



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

**“DESARROLLO DE SISTEMA DE RADIACIÓN CON SOFTWARE  
DEFINIDO POR RADIO PARA APLICACIONES MULTIANTENA  
MIMO Y RADARES UTILIZANDO TARJETAS USRP”**

**Trabajo de titulación**

**Tipo:** Proyecto Técnico

Presentado para obtener el grado académico de:

**INGENIERA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y  
REDES**

**AUTORA:** DANIELA ESTEFANÍA MERINO RODRÍGUEZ

**DIRECTOR:** Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés PhD.

Riobamba – Ecuador

2021

**@2021, Daniela Estefanía Merino Rodríguez**

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.

Yo, Daniela Estefanía Merino Rodríguez, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 29 de marzo de 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Daniela Merino', with a large, stylized flourish above the name.

**Daniela Estefanía Merino Rodríguez**

**060377335-9**

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

El tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto Técnico “**DESARROLLO DE SISTEMA DE RADIACIÓN CON SOFTWARE DEFINIDO POR RADIO PARA APLICACIONES MULTIANTENA MIMO Y RADARES UTILIZANDO TARJETAS USRP**”, realizado por la señorita: **DANIELA ESTEFANÍA MERINO RODRÍGUEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Raúl Marcelo Lozada Yáñez		
<b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	.....	29-03-2021
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés PhD.		
<b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE</b>		
<b>TITULACIÓN</b>	.....	29-03-2021
Ing. Paúl David Moreno Avilés PhD.		
<b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	.....	29-03-2021



## DEDICATORIA

Quiero dedicar el presente trabajo de titulación, a Dios por haberme dado una segunda oportunidad de vida, por ser mi pilar, guía y fuerza en cada paso que doy, a mis amados padres, Mónica Rodríguez y Víctor Merino, por siempre creer en mí, por haberme apoyado y alentado durante todo el camino, por enseñarme a conseguir mis metas con esfuerzo y dedicación, pero en especial quiero dedicárselo a mi madre por haber sido mi más grande inspiración, por ser esa voz de aliento en los momentos que creía no poder más y por siempre haber luchado con mucho sacrificio para darme la mejor educación, le dedico con mucho amor este logro porque si estoy donde estoy es gracias a ella. A mi hermano porque a pesar de ser más pequeño, siempre supo ayudarme y respaldarme en cada decisión que he tomado, además de que espero ser un ejemplo para él en un futuro para que logre cosas mucho más grandes de las que yo he logrado. A mi abuelita Laura Ledesma, que es como una madre para mí, por todo el apoyo que me ha brindado, por sus consejos, por enseñarme a ser paciente, tolerante y sobre todo por enseñarme que en esta vida uno debe luchar muy duro hasta conseguir lo que tanto anhela. Se lo dedico especialmente porque de ella he aprendido a luchar a pesar de las adversidades, a ser fuerte y no rendirme nunca. A mi Abuelito Alberto Rodríguez, por ser como un padre, por haber estado a mi lado siempre, por apoyarme y hacer hasta lo imposible para que yo pudiera alcanzar este logro, esta Tesis se realizó gracias a él en muchos sentidos, porque fue aquella persona que me guio y me acompañó en cada paso. A mi tía Marcela Rodríguez, por haber sido un pilar fundamental, por su sabiduría y consejos, por enseñarme a ser decidida y visionaria. A mi compañera durante 6 largos años, mi mascota Pitufina, por siempre haber llenado mi vida de alegría hasta su último respiro, por siempre haber estado conmigo en los largos desvelos de estudio y a mi mascota Perla por haber llegado a cambiar mi vida, por toda la alegría y fuerza que me dio durante todo este tiempo.

**Daniela.**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haber sido mi fortaleza y por guiarme siempre por el camino correcto para cumplir todas mis metas, a mis padres por todo el esfuerzo y los sacrificios que han hecho por darme una buena educación, además de siempre haberme alentado a realizar las cosas humildad y responsabilidad. Por haber sembrado en mí buenos valores y sobre todo por ayudarme a levantar siempre que me caía. A mi hermano por siempre haberme apoyado, ayudado y por ser una gran compañía durante el trayecto. Agradezco a mis abuelitos por ser uno de los pilares fundamentales durante mi vida estudiantil. A mis abuelitos, Laura Ledesma y Alberto Rodríguez, por ser mis segundos padres. Les agradezco infinitamente por todos los días que estuvieron a mi lado ayudándome en cualquier cosa por más mínima que pudo haber sido. Por no dejarme desistir y por siempre haber estado al pendiente de cualquier cosa o problema que pude atravesar. A mi Tía, Marcela Rodríguez, por sus tan acertadas palabras de aliento, por siempre haber estado dispuesta a acompañarme en cualquier situación que se presentara y por nunca permitir que bajara la cabeza por más duro que sea el camino. A mi enamorado, David Abad, por haber sido mi fuerza en los momentos de dificultad, por siempre haberme ayudado a aclarar mis ideas y a resolver cualquier problema que se presentara. Le agradezco por su infinito amor y paciencia durante todo este proceso, por nunca haberme dejado sola y por recordarme constantemente que lo conseguiría. De la misma manera, agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en especial a mi querida Facultad de Informática y Electrónica por convertirse en un segundo hogar, a todos mis docentes por haber depositado en mí sus conocimientos con la esperanza de que los utilice de la mejor manera, de manera especial al Ing. Hugo Moreno por haber sido un gran mentor durante el desarrollo de toda la tesis y por todos los conocimientos que me ha brindado durante el camino.

**Daniela.**

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XXII
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	XXVI
ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....	XXXI
RESUMEN.....	XXXV
ABSTRACT.....	XXXV
CAPITULO I	
1. <b>DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1. <b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
1.2. <b>FORMULACION DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
1.3. <b>SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
1.4. <b>JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.4.1. <b><i>JUSTIFICACION TEORICA .....</i></b>	<b>3</b>
1.4.2. <b><i>JUSTIFICACION APLICATIVA .....</i></b>	<b>3</b>
1.5. <b>OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
1.5.1. <b><i>OBJETIVOS GENERALES.....</i></b>	<b>5</b>
1.5.2. <b><i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</i></b>	<b>5</b>
CAPITULO II	
INTRODUCCION.....	6
2. <b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
2.1. <b>Radiación Electromagnética .....</b>	<b>7</b>
2.1.1. <b><i>Ondas Electromagnéticas .....</i></b>	<b>7</b>
2.1.2. <b><i>Características de una onda electromagnética.....</i></b>	<b>9</b>
2.1.3. <b><i>Espectro Electromagnético .....</i></b>	<b>10</b>

2.1.4.	<b><i>Propagación de radiofrecuencias</i></b> .....	14
2.1.4.1.	<i>Propiedades ópticas de las ondas de radio</i> .....	14
2.1.5.	<b><i>Efectos de propagación de ondas RF básicos</i></b> .....	17
2.1.5.1.	<i>Pérdidas en el espacio libre</i> .....	17
2.1.5.2.	<i>Atenuación debido a la absorción atmosférica</i> .....	18
2.1.5.3.	<i>Desvanecimiento por centelleo</i> .....	18
2.1.6.	<b><i>Ecuaciones de Maxwell</i></b> .....	19
2.1.7.	<b><i>Propagación y Polarización de antenas</i></b> .....	24
2.1.7.1.	<i>Propagación por Polarización Vertical</i> .....	24
2.1.7.2.	<i>Propagación por Polarización Horizontal.</i> .....	25
2.1.8.	<b><i>Parámetros de Eficiencia</i></b> .....	26
2.1.8.1.	<i>Ruido</i> .....	26
2.1.8.2.	<i>Relación señal a ruido (SNR)</i> .....	27
2.1.8.3.	<i>Eficiencia espectral</i> .....	27
2.1.8.4.	<i>Tasa de Error de Bit (BER)</i> .....	28
2.1.8.5.	<i>Tasa de Error de Modulación (MER)</i> .....	29
2.2.	<b>Software Defined Radio (SDR)</b> .....	30
2.2.1.	<b><i>Historia</i></b> .....	30
2.2.2.	<b><i>Definición</i></b> .....	31
2.2.3.	<b><i>Arquitectura</i></b> .....	32
2.2.4.	<b><i>Niveles de SDR</i></b> .....	35
2.3.	<b>Tecnología MIMO</b> .....	37
2.3.1.	<b><i>Definición</i></b> .....	37
2.3.2.	<b><i>Capacidad de canal</i></b> .....	39
2.3.3.	<b><i>Diversidad en comunicación MIMO</i></b> .....	42
2.3.4.	<b><i>Diversidad espacial</i></b> .....	43
2.3.5.	<b><i>Codificación Espacio Temporal</i></b> .....	44
2.3.6.	<b><i>Multiplexación espacial</i></b> .....	45

2.3.7.	<b>Funcionamiento MIMO</b> .....	46
2.3.7.1.	<i>Propagación multicamino</i> .....	46
2.3.7.2.	<i>MIMO y la propagación multicamino</i> .....	48
2.3.8.	<b>Multiantenas MIMO (MU-MIMO)</b> .....	49
2.3.8.1.	<i>Clasificación de MU-MIMO</i> .....	50
2.3.8.2.	<i>Ventajas de MU-MIMO</i> .....	51
2.3.9.	<b>Modulación QPSK</b> .....	52
2.4.	<b>Tecnología Radar</b> .....	53
2.4.1.	<i>Historia de Radar</i> .....	53
2.4.2.	<i>Definición</i> .....	55
2.4.3.	<i>Funcionamiento</i> .....	55
2.4.4.	<i>Componentes básicos</i> .....	57
2.4.4.1.	<i>Transmisor</i> .....	57
2.4.4.2.	<i>Antena</i> .....	58
2.4.4.3.	<i>Receptor</i> .....	58
2.4.5.	<i>Ecuación Radar</i> .....	58
2.4.6.	<b>Clasificación de radar</b> .....	61
2.4.6.1.	<i>Por el número de antenas</i> .....	61
2.4.6.2.	<i>Según el objetivo</i> .....	63
2.4.6.3.	<i>Según su forma de onda</i> .....	64
2.4.6.4.	<i>Según la finalidad</i> .....	65
2.4.7.	<b>Banda de frecuencias para radar</b> .....	66
2.4.8.	<b>Aplicaciones de los sistemas radar</b> .....	68
2.4.9.	<b>Factores externos que afectan el funcionamiento</b> .....	69
2.4.10.	<b>Señales útiles para SDR</b> .....	70
2.4.10.1.	<i>Onda continua modulada en frecuencia (FMCW)</i> .....	70
2.4.11.	<i>Señal Chirp</i> .....	71
2.4.12.	<b>Análisis de Radar</b> .....	72

2.4.12.1.	<i>Resolución del sistema</i> .....	72
2.4.12.2.	<i>Distancia máxima</i> .....	73
2.4.12.3.	<i>Detección de objeto</i> .....	74
2.4.12.4.	<i>Distancia del objeto detectado</i> .....	75
2.5.	<b>Tarjetas USRP</b> .....	78
2.5.1.	<b>USRP 29-32</b> .....	79
2.5.1.1.	<i>Características</i> .....	79
2.5.1.2.	<i>Limitaciones</i> .....	83
2.6.	<b>Ansoft Designer</b> .....	84
2.7.	<b>LabView (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)</b> .....	86
2.8.	<b>Matlab</b> .....	88

### CAPITULO III

3.	<b>FASES Y PASOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO TÉCNICO</b> .....	90
3.1.	<b>Identificación técnica y teórica para tecnología SDR</b> .....	92
3.1.1.	<i>Resolución máxima</i> .....	92
3.1.2.	<i>Ancho de banda</i> .....	93
3.1.3.	<i>Distancia máxima</i> .....	93
3.1.4.	<i>Coefficiente de reflexión</i> .....	93
3.2.	<b>Diseño de grupo de antenas.</b> .....	95
3.2.1.	<i>Cálculos de diseño de la Antena</i> .....	97
3.2.1.1.	<i>Cálculo del parche rectangular</i> .....	97
3.2.1.2.	<i>Cálculo de la línea de transmisión.</i> .....	99
3.2.1.3.	<i>Cálculo de la línea de transmisión de 50 <math>\Omega</math>.</i> .....	101
3.2.1.4.	<i>Cálculo de las dimensiones del plano de tierra.</i> .....	103
3.2.2.	<i>Ancho de Banda</i> .....	105
3.2.3.	<i>Patrón de Radiación.</i> .....	106
3.3.	<b>Configuración de tarjetas USRP 2932</b> .....	107
3.3.1.	<i>Instalación del software USRP y conexión hacia la PC.</i> .....	107

3.3.2.	<i>Configuración de la dirección IP de las PCs</i> .....	108
3.4.	<b>Diseño de aplicación Tx – Rx de mensaje de texto.</b> .....	111
3.4.1.	<i>Transmisor</i> .....	112
3.4.2.	<i>Receptor</i> .....	116
3.5.	<b>Diseño de aplicación para procesamiento de las señales MIMO (MATLAB)</b> .....	119
3.6.	<b>Diseño de aplicación RADAR</b> .....	125
3.6.1.	<i>Transmisor</i> .....	126
3.6.2.	<i>Receptor</i> .....	128
3.7.	<b>Diseño de aplicación para procesamiento de las señales RADAR (Matlab)</b> .....	131
3.8.	<b>Identificación de las muestras e Implementación</b> .....	132
3.8.1.	<i>Definición de escenarios</i> .....	132
3.8.1.1.	<i>Escenario SISO polarización vertical</i> .....	133
3.8.1.2.	<i>Escenario SISO polarización horizontal</i> .....	135
3.8.1.3.	<i>Escenario SIMO polarización vertical</i> .....	137
3.8.1.4.	<i>Escenario SIMO polarización horizontal</i> .....	139
3.8.1.5.	<i>Escenario MIMO 2X2</i> .....	141
3.8.1.6.	<i>Escenario 1 RADAR (1TX-1RX) polarización vertical</i> .....	141
3.8.1.7.	<i>Escenario 1 RADAR (1TX-1RX) polarización horizontal</i> .....	143
3.8.1.8.	<i>Escenario 2 RADAR (1TX-2RX) polarización vertical.</i> .....	145
3.8.1.9.	<i>Escenario 2 RADAR (1TX-2RX) polarización horizontal.</i> .....	147
3.8.2.	<i>Área de muestro e Implementación</i> .....	149
<b>CAPITULO IV</b>		
4.	<b>MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	151
4.1.	<b>Resultados de Campo</b> .....	152
4.1.1.	<i>Datos escenario SISO polarización vertical</i> .....	152
4.1.1.1.	<i>Comparación de caracteres del mensaje enviado</i> .....	152
4.1.1.2.	<i>Comparación de puntos de la constelación TX respecto a RX mediante desviación estándar</i> .....	153

4.1.1.3.	<i>Relación señal/ruido SNR</i> .....	161
4.1.2.	<b><i>Datos escenario SISO polarización horizontal</i></b> .....	164
4.1.2.1.	<i>Comparación de caracteres del mensaje enviado</i> .....	164
4.1.2.2.	<i>Comparación de puntos de la constelación TX respecto a RX mediante desviación estándar</i> .....	165
4.1.2.3.	<i>Relación señal/ruido SNR</i> .....	173
4.1.3.	<b><i>Datos escenario SIMO polarización vertical</i></b> .....	176
4.1.3.1.	<i>Comparación de caracteres del mensaje enviado</i> .....	176
4.1.3.2.	<i>Comparación de puntos de la constelación TX respecto a RX mediante desviación estándar</i> .....	178
4.1.3.3.	<i>Relación señal/ruido SNR</i> .....	189
4.1.4.	<b><i>Datos escenario SIMO polarización horizontal</i></b> .....	193
4.1.4.1.	<i>Comparación de caracteres del mensaje enviado</i> .....	193
4.1.4.2.	<i>Comparación de puntos de la constelación TX respecto a RX mediante desviación estándar</i> .....	194
4.1.4.3.	<i>Relación señal/ruido SNR</i> .....	205
4.1.5.	<b><i>Datos escenario MIMO 2X2</i></b> .....	209
4.1.5.1.	<i>Comparación de señales mediante correlación</i> .....	209
4.1.5.2.	<i>Relación señal/ruido SNR</i> .....	212
4.1.6.	<b><i>Datos escenario 1 RADAR polarización vertical</i></b> .....	222
4.1.6.1.	<i>Comparación de señal TX y RX mediante correlación</i> .....	222
4.1.6.2.	<i>Tiempos de retardo</i> .....	225
4.1.6.3.	<i>Radargrama</i> .....	228
4.1.7.	<b><i>Datos escenario 1 RADAR polarización horizontal</i></b> .....	231
4.1.7.1.	<i>Comparación de señal tx y Rx mediante correlación</i> .....	232
4.1.7.2.	<i>Tiempos de retardo</i> .....	234
4.1.7.3.	<i>Radargrama</i> .....	237
4.1.8.	<b><i>Datos escenario 2 RADAR polarización vertical</i></b> .....	241
4.1.8.1.	<i>Comparación de señal TX y RX mediante correlación</i> .....	241



4.1.8.2.	<i>Tiempos de retardo</i> .....	243
4.1.8.3.	<i>Radargrama</i> .....	249
4.1.9.	<b><i>Datos escenario 2 RADAR polarización horizontal</i></b> .....	254
4.1.9.1.	<i>Comparación de señal TX y RX mediante correlación.</i> .....	254
4.1.9.2.	<i>Tiempos de retardo.</i> .....	256
4.1.9.3.	<i>Radargrama</i> .....	261
4.2.	<b>Análisis y Comparación de resultados.</b> .....	266
4.2.1.	<b><i>Resultado Final Escenario SISO</i></b> .....	266
4.2.1.1.	<i>Polarización Vertical.</i> .....	266
4.2.1.2.	<i>Polarización Horizontal.</i> .....	269
4.2.2.	<b><i>Resultado Final Escenario SIMO</i></b> .....	273
4.2.2.1.	<i>Con polarización vertical.</i> .....	273
4.2.2.2.	<i>Con polarización horizontal.</i> .....	278
4.2.3.	<b><i>Resultado Final Escenario MIMO 2x2</i></b> .....	283
4.2.3.1.	<i>Con ruido bajo.</i> .....	289
4.2.3.2.	<i>Con ruido medio.</i> .....	290
4.2.3.3.	<i>Con ruido alto.</i> .....	291
4.2.4.	<b><i>Resultado Final Escenario 1 RADAR</i></b> .....	292
4.2.4.1.	<i>Con polarización vertical.</i> .....	292
4.2.4.2.	<i>Con polarización horizontal.</i> .....	296
4.2.5.	<b><i>Resultado Final Escenario 2 RADAR</i></b> .....	301
4.2.5.1.	<i>Con polarización vertical.</i> .....	301
4.2.5.2.	<i>Con polarización horizontal.</i> .....	305
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	311
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	313
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b>	Regiones del espectro electromagnético. ....	11
<b>Tabla 2-2:</b>	Bandas de frecuencias para radar. ....	67
<b>Tabla 3-2:</b>	Características transmisor USRP 2932.....	79
<b>Tabla 4-2:</b>	Características receptor USRP 2932. ....	81
<b>Tabla 5-2:</b>	Características del oscilador GPS de USRP 2932. ....	82
<b>Tabla 6-2:</b>	Características de potencia de USRP 2932.....	82
<b>Tabla 7-2:</b>	Características físicas de USRP 2932. ....	83
<b>Tabla 8-2:</b>	Requerimientos Ansoft Designer. ....	86
<b>Tabla 1-3:</b>	Factores de rendimiento relevantes de antenas microstrip. ....	96
<b>Tabla 2-3:</b>	Dimensiones de la antena. ....	104
<b>Tabla 3-3:</b>	Documentos y datos recopilados mediante LabView TX-RX del mensaje. ....	119
<b>Tabla 4-3:</b>	Factores de evaluación de pruebas. ....	150
<b>Tabla 1-4:</b>	Factores de evaluación de pruebas. ....	151
<b>Tabla 2-4:</b>	ID desviación estándar para los cuadrantes del diagrama de constelación. ....	153
<b>Tabla 3-4:</b>	Resultado de desviación estándar SISO polarización vertical. ....	154
<b>Tabla 4-4:</b>	Desviación estándar mínima, máxima y promedio SISO polarización vertical. ...	157
<b>Tabla 5-4:</b>	Resultado de SNR escenario SISO con polarización vertical. ....	161
<b>Tabla 6-4:</b>	SNR mínimo, máximo y promedio SISO polarización vertical.....	163
<b>Tabla 7-4:</b>	Resultado de desviación estándar escenario SISO polarización horizontal. ....	165
<b>Tabla 8-4:</b>	Desviación estándar mínima, máxima y promedio SISO p.h.....	169
<b>Tabla 9-4:</b>	Resultado de SNR escenario SISO polarización horizontal. ....	173
<b>Tabla 10-4:</b>	SNR mínimo, máximo y promedio SISO polarización horizontal. ....	175
<b>Tabla 11-4:</b>	Resultado de desviación estándar escenario SIMO polarización vertical. ....	178

<b>Tabla 12-4:</b>	Desviación estándar mínima, máxima y promedio SIMO p.v.....	181
<b>Tabla 13-4:</b>	Resultado de SNR escenario SIMO polarización vertical. ....	189
<b>Tabla 14-4:</b>	SNR mínimo, máximo y promedio SIMO polarización vertical. ....	191
<b>Tabla 15-4:</b>	Resultado de desviación estándar SIMO polarización vertical- horizontal.....	194
<b>Tabla 16-4:</b>	Resultado de desviación estándar SIMO polarización vertical - horizontal.....	198
<b>Tabla 17-4:</b>	Resultado de SNR escenario SIMO polarización vertical - horizontal. ....	205
<b>Tabla 18-4:</b>	Resultado de SNR escenario SIMO polarización vertical - horizontal. ....	207
<b>Tabla 19-4:</b>	Resultado de SNR escenario MIMO 2X2 con ruido bajo.....	212
<b>Tabla 20-4:</b>	SNR mínimos, máximos y promedios MIMO 2x2 con ruido bajo. ....	215
<b>Tabla 21-4:</b>	Resultado de SNR escenario MIMO 2X2 con ruido medio.....	216
<b>Tabla 22-4:</b>	SNR mínimos, máximos y promedios MIMO 2X2 con ruido medio. ....	218
<b>Tabla 23-4:</b>	Resultado de SNR escenario MIMO 2X2 con ruido alto. ....	220
<b>Tabla 24-4:</b>	SNR mínimos, máximos y promedios MIMO 2x2 con ruido alto. ....	222
<b>Tabla 25-4:</b>	Resultado de tiempos de retardo escenario 1 radar con polarización vertical. ....	225
<b>Tabla 26-4:</b>	Mínimo, máximo y promedio de tiempos de retardo escenario 1 radar p.v.....	227
<b>Tabla 27-4:</b>	Resultado de Radargrama escenario 1 radar con polarización vertical. ....	228
<b>Tabla 28-4:</b>	Mínimo, máximo y promedio de distancias del objeto escenario 1 radar p.v....	231
<b>Tabla 29-4:</b>	Resultado de tiempos de retardo, escenario 1 radar polarización horizontal. ....	234
<b>Tabla 30-4:</b>	Mínimo, máximo y promedio de tiempos de retardo, escenario 1 radar p.h.....	236
<b>Tabla 31-4:</b>	Resultado de Radargrama, escenario 1 radar con polarización horizontal.....	237
<b>Tabla 32-4:</b>	Mínimo, máximo y promedio de distancias del objeto, escenario 1 radar p.h. ...	240
<b>Tabla 33-4:</b>	Resultado de los tiempos de retardo escenario 2 radar polarización vertical. ....	243
<b>Tabla 34-4:</b>	Resultado de tiempo de retardo escenario 2 radar con polarización vertical. ....	245
<b>Tabla 35-4:</b>	Resultado de Radargrama escenario 2 radar con polarización vertical. ....	249
<b>Tabla 36-4:</b>	Mínimo, máximo y promedio de distancias del objeto, escenario 2 radar p.v ...	251
<b>Tabla 37-4:</b>	Resultado de tiempo de retardo escenario 2 radar polarización v - h. ....	256
<b>Tabla 38-4:</b>	Mínimo, máximo y promedio de tiempo de retardo radar polarización v-h. ....	258
<b>Tabla 39-4:</b>	Resultado de Radargrama escenario 2 radar polarización v- h.....	261

<b>Tabla 40-4:</b>	Resultado de Radargrama escenario 2 radar con polarización v - h. ....	263
<b>Tabla 41-4:</b>	Confiabilidad TX-RX escenario SISO con polarización vertical. ....	266
<b>Tabla 42-4:</b>	Desviaciones estándar máximas SISO con polarización vertical. ....	268
<b>Tabla 43-4:</b>	Valores SNR máximos del escenario SISO con polarización vertical. ....	269
<b>Tabla 44-4:</b>	Confiabilidad TX-RX escenario SISO con polarización horizontal. ....	270
<b>Tabla 45-4:</b>	Desviaciones estándar máximas SISO con polarización horizontal. ....	271
<b>Tabla 46-4:</b>	Valores SNR máximos del escenario SISO con polarización horizontal. ....	272
<b>Tabla 47-4:</b>	Confiabilidad TX-RX escenario SIMO con polarización vertical. ....	274
<b>Tabla 48-4:</b>	Desviaciones estándar máximas SIMO con polarización vertical. ....	276
<b>Tabla 49-4:</b>	Valores SNR máximos del escenario SIMO con polarización vertical. ....	277
<b>Tabla 50-4:</b>	Confiabilidad TX-RX escenario SIMO con polarización horizontal. ....	279
<b>Tabla 51-4:</b>	Desviaciones estándar máximas SIMO con polarización vertical. ....	280
<b>Tabla 52-4:</b>	Valores SNR máximos del escenario SIMO con polarización horizontal. ....	282
<b>Tabla 53-4:</b>	Valores SNR máximos del escenario MIMO 2x2 con ruido bajo. ....	290
<b>Tabla 54-4:</b>	Valores SNR máximos del escenario MIMO 2x2 con ruido medio. ....	290
<b>Tabla 55-4:</b>	Valores SNR máximos del escenario MIMO 2x2 con ruido alto. ....	291
<b>Tabla 56-4:</b>	Resultados finales de tiempos de retardo escenario radar p.v. ....	295
<b>Tabla 57-4:</b>	Resultados finales de distancias del objeto escenario 1 radar p.v. ....	296
<b>Tabla 58-4:</b>	Resultados finales de tiempos de retardo escenario 1 radar p.h. ....	298
<b>Tabla 59-4:</b>	Resultados finales de distancias del objeto escenario 1 radar p.h. ....	299
<b>Tabla 60-4:</b>	Resultados finales de tiempos de retardo en escenario 2 radar p.v. ....	303
<b>Tabla 61-4:</b>	Resultados finales de distancias del objeto, escenario 2 radar p.v. ....	305
<b>Tabla 62-4:</b>	Resultados finales de tiempos de retardo escenario 2 radar p.h. ....	307
<b>Tabla 63-4:</b>	Resultados finales de las distancias del objeto escenario 2 radar p.h. ....	309

