADA
recESC = fread (y, [1,N1], 'float'); %DESDE gnuradio

shif=round((d*N)/dm); %Desplazamiento para simular retardo
recl=[zeros(1,shif),recESC];
recl=recl(1:N);

%procesamiento de señal para obtener la distancia del objetivo
p=x1'.*recl;
ga3=abs(fft(p));
ga3=ga3(1:N/2);
xx=(fs*dist)/(2*(BW));
xf = linspace(0,xx,length(ga3));
pos=find(ga3==max(ga3));
dist=xf(pos); %posicion del objetivo

%matriz para almacenar valores de posicion de acuerdo a cada medida
v(k,1)=dist-res;
v(k,2)=dist;
v(k,3)=B/1e6;
v(k,4)=res;

%algoritmo para optimizar la resolucion

for h=1:n %ciclo para encontrar el mayor valor de la
for i=1:n-h %columna 1 de la matriz v
if v(i,1)< v(i+1,1)
aux=v(i,1);
v(i,1)=v(i+1,1);
v(i+1,1)=aux;
end
end
```

```
end

for h=1:n           %ciclo para encontrar el menor valor de la
for i=1:n-h       %columna 2 de la matriz v
if v(i,2) > v(i+1,2)
aux=v(i,2);
v(i,2)=v(i+1,2);
v(i+1,2)=aux;
end
end
end

resultado=(v(1,1)+v(1,2))/2;
disp('El objetivo con medicion corregida se encuentra a: ');
disp(resultado)
```