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Esquema aplicación multiantena MIMO 2X2 .....	4
<b>Figura 2-1:</b>	Esquema aplicación multiantena MIMO 2X2 .....	4
<b>Figura 1-2:</b>	Onda Electromagnética. ....	8
<b>Figura 2-2:</b>	Características de una onda. ....	9
<b>Figura 3-2:</b>	Espectro Electromagnético. ....	11
<b>Figura 4-2:</b>	Longitudes de onda para la luz visible.....	13
<b>Figura 5-2:</b>	Refracción en una frontera plana entre dos medios. ....	15
<b>Figura 6-2:</b>	Reflexión electromagnética en una frontera plana entre dos medios. ....	16
<b>Figura 7-2:</b>	Teorema Stoke.....	22
<b>Figura 8-2:</b>	Teorema de la divergencia.....	23
<b>Figura 9-2:</b>	Polarización vertical. ....	25
<b>Figura 10-2:</b>	Polarización horizontal. ....	25
<b>Figura 11-2:</b>	Tasa de error de modulación. ....	30
<b>Figura 12-2:</b>	Arquitectura SDR.....	33
<b>Figura 13-2:</b>	Componentes de DDC.....	34
<b>Figura 14-2:</b>	Componentes de DUC.....	35
<b>Figura 15-2:</b>	Diagrama de bloques simplificado de SDR de nivel 3.....	36
<b>Figura 16-2:</b>	Esquema MIMO.....	37
<b>Figura 17-2:</b>	Modelo de canal MIMO. ....	38
<b>Figura 18-2:</b>	Multiplexación espacial.....	45
<b>Figura 19-2:</b>	Propagación multicamino. ....	47
<b>Figura 20-2:</b>	Señales multicamino desfasadas respecto a la señal original. ....	47
<b>Figura 21-2:</b>	Señales multicamino desfasadas 180 grados. ....	48
<b>Figura 22-2:</b>	Señales multicamino desfasadas 180 grados. ....	49
<b>Figura 23-2:</b>	Diagrama de constelación QPSK.....	53

<b>Figura 24-2:</b>	Elementos principales de un sistema radar. ....	56
<b>Figura 25-2:</b>	Radars monoestático. ....	61
<b>Figura 26-2:</b>	Radars Biestático. ....	62
<b>Figura 27-2:</b>	Radars Multiestático. ....	63
<b>Figura 28-2:</b>	Radars de onda pulsada. ....	64
<b>Figura 29-2:</b>	Radars de seguimiento. ....	65
<b>Figura 30-2:</b>	Radars de exploración. ....	66
<b>Figura 31-2:</b>	Bandas de frecuencias para radar. ....	66
<b>Figura 32-2:</b>	Forma de onda Down-chirp. ....	71
<b>Figura 33-2:</b>	Forma de onda up-chirp. ....	71
<b>Figura 34-2:</b>	Forma de onda triangular. ....	72
<b>Figura 35-2:</b>	Señal Tx - reflejada. ....	73
<b>Figura 36-2:</b>	Señal transmitida. ....	74
<b>Figura 37-2:</b>	Señal recibida. ....	75
<b>Figura 38-2:</b>	Señal chirp transmitida. ....	76
<b>Figura 39-2:</b>	Señal chirp recibida. ....	77
<b>Figura 40-2:</b>	Multiplicación de señal chirp transmitida y recibida. ....	77
<b>Figura 41-2:</b>	Radargrama. ....	78
<b>Figura 42-2:</b>	Tarjeta USRP 2932. ....	79
<b>Figura 43-2:</b>	Espectro de frecuencia con 20 MHz sin ninguna señal conectada a la entrada. ...	84
<b>Figura 44-2:</b>	Espectro de frecuencia con 1 MHz sin ninguna señal conectada a la entrada. ...	84
<b>Figura 45-2:</b>	LabView. ....	87
<b>Figura 46-2:</b>	Panel frontal de LabView. ....	87
<b>Figura 47-2:</b>	Diagrama de bloques LabView. ....	88
<b>Figura 48-2:</b>	Matlab. ....	89
<b>Figura 1-3:</b>	Onda transmitida y reflejada. ....	94
<b>Figura 2-3:</b>	Cálculo del acoplador cuarto de onda. ....	100
<b>Figura 3-3:</b>	Diseño de la antena a 3GHz. ....	104

<b>Figura 4-3:</b>	Parámetro S11 de la antena de 3GHz. ....	105
<b>Figura 5-3:</b>	Impedancia de la antena de 3GHz. ....	106
<b>Figura 6-3:</b>	Patrón de radiación de la antena de 3GHz. ....	107
<b>Figura 7-3:</b>	Conexión PC – USRP 932.....	108
<b>Figura 8-3:</b>	Configuración red ethernet. ....	109
<b>Figura 9-3:</b>	Configuración de dirección IP de USRP1 en PC1. ....	109
<b>Figura 10-3:</b>	Configuración de dirección IP de USRP2 en PC2. ....	110
<b>Figura 11-3:</b>	Configuración de parámetros para la comunicación con las tarjetas USRP. ....	112
<b>Figura 12-3:</b>	Panel Frontal Transmisor de mensaje. ....	113
<b>Figura 13-3:</b>	Panel Frontal Transmisor de mensaje. ....	114
<b>Figura 14-3:</b>	Modulación QPSK panel frontal.....	115
<b>Figura 15-3:</b>	Diagrama de bloques Modulación QPSK en TX. ....	115
<b>Figura 16-3:</b>	Diagrama de bloques generación de mensaje. ....	116
<b>Figura 17-3:</b>	Diagrama de bloques para el procesamiento del mensaje. ....	116
<b>Figura 18-3:</b>	Panel Frontal Receptor de mensaje.....	117
<b>Figura 19-3:</b>	Diagrama de bloques RX de mensaje. ....	117
<b>Figura 20-3:</b>	Diagrama de bloques demodulación QPSK en RX.....	118
<b>Figura 21-3:</b>	Diagrama de bloques procesamiento del mensaje recibido.....	118
<b>Figura 22-3:</b>	Archivos .xlsx obtenidos. ....	119
<b>Figura 23-3:</b>	Aplicación para procesamiento de datos Escenario SISO.....	121
<b>Figura 24-3:</b>	Aplicación para procesamiento de datos escenario SIMO. ....	122
<b>Figura 25-3:</b>	Sistema MIMO 2X2. ....	122
<b>Figura 26-3:</b>	Filtro chebyshev diseñado. ....	124
<b>Figura 27-3:</b>	Aplicación para procesamiento de datos Escenario MIMO 2x2. ....	124
<b>Figura 28-3:</b>	Panel frontal Sistema Radar. ....	126
<b>Figura 29-3:</b>	Bloques TX/RX USRP en LabView.....	126
<b>Figura 30-3:</b>	Parámetros para la generación de señal chirp up. ....	127
<b>Figura 31-3:</b>	Diagrama de bloques para la transmisión de la señal chirp.....	127

<b>Figura 32-3:</b>	Señal chirp transmitida en tiempo y frecuencia. ....	128
<b>Figura 33-3:</b>	Bloques RX USPR de LabView. ....	128
<b>Figura 34-3:</b>	Bloques RX USPR de LabView. ....	129
<b>Figura 35-3:</b>	Diagrama de bloques para la recepción de la señal chirp. ....	130
<b>Figura 36-3:</b>	Diagrama de bloques para la transmisión de la señal chirp. ....	130
<b>Figura 37-3:</b>	Generación del radargrama. ....	131
<b>Figura 38-3:</b>	Programa de procesamiento Radar. ....	132
<b>Figura 39-3:</b>	Escenario SISO polarización vertical a 2m. ....	133
<b>Figura 40-3:</b>	Escenario SISO polarización vertical a 4m. ....	134
<b>Figura 41-3:</b>	Escenario SISO polarización vertical a 6 m. ....	134
<b>Figura 42-3:</b>	Escenario SISO polarización horizontal a 2 m. ....	135
<b>Figura 43-3:</b>	Escenario SISO polarización horizontal a 4 m. ....	136
<b>Figura 44-3:</b>	Escenario SISO polarización horizontal a 6 m. ....	136
<b>Figura 45-3:</b>	Escenario 2 SIMO polarización vertical a 2 m. ....	137
<b>Figura 46-3:</b>	Escenario SIMO polarización vertical a 4 m. ....	138
<b>Figura 47-3:</b>	Escenario SIMO polarización vertical a 6 m. ....	138
<b>Figura 48-3:</b>	Escenario SIMO polarización horizontal a 2 m. ....	139
<b>Figura 49-3:</b>	Escenario SIMO polarización horizontal a 4 m. ....	140
<b>Figura 50-3:</b>	Escenario SIMO polarización horizontal a 6 m. ....	140
<b>Figura 51-3:</b>	Escenario MIMO 2X2 polarización vertical. ....	141
<b>Figura 52-3:</b>	Escenario 1 RADAR polarización vertical a 2 m. ....	142
<b>Figura 53-3:</b>	Escenario 1 RADAR polarización vertical a 4 m. ....	142
<b>Figura 54-3:</b>	Escenario 1 RADAR polarización vertical a 6 m. ....	143
<b>Figura 55-3:</b>	Escenario 1 RADAR polarización horizontal a 2 m. ....	144
<b>Figura 56-3:</b>	Escenario 1 RADAR polarización horizontal a 4 m. ....	144
<b>Figura 57-3:</b>	Escenario 1 RADAR polarización horizontal a 6 m. ....	145
<b>Figura 58-3:</b>	Escenario 2 RADAR polarización vertical a 2 m. ....	146
<b>Figura 59-3:</b>	Escenario 2 RADAR polarización vertical a 4 m. ....	146



<b>Figura 60-3:</b>	Escenario 2 RADAR polarización vertical a 6 m. ....	147
<b>Figura 61-3:</b>	Escenario 2 RADAR polarización horizontal a 2 m. ....	148
<b>Figura 62-3:</b>	Escenario 2 RADAR polarización horizontal a 4 m. ....	148
<b>Figura 63-3:</b>	Escenario 2 RADAR polarización horizontal a 6 m. ....	149
<b>Figura 1-4:</b>	Señales resultantes recibidas en un ambiente de bajo ruido MIMO 2x2. ....	284
<b>Figura 2-4:</b>	Señales resultantes recibidas en un ambiente de ruido medio MIMO 2x2. ....	285
<b>Figura 3-4:</b>	Señales resultantes recibidas en un ambiente de bajo ruido MIMO 2x2. ....	285
<b>Figura 4-4:</b>	Correlación RX1 con TX1 y TX2, ruido bajo. ....	286
<b>Figura 5-4:</b>	Correlación RX2 con TX1 y TX2, ruido bajo. ....	287
<b>Figura 6-4:</b>	Correlación RX1 con TX1 y TX2, ruido alto. ....	287
<b>Figura 7-4:</b>	Correlación RX2 con TX1 y TX2, ruido medio. ....	288
<b>Figura 8-4:</b>	Correlación RX2 con TX1 y TX2, ruido alto. ....	288
<b>Figura 9-4:</b>	Correlación RX2 con TX1 y TX2, ruido alto. ....	289
<b>Figura 10-4:</b>	Correlación TX – RX prueba 27 a 2 metros, polarización vertical. ....	293
<b>Figura 11-4:</b>	Correlación TX – RX1 prueba 1 a 4 metros, polarización vertical. ....	294
<b>Figura 12-4:</b>	Correlación TX – RX1 prueba 11 a 6 metros, polarización vertical. ....	294
<b>Figura 13-4:</b>	Correlación TX – RX prueba 22 a 2 metros, polarización horizontal. ....	297
<b>Figura 14-4:</b>	Correlación TX – RX prueba 17 a 4 metros, polarización horizontal. ....	297
<b>Figura 15-4:</b>	Correlación TX – RX prueba 6 a 6 metros, polarización horizontal. ....	298
<b>Figura 16-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 5 a 2 metros, polarización vertical. ....	302
<b>Figura 17-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 10 a 4 metros, polarización vertical. ....	302
<b>Figura 18-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 28 a 6 metros, polarización vertical. ....	303
<b>Figura 19-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 24 a 2 metros, polarización horizontal. ....	306
<b>Figura 20-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 17 a 4 metros, polarización horizontal. ....	306
<b>Figura 21-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 8 a 6 metros, polarización vertical. ....	307

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b>	Fases para el desarrollo del sistema de radiación con SDR.....	91
<b>Gráfico 1-4:</b>	Caracteres perdidos, escenario SISO con polarización vertical.....	153
<b>Gráfico 2-4:</b>	Datos de desviación estándar, SISO a 2 metros con polarización vertical.....	158
<b>Gráfico 3-4:</b>	Datos de desviación estándar, SISO a 4 metros con polarización vertical.....	159
<b>Gráfico 4-4:</b>	Datos de desviación estándar, SISO a 6 metros con polarización vertical.....	160
<b>Gráfico 5-4:</b>	Datos de SNR, SISO con polarización vertical. ....	164
<b>Gráfico 6-4:</b>	Caracteres perdidos, SISO con polarización horizontal. ....	165
<b>Gráfico 7-4:</b>	Datos de desviación estándar, SISO a 2 metros con polarización horizontal. ..	170
<b>Gráfico 8-4:</b>	Datos de desviación estándar, SISO a 4 metros con polarización horizontal. ..	171
<b>Gráfico 9-4:</b>	Datos de desviación estándar, SISO a 6 metros con polarización horizontal. ..	172
<b>Gráfico 10-4:</b>	Datos de SNR, SISO con polarización horizontal. ....	176
<b>Gráfico 11-4:</b>	Datos de SNR SIMO, RX1 con polarización vertical. ....	177
<b>Gráfico 12-4:</b>	Datos de SNR SIMO, RX2 con polarización vertical. ....	177
<b>Gráfico 13-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 2 metros, RX1 con p.v. ....	183
<b>Gráfico 14-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 2 metros, RX2 con p.v. ....	184
<b>Gráfico 15-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 4 metros, RX1 con p.v. ....	185
<b>Gráfico 16-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 4 metros, RX2 con p.v. ....	186
<b>Gráfico 17-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 6 metros, RX1 con p.v. ....	187
<b>Gráfico 18-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 6 metros, RX2 con p.v. ....	188
<b>Gráfico 19-4:</b>	Datos de SNR SIMO, RX1 con polarización vertical. ....	192
<b>Gráfico 20-4:</b>	Datos de SNR SIMO, RX2 con polarización vertical. ....	192
<b>Gráfico 21-4:</b>	Caracteres perdidos SIMO con polarización vertical - horizontal. ....	194
<b>Gráfico 22-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 2 metros, RX1 con p.v. ....	199
<b>Gráfico 23-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 2 metros, RX2 con p.h. ....	200
<b>Gráfico 24-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 4 metros, RX1 con p.v. ....	201

<b>Gráfico 25-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 4 metros, RX2 con p.h. ....	202
<b>Gráfico 26-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 6 metros, RX1 con p.v. ....	203
<b>Gráfico 27-4:</b>	Datos de desviación estándar SIMO a 6 metros, RX2 con p.h. ....	204
<b>Gráfico 28-4:</b>	Datos de SNR SIMO, Rx1 con polarización vertical. ....	208
<b>Gráfico 29-4:</b>	Datos de SNR SIMO, RX2 con polarización horizontal. ....	209
<b>Gráfico 30-4:</b>	Correlación de señales con ruido bajo.....	210
<b>Gráfico 31-4:</b>	Correlación de señales con ruido medio.....	211
<b>Gráfico 31-4:</b>	Correlación de señales con ruido alto.....	211
<b>Gráfico 33-4:</b>	Señales recibidas en cada receptor con ruido bajo, escenario MIMO 2x2.....	212
<b>Gráfico 34-4:</b>	Datos de SNR escenario MIMO 2x2 con ruido bajo. ....	215
<b>Gráfico 35-4:</b>	Señales recibidas en cada receptor con ruido medio, MIMO 2x2. ....	216
<b>Gráfico 36-4:</b>	Datos de SNR escenario MIMO 2X2, con ruido medio. ....	219
<b>Gráfico 37-4:</b>	Señales recibidas en cada receptor con ruido alto, MIMO 2x2. ....	219
<b>Gráfico 38-4:</b>	Señales recibidas en cada receptor con ruido alto, MIMO 2x2. ....	222
<b>Gráfico 39-4:</b>	Correlación TX – RX1 a 2 metros, polarización vertical. ....	223
<b>Gráfico 40-4:</b>	Correlación TX – RX1 a 4 metros, polarización vertical. ....	224
<b>Gráfico 41-4:</b>	Correlación TX – RX1 a 6 metros, polarización vertical. ....	224
<b>Gráfico 42-4:</b>	Tiempos de retardo, escenario 1 RADAR con p.v. ....	228
<b>Gráfico 43-4:</b>	Distancia del objeto detectado, escenario 1 RADAR p.v.....	231
<b>Gráfico 44-4:</b>	Correlación TX – RX1 a 2 metros, polarización horizontal. ....	232
<b>Gráfico 45-4:</b>	Correlación TX – RX1 a 4 metros, polarización horizontal. ....	233
<b>Gráfico 46-4:</b>	Correlación TX – RX1 a 6 metros, polarización horizontal. ....	233
<b>Gráfico 47-4:</b>	Tiempos de retardo, escenario 1 RADAR con p.h. ....	237
<b>Gráfico 48-4:</b>	Distancia del objeto detectado, escenario 1 RADAR p.h. ....	240
<b>Gráfico 49-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 a 2 metros, escenario 2 RADAR p.v.....	241
<b>Gráfico 50-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 a 4 metros, escenario 2 RADAR p.v.....	242
<b>Gráfico 51-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 a 6 metros, escenario 2 RADAR p.v.....	242
<b>Gráfico 52-4:</b>	Tiempos de retardo escenario 2 RADAR, RX1 con p.v.....	246

<b>Gráfico 53-4:</b>	Tiempos de retardo escenario 2 RADAR, RX2 con p.v.....	246
<b>Gráfico 54-4:</b>	Tiempos de retardo obtenidos escenario 2 RADAR, RX1 y RX2 con p.v. ....	248
<b>Gráfico 55-4:</b>	Distancia del objeto escenario 2 RADAR, RX1 con p.v. ....	252
<b>Gráfico 56-4:</b>	Distancia del objeto escenario 2 RADAR, RX2 con p.v. ....	252
<b>Gráfico 57-4:</b>	Distancia del objeto, escenario 2 RADAR con p.v. ....	253
<b>Gráfico 58-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 a 2 metros, polarización vertical - horizontal.	254
<b>Gráfico 59-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 a 4 metros, polarización vertical - horizontal.	255
<b>Gráfico 60-4:</b>	Correlación TX – RX1 y RX2 a 6 metros, polarización vertical - horizontal.	255
<b>Gráfico 61-4:</b>	Tiempos de retardo escenario 2 radar, RX1 con p.v.....	259
<b>Gráfico 62-4:</b>	Tiempos de retardo escenario 2 radar, RX2 con p.h.....	259
<b>Gráfico 63-4:</b>	Tiempos de retardo escenario 2 radar con polarización vertical - horizontal..	260
<b>Gráfico 64-4:</b>	Distancia del objeto escenario 2 radar, RX1 con p.v.....	264
<b>Gráfico 65-4:</b>	Distancia del objeto escenario 2 radar, RX2 con p.h.....	264
<b>Gráfico 66-4:</b>	Distancia del objeto escenario 2 radar con polarización vertical - horizontal.	265
<b>Gráfico 67-4:</b>	Confiabilidad TX – RX, escenario SISO con p.v.....	267
<b>Gráfico 68-4:</b>	Confiabilidad TX – RX diagrama de constelación, escenario SISO p.v.....	268
<b>Gráfico 69-4:</b>	SNR Máximo, escenario SISO con polarización vertical. ....	269
<b>Gráfico 70-4:</b>	Confiabilidad TX – RX caracteres perdidos, escenario SISO p.h. ....	270
<b>Gráfico 71-4:</b>	Confiabilidad TX – RX diagrama de constelación, escenario SISO p.h.....	272
<b>Gráfico 72-4:</b>	SNR Máximos, escenario SISO con polarización horizontal. ....	273
<b>Gráfico 73-4:</b>	Confiabilidad TX – RX caracteres perdidos, escenario SIMO p.v.....	275
<b>Gráfico 74-4:</b>	Confiabilidad TX – RX diagrama de constelación, escenario SIMO p.v. ....	276
<b>Gráfico 75-4:</b>	SNR Máximos, escenario SIMO con polarización vertical. ....	278
<b>Gráfico 76-4:</b>	Confiabilidad TX – RX caracteres perdidos, escenario SIMO p.h.....	279
<b>Gráfico 77-4:</b>	Confiabilidad TX – RX diagrama de constelación, escenario SIMO p.h. ....	281
<b>Gráfico 78-4:</b>	SNR Máximos, escenario SIMO con polarización vertical - horizontal.....	283
<b>Gráfico 79-4:</b>	SNR Máximos ruido bajo, medio y alto.....	292
<b>Gráfico 80-4:</b>	Tiempos de retardo, Polarización vertical vs. Polarización Horizontal. ....	300

<b>Gráfico 81-4:</b>	Distancia del objeto, Polarización vertical vs. Polarización Horizontal. ....	301
<b>Gráfico 82-4:</b>	Tiempos de retardo, Polarización vertical vs. Polarización Horizontal. ....	310
<b>Gráfico 83-4:</b>	Distancia del objeto, Polarización vertical vs. Polarización Horizontal. ....	310

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1-2:</b>	Intensidad de campo eléctrico. ....	8
<b>Ecuación 2-2:</b>	Intensidad de campo magnético. ....	8
<b>Ecuación 3-2:</b>	Longitud de onda.....	9
<b>Ecuación 4-2:</b>	Frecuencia. ....	10
<b>Ecuación 5-2:</b>	Velocidad de propagación. ....	10
<b>Ecuación 6-2:</b>	Energía. ....	10
<b>Ecuación 7-2:</b>	Índice de refracción.....	15
<b>Ecuación 8-2:</b>	Coefficiente de reflexión. ....	16
<b>Ecuación 9-2:</b>	Pérdida en el espacio libre.....	17
<b>Ecuación 10-2:</b>	Pérdida en el espacio libre en dB y en función de la frecuencia. ....	17
<b>Ecuación 11-2:</b>	Atenuación en un trayecto de longitud $d$ .....	18
<b>Ecuación 12-2:</b>	Atenuación en un trayecto de longitud $d$ .....	19
<b>Ecuación 13-2:</b>	Forma diferencial de ley de Ampere. ....	19
<b>Ecuación 14-2:</b>	Forma diferencial de Ley de Faraday. ....	19
<b>Ecuación 15-2:</b>	Ley de Gauss, forma diferencial.....	19
<b>Ecuación 16-2:</b>	Ley de Gauss para magnetismo, forma diferencial.....	20
<b>Ecuación 17-2:</b>	Desplazamiento eléctrico. ....	20
<b>Ecuación 18-2:</b>	Densidad de flujo magnético. ....	20
<b>Ecuación 19-2:</b>	Permitividad relativa. ....	21
<b>Ecuación 20-2:</b>	Permeabilidad relativa.....	21
<b>Ecuación 21-2:</b>	Velocidad de la luz en el espacio libre. ....	21
<b>Ecuación 22-2:</b>	Constante dieléctrica y permeabilidad relativa. ....	21
<b>Ecuación 23-2:</b>	Densidad de corriente.....	21
<b>Ecuación 24-2:</b>	Teorema de Stoke.....	22
<b>Ecuación 25-2:</b>	Integral de línea de la ley de Ampere. ....	22

<b>Ecuación 26-2:</b>	Integral de línea de la ley de inducción de Faraday. ....	23
<b>Ecuación 27-2:</b>	Teorema de divergencia de Ecuación 15-2 y 16-2.....	23
<b>Ecuación 28-2:</b>	Ley de Gauss del flujo eléctrico total a través de una superficie cerrada. ....	24
<b>Ecuación 29-2:</b>	Inexistencia de carga o flujo magnético en una superficie cerrada. ....	24
<b>Ecuación 30-2:</b>	Relación señal a ruido (SNR). ....	27
<b>Ecuación 31-2:</b>	Eficiencia Espectral. ....	28
<b>Ecuación 32-2:</b>	Ancho de banda mínimo.....	28
<b>Ecuación 33-2:</b>	Tasa de error de bit.....	29
<b>Ecuación 34-2:</b>	Tasa de error de modulación. ....	29
<b>Ecuación 35-2:</b>	Vector de señales Rx. ....	38
<b>Ecuación 36-2:</b>	Vector de señales transmitidas. ....	39
<b>Ecuación 37-2:</b>	Canal MIMO MxN de forma matricial.....	39
<b>Ecuación 38-2:</b>	Relación entrada y salida de señales MIMO en tiempo. ....	39
<b>Ecuación 39-2:</b>	Capacidad de canal MIMO.....	40
<b>Ecuación 40-2:</b>	Eficiencia del ancho de banda de un sistema.....	40
<b>Ecuación 41-2:</b>	Eficiencia máxima del ancho de banda de un sistema. ....	40
<b>Ecuación 42-2:</b>	Potencia de señal y Potencia del ruido. ....	41
<b>Ecuación 43-2:</b>	Eficiencia máxima del ancho de banda de un sistema. ....	41
<b>Ecuación 44-2:</b>	Energía mínima requerida para la transmisión. ....	41
<b>Ecuación 45-2:</b>	Mínimo absoluto global energía de señal. ....	42
<b>Ecuación 46-2:</b>	Energía mínima requerida para la transmisión. ....	52
<b>Ecuación 47-2:</b>	Rango hacia el objeto. ....	56
<b>Ecuación 48-2:</b>	Densidad de potencia transmitida por unidad de superficie. ....	59
<b>Ecuación 49-2:</b>	Densidad de potencia recibida originada por un obstáculo a 1 distancia R....	59
<b>Ecuación 50-2:</b>	Área efectiva de la antena en función de $Gt$ .....	60
<b>Ecuación 51-2:</b>	Potencia recibida en un sistema radar.....	60
<b>Ecuación 52-2:</b>	Ecuación radar.....	60
<b>Ecuación 53-2:</b>	Potencia media transmitida.....	61

<b>Ecuación 54-2:</b>	Duty cycle o factor de ciclo de trabajo. ....	61
<b>Ecuación 55-2:</b>	Frecuencia de muestreo. ....	72
<b>Ecuación 56-2:</b>	Resolución del sistema. ....	72
<b>Ecuación 57-2:</b>	Distancia máxima teórica. ....	73
<b>Ecuación 58-2:</b>	Distancia máxima práctica. ....	73
<b>Ecuación 59-2:</b>	Señal transmitida. ....	74
<b>Ecuación 60-2:</b>	Señal recibida. ....	75
<b>Ecuación 61-2:</b>	Multiplicación de señal transmitida y señal recibida. ....	75
<b>Ecuación 62-2:</b>	Señal chirp transmitida. ....	75
<b>Ecuación 63-2:</b>	Función de la frecuencia variante en tiempo. ....	76
<b>Ecuación 64-2:</b>	Rapidez con la que cambia la frecuencia. ....	76
<b>Ecuación 65-2:</b>	Señal chirp recibida. ....	76
<b>Ecuación 66-2:</b>	Multiplicación de señal chirp transmitida y recibida. ....	77
<b>Ecuación 1-3:</b>	Resolución máxima. ....	92
<b>Ecuación 2-3:</b>	Resolución máxima para un ancho de banda de 40 MHz. ....	92
<b>Ecuación 3-3:</b>	Resolución máxima para un ancho de banda de 20 MHz. ....	92
<b>Ecuación 4-3:</b>	Ancho de banda de señal chirp utilizada. ....	93
<b>Ecuación 5-3:</b>	Distancia máxima. ....	93
<b>Ecuación 6-3:</b>	Relación de amplitudes. ....	94
<b>Ecuación 7-3:</b>	Relación de amplitud entre el metal y el material. ....	95
<b>Ecuación 8-3:</b>	Coeficiente de reflexión en base a campo eléctrico. ....	95
<b>Ecuación 9-3:</b>	Ancho del parche rectangular. ....	97
<b>Ecuación 10-3:</b>	Permitividad efectiva. ....	97
<b>Ecuación 11-3:</b>	Extensión L del parche. ....	98
<b>Ecuación 12-3:</b>	Longitud efectiva del parche rectangular. ....	98
<b>Ecuación 13-3:</b>	Longitud efectiva del parche rectangular. ....	99
<b>Ecuación 14-3:</b>	Impedancia de a línea. ....	100
<b>Ecuación 15-3:</b>	Primera condición para cálculo de W/d. ....	100



<b>Ecuación 16-3:</b>	Segunda condición para cálculo de W/d.....	101
<b>Ecuación 17-3:</b>	Relación de aspecto en función de la impedancia característica. ....	101
<b>Ecuación 18-3:</b>	Ancho de la línea de Transmisión. ....	101
<b>Ecuación 19-3:</b>	Primera condición para cálculo de W/d.....	102
<b>Ecuación 20-3:</b>	Primera condición para cálculo de W/d.....	102
<b>Ecuación 21-3:</b>	Relación de aspecto en función de la impedancia característica. ....	102
<b>Ecuación 22-3:</b>	Ancho de la línea de Transmisión. ....	102
<b>Ecuación 23-3:</b>	Largo de la línea de transmisión de 50 $\Omega$ .....	103
<b>Ecuación 24-3:</b>	Constante dieléctrica efectiva. ....	103
<b>Ecuación 25-3:</b>	Largo de la línea de transmisión de 50 $\Omega$ , 13.1mm.....	103
<b>Ecuación 26-3:</b>	Largo del plano de tierra. ....	103
<b>Ecuación 27-3:</b>	Ancho del plano de tierra. ....	104
<b>Ecuación 28-3:</b>	Desviación estándar.....	120
<b>Ecuación 29-3:</b>	Cálculo SNR. ....	121

## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** ANTENAS A 3GHZ
- ANEXO B:** TARJETA USRP 2932
- ANEXO C:** CABLE SMA – SMA
- ANEXO D:** CABLE GIGABIT ETHERNET
- ANEXO E:** CABLE CONSTRUIDO SMA – SMA
- ANEXO F:** CARGADOR USRP 2932
- ANEXO G:** PC ALIENWARE
- ANEXO H:** PC DELL
- ANEXO I:** CODIGO DE PROCESAMIENTO PROGRAMA SISO
- ANEXO J:** CODIGO DE PROCESAMIENTO PROGRAMA SIMO
- ANEXO K:** CODIGO DE PROCESAMIENTO PROGRAMA MIMO 2X2
- ANEXO L:** CODIGO DE PROCESAMIENTO RADAR
- ANEXO M:** PRUEBAS ESCENARIO 1 SISO POLARIZACION VERTICAL
- ANEXO N:** PRUEBAS ESCENARIO 1 SISO POLARIZACION HORIZONTAL
- ANEXO O:** PRUEBAS ESCENARIO 2 SIMO POLARIZACION VERTICAL
- ANEXO P:** PRUEBAS ESCENARIO 2 SIMO POLARIZACION HORIZONTAL
- ANEXO Q:** PRUEBAS ESCENARIO MIMO 2X2 RUIDO BAJO
- ANEXO R:** PRUEBAS ESCENARIO MIMO 2X2 RUIDO MEDIO
- ANEXO S:** PRUEBAS ESCENARIO MIMO 2X2 RUIDO ALTO
- ANEXO T:** PRUEBAS ESCENARIO 1 RADAR POLARIZACION VERTICAL
- ANEXO U:** PRUEBAS ESCENARIO 1 RADAR POLARIZACION HORIZONTAL
- ANEXO V:** PRUEBAS ESCENARIO 2 RADAR POLARIZACION VERTICAL
- ANEXO W:** PRUEBAS ESCENARIO 2 RADAR POLARIZACION HORIZONTAL

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

$\bar{B}$	Densidad de flujo magnético
<b>BS</b>	Estación Base
<b>BER</b>	Bit Error Rate
$c$	Velocidad de laLuz
<b>CO-MIMO</b>	Cooperative MIMO
<b>CSI</b>	Channel State Information
<b>CSIR</b>	Channel State Information at the Receiver
<b>CW</b>	Onda Continua
$\bar{D}$	Desplazamiento eléctrico
<b>DDC</b>	Digital Down Converter
<b>DUC</b>	Digital Up Converter
$E$	Campo Eléctrico
<b>EHF</b>	Extremadamente Alta Frecuencia
<b>EM</b>	Electromagnéticas
<b>FCC</b>	Federal Communications Commission
<b>FMCW</b>	Onda Continua Modulada en Frecuencia
$F_s$	Frecuencia de muestreo
<b>ISR</b>	Radio Definido por Software Ideal
$L_{bf}$	Pérdida en el espacio libre
<b>LOS</b>	Línea de vista
<b>LWIR</b>	Infrarrojo Lejano

<b>MER</b>	Modulation Error Rate
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>M</b>	Campo Magnético
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>MU-MIMO</b>	MIMO Multi Usuario
<b>Mwir</b>	Infrarrojo Medio
<b><i>n</i></b>	Índice de refracción
<b>NIR</b>	Infrarrojo Cercano
<b>NUV</b>	Ultravioleta Cercano
<b>PSK</b>	Phase-Shift Keying
<b>PSR</b>	Primary Surveillance Radar
<b>p.v</b>	Polarización vertical
<b>p.h</b>	Polarización horizontal
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase-Shift Keying
<b>RADAR</b>	Radio Detection And Ranging
<b>RF</b>	Radio Frecuencia
<b>RX</b>	Receptor
<b>SCR</b>	Radio Controlado por Software
<b>SDR</b>	Software Definido por Radio
<b>SHF</b>	Super Alta Frecuencia
<b>SISO</b>	Single Input Single Output
<b>SIMO</b>	Single Input Multiple Output
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>SSR</b>	Secondary Surveillance Radar

<b>T/R</b>	Trasmisor/Receptor
<b>TX</b>	Transmisor
<b>UHF</b>	Ultra Alta Frecuencia
<b>UIT</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
<b>USR</b>	Ultimate Software Radio
<b>USRP</b>	Universal Software Radio Peripheral
<b>UVA</b>	Ultravioleta Onda Larga
<b>UVB</b>	Ultravioleta Onda Media
<b>UVC</b>	Ultravioleta Onda Corta
<b>VUV/FUV</b>	Ultravioleta Lejano
$\lambda$	Longitud de Onda
$\Gamma$	Coefficiente de reflexión
$\epsilon$	Permitividad dieléctrica
$\epsilon_0$	Permitividad
$\epsilon_r$	Permitividad Relativa
$\mu_0$	Permeabilidad
$\mu_r$	Permeabilidad Relativa
$\sigma$	Desviación estándar

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo desarrollar un sistema de radiación con el sistema de Radio Definida por Software (SDR) para aplicaciones multiantena Múltiple Entrada Múltiple Salida (MIMO) y Radar, mediante el uso de tarjetas USRP. A través de la investigación teórica realizada, se determinaron los requerimientos y parámetros necesarios para la implementación y procesamiento de los sistemas, con la finalidad de analizar los beneficios que brinda la tecnología SDR. Se diseñó e implementó un grupo de 4 antenas a una frecuencia central de 3GHz para el análisis de los escenarios a dos polarizaciones: vertical y horizontal. En la primera etapa, se realizó un programa para el envío y recepción de un mensaje mediante modulación QSPK a través del software LabView, para configuraciones SISO, SIMO y MIMO 2X2, obteniendo información sobre la relación señal/ruido (SNR), diagrama de constelación y mensaje recibido. En la segunda etapa, se desarrolló un sistema Radar para el envío y recepción de una señal chirp, obteniendo los tiempos de retardo y la posición a la que se ubica la placa de cobre. La información de ambos sistemas fue procesada mediante Matlab y al analizarla se concluyó que se obtienen mejores resultados cuando los sistemas se polarizan verticalmente, ya que el sistema MIMO 2X2 obtuvo mejores valores de SNR en comparación con los sistemas tradicionales, llegando a alcanzar hasta 55dB en ambientes de bajo ruido. En el sistema radar se obtuvieron tiempos de retardo menores y una mayor precisión en cuanto a la detección de la posición del objeto; comprobando así que la tecnología SDR brinda grandes beneficios en la obtención y procesamiento de datos, ya que permite unificar el sistema en una única plataforma, reduciendo costos de implementación, reducción de fallos del sistema, ofreciendo mayor facilidad en la reconfiguración de parámetros y equipos, además de ser accesible para estudiantes, universidades y centros de investigación.

**Palabras clave:** <RADIOCOMUNICACIONES>, <SISTEMA DE RADIACIÓN>, <RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (SDR)>, <RADAR>, <MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO CUADRIFÁSICA (QPSK)>, <ONDA CONTINUA MODULADA EN FRECUENCIA>, <RELACIÓN SEÑAL RUIDO (SNR)> <TIEMPO DE RETARDO>.



Firmado electrónicamente por:

**ELIZABETH  
FERNANDA  
AREVALO  
MEDINA**



0831-DBRAI-UPT-2021

## ABSTRACT

The current research work aimed to develop a radiation system with the Software Defined Radio (SDR) system for multi-antenna Multiple Input Multiple Output (MIMO) and Radar applications using USRP cards. Through theoretical research carried out, the requirements and parameters necessary for implementing and processing the systems were determined to analyze the benefits provided by SDR technology. A group of 4 antennas at a central frequency of 3GHZ was designed and implemented to analyze the scenarios at two polarizations: vertical and horizontal. In the first stage, a program was made to send and receive a message using QSPK modulation through the LabVIEW software for SISO, SIMO, and MIMO 2X2 configurations, finding information on the signal/noise ratio (SNR), constellation diagram, and message received. In the second stage, a Radar system was developed to send and receive a chirp signal, obtain the delay times, and locate the copper plate. The information from both systems was processed using Matlab, and when it was analyzed, it was concluded that better results are obtained when the systems are vertically polarized. The MIMO 2X2 system obtained better SNR values than traditional systems, reaching 55dB in low noise environments. In the radar system, shorter delay times and greater precision were obtained to detect the object's position. This proves that SDR technology provides excellent benefits in obtaining and processing data since it allows to unify the system in a single platform, reducing implementation costs and system failures, offering greater ease in the reconfiguration of parameters and equipment, in addition to being accessible to students, universities and research centers.

**Keywords:** <RADIOCOMMUNICATIONS>, <RADIATION SYSTEM>, <SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR)>, <RADAR>, <QUADRATURE PHASE SHIFT KEYED (QPSK)>, <FREQUENCY MODULATED CONTINUOUS WAVE (FMCW)>, <SIGNAL TO NOISE RATIO (SNR)>, <DELAY TIME>

## **CAPITULO I.**

### **1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. ANTECEDENTES**

En el mundo las transmisiones por medio de radio han sido de gran utilidad para la comunicación entre dos usuarios o lugares remotos, su origen se remonta a los dispositivos analógicos, pero debido a las limitaciones que estos presentan tanto en recursos como en aplicaciones, se han desarrollado las tecnologías inalámbricas. Una de las más grandes evoluciones se ha visto reflejada en la creación de la radio definida por software (SDR) donde las necesidades y problemáticas que conlleva la tecnología de radio pueden ser mejoradas dependiendo del entorno que envuelve a la radio, la situación que atraviesan los usuarios e incluso de la situación en la que se desarrolla la red.

En el año 2000 iniciaron los primeros proyectos de origen no militar orientados a radio aficionados, entre ellos el denominado SDR-100, el cual fue desarrollado en abril de 2003 por parte de FlexRadio Systems, considerado el primer radio definido por software de código abierto, posteriormente en el año 2005 se creó el proyecto HPSDR el cual actualmente reúne a más de 800 integrantes que contribuyeron en su desarrollo. Conforme van pasando los años las SDRs han sido mejoradas y son de gran utilidad no solo en el ámbito militar, de donde remonta su origen, sino también en los servicios de telefonía celular especialmente, debido a que son sistemas de bajo costo, los cuales permiten comprender el funcionamiento interno de las comunicaciones en tiempo real de forma óptima y precisa. Debido a que las SDR permiten el reemplazo de los componentes físicos por su equivalente en software, brindan la posibilidad de realizar actualizaciones sin la necesidad de un hardware específico, facilitando así el rediseño, reparación y corrección de errores de los sistemas de comunicación.

En los últimos años los sistemas de radio analógicos han sido sustituidos por sistemas de radio digital para diferentes aplicaciones, por ello se aspira que las SDRs se conviertan en una de las tecnologías dominantes para las radiocomunicaciones y sus futuros avances.

Debido a que la necesidad de los usuarios aumenta día a día, generándose una mayor demanda con respecto al aumento de velocidad de datos y confiabilidad en la comunicación, el uso de tecnología SDR generaría grandes beneficios en aplicaciones multiantena MIMO y radares, ya



que reduciría notablemente los fallos en los sistemas y las pérdidas de información durante la transmisión, incrementando así la eficiencia y velocidad del canal de transmisión, ya que la optimización de los sistemas de comunicación es un gran reto, debido al crecimiento que presenta la tecnología inalámbrica y los estándares que las definen.

Así como es de suma importancia la eficiencia y precisión en aplicaciones MIMO, de igual forma lo es en Radar ya que a través de los años estos han beneficiado en gran parte al campo militar y de defensa, así también para el control de velocidad del tráfico rodado, y otros campos como geología, cartografía, agricultura., etc. Han dejado de ser útiles solo como detectores de manchas o puntos en el espacio, ya que gracias a la información extraída sobre ecos y señales permiten la identificación o reconocimiento de aeronaves, a más de ser una herramienta de gran utilidad en la electrónica.

Actualmente hay cientos de módulos que permiten realizar investigaciones en este campo, y dentro de los óptimos y operables se encuentran las tarjetas USRP, las cuales trabaja con ondas electromagnéticas, lo que permite que las aplicaciones basadas en tecnología MIMO y Radar puedan desarrollarse exitosamente y con bajos costos.

## **1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA**

¿Cuál es la mejora que brinda el sistema con software definido por radio, en cuanto a alcance y cobertura para aplicaciones multiantena mimo y radares?

## **1.3. SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuáles son los beneficios obtenidos al aplicar SDR en aplicaciones multiantena MIMO?

¿Cuáles son los beneficios obtenidos al aplicar SDR en aplicaciones de radar?

¿Cuáles son las herramientas/metodologías utilizadas para el desarrollo del sistema con SDR?

## **1.4. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

#### ***1.4.1. JUSTIFICACION TEORICA***

Con el creciente desarrollo de las comunicaciones inalámbricas es de suma importancia proporcionarles a los usuarios una mejor calidad en los servicios, confiabilidad y rapidez en la transmisión de la información, es por ello que se busca desarrollar un sistema de radiación con software definido por radio especialmente para aplicaciones multiantena mimo y radar, ya que son medios que están en constante evolución tecnológica.

El sistema de radiación será desarrollado mediante la tecnología SDR e implementado mediante dos tarjetas USRP, propiedad de la EIE-TR, las cuales ya vienen integradas con el software LabVIEW por medio del cual se realizará todo el sistema de transmisión, recepción y el procesamiento de las señales, en conjunto con un grupo de antenas para realizar las pruebas de las aplicaciones de multiantena MIMO y Radar, ya que se busca mejorar el patrón de radiación, para así alcanzar mejor cobertura, directividad e inclinación del haz electromagnético, así también como la reconfiguración de dispositivos mediante software, brindando interoperabilidad a nivel de estándares y tecnología, permitiendo sustituir el hardware de propósito general por el de propósito específico.

Existen estudios como el realizado en la ciudad de Riobamba, Ecuador por parte de Christian Vladimir Merchán, denominado “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA RADAR UTILIZANDO SISTEMA SDR A TRAVÉS DE TECNOLOGÍA USRP PARA APLICACIONES TOPOGRÁFICAS” donde menciona que la tarjeta USRP permite unificar sistemas de comunicación en una única plataforma, reduciendo así costos de implementación y que pueda ser accesible para estudiantes, universidades y centros de investigación. Además, se menciona una característica importante del mismo, la cual es que las tarjetas USRP operan bajo Linux en distribuciones como: Ubuntu, Debian, Fedora, entre otras.

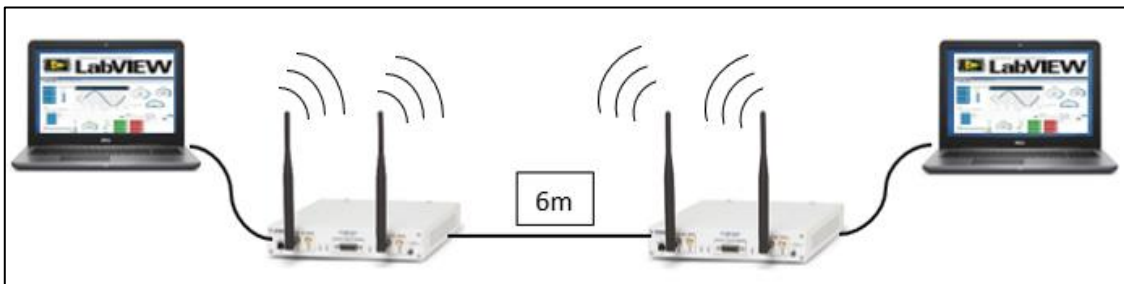
#### ***1.4.2. JUSTIFICACION APLICATIVA***

La presente investigación está destinada al desarrollo de un sistema de radiación con software definido por radio para aplicaciones multiantena mimo y radar con el fin de proporcionar a la sociedad un avance significativo en la comunicación.

Mediante dicho proyecto se pretende mejorar el patrón de radiación de las antenas, reducir los fallos en los sistemas, incrementar considerable la velocidad de transmisión, proporcionando así

un aumento de la cobertura inalámbrica, lo cual permitirá incrementar el caudal efectivo para la transmisión de los datos y la precisión en la toma y procesamiento de estos.

En la Figura 1-1 se puede observar el esquema para la transmisión en la aplicación de multiantena MIMO la cual está conformada por dos tarjetas USRP, donde a cada una se le acoplarán dos antenas para TX y RX formando un sistema MIMO 2X2, la transmisión de la información se llevará a cabo mediante cableado, colocando las tarjetas a una distancia de 6m. Ambas tarjetas estarán conectadas a una PC en la cual se manejará el software LabVIEW para el procesamiento de las señales transmitidas y recibidas mediante las tarjetas USRP.



**Figura 1-1:** Esquema aplicación multiantena MIMO 2X2

Realizado por: Merino, Daniela; 2019

En la Figura 2-1 se puede observar el esquema para la transmisión - recepción en la aplicación de Radar para la cual se hará uso de una tarjeta USRP a la cual se acoplarán dos antenas, una para transmisión y una para recepción. La transmisión de las señales para la detección y el reconocimiento de objetos se lo hará mediante aire, además que los objetos a utilizar serán de metal. La tarjeta estará conectada a un computador en el cual se manejará el software LabVIEW para el procesamiento de las señales.



**Figura 2-1:** Esquema aplicación multiantena MIMO 2X2

## **1.5. OBJETIVOS**

### ***1.5.1. OBJETIVOS GENERALES***

Desarrollar un sistema de radiación con software definido por radio para aplicaciones multiantena MIMO y radar.

### ***1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS***

- Estudiar la tecnología, software y hardware a utilizar para el desarrollo del sistema de radiación como: SDR, tecnología MIMO, Radar, tarjetas USRP, LabVIEW.
- Diseñar, construir e implementar un grupo de antenas para estudiar el comportamiento y grado de dinamismo en la conformación del haz electromagnético.
- Diseñar las aplicaciones específicas para la transmisión de multiantena MIMO y Radar mediante LabVIEW como software.
- Implementar la tecnología SDR a través de las tarjetas USRP para aplicaciones de multiantena MIMO y Radar.
- Realizar las pruebas para la generación de multi-haz a través de SDR para aplicaciones MIMO.
- Realizar pruebas de laboratorio para la transmisión MIMO y Radar mediante las tarjetas USRP y el grupo de antenas.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos para determinar las mejoras conseguidas en las aplicaciones de multiantena MIMO y Radar al aplicar la tecnología SDR.

## **CAPITULO II.**

### **INTRODUCCION**

Durante la evolución de los sistemas inalámbricos en el campo de las telecomunicaciones, se han ido descubriendo una gran cantidad de tecnologías que tienen como objetivo principal facilitar y optimizar la transferencia de información entre puntos geográficamente dispersos, pero estas diferencias técnicas generan incompatibilidad entre estándares y equipos, generando problemas en la prestación de servicios, actualización y el remplazo de las tecnologías de bajo costo.

El software Definido por Radio (SDR) surge entonces como una solución a problemas de interoperabilidad y compatibilidad, el cual fue acuñado por Joe Mitola en el año de 1991, donde propone un concepto que hace referencia a la posibilidad de construir dispositivos electrónicos para sistemas de radiocomunicaciones, remplazando algunos componentes físicos mediante módulos en software. (Arce, 2012, p. 23)

La SDR define un conjunto de procedimientos y técnicas orientadas a realizar el procesamiento de señales de información por medio de un dispositivo de propósito general, los cuales pueden ser modificados mediante software logrando así un cambio dinámico, automático y eficiente entre tecnologías, sin tener que incurrir en gastos debido a nuevos equipos y evitando incrementos considerables en el tamaño de éstos. (Galvis, 2007, p.3)

La primera implementación de SDR fue el proyecto militar estadounidense SpeakEasy, el cual logró la interoperabilidad de diez tecnologías de telecomunicaciones inalámbricas utilizadas por las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos. Posteriormente nuevos descubrimientos y desarrollos popularizaron esta técnica, llevándola a impactar en el campo académico y comercial, ya que permite la reducción de costos, reducción del tamaño de los dispositivos y flexibilidad para reconfigurar sus funcionalidades. (Rentería & Cadavid, 2011)

Conforme va evolucionando la tecnología se demandan sistemas de comunicación donde la transmisión de la información sea a velocidades más altas, con un aumento del ancho de banda, incremento de la capacidad del canal y la miniaturización de los sistemas radiantes. La tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output) ofrece una adecuada aproximación a las exigencias antes mencionadas.

Los descubrimientos obtenidos con SDR fueron y son muy utilizados en el ámbito militar y de defensa, donde la guerra fue clave crucial para iniciar investigaciones de diferentes tecnologías utilizadas para sacar ventaja en las mismas, dando origen a la denominada “Guerra Electrónica”, la cual se remonta a la época de la Segunda Guerra Mundial.

Uno de los más grandes descubrimientos durante esas investigaciones fue el radar, siendo de mucha utilidad principalmente para la teledetección, posteriormente recibiría muchas más aplicaciones, llegando a convertirse en un sistema usado para la detección y localización de objetos que son imperceptible por la visión humana. Operan mediante la transmisión de algún tipo de forma de onda sinusoidal, permitiendo en la actualidad extender los límites de detección que presenta la visión humana. (Merchán, C. 2016, p.7)

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Radiación Electromagnética**

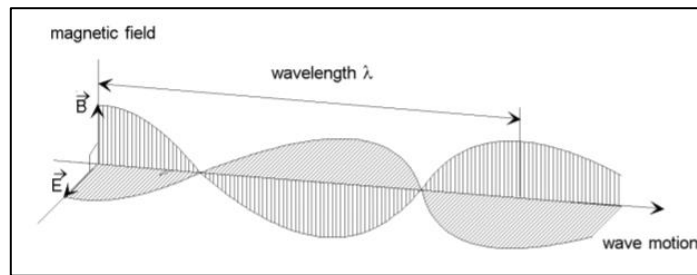
La radiación electromagnética es un conjunto de ondas de radio en frecuencias que van desde los hercios hasta los gigahercios. Dichas ondas se propagan por el espacio formando así ondas electromagnéticas las cuales son el resultado de la combinación de campos eléctricos y magnéticos. (Wayne, 2003, p. 343)

La energía electromagnética se puede propagar como voltaje o corriente a través de un hilo metálico, un conductor o por ondas de radio emitidas en el espacio libre, o también como señales luminosas a través de fibra óptica. Para la transferencia de la información entre dos o más lugares se lo realiza mediante la transmisión de ondas de radio, convirtiendo la información original a energía electromagnética para luego transmitirla a una o más estaciones receptoras, donde se vuelve a convertir a su forma original. (Wayne, 2003, p. 343)

#### **2.1.1. Ondas Electromagnéticas**

Las ondas electromagnéticas están generadas por una vibración entre los campos magnéticos y eléctricos, los cuales son perpendiculares entre sí, se propagan en el vacío con una velocidad

semejante a la velocidad de la luz ( $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ ), independientemente de la frecuencia y longitud de onda de cada una de ellas. (Wayne, 2003, p. 343)



**Figura 1-2:** Onda Electromagnética.

**Fuente:** (Wayne, 2003, p. 344)

A través de las ecuaciones de Maxwell se rige el comportamiento de las ondas EM tanto en tiempo como en espacio, donde se señala que para que se dé la propagación por el espacio libre de una onda electromagnética hay que considerar la intensidad de campo eléctrico y magnético, como se observa en las Ecuaciones 1-2 y 2-2, respectivamente:

$$E = (x, y, z: t)[V/m]$$

**Ecuación 1-2:** Intensidad de campo eléctrico.

$$H = (x, y, z: t)[A/m]$$

**Ecuación 2-2:** Intensidad de campo magnético.

Donde:

x, y,z = vector en el espacio

t = tiempo

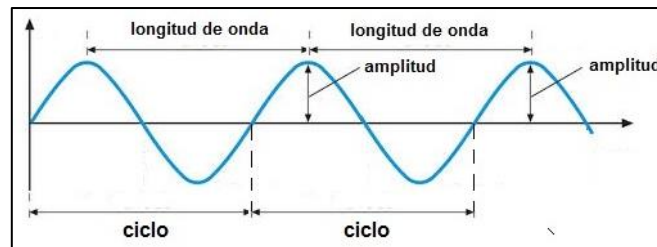
V = voltio

A = amperio

m = metro

### 2.1.2. Características de una onda electromagnética

Las ondas EM están caracterizadas por:



**Figura 2-2:** Características de una onda.

Fuente: Google.

- **Longitud de onda:** es la distancia entre la cresta de una onda con la siguiente, mientras esta viaja por determinado medio, donde su ecuación es la siguiente:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

**Ecuación 3-2:** Longitud de onda.

Donde:

$\lambda$  = longitud de onda

c= velocidad de la luz

f= frecuencia

- **Frecuencia:** número de oscilaciones en cierto punto por cada segundo.



$$f = \frac{c}{\lambda}$$

**Ecuación 4-2:** Frecuencia.

- **Amplitud:** máxima perturbación del medio generada por la onda EM.
- **Periodo:** tiempo que le toma a una onda en realizar una oscilación completa.
- **Velocidad de propagación:** depende del medio de propagación de la onda, está definida por:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda * f$$

**Ecuación 5-2:** Velocidad de propagación.

- **Energía:** energía transportada por unidad de tiempo, definida por:

$$S = E \times H$$

**Ecuación 6-2:** Energía.

Donde:

S= vector de Poynting

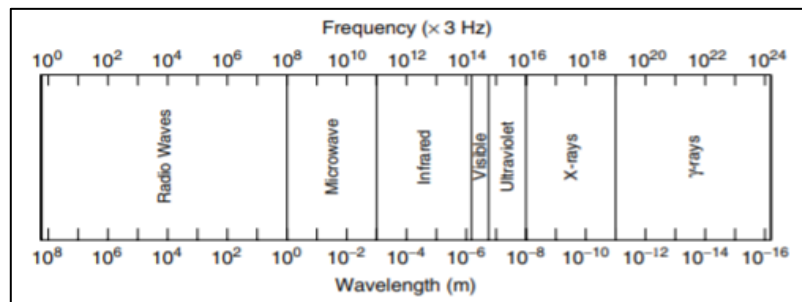
E= campo eléctrico

M= campo magnético

### **2.1.3. Espectro Electromagnético**

La radiación electromagnética puede estar representada por ondas de frecuencias muy altas hasta frecuencias muy bajas, esto se representa a través del espectro electromagnético, el cual se divide en 7 regiones, el cual va desde los rayos gamma hasta las ondas RF, como se observa en a Figura 3-2.

Gran parte de las ondas electromagnéticas solo difieren por su frecuencia y por la forma en la que se producen, ya que todas se propagan en el vacío, con la misma velocidad, siendo originadas por la aceleración de una carga eléctrica. Cabe mencionar que las ondas de baja frecuencia poseen una longitud de onda larga, mientras que las de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta. (Wendell H., 2009, p.8)



**Figura 3-2:** Espectro Electromagnético.

Fuente: Wendell, H; 2009, p.8

El espectro EM se divide en las siguientes ondas, como se observa en la Tabla 1-2:

**Tabla 1-2:** Regiones del espectro electromagnético.

Región	Frecuencia (Hz)	Longitud de onda (m)
Rayos gamma	$10^{22} - 10^{19}$	$10^{-11} - 10^{-14}$
Rayos X	$10^{17} - 10^{20}$	$10^{-8} - 10^{-11}$
Ultravioleta	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{-6} - 10^{-8}$
Visible	$10^{14} - 10^{15}$	$4 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$
Infrarrojo	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-5}$
Microondas	$10^9 - 10^{11}$	$10^{-1} - 10^{-3}$
Ondas RF	$10^3 - 10^9$	$10^5 - 10^{-1}$

**Fuente:** (Fontal, B; 2005, p.16)

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2018

- **Rayos Gamma:** son los fotones más energéticos del espectro, incluso de 10000 a 10000000 veces más que la luz visible. Tienen frecuencias que oscilan entre  $10^{22} - 10^{19}$  Hz y longitudes de onda que van desde  $10^{-11} - 10^{-14}$  m. En la tierra estos pueden ser producidos por explosiones de bombas nucleares o por la desintegración nuclear de sustancias radioactivas, cabe mencionar que estos rayos son altamente penetrantes causando daños serios en los tejidos vivos si llegan a ser absorbidos. (Fontal B., 2005, p.16)
- **Rayos X:** son ondas electromagnéticas con frecuencias que oscilan entre  $10^{17} - 10^{20}$  Hz, longitudes de onda entre  $10^{-8} - 10^{-11}$  m y energías entre 200 - 100000 eV. Son producidos por tubos de rayos X, aceleradores de partículas, etc. Hay de dos tipos los rayos X suaves los cuales tienen longitudes de onda mayores a 0.1nm y los rayos X duros que se solapan con los rayos gamma de baja energía. Además, son muy utilizados en los procesos de radiografía, tratamientos médicos contra el cáncer, pruebas industriales, etc. (Fontal B., 2005, p.16)
- **Ultravioleta:** son ondas electromagnéticas con frecuencias que oscilan entre  $10^{15} - 10^{17}$  Hz y longitudes de onda entre  $10^{-6} - 10^{-8}$  m. No son muy usadas en aplicaciones de telecomunicaciones más es usada en el campo de la medicina, además de no ser visibles para el ojo humano. (Fontal B., 2005, p.16) Se divide en:
  - Ultravioleta cercano (NUV): 370 - 200 nm
  - Onda larga o luz negra (UVA): 380 - 315 nm
  - Onda media (UVB): 315 - 280 nm
  - Onda corta o germicida (UVC): <280 nm
  - Ultravioleta lejano (FUV, VUV): 200 - 10 nm
- **Visible:** son ondas electromagnéticas visibles para el ojo humano que oscilan entre  $10^{14} - 10^{15}$  Hz y longitudes de onda entre  $4 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$  m. En la Figura 4-2, se puede observar los rangos de longitudes de onda para los distintos colores: (Fontal B., 2005, p.16)

Rojo	630 - 760 nm	Azul	440 - 490
Naranja	590 - 630	Índigo	420 - 440
Amarillo	560 - 590	Violeta	380 - 420
Verde	490 - 560	Púrpura	No un color espectral puro

**Figura 4-2:** Longitudes de onda para la luz visible.

**Fuente:** Wendell, H; 2009, p.8

- **Infrarrojo:** sus frecuencias oscilan entre  $10^{11} - 10^{14} \text{ Hz}$  y longitudes de onda entre  $10^{-3} - 10^{-5} \text{ m}$ . Se producen principalmente por objetos que generan calor, incluyendo animales y el hombre. (Fontal B., 2005, p.16) El infrarrojo se divide en 4 regiones:
  - Infrarrojo cercano (NIR): 780 – 3000 nm
  - Infrarrojo medio (MWIR): 3000 – 6000 nm
  - Infrarrojo lejano (LWIR): 6000 – 15000 nm
  - Infrarrojo extremo: 0.015 – 1mm
  
- **Microondas:** sus frecuencias oscilan entre  $10^9 - 10^{11} \text{ Hz}$ , con longitudes de onda que van desde  $10^{-1} - 10^{-3} \text{ m}$ . Son producidas por los dispositivos de estado sólido y tubos de vacío, y debido a su longitud de onda corta son muy útiles para sistemas radar. Son ampliamente utilizadas en el campo de las telecomunicaciones para la transmisión en TV, telefónica, etc. (Fontal B., 2005, p.16) Su rango se divide en:
  - Ultra Alta Frecuencia (UHF): 0.3 – 3 GHz
  - Super alta frecuencia (SHF): 3 – 30 GHz
  - Extremadamente alta frecuencia (EHF): 30 – 300 GHz
  
- **Ondas RF:** Son ondas EM que oscilan entre  $10^3 - 10^9 \text{ Hz}$ , con longitudes de onda entre  $10^5 - 10^{-1} \text{ m}$ . Son generados por corriente alterna y viajan en línea recta alrededor del mundo, sin ser reflejadas por la ionosfera. (Fontal B., 2005, p.16)

#### **2.1.4. Propagación de radiofrecuencias**

La comunicación RF se da cuando una señal dentro del rango de 30KHz a 300GHz se propaga de Tx a Rx, entre los cuales puede o no existir línea de vista (LOS) y la señal sufre diversos efectos antes de llegar al destino. (Frenzel L., 2003, p.5)

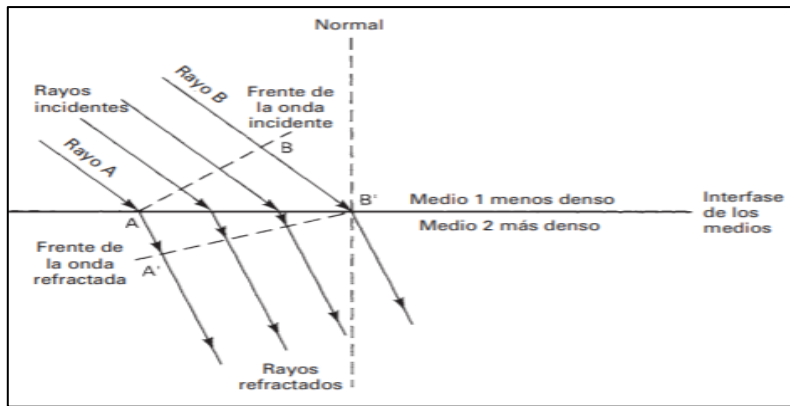
En los sistemas RF la propagación permite que las ondas de las antenas transmisoras se dispersen en todas direcciones y siempre y cuando exista línea de vista entre TX y RX se establecerá una comunicación exitosa, factible y sin pérdidas o distorsión de la información. (Wayne, 2003, p.343)

##### **2.1.4.1. Propiedades ópticas de las ondas de radio**

En condiciones especiales y con una atmósfera uniforme, las ondas RF tienden a desplazarse en línea recta, es decir siempre y cuando exista una línea de vista entre el emisor y el receptor la comunicación será eficiente, pero si el receptor se encuentra más allá del horizonte se debe tomar en cuenta las condiciones de propagación y las frecuencias adecuadas para una correcta comunicación. (Wayne T., 2003, p.353)

Es por lo que para hablar de comunicación por medio de ondas RF a grandes distancias se debe tomar en cuenta ciertos fenómenos como los que se explicaran a continuación.

- **Refracción:** es el cambio de dirección de un rayo al pasar en dirección oblicua de un medio a otro con distinta velocidad de propagación. La velocidad a la que se propaga una onda electromagnética es inversamente proporcional a la densidad del medio en el que lo hace. Por consiguiente, hay refracción siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro de distinta densidad. (Wayne T., 2003, p.353)



**Figura 5-2:** Refracción en una frontera plana entre dos medios.

Fuente: Wayne, Tomasi; 2003, p.353

El grado de flexión o refracción que hay en la interfase entre dos materiales de distintas densidades es bastante predecible, y depende del índice de refracción de cada material. El índice de refracción no es más que la relación de la velocidad de propagación de la luz en el espacio vacío entre la velocidad de propagación de la luz en determinado material, Ecuación 7-2. (Wayne T., 2003, p.353)

$$n = \frac{c}{v}$$

**Ecuación 7-2:** Índice de refracción.

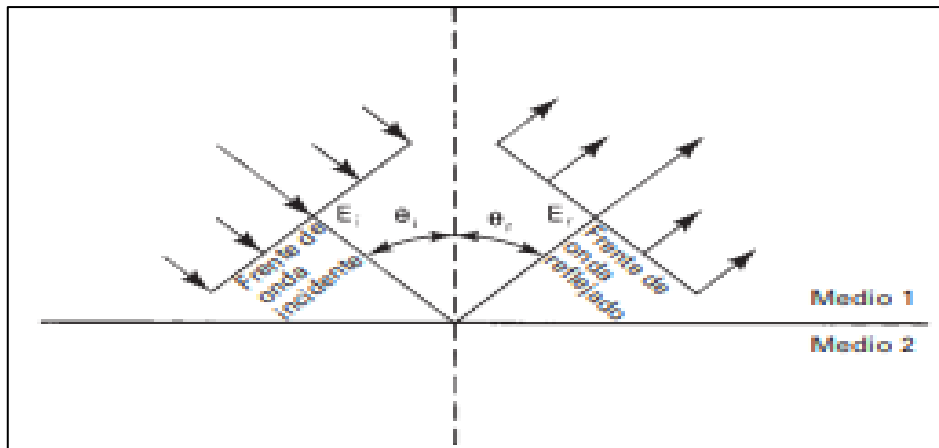
Donde

$n$ = índice de refracción (adimensional)

$c$ = velocidad de la luz en el espacio libre ( $3 \times 10^8$  m/s)

$v$ = velocidad de la luz en determinado material (m/s)

- **Reflexión:** se presenta cuando una onda incidente choca con una frontera entre dos medios, y algo o toda la potencia incidente no entra al segundo material. Las ondas que no penetran al segundo medio se reflejan. (Wayne T., 2003, p.355)



**Figura 6-2:** Reflexión electromagnética en una frontera plana entre dos medios.

**Fuente:** Wayne, Tomasi; 2003, p.355

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = e^{j(\theta_r - \theta_i)}$$

**Ecuación 8-2:** Coeficiente de reflexión.

Donde:

$\Gamma$  = coeficiente de reflexión (adimensional)

$E_r$  = intensidad de voltaje incidente (V)

$E_i$  = intensidad de voltaje reflejado (V)

$\theta_r$  = fase incidente (grados)

$\theta_i$  = fase reflejada (grados)

- **Dispersión:** sucede cuando una onda electromagnética se encuentra con un medio eléctricamente diferente, lo que origina una descomposición de la trayectoria original en diversas direcciones (hacia atrás, adelante y hacia los lados). Parte de la señal puede llegar al receptor. Por lo general se produce por obstáculos como árboles, postes de alumbrado, vallas de señalización, etc. Así como irregularidades troposféricas y rugosidades en la superficie en la cual incide la onda. (Gallargo S., 2015)

- **Difracción:** es la modulación o redistribución de la energía dentro de un frente de onda, al pasar cerca de la orilla de un objeto opaco, es decir para que exista difracción debe haber un obstáculo. Este fenómeno permite que las ondas luminosas o de radio se propaguen en torno a esquinas. (Wayne T., 2003, p.357)

### 2.1.5. Efectos de propagación de ondas RF básicos

#### 2.1.5.1. Pérdidas en el espacio libre

La pérdida en el espacio libre es causada principalmente sólo por la divergencia del haz, es decir, la energía de la señal se expande por zonas cada vez más extensas a medida que se aleja de la fuente. Puede definirse como la atenuación de la señal que se observaría si se eliminasen todas las influencias de la absorción, difracción, obstrucción, refracción, dispersión y reflexión, de manera que no afectasen a la propagación. (Radiocomunicaciones, 2008, p.6)

$$L_{bf} = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

**Ecuación 9-2:** Pérdida en el espacio libre.

Donde:

$L_{bf}$  = pérdida en el espacio libre

$d$  = longitud del trayecto

$\lambda$  = longitud de onda

Expresando la ecuación en dB y en función de la frecuencia:

$$L_{bf}(dB) = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d$$

**Ecuación 10-2:** Pérdida en el espacio libre en dB y en función de la frecuencia.



Donde:

$L_{bf}$  = pérdida de transmisión básica en el espacio libre (dB)

$d$  = longitud del trayecto (km)

$f$  = frecuencia (MHz)

#### 2.1.5.2. Atenuación debido a la absorción atmosférica

Debido a las atenuaciones producidas por la absorción por parte del oxígeno y vapor de agua, se incluye en el cálculo de pérdida de propagación total a frecuencias por encima de unos 10 GHz. La atenuación en un trayecto de longitud  $d$  (km) se obtiene mediante la Ecuación 11-2: (Radiocomunicaciones, 2008, p.7)

$$A_a = \gamma_a d \text{ (dB)}$$

**Ecuación 11-2:** Atenuación en un trayecto de longitud  $d$ .

La atenuación específica  $\gamma_a$  (dB/km) se obtiene utilizando la Recomendación UIT-R P.676.

#### 2.1.5.3. Desvanecimiento por centelleo

Las irregularidades turbulentas del índice de refracción pueden originar centelleos de amplitud y variaciones en el ángulo de llegada de la señal recibida. Estos efectos se encuentran en todos los trayectos con visibilidad directa cuando se utilizan frecuencias de microondas y frecuencias superiores, pero pueden estar enmascarados por el desvanecimiento por trayectos múltiples y otros fenómenos conexos. (Radiocomunicaciones, 2008, p.9)

$$\sigma_x^2 = 42.25 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} \int Cn^2(r) r^{\frac{5}{6}} dr$$

**Ecuación 12-2:** Atenuación en un trayecto de longitud  $d$ .

Donde:

$\sigma_x$ =desviación normalizada del algoritmo de potencia recibida

$\lambda$ =longitud de onda (m)

$Cn^2$ =función estructural del índice de refracción  $m^{-\frac{2}{3}}$

$r$ = distancia a lo largo del trayecto

### 2.1.6. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell que regulan el comportamiento de campos electromagnéticos fueron creadas por Maxwell en 1865. Las cuales se especifican a continuación:

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J}$$

**Ecuación 13-2:** Forma diferencial de ley de Ampere.

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

**Ecuación 14-2:** Forma diferencial de Ley de Faraday.

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho$$

**Ecuación 15-2:** Ley de Gauss, forma diferencial.

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0$$

**Ecuación 16-2:** Ley de Gauss para magnetismo, forma diferencial.

Donde:

$\bar{E}$ : vector de campo eléctrico en  $V/m$ .

$\bar{H}$ : vector de campo magnético en  $A/m$ .

$\bar{D}$ : vector de desplazamiento eléctrico en  $C/m^2$ .

$\bar{B}$ : vector de densidad de flujo magnético en webers/ $m^2$

$\bar{J}$ : vector de densidad de corriente libre en  $A/m^2$ .

$\rho$ : densidad volumétrica de cargas libres en  $C/m^3$ .

Las relaciones entre  $\bar{E}$ ,  $\bar{H}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{D}$  y  $\bar{J}$  dependen de las características del medio, representadas por los parámetros constitutivos. Considerando un medio sin pérdidas donde  $\bar{J} = 0$ . (Ishimaru A., 2017, p.101). Para un medio lineal, pasivo e isotrópico se tiene:

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E}$$

**Ecuación 17-2:** Desplazamiento eléctrico.

$$\bar{B} = \mu \bar{H}$$

**Ecuación 18-2:** Densidad de flujo magnético.

Donde:

$\epsilon$ : es la permitividad o constante dieléctrica en  $F/m$ .

$\mu$ : es la permeabilidad en henries (H)/m

Tomando al espacio libre como medio,  $\epsilon$  y  $\mu$  son:

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \approx \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ F/m}$$

**Ecuación 19-2:** Permitividad relativa.

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

**Ecuación 20-2:** Permeabilidad relativa.

Además, la velocidad de la luz en el espacio libre viene representado por:

$$c = \frac{1}{(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

**Ecuación 21-2:** Velocidad de la luz en el espacio libre.

La constante dieléctrica  $\epsilon_r$  y la permeabilidad relativa  $\mu_r$ , viene representado por:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad , \quad \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

**Ecuación 22-2:** Constante dieléctrica y permeabilidad relativa.

Si  $\epsilon$  y  $\mu$  son constantes de un punto a otro, el medio se conoce como homogéneo. Considerando un medio lineal con pérdidas, la densidad de corriente  $\bar{J}$  es proporcional al campo  $\bar{E}$ , a esto se conoce como ley de Ohm: (Ishimaru A., 2017, p.105)

$$\bar{J} = \sigma \bar{E}$$

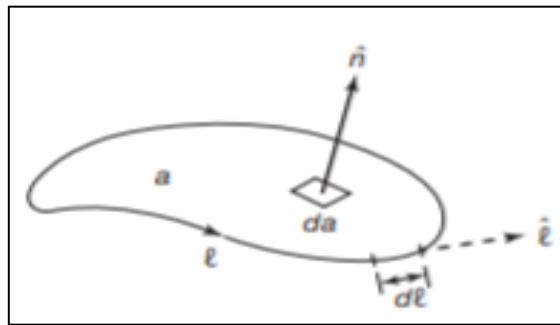
**Ecuación 23-2:** Densidad de corriente.

Donde  $\sigma$  es la conductividad del medio en siemens/m.

Se las puede comprender de forma más sencilla si se las representa mediante integrales. La Ecuación 24-2 se la obtiene mediante el teorema Stoke, (Ishimaru A., 2017, p.105) como se observa en la figura:

$$\int_a \nabla \times \bar{A} \cdot d\bar{a} = \oint_l \bar{A} \cdot d\bar{l}$$

**Ecuación 24-2:** Teorema de Stoke.



**Figura 7-2:** Teorema Stoke.

Fuente: Ishimaru A., 2017

Donde:

$d\bar{a}$ : es un diferencial de superficie de vector elemento con magnitud da.

$d\bar{l}$ : es un diferencial de línea de vector elemento con magnitud dl.

Utilizando la Ecuación 24-2, 13-2 y 14-2 se las expresa de la siguiente manera:

$$\oint_l \bar{H} \cdot d\bar{l} = \oint_a \left( \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J} \right) \cdot d\bar{a}$$

**Ecuación 25-2:** Integral de línea de la ley de Ampere.

$$\int_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_a \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a}$$

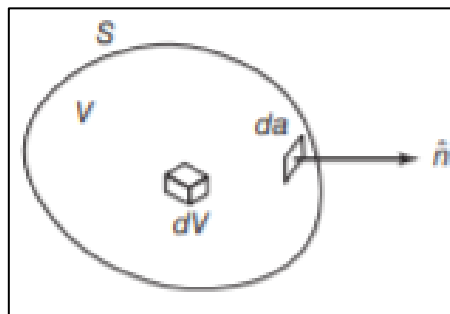
**Ecuación 26-2:** Integral de línea de la ley de inducción de Faraday.

La Ecuación 25-2 y 26-2 se las analiza sobre una trayectoria cerrada, donde la Ecuación 25-2 representa la Ley de Ampere de la integral de línea de un campo magnético siendo igual al total de la corriente y la Ecuación 26-2 representa la Ley de inducción de Faraday de la integral de línea de un campo eléctrico siendo igual a negativo de la tasa de tiempo de cambio de flujo magnético total a través del bucle. (Ishimaru A., 2017, p.107)

La Ecuación 15-2 y 16-2 se las representan mediante integral utilizando el teorema de la divergencia:

$$\int_V \nabla \cdot \vec{A} dV = \int_S \vec{A} \cdot d\vec{a}$$

**Ecuación 27-2:** Teorema de divergencia de Ecuación 15-2 y 16-2.



**Figura 8-2:** Teorema de la divergencia.

**Fuente:** Ishimaru; 2017

Donde S es una superficie cerrada que rodea a un volumen V. Con la ecuación 26-2, la 15-2 y 16-2 se pueden representar como:

$$\int_S \vec{D} \cdot d\vec{a} = \int_V \rho dV$$

**Ecuación 28-2:** Ley de Gauss del flujo eléctrico total a través de una superficie cerrada.

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0$$

**Ecuación 29-2:** Inexistencia de carga o flujo magnético en una superficie cerrada.

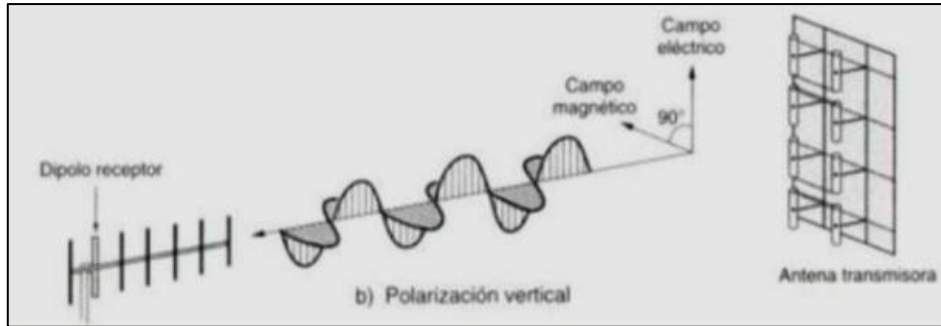
La Ecuación 28-2 es la ley de Gauss del flujo eléctrico total que fluye a través de una superficie cerrada, siendo igual a la carga total encerrada por la superficie. La Ecuación 28-2 representa que no existe carga ni flujos magnéticos neto que se encuentre dentro o fuera de la superficie cerrada. (Ishimaru A., 2017, p.110)

### **2.1.7. Propagación y Polarización de antenas**

La polarización de la onda electromagnética se define como la trayectoria descrita por la componente vectorial de campo eléctrico en su propagación, de manera que mantenga la ortogonalidad respecto a la componente vectorial de campo magnético. Las ondas electromagnéticas están polarizadas de forma que al propagarse las oscilaciones de los campos eléctrico y magnéticos, se mantienen en un plano determinado para cada uno. (Briseño A. & Gómez G., 2016, p2)

#### *2.1.7.1. Propagación por Polarización Vertical*

Las antenas transmisoras de polarización vertical por lo general constan de una matriz de elementos de dipolo verticales montados a lo largo de la longitud vertical de una torre. El dipolo vertical, en el espacio libre tiene un patrón de radiación que es direccional en el plano vertical y omnidireccional en el plano horizontal. El patrón de radiación al ser ligeramente más direccional en el plano vertical y muy amplio en el plano horizontal aumenta la intensidad de señal en dirección de avance y la disminución en la dirección hacia atrás. (Heras M., 2016, p.40)



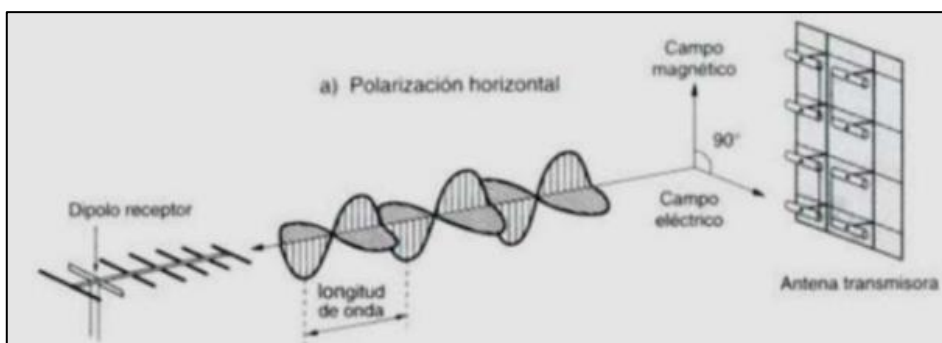
**Figura 9-2:** Polarización vertical.

**Fuente:** Heras M; 2016, p.40

### 2.1.7.2. Propagación por Polarización Horizontal.

Las antenas de transmisión con polarización horizontal, por lo general, son un conjunto de elementos de dipolo horizontal. Tiene un patrón de radiación que es muy direccional en el plano horizontal y muy amplio en el plano vertical, lo contrario de lo que normalmente se requiere para una antena de transmisor. (Heras M., 2016, p.41)

El problema fundamental es que la antena tipo “látigo”, que se utiliza para la recepción en automóviles de emisiones omnidireccionales de AM y FM es ante todo una antena de polarización vertical y una débil respuesta a una señal de polarización horizontal. Las mediciones de campo, hechas usando antenas de automóvil “látigo”, han demostrado que la respuesta a las señales de polarización horizontal puede ser de 10 a 20 dB por debajo de la respuesta a las señales de polarización vertical. (Heras M., 2016, p.41)



**Figura 10-2:** Polarización horizontal.

**Fuente:** Heras M; 2016, p.40



Se sabe también que si una estación transmite una señal de polarización vertical y la estación receptora utiliza una antena de polarización horizontal, esto da como resultado una señal que es 20 dB más débil en el receptor. En sistemas de comunicaciones inalámbricas la polarización de las antenas es importante ya que para comunicaciones de corto alcance se obtienen mejores resultados cuando la transmisión y recepción de antenas tienen la misma polarización, ya que se obtiene la potencia de la señal más fuerte posible. Las comunicaciones de corto alcance menos eficientes suelen tener lugar cuando las dos antenas están en ángulo recto (por ejemplo, uno horizontal y uno vertical). Distancias largas, la atmósfera puede provocar la polarización de una onda de radio a fluctuar, por lo que la distinción entre horizontal y vertical se convierte en menos importante. (Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT, 1990, p.119-122) (4NetNetworking, 2019)

Las señales de radiodifusión que llegan a un receptor se componen de varias componentes, una onda directa y una difractada. La amplitud de estas ondas es independiente de la polarización a menos que la difracción se produzca en colinas redondeadas y lisas, de ser así el caso, la onda con polarización vertical sufrirá menos atenuación que una onda con polarización horizontal. (Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT, 1990, p. 122)

### **2.1.8. Parámetros de Eficiencia**

Para que un sistema de comunicaciones tenga un buen funcionamiento es necesario que cumpla con ciertas especificaciones en los parámetros de trabajo

#### *2.1.8.1. Ruido*

Es toda aquella señal fortuita e impredecible, producto de causas internas y externas al sistema, que alteran la señal que llega al receptor. Son todas aquellas señales indeseables que se introducen a lo largo del canal durante la transmisión. (Zúñiga A., 2018, p.18). El ruido de un sistema puede ser:

- Interno o inherente: es de naturaleza aleatoria y generado en dispositivos electrónicos, consecuencia de su naturaleza física: ruido térmico, ruido por cuantización de las cargas, ruido semiconductor, etc. (Drake J., 2005, p.3)

- Externo o interferencias: es generado en un punto del sistema como consecuencia de acoplamiento eléctrico o magnético con otro punto del mismo sistema, o con otros sistemas naturales, o construidas por el hombre. El ruido de interferencia puede ser periódico, intermitente o aleatorio. (Drake J., 2005, p.3)

### 2.1.8.2. Relación señal a ruido (SNR)

Es la relación existente entre el nivel de potencia de la señal respecto al nivel de potencia del ruido. Considerado como una medida de calidad en un sistema de comunicación, evaluado en el lado del receptor. Mientras mayor sea la SNR mejor será la calidad del sistema, es decir un valor adecuado de SNR es aquel donde la señal recibida se considere sin defectos o con un mínimo de ellos. (Zúñiga A., 2018, p.19)

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} (W) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_S}{P_N} \right) (dB)$$

**Ecuación 30-2:** Relación señal a ruido (SNR).

Donde  $P_S$  es la potencia de la señal y  $P_N$  es la potencia del ruido. La SNR depende tanto del nivel de señal recibido como del ruido total del sistema (suma del ruido externo y ruido inherente al sistema). Sus valores óptimos tanto para polarización vertical como horizontal son  $SNR > 20dB$ , y como mínimo 18 dB ya que valores inferiores a ello puede reducir el desempeño del sistema. (LigoWave, s.f) (Luna F., 1994, p.14)

### 2.1.8.3. Eficiencia espectral

También conocido como densidad de información, es un parámetro que indica cuanta información es posible transmitir sobre un ancho de banda determinado, define la calidad de una modulación digital. (Zúñiga A., 2018, p.20)

$$\eta = \frac{R_b \left( \frac{\text{bits}}{\text{s}} \right)}{B_{min}(\text{Hz})} = N$$

**Ecuación 31-2:** Eficiencia Espectral.

Donde:

$B_{min}$ =ancho de banda mínimo (Hz)

$R_b$ =tasa de transmisión de bits (bits/s)

$M$ = cantidad de estados o variaciones en la señal modulada

$N$ = cantidad de bits por estado

$$B_{min} = \frac{R_b \left( \frac{\text{bits}}{\text{s}} \right)}{\log_2 M} = \frac{R_b}{N} (\text{Hz})$$

**Ecuación 32-2:** Ancho de banda mínimo.

Cuanto mayor sea el valor  $\eta$ , mejor aprovechado estará el ancho de banda y será mejor el sistema de modulación. Aunque la eficiencia espectral se normaliza a un ancho de banda de 1Hz y como consecuencia indica la cantidad de bits por Hz que se pueden propagar a través del medio. (Zúñiga A., 2018, p.20)

#### 2.1.8.4. Tasa de Error de Bit (BER)

El BER representa la cantidad de bits recibidos con errores respecto a la cantidad total de bits recibidos durante un periodo de tiempo determinado. Es uno de los criterios de rendimiento más importantes de un sistema de comunicación digital. Una tasa de BER muy alta puede indicar que una velocidad menor de los datos podría reducir el tiempo de transmisión para una determinada cantidad de datos, ya que un BER reduciría la cantidad de paquetes que deban ser transmitidos. (Andreotti J., 2015)

En un sistema de comunicación digital, el objetivo del receptor es seleccionar correctamente los símbolos de mensaje transmitidos fuera de un conjunto finito pero la presencia de ruido en el canal complica esto y casi errores de bits. (Zúñiga A., 2018, p.22)

$$BER = \frac{\# \text{ bits errones recibidos}}{\# \text{ bits transmitidos}}$$

**Ecuación 33-2:** Tasa de error de bit.

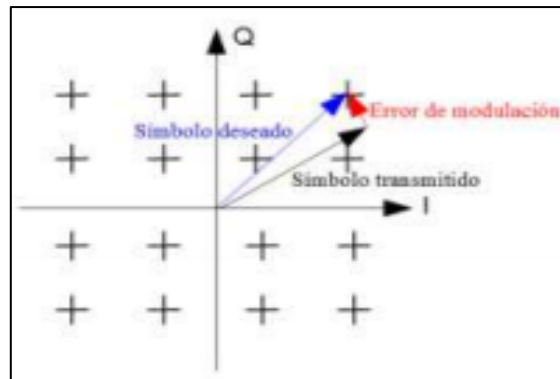
#### 2.1.8.5. Tasa de Error de Modulación (MER)

Es un factor de eficiencia muy importante ya que cuantifica el error que poseen los vectores de una determinada constelación respecto a la posición teórica que deberían tener, es decir representa la relación entre la potencia media de la señal DVB-T y la potencia media de ruido presente en la constelación de las señales. Permite valora que tan buena es la señal modulada digitalmente. (Bobi C. & Platas J., 2015, p.25) (Zúñiga A., 2018, p.23)

$$MER = 10 \log \left[ \frac{\text{potencia de señal recibida}}{\text{potencia de señal de error}} \right] = 10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_{j=1}^N (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^N (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)} \right] (dB)$$

**Ecuación 34-2:** Tasa de error de modulación.

Donde los datos I/Q muestran los cambios en la magnitud (amplitud) y la fase de la onda sinusoidal.



**Figura 11-2:** Tasa de error de modulación.

**Fuente:** Bobi, Cristina; Platas, Javier; 2015, p.25

A mayor dispersión en la constelación, se tiene un valor MER más bajo, es decir hay más error. Mientras que, a menos dispersión, el valor MER es más alto y el error es menor. (Bobi C. & Platas J., 2015, p.25)

## 2.2. Software Defined Radio (SDR)

### 2.2.1. Historia

El origen del Software Definido por Radio remonta al año 1992, donde el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) lanza un proyecto sobre SDR, cuyo inicio fue en 1970, tanto en Europa como en Estados Unidos. El proyecto recibió el nombre de SpeakEasy, cuyo objetivo era operar en la banda de 2 a 2000 MHz, albergando 10 tipos de tecnologías de comunicaciones inalámbricas.

Para mediados de 1995 SpeakEasy tuvo un rotundo éxito, lo cual permitió el desarrollo de su segunda etapa, en la cual se buscaba agregarle la funcionalidad de un sistema de radio completo, dando inicio en el mismo año y finalizando en el 2000. (Angulo O. & Paredes C., 2011, p.10)

En 1996 Joseph Mitola fundó el SDR Forum, conocido en la actualidad como Wireless Innovation Forum, un trabajo en conjunto con diferentes empresas como: Motorola, MIT Lincoln Laboratory, NASA, entre otros, los cuales introdujeron al mercado la tecnología Radio Cognitiva (RD) y SDR.

A mediados del año 1997 el ejército americano desarrolló un programa para sistemas de radiocomunicación, denominado *Joint Tactical Radio System*, buscando ponerles fin a los problemas de interoperabilidad que se hacían presente en los distintos sistemas de radio. Dicho programa podía ser reconfigurable por medio del software, permitiéndole a los aviones de combate poder realizar una transmisión de voz, video y datos de forma convergente. (Angulo O. & Paredes C., 2011, p.10)

Para el año 2000 se dio paso a la creación de proyectos por radioaficionados, donde uno de los más relevantes es el SDR-1000 lanzado al mercado por Flex Radio Systems en 2003. En el 2001, el grupo denominado GNU Radio liderado por Eric Blossom, empezó con el desarrollo de una tarjeta capaz de proveer la sección front-end de la radiocomunicación, naciendo así la denominada USRP. (Angulo O. & Paredes C., 2011, p.10)

En el año 2007 gracias a los grandes avances generados en la microelectrónica y plataformas SDR, permitieron que el mercado que utiliza la tecnología SDR supere los 5.3 billones de dólares, donde uno de los proyectos más representativos fue OpenBTS, el cual trata sobre la implementación de una Estación Base (BS) de telefonía GSM mediante software, utilizando la plataforma Asterisk para el servicio e VoIP. (Velasco A., 2016, p.7)

### **2.2.2. Definición**

Existe una gran variedad de definiciones para el Software Definido por Radio (SDR), dependiendo principalmente del campo de estudio de quien establezca dicha definición, a continuación, se presentarán las más relevantes. Lee Pucker, colaborador de Wireless Innovation Forum en su trabajo denominado SDR Architecture menciona que, la radio definida por software (SDR) es una tecnología habilitadora, aplicable en una amplia gama de áreas dentro de la industria inalámbrica, que proporciona soluciones eficientes y comparativamente económicas a varios de los problemas inherentes a las arquitecturas de radio más tradicionales. (Pucker L., 2010, p.1)

De acuerdo con Ahmad Ali Tabassam, SDR es: un sistema de comunicación por radio, que proporciona control de software para una variedad de métodos de modulación, filtrado, operaciones de banda ancha o banda estrecha, técnicas de espectro expandido y requisitos de forma de onda, etc. Las bandas de frecuencia aún están restringidas en los extremos frontales de RF. Un SDR permite una implementación de la funcionalidad de procesamiento de señales en software en lugar de circuitos de hardware dedicado. (Tabassam, 2011, p. 8)

SDR es una tecnología que fue creada para mejorar la interoperabilidad entre diferentes servicios, la cual está compuesta por hardware y software que pueden ser reconfigurados dinámicamente para habilitar la comunicación entre una amplia variedad de normas de comunicaciones, protocolos y radio enlaces. Permite crear dispositivos inalámbricos y equipos de redes multibanda y multifuncionales, los cuales pueden ser dinámicamente reconfigurados o también a través de actualizaciones de software y reconfiguraciones de hardware.

Según la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos (FCC, Federal Communications Commission) como organismo regulador, define a la SDR como “aquellos radios que incluyen un transmisor cuyos parámetros de operación como banda de frecuencias, tipo de modulación o potencia máxima de salida pueden ser alteradas mediante cambios en software sin realizar cambios a los componentes de hardware que se relacionan con la emisión de radiofrecuencias.” Los receptores no se incluyen en esta definición debido a su poco potencial como generadores de interferencias hacia otros servicios. (Engineering & Technology FCC, 2001, p.2-3)

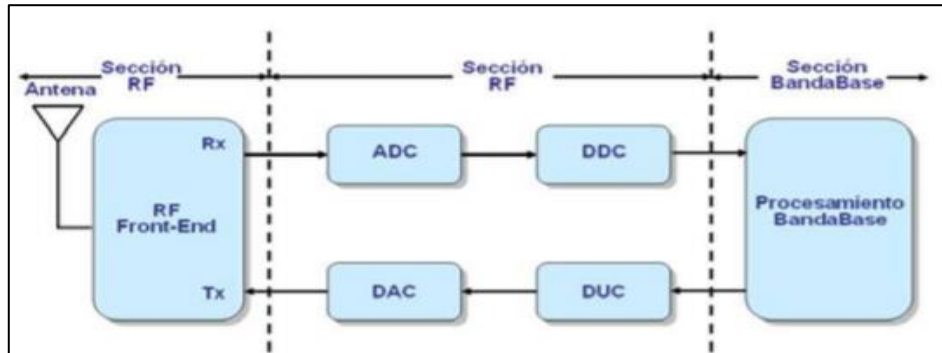
Una vez mencionadas algunas de las definiciones sobre SDR se puede decir que se trata de un radio donde parte o todas las funciones de capa física pueden ser definidas por software. Está compuesta por una arquitectura que permite cambiar los componentes del radio en tiempo real sin alterar el hardware, brindando flexibilidad, capacidad de reconfiguración, actualización eficiente y adaptación a diferentes ambientes y propósitos. Tiene amplias aplicaciones en las comunicaciones inalámbricas, ya que brinda soluciones eficientes a los problemas inherentes de las arquitecturas de radio convencional, además de que permiten tener bajos costos en las investigaciones a través de la simulación de ambientes, permitiendo así un estudio a profundidad en ámbitos profesionales, comerciales y académicos.

### **2.2.3. *Arquitectura***

Uno de los problemas habituales de los sistemas de telecomunicaciones inalámbricos es la actualización del equipo radio de forma rentable y fácil, para convertirlos en sistemas aptos para soportar los nuevos estándares de comunicación. La SDR trabaja con hardware de propósito general, los cuales, combinados por transmisores y receptores de RF, permiten la implementación de una gran variedad de sistemas de comunicación, desde un receptor de radio FM hasta un receptor de señales enviadas desde un satélite. (Montenegro G., Rodriguez V & Castillo F., 2019, p.25)

La arquitectura está conformada por un subsistema digital y uno analógico. Las funciones analógicas son restringidas a aquellas que no pueden ser mejoradas digitalmente como: antena,

filtro RF, combinación RF, pre-amplificación en la recepción, transmisión de potencia de amplificación y generación de frecuencia de referencia. (De la Cruz A. & Moreira R., 2018, p.48)



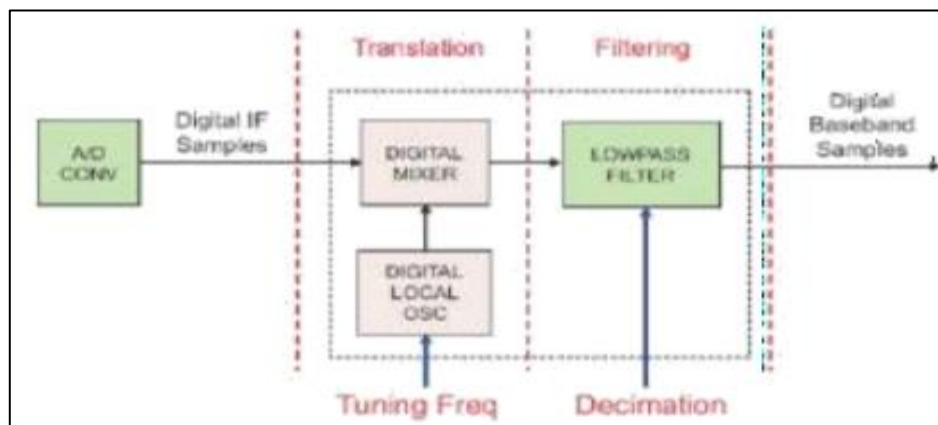
**Figura 12-2:** Arquitectura SDR.

**Fuente:** De la Cruz, Alexis; Moreira, Ronald; 2018, p.48

- **Antena:** se encarga de generar ondas electromagnéticas para transmitir la información por espacio, aire y otros medios no conductores.
- **RF Front-End:** actúa como una interfaz del dominio RF analógico. Se encarga de transmitir y recibir las señales RF mediante la antena. Consta de dispositivos electrónicos de estado sólido como: filtros, amplificadores de bajo ruido, amplificadores de potencia, osciladores locales, que adaptan el nivel de las señales de entrada para que sean adecuadas para los siguientes niveles del SDR, es decir, convierte de RF a frecuencia intermedia. En el TX se amplifica la señal entregada por las etapas anteriores hasta que alcance un nivel de potencia suficiente para transmitir las por el medio físico. (De la Cruz A. & Moreira R., 2018, p.49) (Hurtado Y., 2017, p.34)
- **Bloque de frecuencia intermedia (FI):** está encargado de realizar la selectividad y ganancia del receptor. Procesa la señal para transmitirla a una frecuencia inferior para después convertirla a un valor final y amplificarla hasta el nivel de aplicación de la antena. (De la Cruz A. & Moreira R., 2018, p.49)
- **Oscilador local:** se encarga de generar frecuencias adecuadas para convertir de la frecuencia RF a frecuencia FI, mediante una mezcla no lineal que produce frecuencias imagen. La frecuencia deseada es seleccionada mediante filtros analógicos para amplificarlo mediante los amplificadores de FI correspondientes. (De la Cruz A. & Moreira R., 2018, p.49)



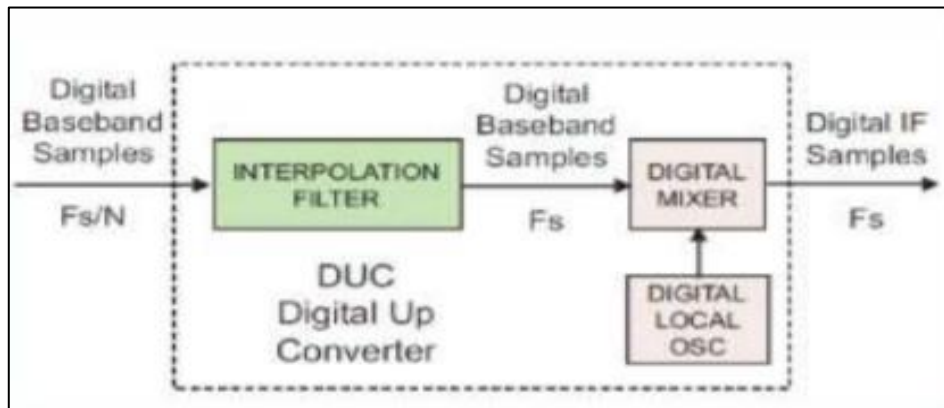
- **ADC/DAC:** al transmitir información por el medio físico, se realiza mediante señales analógicas pero el procesamiento en el transceiver es digital, por ello hay que realizar una conversión analógico-digital en el transmisor y digital-analógico en el receptor.  
El conversor ADC es un dispositivo que devuelve un valor binario a partir de una entrada analógica de voltaje. Mientras que el DAC realiza el proceso contrario, devuelve una señal analógica a partir de una entrada digital. (De la Cruz A. & Moreira R., 2018, p.49)
- **Muestreo:** se toman muestras periódicas de la amplitud de la señal analógica con cierta velocidad conocida como frecuencia de muestreo.
- **Cuantificación:** mide el nivel de voltaje de cada muestra y le asigna un valor numérico de salida. Cuando el valor de salida no coincide con el valor de entrada se conoce como ruido de cuantificación.
- **Codificación:** traduce los valores obtenidos en cuantificación en código binario.
- **DDC (Digital Down Converter):** convierte una señal digital FI en una señal banda base. Está compuesto por un mezclador digital, oscilador local digital y filtro digital pasa bajo. El mezclador y el oscilador trasladan las muestras digitales de FI a banda base, el filtro limita el ancho de banda de la señal mediante la función de decimación de muestras a un rango menor de muestreo. (De la Cruz A. & Moreira R., 2018, p.49-50)



**Figura 13-2:** Componentes de DDC.

**Fuente:** De la Cruz, Alexis; Moreira, Ronald; 2018, p.50

- **DUC (Digital Up Converter):** convierte la señal banda base a una de frecuencia digital intermedia. Esta señal es transformada en FI analógica por el convertidor DAC y a su vez es convertida en RF por el transmisor. El mezclador y oscilador local trasladan las muestras de banda base a frecuencia FI. El filtro de interpolación resuelve la diferencia entre la frecuencia de muestreo del oscilador ( $F_s$ ) y la frecuencia de entrada de la señal de banda base ( $F_s/N$ ). (De la Cruz A. & Moreira R., 2018, p.50)



**Figura 14-2:** Componentes de DUC.

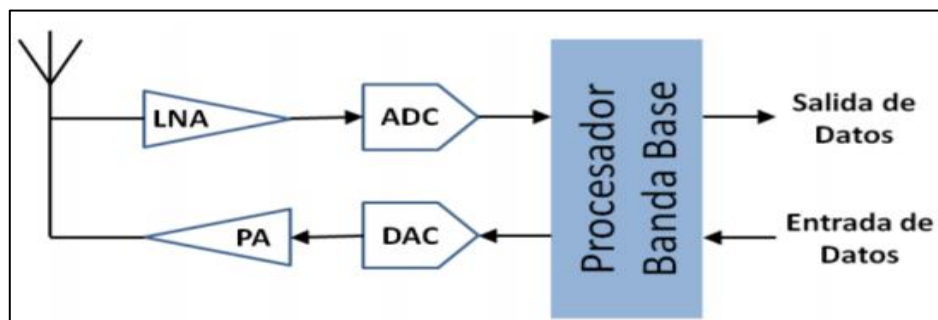
**Fuente:** De la Cruz, Alexis; Moreira, Ronald; 2018, p.50

- **Modulador/Demodulador:** para que la información transmitida mediante una onda electromagnética sea útil es necesario imprimir la información sobre una señal portadora, esto se logra a partir de la modificación de alguno de los parámetros que la definen de acuerdo con el valor de la información a transmitir, esto es conocido como modulación y el proceso contrario, demodulación. El bloque que realiza ambos procesos se conoce como MODEM. (De la Cruz A. & Moreira R., 2018, p.50)

#### 2.2.4. Niveles de SDR

El Wireless Innovation Forum ha definido 5 niveles de utilización de software dentro del radio para controlar o realizar funciones de la capa física, determinando la frontera entre hardware y software en el equipo.

- **Nivel 0:** aquí el radio es construido mediante hardware únicamente. En este nivel no hay software, ni el control ni la realización propia de las funciones de operación del radio.
- **Nivel 1:** el radio ya es controlado por software, pero tiene limitaciones en cuanto a sus funciones. Se puede controlar el nivel de potencia, interconexiones o el modo o frecuencia. (Garcia C., 2011, p.6) (Vega A., 2020)
- **Nivel 2:** se lo conoce como Radio Controlado por Software (SCR), ya que una parte significativa del radio es configurada mediante software. Se puede controlar la frecuencia, modulación, generación/detección de forma de onda, seguridad, etc. Sin embargo, la etapa RF se encuentra en hardware y no puede ser reconfigurada. En este tipo de radios el software solo puede controlar funciones que estén implementadas de forma física dentro del mismo, a hardware únicamente. (Garcia C., 2011, p.7) (Vega A., 2020)
- **Nivel 3:** se encuentra todos los radios en los que al menos una de sus funciones es definida por software, incluso los Radios Definido por Software Ideal (ISR) donde la frontera entre la parte configurable y la no configurable se encuentra muy cerca de la antena y la etapa final de RF es configurable. (Garcia C., 2011, p.7) (Vega A., 2020)



**Figura 15-2:** Diagrama de bloques simplificado de SDR de nivel 3.

Fuente: Garcia, Carlos; 2011, p.7

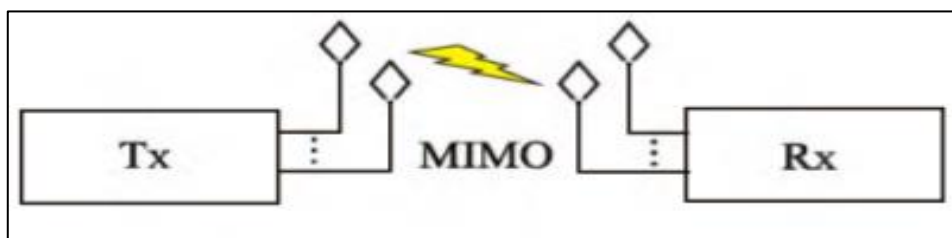
- **Nivel 4:** aquí se encuentran los equipos Ultimate Software Radio (USR), son completamente programables y capaces de soportar un amplio rango de frecuencias y funciones simultáneamente. Dentro de este nivel se encuentran los celulares con soporte de varios estándares. (Garcia C., 2011, p.7) (Vega A., 2020)

## 2.3. Tecnología MIMO

### 2.3.1. Definición

Martín D, Daniela T y Andrés B en su artículo “Simulación y evaluación de arreglo de antenas MIMO para sistemas de comunicaciones inalámbricos mediante el uso del paradigma de tensores” mencionan que *“MIMO es un mecanismo que incrementa la eficiencia espectral de un sistema de transmisión inalámbrica por medio de la utilización del dominio espacial, aprovechando fenómenos físicos como la propagación multitrayecto para incrementar la velocidad de transmisión o reducir la tasa de error de bit. MIMO se basa en el dominio espacial, por lo tanto, requiere el uso de múltiples antenas en el transmisor y en el receptor.”* (Bravo, 2014, p.9)

En el trabajo titulado “Antenas en Sistemas Inalámbricos de Comunicaciones Digitales” realizado por Valdez, Alberto D.; Miranda, Carlos A.; Schlesinger, Paola L.; Chiozza, Juan A.; Miranda, Carlos V, se menciona que *“El sistema MIMO es una tecnología inalámbrica que utiliza varios transmisores y receptores para transferir mayor cantidad de datos al mismo tiempo y algoritmos apropiados aprovechando las contribuciones de las trayectorias múltiples. Las antenas inteligentes utilizan la tecnología de diversidad espacial, la cual hace uso de antenas en exceso. Cuando hay más antenas que transferencias espaciales, las antenas pueden agregar diversidad al receptor y aumentar el alcance.”* (Valdez, 2016, p.15)



**Figura 16-2:** Esquema MIMO.

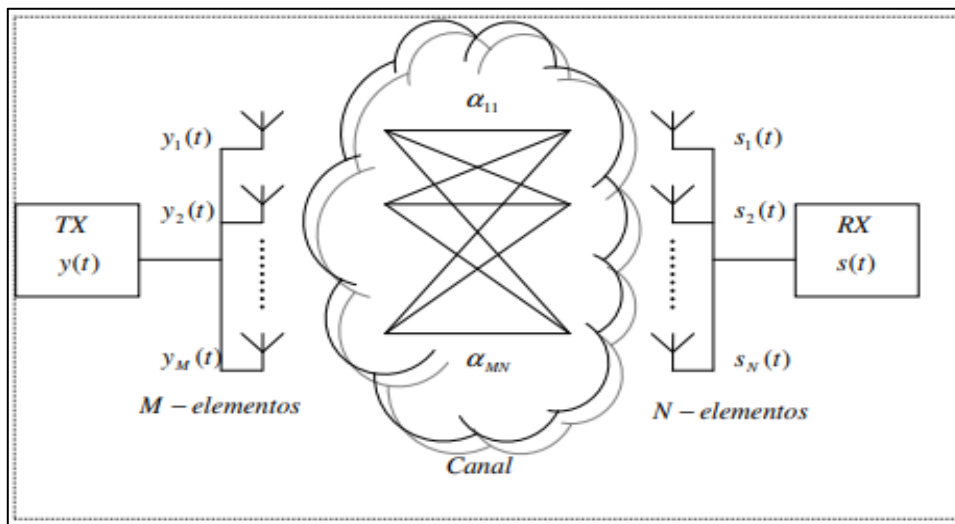
**Fuente:** Simulación y evaluación de arreglo de antenas MIMO para sistemas de comunicaciones inalámbricos mediante el uso del paradigma de tensores; 2015, p.12

Se puede decir que MIMO es una tecnología conformada por múltiples antenas tanto en transmisión y recepción, a través de las cuales viajan múltiples señales por un único canal de

radiofrecuencia, tomando como ventaja a la propagación multicamino, incrementando la velocidad de transmisión, cobertura y reduciendo la BER, sin la necesidad de incrementar ancho de banda, ni potencia de las antenas.

En un sistema MIMO  $M \times N$  ( $M$  antenas Tx y  $N$  antenas Rx) se generan  $MN$  subcanales entre el array Tx y el array Rx. La respuesta al impulso de un canal MIMO de forma matricial está representado por 3 elementos: transmisor, receptor y canal, como se observa en la Ecuación 35-2. (Fernández O. , 2007, p.14)

La Figura 17-2 representa el canal MIMO  $M \times N$  con  $M$  antenas transmisoras y  $N$  antenas receptoras generando  $MN$  subcanales.



**Figura 17-2:** Modelo de canal MIMO.

**Fuente:** Castillo, Iván; 2006, p.24

El vector de las señales recibidas está representado por la Ecuación 35-2:

$$H(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_M(t)]^T$$

**Ecuación 35-2:** Vector de señales Rx.

Donde  $y_m(t)$  es la señal recibida en la m-esima antena y  $[\cdot]^T$  es la transpuesta. El vector de las señales transmitidas está representado por la Ecuación 36-2:

$$s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$$

**Ecuación 36-2:** Vector de señales transmitidas.

Donde  $s_n(t)$  es la señal transmitida en la n-esima antena y  $[\cdot]^T$  es la transpuesta.

La matriz de transferencia del canal radio MIMO está representada por  $H(t) \in \mathbb{C}^{M \times N}$  y  $H(t)$  son las conexiones entre el Tx y el Rx, Ecuación 37-2:

$$H(t) = \begin{pmatrix} \alpha_{11}(t) & \alpha_{12}(t) & \cdots & \alpha_{1N}(t) \\ \alpha_{21}(t) & \alpha_{22}(t) & \cdots & \alpha_{2N}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{M1}(t) & \alpha_{M2}(t) & \cdots & \alpha_{MN}(t) \end{pmatrix}$$

**Ecuación 37-2:** Canal MIMO MxN de forma matricial.

Donde  $\alpha_{mn}(t)$  son las respuestas al impulso de los diferentes subcanales radio. Es así que los vectores  $y(t)$  y  $s(t)$  están relacionados mediante la Ecuación 38-2:

$$y(t) = H(t)s(t) + n(t)$$

**Ecuación 38-2:** Relación entrada y salida de señales MIMO en tiempo.

### 2.3.2. Capacidad de canal

La capacidad del canal MIMO depende de varios factores como: el número de antenas transmisoras y receptoras, la respuesta compleja normalizada del canal o la SNR. La fórmula de la capacidad derivada de Shannon en 1948 para un canal con AWGN, está representada por la Ecuación 39-2.

$$C = M * W * \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \left[ \frac{\text{bits}}{s} \right]$$

**Ecuación 39-2:** Capacidad de canal MIMO.

Donde:

$M$ = mínimo de  $Y_M$  o  $S_N$

$W$ = ancho de banda del canal en Hz

$S$ = potencia de la señal en Watios

$N$ = potencia del ruido cel canal en watios.

La Ecuación 40-2 representa la eficiencia del ancho de banda de un sistema con ancho de banda  $W$ .

$$\eta = \frac{\text{Velocidad de transmision}}{\text{Ancho de banda } W} \text{ [bits/ s / Hz]}$$

**Ecuación 40-2:** Eficiencia del ancho de banda de un sistema.

La Ecuación 41-2 representa el límite de Shannon.

$$\eta_{max} = \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \text{ [bits/ s / Hz]}$$

**Ecuación 41-2:** Eficiencia máxima del ancho de banda de un sistema.

La Ecuación 42-2 representa la potencia de la señal  $S$  y la potencia del ruido  $N$  como:

$$S = \frac{K * E_b}{T} = R * E_b \quad y \quad N = N_0 * W$$

**Ecuación 42-2:** Potencia de señal y Potencia del ruido.

Donde

$E_b$  = Energía por bit

$K$  = Número de bits transmitidos por símbolo

$T$  = Duración del símbolo

$R$  = Velocidad de transmisión del sistema en bits/s

$\frac{S}{N}$  = Relación señal ruido

$N_0$  = Densidad espectral de ruido

Reemplazando la Ecuación 42-2 en la Ecuación 41-2, se obtiene:

$$\eta_{max} = \log_2 \left( 1 + \frac{R * E_b}{N_0 * W} \right) [bits / s / Hz]$$

**Ecuación 43-2:** Eficiencia máxima del ancho de banda de un sistema.

A partir de la Ecuación 43-2 se obtiene la energía mínima requerida para la transmisión, es decir el límite de Shannon.

$$\frac{E_b}{N_0} \geq \frac{2^{\eta_{max}} - 1}{\eta_{max}}$$

**Ecuación 44-2:** Energía mínima requerida para la transmisión.



Cuando el límite de Shannon posee una eficiencia  $\eta_{max}$  que tiende a 0 se obtiene el mínimo absoluto global energía de señal partido por densidad espectral de ruido requerido para transmitir un bit de información:

$$\frac{E_b}{N_0} \geq \lim_{\eta_{max}} \frac{2^{\eta_{max}} - 1}{\eta_{max}} = \ln(2) = -1.59dB$$

**Ecuación 45-2:** Mínimo absoluto global energía de señal.

La capacidad del canal se ve afectada por la correlación entre los subcanales, ya que disminuye el grado de diversidad y reduce la capacidad del canal con respecto del canal correlado. Los valores propios son los encargados de trasladar el efecto de la correlación entre subcanales a la cuantificación de la eficiencia espectral máxima. Por tanto, los valores propios permiten evaluar el rendimiento del canal MIMO sin la complejidad que introduce el estudio de la correlación ni la dependencia de la capacidad con la relación señal a ruido. (Fernández O. , 2007, p.30)

Shannon estableció que es posible obtener una transmisión libre de errores si se considera transmitir a una tasa de transmisión menor o igual que la capacidad de canal ( $R_b \leq C$ ), en el caso contrario, la probabilidad de error en el receptor se incrementaría sin límite mientras se aumenta la tasa, es por ello que no se puede transmitir información útil por encima de la capacidad de canal. (Zúñiga A., 2018, p.21)

### 2.3.3. *Diversidad en comunicación MIMO*

En un sistema MIMO las señales que llegan de las diferentes antenas deben ser lo más distintas posibles entre ellas, es decir estén decorreladas, además de que la capacidad del canal se ve determinado por el entorno de propagación y las prestaciones del sistema depende de una correcta implementación de la agrupación de las antenas. Es por lo que se puede recurrir a técnicas de diversidad para la decorrelación de las señales: (González S. & Fernández A., 2014, p.52)

- **Diversidad Espacial:** consiste en ubicar las antenas en distintas posiciones, donde cada posición reciba una fase diferente de cada una de las componentes de la señal multicamino, llegando así con un ángulo distinto unas de otras.

- **Diversidad de diagrama de radiación:** consiste en aplicar un diagrama de radiación distinto a cada antena entonces cada componente de la señal multicamino se multiplicará por un peso distinto.
- **Diversidad de polarización:** consiste en colocar las antenas en distinta polarización para así recibir señales distintas.
- **Diversidad Temporal:** consiste en transmitir una señal de información en diferentes intervalos de tiempo, lo cual genera desvanecimientos independientes. Su principal desventaja es que se genera un tiempo de retraso en la transmisión debido a que utiliza varios tiempos para enviar múltiples copias de la señal, disminuyendo así la tasa efectiva de transmisión, sin embargo, su ventaja es que reduce la probabilidad de error de bit (BER). (Cárdenas F. & Otáñez J., 2019, p.4) (Anónimo, 2016, p.79)
- **Diversidad de Código:** se transmite la señal de información utilizando códigos de detección, convolucionales y espaciotemporales, lo cual es de gran ayuda para el control de fallas, además de que aprovechan los multitrayectos del canal lo cual robustece la transmisión. Su principal ventaja es que pueden tener diferentes bloques de codificaciones un mismo sistema, por lo cual los códigos de detección son capaces de añadir bits de redundancias que ayudan a minimizar la capacidad de detección, reduciendo la probabilidad de los errores no detectados. Por su parte los códigos convolucionales tienen la ventaja de tener memoria, donde los bits codificados dependerán de los bits originales para obtener nuevos bits. (Cárdenas F. & Otáñez J., 2019, p.5)
- **Diversidad de Usuario:** el transmisor se encarga de seleccionar al mejor usuario entre varios candidatos de acuerdo con la calidad de cada canal. Esta técnica es muy utilizada por MIMO Multiusuario, encontrando así: punto a multipunto y multipunto a multipunto. También es conocido como diversidad por selección y se presenta como diversidad en las antenas de recepción, donde el receptor puede escoger una de las antenas basándose en la señal de mayor potencia y un mejor SNR. (Cárdenas F. & Otáñez J., 2019, p.5)

#### 2.3.4. *Diversidad espacial*

Esta técnica permite que el receptor reciba varias réplicas de la señal emitida y en conjunto con una codificación adecuada en el receptor se puede mejorar el BER de la señal recibida. Se trata de convertir a un canal de desvanecimiento inalámbrico inestable que es variable en tiempo en un canal AWGN estable el cual no presente desvanecimientos instantáneos que sean significativos,

acelerando de esta forma una caída más rápida del BER en la curva SNR vs. BER. (Corrales E. & Gomez W., 2007, p 55-56.)

El principio de diversidad se basa en la transmisión de redundancia estructurada, dicha redundancia puede ser transmitida en cualquier momento, en cualquier polarización, de cualquier antena o sobre cualquier frecuencia.

- **Diversidad de recepción:** consiste en utilizar dos o más antenas en un mismo receptor generando así recepciones independientes de la señal transmitida. Las antenas deben estar separadas por una distancia de coherencia, si dichas separaciones suficiente, el desvanecimiento sufrió por cada uno de los canales será independiente, siendo muy probable que ambas señales recibidas o sufran un desvanecimiento simultaneo. Su objetivo es mitigar los desvanecimientos generados por el efecto multicamino y mejorar la SNR. Hay tres tipos: diversidad por selección, combinación con misma ganancia y combinación por razón máxima. (Corrales E. & Gómez W., 2007, p 55-56.) (Fernández O., 2007, p. 19-21)
- **Diversidad de transmisión:** utiliza dos o más antenas en el transmisor, pero debido a su complejidad no ha sido muy estudiada. Las señales transmitidas se combinan espacialmente antes de llegar al receptor, por ello es necesario contar con una etapa de procesamiento tanto en transmisión como en la recepción para así separar las señales recibidas y conseguir ganancia por diversidad. (Corrales E. & Gómez W., 2007, p 55-56.) (Fernández O., 2007, p. 22-24)

### ***2.3.5. Codificación Espacio Temporal***

Para maximizar la ganancia por diversidad espacial y la fiabilidad en la transmisión de datos se utilizan los codificadores de espacio temporal. La codificación se realiza tanto en espacio como en tiempo para introducir correlación entre señales transmitidas desde varias antenas en diferentes periodos de tiempo, aprovechando así los desvanecimientos del canal y minimizando errores introducidos por el canal, mejorando el rendimiento del enlace sin aumentar el ancho de banda. (Fernández O., 2007, p. 23-24) (Anónimo, 2016, p 88-89)

Dentro de sus ventajas están que no necesitan de realimentación, se puede combinar con codificación del canal para obtener ganancia por codificación, no necesitan múltiples antenas receptoras lo cual es útil en receptores compactos y circuitalmente ligeros. Son robustos ante

condiciones no ideales como correlacion de antenas, errores en la estimación del canal y el efecto doppler. (Fernández O., 2007, p. 24-25)

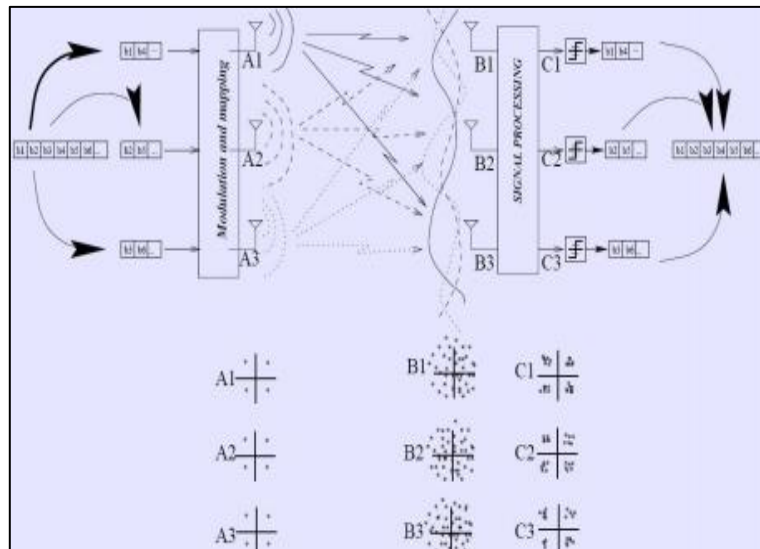
Los codigos de espacio temporal se dividen en dos:

- Codificación espacio temporal Trellis (STTC)
- Codificación espacio temporal de bloque (STBC)

### 2.3.6. Multiplexación espacial

Esta técnica combina múltiples señales de menor ancho de banda en una señal de mayor ancho de banda maximizando así la tasa de transmisión (eficiencia espectral). Gracias a la decorrelación entre canales producto del multicamino y el conocimiento del canal en el receptor es posible separar los diferentes flujos de información. (Fernández O., 2007, p.25-26) (Anónimo, 2016, p.90)

El orden de la multiplexación espacial es el número de flujos de datos transmitidos paralelamente, y su valor máximo está limitado por el menor número de antenas transmisoras o receptoras, el incremento de la eficiencia espectral será proporcional a ese orden. (Tecnología MIMO, 2016, p.90)



**Figura 18-2:** Multiplexación espacial.

Fuente: Tecnología MIMO; 2016, p.90

Hay varias opciones de codificación junto con la multiplexación espacial que son:

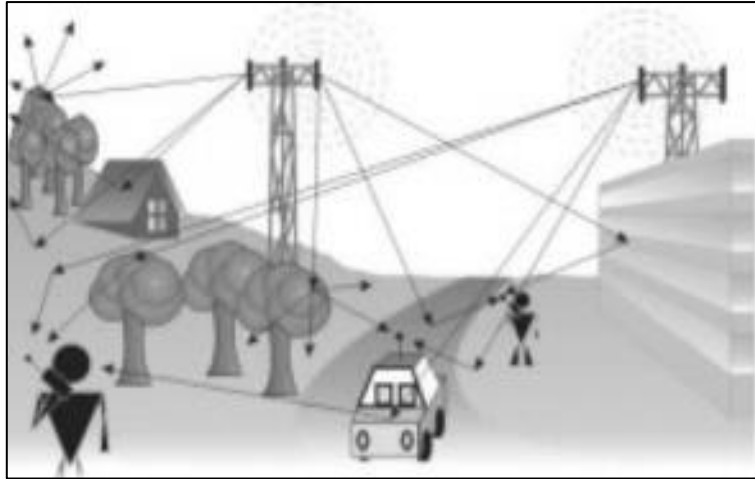
- Codificación Horizontal HE (H-BLAST)
- Codificación Vertical VE (V-BLAST)
- Combinación de HE y VE (D-BLAST)

### **2.3.7. Funcionamiento MIMO**

#### **2.3.7.1. Propagación multicamino**

Los sistemas de comunicación inalámbricos tienen como característica la propagación multicamino o multitrayecto, la cual consiste que entre un transmisor en un punto “X” y un receptor en un punto “Y” existe un camino primario o directo. La señal que llega al receptor es producto de la combinación lineal de las señales multicamino con la señal primaria. Por lo que MIMO toma como ventaja la propagación multicamino para incrementar el caudal eficaz, cobertura y la fiabilidad de las señales. (*Tecnología MIMO*; 2016, p.92-93)

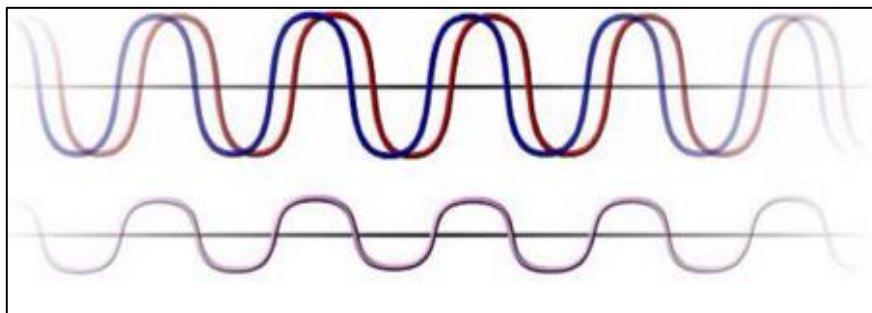
Sin embargo, no todas las señales que se transmiten toman el camino directo debido a múltiples factores como: reflexiones y/o refracciones, los cuales crean un cambio constante en el canal de propagación lo que disipa energía en amplitud, fase y tiempo. Estos efectos producen múltiples versiones de la señal transmitida, los cuales llegan a la antena receptora desplazada en tiempo una respecto a las otras, además poseen un desfase con respecto a la señal primaria. Dependiendo del desfase se generarán interferencias constructivas o destructivas provocando sumas o degradaciones de la señal original. (Yáñez P., 2009, p.24-25) (*Tecnología MIMO*; 2016, p.92-93)



**Figura 19-2:** Propagación multicamino.

**Fuente:** Yáñez, Paulina; 2009, p.25

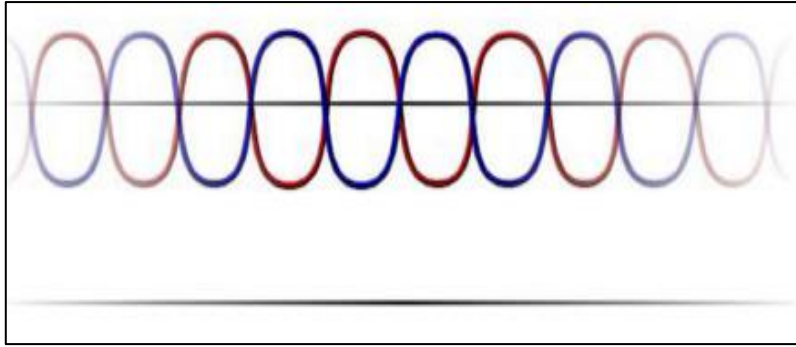
La Figura 20-2 representa a una señal multicamino (línea roja) con un pequeño desfase respecto a la señal primaria (línea azul), al combinarse en el receptor generarán una señal débil (línea gris).



**Figura 20-2:** Señales multicamino desfasadas respecto a la señal original.

**Fuente:** Anónimo; 2016, p.92

A diferencia de la Figura 21-2, si el desfase es de 180 grados la señal multicamino cancelara por completo a la señal primaria, haciendo que al receptor no llegue nada.



**Figura 21-2:** Señales multicamino desfasadas 180 grados.

**Fuente:** Anónimo; 2016, p.92

#### 2.3.7.2. MIMO y la propagación multicamino

La propagación multicamino ocasiona muchos problemas para las radiocomunicaciones, sin embargo, a través de varios estudios se descubrió que podría multiplicar la capacidad de los sistemas inalámbricos y es por lo que MIMO lo utiliza como ventaja.

MIMO toma a cada ruta multicamino como un canal diferente, creando así un “cable virtual” para cada ruta y el canal inalámbrico se comportará como un “mazo” de cables virtuales. Al tener múltiples antenas transmisoras separadas espacialmente se pueden transmitir más datos por medio de estos cables virtuales, aumentando el caudal efectivo (throughput). Además, la tasa máxima por canal crecerá linealmente con el número de subflujos de datos diferentes transmitidos en un mismo canal y gracias a la diversidad de antenas se incrementará también la distancia de cobertura. Sin embargo, al ser una transmisión sin cables, lo correcto sería decir que el canal inalámbrico actúa como un conjunto de cables, pero con gran grado de “fuga” entre ellos, por lo que al receptor llegara una señal producto de la combinación de múltiples subflujos transmitidos. El receptor mediante complejos algoritmos de procesamiento tendrá que separar cada señal para luego ordenarlas y combinarlas para recuperar la señal original. (Corrales E. & Gomez W., 2007, p.62-63) (Anónimo, 2016, p.94-95)

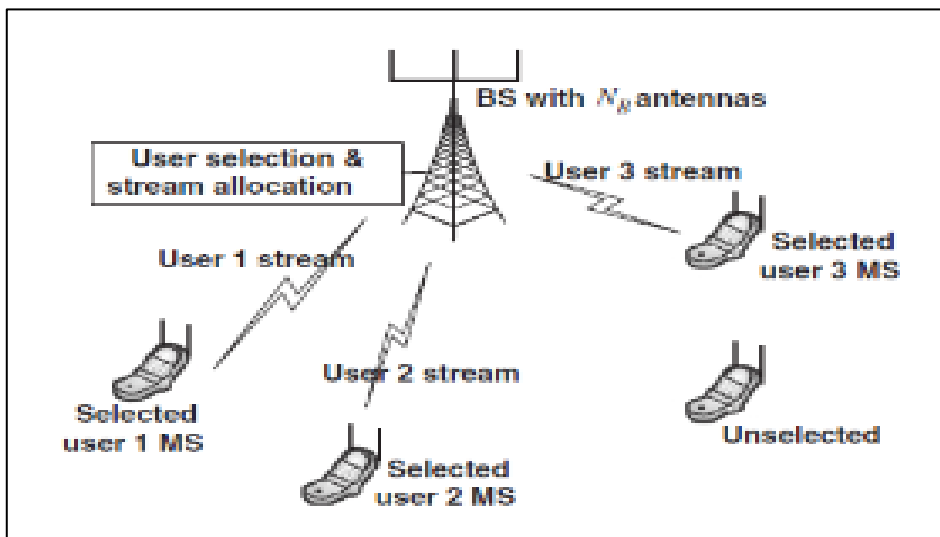
Producto de este proceso los sistemas de transmisión MIMO consiguen un incremento lineal de la eficiencia espectral frente al incremento logarítmico de los sistemas tradicionales de una sola antena, como consecuencia mejora la cobertura, calidad (BER), capacidad y tasa de bits. (Corrales E. & Gomez W., 2007, p.62-63) (Anónimo, 2016, p.94-95)

### 2.3.8. Multiantenas MIMO (MU-MIMO)

A diferencia de la estructura SU-MIMO (MIMO punto a punto) que se enfoca en mejorar e incrementar la capacidad del enlace Estación Base – Móvil, MU-MIMO busca mejorar o incrementar la capacidad de la celda en general, es decir que un número de terminales o móviles diferentes puedan compartir la banda de frecuencias mediante el multiplexado espacial, buscando cubrir la mayor cantidad de usuarios posibles. (Perrino G., 2013, p.27)

MU-MIMO lo que busca es transmitir simultáneamente múltiples señales a la misma frecuencia, por el mismo radiocanal y aprovechando la propagación multicamino, aumentando así la eficiencia espectral. Por ello en las estaciones base se utilizan modelos precodificadores que permiten una buena separación entre canales de datos de cada usuario y así minimizar interferencias. (Garrido S., 2013, p11-12)

La Figura 16-2 representa un escenario MU-MIMO donde múltiples usuarios (UEs) son servidos por una estación base (BS). Suponiendo que la BS y cada UE están equipados con  $N_B$  y  $N_M$  antenas. Los  $k$  usuarios independientes forman un conjunto virtual de  $(K \cdot N_M)$  antenas, las cuales se comunican con las  $N_B$  antenas de la BS. Las múltiples antenas permiten que los  $k$  usuarios independientes transmitan sus propios flujos de datos en el canal MAC al mismo tiempo o que la BS transmita flujos de datos a múltiples usuarios para ser decodificados en cada uno en el canal BC.



**Figura 22-2:** Señales multicamino desfasadas 180 grados.

Fuente: Anónimo; 2016, p.92



MU-MIMO es considerado a menudo como una extensión de SDMA. Esta tecnología admite múltiples conexiones en un solo canal convencional donde los diferentes usuarios se identifican mediante firmas espaciales. SDMA utiliza multiplexación espacial y permite una mayor velocidad de datos. Esto podría lograrse utilizando múltiples rutas como diferentes canales para transportar datos. (Maha Z. & Kosai R., 2012, p.5)

### 2.3.8.1. Clasificación de MU-MIMO

Una de las características de MU-MIMO es que puede funcionar bien en canales que tienen malas características de propagación y al revés, en los enlaces de LOS en los cuales MIMO convencional pierde eficiencia, MU-MIMO no tiene problemas. Pero hay que tener en cuenta que se requiere de un procesamiento de señales diferente al de MIMO convencional y esto se divide en:

#### ➤ PUNTO A MULTIPUNTO

Mediante ellos se desarrollan escenarios donde la comunicación es desde un solo usuario con múltiples antenas hacia varios usuarios o viceversa, dentro de este tipo se encuentran dos tipos de MIMO para cada enlace:

- **Enlace ascendente - Canal MAC:** aquí cada terminal transmite con una sola antena y la BS recibe con muchas, es decir múltiples enlaces punto a punto. Por lo tanto, los terminales no pueden aplicar la matriz de precodificación. En la BS hay que tratar a cada enlace de forma independiente, con estructuras de receptores lineales en un entorno. (Grupo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2016, p.11-14)  
El receptor realiza gran parte del procesamiento, necesita conocer el estado del canal y utiliza la información del estado del canal en el receptor (CSIR: Channel State Information at the Receiver). La determinación del CSIR es más fácil que la del CSIT, pero requiere de niveles significativos de capacidad de enlace ascendente para transmitir pilotos dedicados a cada usuario. Sin embargo, los sistemas MAC MIMO superan al MIMO punto a punto, especialmente si el número de antenas receptoras es mayor que el número de antenas transmisoras en cada usuario. (Electronicsnotes, 2020)
- **Enlace descendente - Canal BC:** La BS tiene M antenas y dispondrá de la información del canal radio CSI (Channel State Information), por lo que puede aplicarse una precodificación,

como en MIMO convencional. Los flujos de datos destinados a los  $k$  usuarios pasan a la matriz de precodificación con  $M$  salidas que se llevan a los  $M$  puertos de antenas. La BS utiliza procesadores avanzados para la transmisión incluyendo técnicas SDMA y precoding avanzado, además deberá conocer el estado del canal (CSIR: Channel State Information at the Receiver) (Grupo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2016, p.11-14)

MIMO MAC y MIMO BC tienen mayor rendimiento en comparación a SU-MIMO (MIMO punto a punto), especialmente cuando el número de antenas en la BS es mayor que el número de antenas de cada usuario.

#### ➤ MULTIPUNTO A MULTIPUNTO

También conocido como Network MIMO Ad Hoc (CO-MIMO), donde la comunicación es de varios usuarios a varios usuarios, tanto en el lado del Tx como en el lado del Rx. Cada nodo utiliza múltiples antenas distribuidas que pertenecen a múltiples nodos diferentes. En este tipo de comunicación cada nodo trata de aprovechar su propia interferencia y las interferencias de los nodos restantes de la red para mejorar el rendimiento de la codificación y decodificación de datos. Es una técnica muy útil para redes celulares que tienen topología ad hoc inalámbricas, donde múltiples nodos transmisores se comunican con múltiples nodos receptores a la vez. (*Tecnología MIMO*, 2016, p. 102-103)

#### 2.3.8.2. Ventajas de MU-MIMO

- Los sistemas MU-MIMO permiten obtener un nivel de ganancia directa en una capacidad de acceso múltiple que surge de los esquemas de multiplexación multiusuario. Esto es proporcional al número de antenas de estación base empleadas. (Electronicsnotes, 2020)
- MU-MIMO parece verse menos afectado por algunos problemas de propagación que afectan a los sistemas MIMO de un solo usuario. Estos incluyen la pérdida de rango de canal y la correlación de antena; aunque la correlación de canal todavía afecta la diversidad por usuario, no es un problema importante para la diversidad de múltiples usuarios. (Electronicsnotes, 2020)

- MU-MIMO permite lograr una ganancia de multiplexación espacial en la BS sin la necesidad de múltiples antenas en el UE. Esto permite la producción de terminales remotos baratos: la inteligencia y el costo se incluyen dentro de la BS. (Electronicsnotes, 2020)

### 2.3.9. Modulación QPSK

La modulación QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) es una modulación digital que viene de la modulación del desplazamiento en fase, con un número limitado de estados. Esta modulación también conocida como modulación 4-QAM. Es un esquema de modulación lineal digital donde la información transportada por la señal transmitida está contenida en la fase. Es una particularización de la modulación digital por desplazamiento de fase o PSK (Phase-Shift Keying). (Ramirez A., 2016, p.16-16)

Se representa mediante un diagrama de constelación con cuatro puntos equidistantes del centro de origen de coordenadas. La fase de la portadora toma uno de cuatro valores igualmente espaciados cada uno corresponde a un único símbolo. QPSK equivale a una señal de 4 símbolos desplazados entre sí 90° donde se modifica su fase aportando cada símbolo con 2 bits. (Ramirez A., 2016, p.16-16)

La señal QPSK se representa mediante la Ecuación 46-2:

$$S(t)_{QPSK} = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \left[ 2\pi f_c t + (i - 1) \frac{\pi}{2} \right]$$

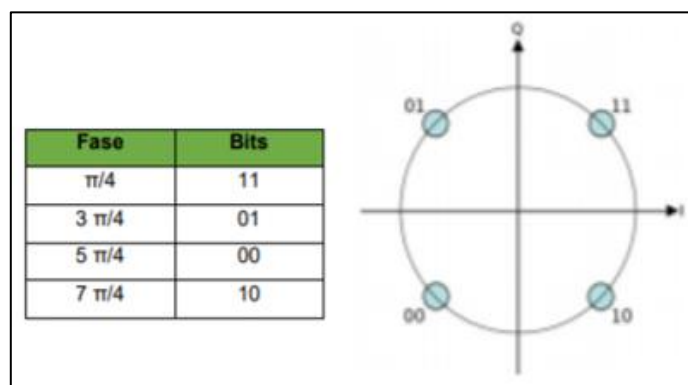
**Ecuación 46-2:** Energía mínima requerida para la transmisión.

Donde:

$E$  = es la energía de símbolo.

$T$  = tiempo de símbolo

El diagrama de constelación muestra 4 símbolos equi-espaciados. La asignación de bits a cada símbolo suele hacerse mediante el código Gray, que consiste en que entre dos símbolos adyacentes los símbolos solo se diferencian en 1 bit. Esto se escoge así para minimizar la tasa de bits erróneos. (Ramirez A., 2016, p.16-16)



**Figura 23-2:** Diagrama de constelación QPSK.

**Fuente:** Anónimo; 2016, p.92

Estos modelos de modulación son usados para aumentar la calidad de los sistemas de comunicaciones, pudiendo aumentar la cantidad de información a transmitir, sin aumentar su ancho de banda, teniendo especial cuidado con la calidad del canal, porque a mayores modulaciones mayor es la sensibilidad frente a las interferencias y ruidos. La polarización de la onda electromagnética se define como la trayectoria descrita por la componente vectorial de campo eléctrico en su propagación, de manera que mantenga la ortogonalidad respecto a la componente vectorial de campo magnético. (Lorente J., 2019, p.14)

## 2.4. Tecnología Radar

### 2.4.1. Historia de Radar

En 1880 el científico Heinrich Hertz demostró experimentalmente el concepto básico de radar mediante las predicciones de la teoría del campo eléctrico de Maxwell, concluyendo que las ondas RF en el espacio libre se propagan a la velocidad de la luz. Gracias a estos experimentos se demostró que las ondas de radio podían ser reflejadas en objetos y se recibidas de vuelta, lo que básicamente define a radar. (Merchán C., 2016, p.7-9)

En 1900 el alemán Christian Hulsmeyer tomando como base los estudios de Hertz continuó con las investigaciones a cerca de la reflexión de las ondas RF. Diseñó y construyó un aparato mejor

que el de Hertz, este era capaz de captar ondas RF reflejadas por los buques, orientándolo a ayudar a la navegación de buques y evitar colisiones entre ellos. Presento su deseo a la armada, pero no se interesaron en el debido a que tenía un alcance de solo una milla. Años más tarde se logró transmitir y recibir en una frecuencia específica, y fue en el año de 1920 cuando Marconi le dio uso y fue posible la transmisión de información. (Merchán C., 2016, p.7-9)

Tras algunos años Sir Robert Watson-Watt logró llevar a cabo un contacto aéreo a 15 millas de distancia y en 1936 Hoyt Taylor y Young, científicos del Naval Research Laboratory, consiguieron un alcance de 25 millas, sobrepasando el horizonte visual, siendo el primer radar de onda pulsada de la historia. (Merchán C., 2016, p.7-9)

A finales de 1920 e inicios de 1921 se dio un desarrollo acelerado de radar debido al surgimiento de los bombarderos militares. De forma independiente países como: Estados Unidos, Francia, Rusia, Gran Bretaña, Alemania, Japón e Italia, realizaron investigaciones debido a las amenazas de aproximación cercana de los bombarderos pesados siendo los localizadores de sonido de los primeros sensores examinados, cabe mencionar que los métodos de detecciones fueron muy similares pero los descubrimientos y adelantos estuvieron envueltos en el secretismo. En 1934 el laboratorio naval de Estados Unidos comenzó el desarrollo de un radar pulsado realizando pruebas exitosas en 1936. (Merchán C., 2016, p.7-9)

Durante la Segunda Guerra Mundial era necesaria la detección temprana de objetos a grandes distancias por lo cual radar fue de mucha ayuda. En la etapa de pre-guerra, Inglaterra invirtió en un sistema radar para la vigilancia aérea denominado Chain Home, el cual permaneció activo hasta el final de la Guerra. (Merchán C., 2016, p.7-9)

En el año de 1940 Estados Unidos y Gran Bretaña comenzaron a intercambiar información relacionada a sus avances a cerca del desarrollo del radar, el cual trabajaba en rangos HF y VHF, pero debido al descubrimiento del tubo de potencia de magnetrón de microondas y la creación del laboratorio de radicación en el Instituto Tecnológico de Massachusetts se dio pie para las bases del desarrollo del radar en frecuencias microondas. (Merchán C., 2016, p.7-9)

Gracias a los descubrimientos y experimentos sobre radar llevados a cabo durante la guerra permitieron su rápido crecimiento, pero años posteriores los estudios se enfocaron en todo aquello que quedo incompleto durante la guerra. Desde ese momento los sistemas radar han continuado con su desarrollo gracias a los avances tecnológicos que se dan con el tiempo, luego fueron desarrollándose impulsados por las necesidades militares para aplicaciones de vigilancia, navegación y orientación de vehículos aéreos, de tierra y mar. (Merchán C., 2016, p.7-9)

En la actualidad los sistemas radar se han apoyado del avance de la tecnología gozando así cada vez más de una amplia gama de aplicaciones en el ámbito civil para el control de tráfico terrestre

y aéreo, aplicaciones meteorológicas como sistemas para vigilancia a gran escala y predicción atmosférica, entre otras. (Merchán C., 2016, p.7-9)

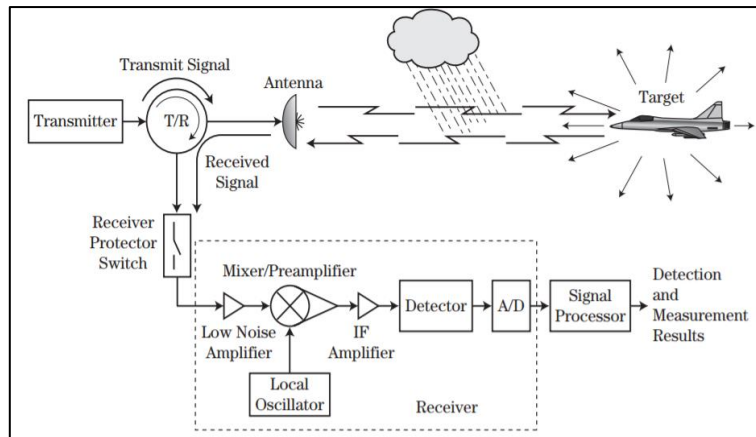
#### **2.4.2. Definición**

El nombre de RADAR es una contracción de Radio Detection And Ranging (Detección y Medida de Distancias por Radio). Es un sistema electromagnético para la detección y localización de objetos. En un primer momento fue desarrollado como un dispositivo de detección para advertir de la aproximación de aeronaves enemigas, así como para saber en qué dirección lanzar las armas antiaéreas, este fue la causa del sistema Chain Home utilizado por la RAF durante la Segunda Guerra Mundial para contrarrestar los ataques de Luftwaffe alemana. Opera a partir de la transmisión de un tipo de onda particular, detectando la naturaleza del eco de la señal. Permite extender la capacidad del ser humano de percibir estímulos del ambiente a través de alguno de sus sentidos, especialmente el de la visión, sin embargo, no es ningún sustituto del ojo humano en el sentido de que no percibe la imagen de los objetos con tanta precisión, no detecta el “color”, etc. (López I., 2011, p.1) (Vera F. & Mora A., 2017, p.22)

Fue diseñado para percibir objetos en condiciones en las que el ojo humano no es capaz de hacerlo y lo más importante de esta clase de dispositivos es que pueden medir la distancia o rango hasta el objeto en cuestión. (López I., 2011, p.1)

#### **2.4.3. Funcionamiento**

La tecnología radar es un sistema eléctrico mediante el cual se transmiten ondas electromagnéticas de RF hacia una región en específico y recibe las ondas reflejadas cuando estas chocan con un objeto. Un sistema radar se conforma principalmente de transmisor, receptor, antena y procesador de señal, ver Figura 24-2. (Scheer A. & Holm W., 2010, p.4-5)



**Figura 24-2:** Elementos principales de un sistema radar.

**Fuente:** Scheer, James; Holm, William; 2010, p.5

El transmisor es el encargado de generar las ondas electromagnéticas, mediante un dispositivo T/R, por lo general se trata de un switch o un circulador, el transmisor se conecta a la antena la cual toma como entradas a dichas ondas para posteriormente introducirlas en el medio de propagación, por lo general la atmosfera.

El dispositivo T/R brinda un punto de conexión para que el transmisor y el receptor se conecten con la antena de forma simultánea, además de aislar el transmisor del receptor para proteger a los componentes más sensibles del mismo. Una vez que la señal se propaga al medio, las ondas EM inducen corrientes hacia el objetivo lo que las revierte en el medio ambiente, a estas ondas no deseadas se las conoce también como clutter. (Scheer A. & Holm W., 2010, p.4-5)

Las ondas reflejadas llegan a la antena receptora, el cual la captura y luego es aplicada a los circuitos que posee el receptor, estos se encargan de amplificar la señal, convertirla a una frecuencia intermedia (IF), aplicarla a un convertidor ADC y finalmente pasarla al procesador señal/datos. (Scheer A. & Holm W., 2010, p.4-5)

Para determinar el rango hacia el objeto detectado por el radar, se utiliza la siguiente formula:

$$R = \frac{c\Delta T}{2}$$

**Ecuación 47-2:** Rango hacia el objeto.

Donde:

$c$ : velocidad de la luz,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

$\Delta T$ : tiempo del viaje ida/vuelta en segundos.

$R$ : distancia hacia el objetivo en metros.

Cabe recalcar que las señales recibidas coexisten con la interferencia y están pueden ser:

- Interferencia de ondas EM reflejadas con objetos desinterés o clutter.
- Interferencia por ruido electrónico interno y externo.
- Interferencia electromagnética EMI (producidas por fuentes humanas)
- Interferencias ECM.

#### **2.4.4. Componentes básicos**

Los componentes básicos de un sistema radar son transmisor, receptor, procesador y presentador. El proceso inicia cuando el transmisor mediante la antena Tx irradia una señal electromagnética hacia el espacio con la potencia adecuada, la onda electromagnética viaja a la velocidad de la luz por lo cual la respuesta es inmediata. Después de un tiempo determinado la antena cesa la transmisión y mediante un switch pasa a modo de recepción. Si el sistema utiliza solo una antena tanto para transmisión como recepción, independientes, el switch es completamente innecesario. La información captada por el receptor pasa a un procesador y a partir de ella se obtiene la posición y velocidad del objeto. La distancia del objeto se puede determinar a partir del tiempo que tarda la señal emitida por el radar en ir hacia el objeto y regresar hacia el radar. Finalmente, dicha información es extraída y presentada de forma adecuada. (Merchán C., 2016, p.11)

##### **2.4.4.1. Transmisor**

Desempeña un papel importante en el sistema ya que determina la sensibilidad y el rango de resolución del radar. Se encargan de radiar campos electromagnéticos contenidos en una onda



especifica moduladas para llevar información. Deben generar transmisiones estables y de bajo ruido para que las señales externas no interfieran con la detección de objetos. El transmisor debe ser eficiente, confiable, poseer un ancho de banda y potencia amplios. (Charvart G., 2014, p.2)

#### *2.4.4.2. Antena*

Las antenas de un sistema radar permite determinar la sensibilidad y la resolución angular del mismo. Dentro de los tipos más comunes de antenas empleados en estos sistemas son: reflector parabólico, arreglos desfasados y antenas de alimentación de escaneo.

#### *2.4.4.3. Receptor*

El receptor del sistema se encarga de recoger lo campo electromagnéticos a una longitud de onda y los demoduladores para posteriormente reproducir la información transmitida. Se encargan de separar la señal deseada del ruido y otras señales interferentes. Sintonizan, amplifican y detectan una longitud de onda o rango de longitudes de onda específicos y excluyen las demás. (Charvart G., 2014, p.85)

#### **2.4.5. Ecuación Radar**

La precisión de un sistema de radiación es algo complejo ya que necesita de un estudio detallado no solo de la potencia radiada y las condiciones de propagación, sino también de la forma de onda concreta que ha sido emitida. Sin embargo, para calcular el alcance máximo, se lo puede calcular de manera directa a partir del balance de potencia en el camino de ida y vuelta de la señal transmitida. (López J., 2014, p.15-17) (Berzal C., 2015, p.5-6)

Supongamos que inicialmente el sistema radar utiliza una antena isotrópica cuya potencia transmitida es  $P_t$ , a una distancia  $R$ , y propagada en el espacio libre. La potencia inicial  $P_t$  se reparte entre todos los puntos que forman la superficie de una esfera de radio  $R$ , representada en la Ecuación 48-2. (López J., 2014, p.15-17)

$$\rho_{iso}^{tx}(d) = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

**Ecuación 48-2:** Densidad de potencia transmitida por unidad de superficie.

Donde  $\rho_{iso}^{tx}(d)$  es la densidad de potencia transmitida por unidad de superficie, medida en  $W/m^2$ . Debido a las condiciones de propagación en espacio libre, la pérdida de potencia puntual es única y exclusivamente debido al incremento cuadrático de la superficie esférica en la que va a ser repartida la potencia transmitida a medida que aumenta R. (López J., 2014, p.15-17)

Si a esa distancia R se encuentra un obstáculo, este va a reflejar parte de la potencia incidente en varias direcciones, y lo más probable es que en la dirección del radar se refleje una fracción  $\sigma$  de la potencia transmitida. La potencia reflejada recorrerá el camino de vuelta hacia el radar y al llegar al será afectado por el efecto de propagación de espacio libre  $\frac{1}{4\pi R^2}$ . La ecuación 49-2 representa así a la densidad de potencia recibida en el radar originada por un obstáculo a una distancia R. (López J., 2014, p.15-17)

$$\rho_{iso}^{tx}(d) = \frac{P_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} = \frac{P_t \sigma}{(4\pi)^2 R^4}$$

**Ecuación 49-2:** Densidad de potencia recibida originada por 1 obstáculo a una distancia R.

Hay que tener en cuenta dos aspectos sobre un sistema radar. Radar no utiliza antenas isotrópicas sino antenas directivas para así concentrar la potencia radiada en una dirección determinada, es decir la densidad de potencia transmitida se verá amplificada por un factor igual a la ganancia de la antena transmisora,  $G_t$ . Además, la antena receptora va a captar la mayor cantidad de potencia por unidad de superficie posible, denominado área efectiva de la antena,  $A_e$ . (López J., 2014, p.15-17)

El área efectiva es la fracción útil de toda el área  $A$  que dispone la antena, es decir,  $A_e = A \cdot \eta$ , en donde  $\eta$  es la fracción de eficiencia de la antena. Si la antena receptora es la misma que la utilizada en transmisión, lo cual es lo habitual en los sistemas radar, es posible expresar el área efectiva de la antena en función de la ganancia de transmisión. (López J., 2014, p.15-17)

$$A_e = \frac{G_t \lambda^2}{4\pi}$$

**Ecuación 50-2:** Área efectiva de la antena en función de  $G_t$ .

Teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados, se puede expresar a la potencia recibida en un sistema radar ante la presencia de un objeto a una distancia R mediante la Ecuación 51-2

$$P_r = \frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

**Ecuación 51-2:** Potencia recibida en un sistema radar.

A partir de la Ecuación 52-2, se puede calcular la distancia máxima a la que se puede detectar un objeto.

$$d_{max} = \left( \frac{P_t G_t A_e \sigma}{4\pi^2 P_{min}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

**Ecuación 52-2:** Ecuación radar.

Donde  $P_{min}$  es la sensibilidad o potencia mínima detectable por el receptor. La Ecuación 52-2 se conoce también como Ecuación Radar, la cual relaciona el alcance máximo con los parámetros de transmisión y recepción del sistema. (López J., 2014, p.15-17)

Hay que tener en cuenta que la potencia transmitida de la Ecuación 53-2 se refiere netamente a la potencia de la señal transmitida, es decir, la potencia de la señal pulsada que se transmite durante el tiempo de actividad  $T_s$ . Esta potencia transmitida se considera en el sentido de la potencia efectiva porque si se analiza la transmisión de señal durante todo un periodo de repetición  $T_r$ , la posible presencia de cierto tiempo de inactividad  $T_i$  hace que la potencia media transmitida sea: (López J., 2014, p.15-17)

$$P_{av} = \frac{T_r - T_i}{T_r} P_t = T_s F_r P_t = \zeta P_t$$

**Ecuación 53-2:** Potencia media transmitida.

Donde  $\zeta$  es el factor de ciclo de trabajo o duty cycle.

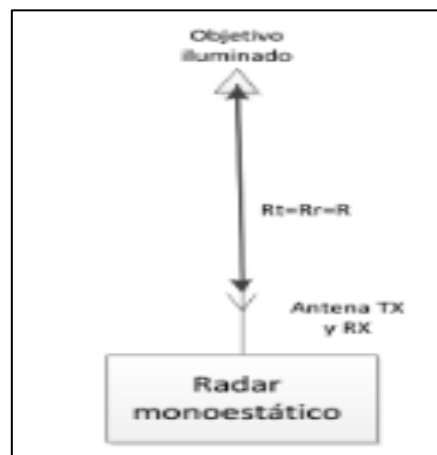
$$\zeta = \frac{P_{av}}{P_t}$$

**Ecuación 54-2:** Duty cycle o factor de ciclo de trabajo.

#### 2.4.6. Clasificación de radar

##### 2.4.6.1. Por el número de antenas

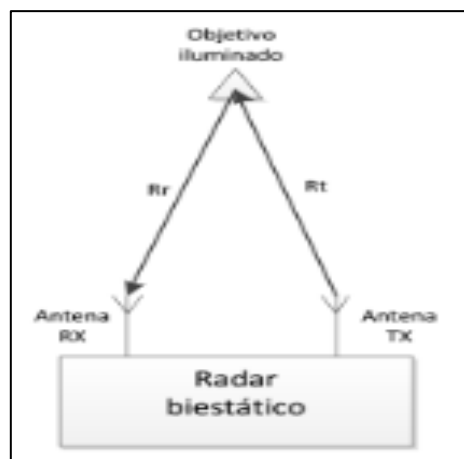
- **Mono estático:** Tanto transmisor como receptor comparten la misma antena y se ubican en una misma posición de forma estática. Una de sus desventajas es que es muy difícil proporcionar un buen aislamiento entre transmisor y receptor debido a que ambos están conectados a la antena. (Scheer A. & Holm W.; 2010, p.18-20)



**Figura 25-2:** Radar mono estático.

**Fuente:** Vera, Francisco; Mora, Aandrea; 2017, p.23

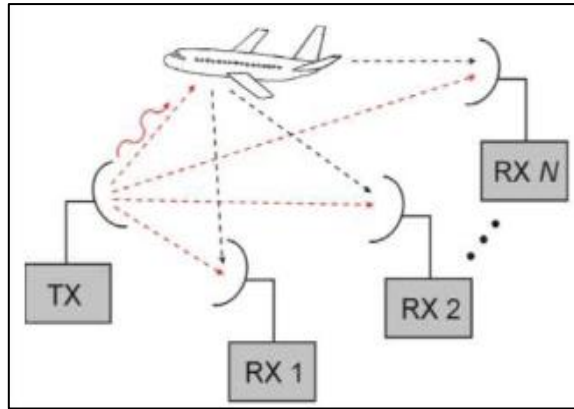
- **Pseudo-mono estático:** Aun teniendo las antenas transmisoras y receptoras separadas, el ángulo subtendido entre ellos es cercano a cero, por lo que son considerados como mono-estáticos. (Vera F. & Mora A., 2017, p.23)
- **Biestático:** tanto el transmisor como el receptor trabajan con sus antenas de forma independiente y se encuentran separados cierta distancia, de modo que los ángulos que se forman hacia el objetivo sean lo suficientemente diferentes, además de que la posición del sistema es estática. Una antena transmite y la otra recibe en el mismo o en diferente emplazamiento de modo que los ángulos que se forman hacia el objetivo sean lo suficientemente diferentes. (Scheer A. & Holm W.; 2010, p.18-20) (Merchán C., 2016, p.12)



**Figura 26-2:** Radar Biestático.

**Fuente:** Vera, Francisco; Mora, Aandrea; 2017, p.23

- **Multiestático:** consta de dos transmisores y un único receptor o varios receptores, separados por cierta distancia, combinando la información recibida por las múltiples antenas. Son capaces de captar las señales reflejadas por el blanco en distintos ángulos lo que podría representar una identificación más eficaz. (Merchán C., 2016, p.12)



**Figura 27-2:** Radar Multiestático.

**Fuente:** Merchán, Christian; 2016, p.13

- **De dispersión total:** están configurados para que la detección se produzca cuando los blancos pasen entre el transmisor y el receptor, es decir, con un ángulo biestático cerca de  $180^\circ$ . Son ideales para la detección de aviones stealth (utilizan tecnología de invisibilidad) pero el seguimiento y la información en medición de distancia es muy difícil, además el Doppler es muy inexacto debido al movimiento de los blancos. (Vera F. & Mora A., 2017, p.23)
- **Pasivos:** utilizan información de transmisores que no pertenecen al radar, pueden ser biestáticos o multiestáticos. (Vera F. & Mora A., 2017, p.24)

#### 2.4.6.2. Según el objetivo

- **Radar primario PSR (Primary Surveillance Radar):** irradian ondas electromagnéticas en cortos lapsos de tiempo. La señal que se transmite choca con el objeto, se refleja y parte de esta se transmite devuelta al radar, se determina la distancia analizando el tiempo que tarda la señal en ir y volver. (Merchán C., 2016, p.13) (Vera F. & Mora A., 2017, p.24)
- **Radar secundario de vigilancia SSR (Secondary Surveillance Radar):** transmiten señales de forma codificada que interrogan al blanco. El blanco posee un dispositivo llamado transponder, el cual permite responder las señales enviadas por el radar y proporciona su información mediante una señal codificada. Esta información puede ser de altitud, distancia, si se trata de vehículos militares se puede llegar a conocer si se trata de un enemigo o amigo. Este tipo de radar no depende de la señal reflejada, a diferencia de los PSR, sino que reciben

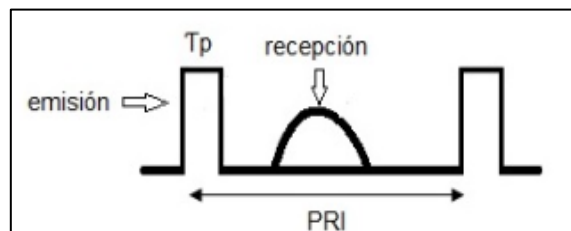
información directamente del blanco. Son muy utilizados en aviación. (Merchán C., 2016, p.13)  
(Vera F. & Mora A., 2017, p.24)

#### 2.4.6.3. Según su forma de onda

- **De onda pulsada:** su funcionamiento es de lo más tradicional. Transmite pulsos en ráfagas muy cortas, pero al ser de potencia en el orden de los kilovatios los hace relativamente grandes. La información recibida se obtiene a partir del tiempo que la señal llega al blanco y regresa al radar y la velocidad con la que se transmitió el pulso, el cual puede o no estar modulado.

Dentro de estos radares se encuentran aquellos que tienen una Frecuencia de Repetición de Pulsos (PRF): (Merchán C., 2016, p.15) (Vera F. & Mora A., 2017, p.24-25)

- **Frecuencia de repetición de pulsos baja:** se utilizan para medir distancias de blancos, donde su velocidad radial no es de interés.
- **Frecuencia de repetición de pulsos media**
- **Frecuencia de repetición de pulsos alta:** se utilizan para medir velocidad



**Figura 28-2:** Radar de onda pulsada.

**Fuente:** Vera, Francisco; Mora, Aandrea; 2017, p.25

- **De onda continua (CW):** utilizan señales continuas en lugar de ráfagas cortas, es decir transmiten de forma ininterrumpida. Utilizan antenas separadas tanto para el transmisor como para el receptor, además de que la señal normalmente se encuentra modulada para poder determinar cuándo se transmitió. Para medir la distancia del blanco es necesario que la señal este modulada, mientras que si solo se transmite la portadora se obtiene información sobre la velocidad. Son capaces de medir de forma precisa la posición angular y la velocidad radial del blanco. Los radares CW sin modulación principalmente son utilizados para búsqueda y

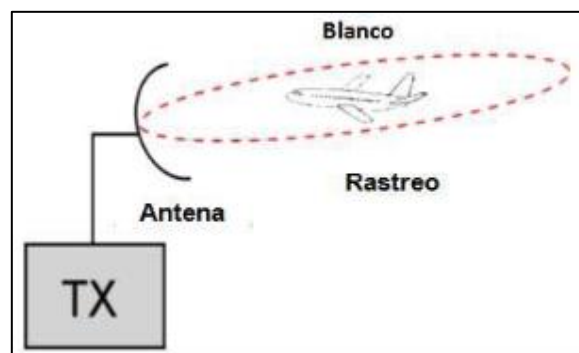
seguimiento de blancos móviles, así como el guiado de misiles. (Merchán C., 2016, p.15) (Vera F. & Mora A., 2017, p.24-25)

Dentro de este tipo de radares se encuentran:

- **Radar Doppler:** transmiten una onda continua de frecuencia fija, cuando la señal encuentra el objeto en movimiento, la frecuencia de la onda reflejada cambia respecto a la onda transmitida, mediante la variación de frecuencia el radar puede determinar el objetivo. (Merchán C., 2016, p.15)
- **Radar FM:** transmiten ondas continuas pero moduladas en frecuencia, estas variaciones de frecuencia que presenta la señal permiten además de conocer la velocidad del objetivo, posición. (Merchán C., 2016, p.15)

#### 2.4.6.4. Según la finalidad

- **Radar de seguimiento o multifunción:** pueden seguir el movimiento de un objeto, por ejemplo, los radares de seguimiento de misiles.

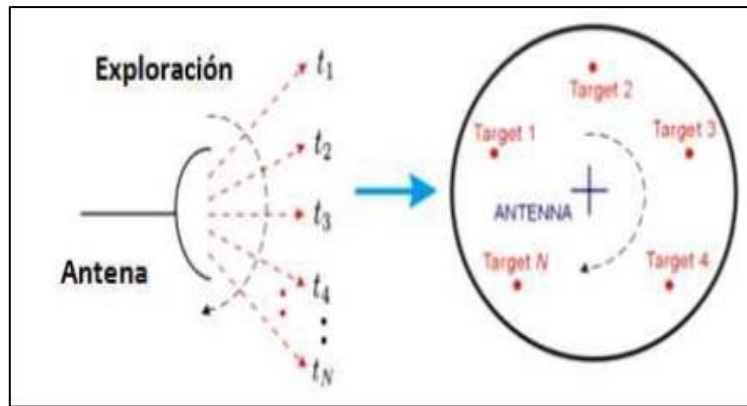


**Figura 29-2:** Radar de seguimiento.

**Fuente:** Merchán, Christian; 2016, p.14

- **Radar de vigilancia:** (scanning radar) se encargan de explorar todo el espacio o una porción de él para identificar al objeto, siempre y cuando se encuentre dentro de su rango de alcance. (Merchán C., 2016, p.14)



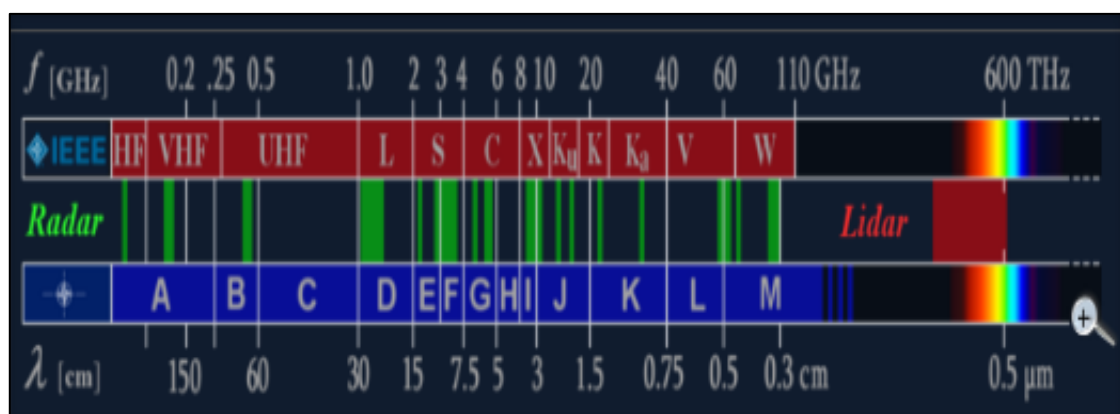


**Figura 30-2:** Radar de exploración.

**Fuente:** Merchán, Christian; 2016, p.14

#### 2.4.7. Banda de frecuencias para radar

Los diferentes sistemas radar han sido asignados en función de su frecuencia de operación la cual depende de la aplicación en la que vayan a operar, por lo que el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) les asigno diferentes bandas del espectro mediante letras, como se observa en la Figura 31-2.



**Figura 31-2:** Bandas de frecuencias para radar.

**Fuente:** Merchán, Christian; 2016, p.16

**Tabla 2-2:** Bandas de frecuencias para radar.

<b>Designación de bandas de frecuencias</b>	<b>Rango de frecuencias</b>		<b>Longitudes de ondas</b>	<b>Campo de trabajo</b>
<b>HF</b>	3-30 MHz	A	10-100 m	Radars de vigilancia costera, vigilancia OTH
<b>VHF</b>	30-300 MHz	A<0.25; B>0.25	0.9-6 m	Radars de vigilancia a distancias muy elevadas, penetración en el terreno.
<b>UHF</b>	300-1000 MHz	B<0.5; C>0.5	0.3-1 m	Radars de vigilancia a distancias muy elevadas, penetración en el terreno y a través de la vegetación
<b>Banda L</b>	1-2 GHz	D	15-30 m	Radar para distancias elevadas, control de tráfico en ruta.
<b>Banda S</b>	2-4 GHz	E< 3.0; F> 3.0	7.5-15 cm	Radars para vigilancia a distancias intermedias. Control de tráfico en terminales. Condiciones meteorológicas a largas distancias
<b>Banda C</b>	4-8 GHz	G< 6.0; H>6.0	3.75-7.5 cm	Radars de seguimiento a distancias elevadas. Meteorología
<b>Banda X</b>	8-12.5 GHz	I< 100; J>10.0	2.5-3.75 cm	Radars de seguimiento a distancias cortas Guía de misiles, meteorología, cartografía de resolución media, radars de superficie aeroportuarios.
<b>Banda Ku</b>	12.5-18 GHz	J	1.67-2.5cm	Cartografía de alta resolución. Altímetros para satélites
<b>Banda K</b>	18-26.5 GHz	J<20.0; K>20.0	1.11-1.67 cm	Absorción del vapor de agua. Se usa para meteorología, para detectar nubes. También para control de velocidad de motoristas.

<b>Banda Ka</b>	26.5-40 GHz	K	0.75-1.1 cm	Cartografía de muy alta resolución vigilancia de aeropuertos. Usado para accionar cámaras para fotografía matrículas de coches infractores
<b>V &amp; W o MMW</b>	Normal > 34 GHz	L<60.0; M>60.0	0.3-0.5 cm	Comunicaciones militares

Fuente: Mahafza B., Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, 3ª ed., Alabama-USA., CRC Press., 2013., p. 4.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

Los sistemas de radar pueden variar su frecuencia dependiendo de su aplicación. Al emplear frecuencias altas va a mejorar su resolución y exactitud, además de que reduce el tamaño de las antenas, sin embargo, si utiliza frecuencias bajas se extiende el alcance de localización. (Merchán C., 2016, p.17)

#### 2.4.8. Aplicaciones de los sistemas radar

Los sistemas radar fueron creados inicialmente como herramientas de defensa, para advertir sobre la presencia de enemigos, actualmente siguen el mismo principio, pero para una gran cantidad de aplicaciones con fines civiles como:

- **Control de tráfico aéreo:** son una pieza clave tanto a nivel local (zonas aeroportuarias) como a nivel de seguimiento de aeronaves en ruta.
- **Navegación marina:** son instalados en embarcaciones náuticas para evitar obstáculos, ya sea a nivel de superficie, otras embarcaciones, o debajo del nivel del mar, profundidad del suelo. (López J., 2014, p.22)
- **Seguridad vial:** permiten monitorizar la velocidad de los vehículos que circulan por ciertos tramos de la red viaria, con el fin de detectar posibles infracciones. (López J., 2014, p.22)
- **Navegación aérea:** para estos se utilizan radares meteorológicos, incorporados en los aviones, permiten detectar zonas meteorológicamente adversas que se pueden encontrar en el

camino de la ruta, brindando información valiosa para preservar la seguridad del vuelo. (López J., 2014, p.22)

- **Remote sensing:** agrupa a las aplicaciones que requieren la medida de magnitudes físicas de manera remota como: temperatura en zonas boscosas durante la prevención de incendios, o a nivel del mar en zonas con posible actividad sísmica que puedan dar lugar a tsunamis. (López J., 2014, p.22)
- **Geofísica:** se utilizan radares GPR (Ground Penetrating Radar), los cuales permiten obtener imágenes del subsuelo a partir del análisis de señales reflejadas en las capas de estratos, proporcionando información remota sin la necesidad de hacer prospecciones. (López J., 2014, p.22)
- **Meteorología:** permiten detectar la presencia de partículas en la atmosfera como gotas de agua o nieve. (López J., 2014, p.22)
- **Espacio:** son empleados en misiones espaciales para el alineado y ensamblaje de módulos espaciales en órbita, así también para el aterrizaje. (López J., 2014, p.22)

#### **2.4.9. Factores externos que afectan el funcionamiento**

- **Altura del obstáculo o blanco:** es sumamente importante la altura a la que se encuentra el blanco para determinar la distancia ya que las ondas de propagación del radar son lineales.
- **Tamaño:** El tamaño de los ecos depende mucho de la superficie de reflexión del obstáculo, mientras más grande sea, más grandes serán los ecos.
- **Forma:** los obstáculos generan ecos de diferente intensidad y dependen mucho de su aspecto, es decir, si los blancos tienen forma cóncava, las ondas reflejadas se concentrarán en la antena y si tienen forma convexa las ondas se dispersarán. (Vera F. & Mora A., 2017, p.33-34)
- **Aspecto:** se refiere al ángulo que forma el obstáculo con el haz del radar, si este cambia de aspecto, la superficie cambia para reflejar las ondas. Mientras el ángulo esté más cerca de los 90°, el eco será mayor. (Vera F. & Mora A., 2017, p.33-34)

- **Composición:** Diferentes sustancias intervienen en la reflexión de las ondas, sin embargo, depende de sus cualidades eléctricas intrínsecas, por ejemplo: el agua y el metal generan buenos ecos. (Vera F. & Mora A., 2017, p.33-34)
- **Textura:** la textura de un objeto puede influir en modificar los efectos del aspecto y la forma. Si la textura es plana hay buenas cualidades para la reflexión, pero puede no tener buenos resultados en los ecos. Si la textura es rugosa mejora el eco de un objeto que no tenga un aspecto bueno. (Vera F. & Mora A., 2017, p.33-34)

#### **2.4.10. Señales útiles para SDR**

Hay un sin número de señales para el trabajo de un SDR, las cuales depende de la aplicación a realizar, sin embargo, para aplicaciones radar las más utilizadas son:

- Pulso corto
- Onda continua (CW)
- Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM)
- Onda continúa modulada en frecuencia (FMCW)
- Onda continua de frecuencia escalonada (SFCW)
- Pulso Chirp (frecuencia lineal modulada LFM).

Para el desarrollo de la presente tesis se usará FMCW, la cual se explicará a continuación.

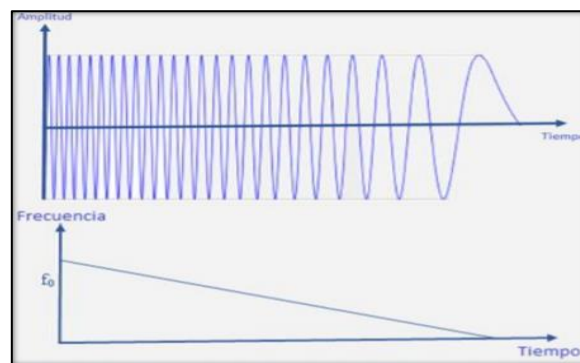
##### **2.4.10.1. Onda continúa modulada en frecuencia (FMCW)**

Los radares FMCW tienen la capacidad de variar su frecuencia de trabajo durante la medida, lo que implica que la señal que transmiten estos radares se encuentra modulada en frecuencia. Uno de los beneficios de la modulación en frecuencia es que permite medir distancias, ya que dicha modulación proporciona una referencia temporal. Además, si la frecuencia de modulación es lineal a esta se la conoce como chirp, simplificando considerablemente el proceso de análisis de las señales de eco. Las formas de onda moduladas en frecuencia o en fase son usadas en los radares

de onda continua (CW), con el fin de lograr anchos de bandas mucho más amplios o también para aumentar la precisión en la detección de blancos. (Merchán C, 2016, p.17)

#### 2.4.11. Señal Chirp

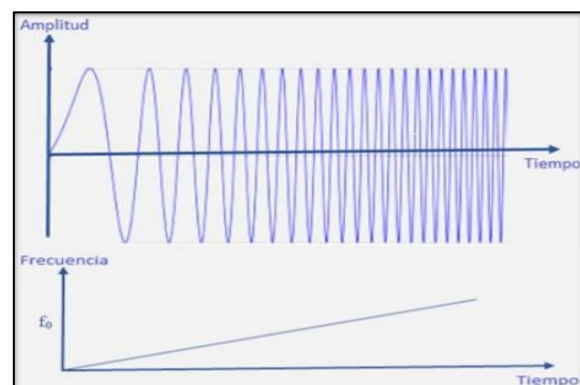
Son aquellas señales que varían su frecuencia a lo largo de un periodo de tiempo, pudiendo cambiar de una frecuencia alta a una baja, conocido como Down-chirp.



**Figura 32-2:** Forma de onda Down-chirp.

**Fuente:** Merchán, Christian; 2016, p.18

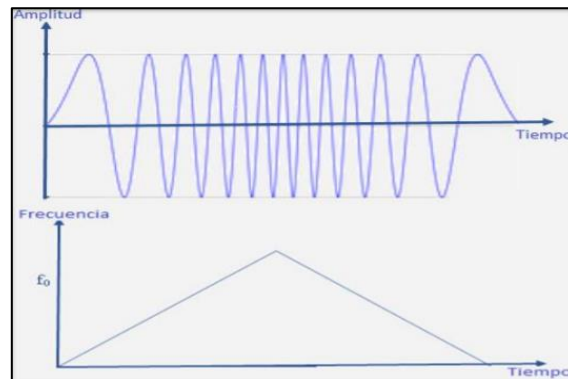
Si cambia de una frecuencia baja a una alta se lo conoce como up-chirp.



**Figura 33-2:** Forma de onda up-chirp.

**Fuente:** Merchán, Christian; 2016, p.18

También es posible generar una señal triangular que es el resultado de la combinación de las señales Down-chirp y up-chirp.



**Figura 34-2:** Forma de onda triangular.

**Fuente:** Merchán, Christian; 2016, p.19

## 2.4.12. Análisis de Radar

### 2.4.12.1. Resolución del sistema

Es la distancia mínima entre dos blancos de similares características, detectados por el radar.

$$fs = 2 * f_{max} = B$$

**Ecuación 55-2:** Frecuencia de muestreo.

$$\Delta R = e_d = \frac{c}{B} = \frac{c}{2 * f_{max}}$$

**Ecuación 56-2:** Resolución del sistema.

Donde:

$B$ =Ancho de banda.

$f_{max}$ = Frecuencia máxima

$e_d$ = Exactitud de la distancia.

$c$ = Velocidad de la luz

#### 2.4.12.2. Distancia máxima

La distancia máxima de una señal recibida depende del tiempo final. Ver Figura 35-2.

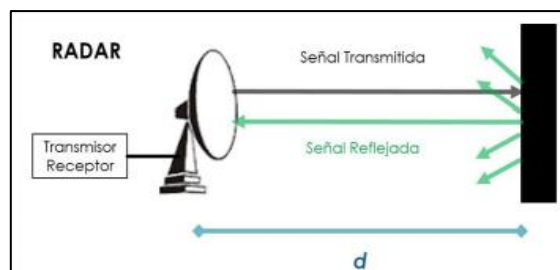
$$d_{maxteorica} = \frac{c * t_f}{2}$$

**Ecuación 57-2:** Distancia máxima teórica.

Aunque de forma práctica la distancia se reduce a la mitad.

$$d_{maxpractica} = \frac{c * t_f}{4}$$

**Ecuación 58-2:** Distancia máxima práctica.



**Figura 35-2:** Señal Tx - reflejada.

**Fuente:** Merchán, Christian.; 2016, p.20



### 2.4.12.3. *Detección de objeto*

Para realizar la detección de un objeto, el proceso parte desde la modulación de la señal transmitida mediante una función coseno, la cual está en función del tiempo y la frecuencia de muestreo como se observa en la Ecuación 59-2.

$$V(t) = V_o \cos (2\pi ft + \varphi_o)$$

**Ecuación 59-2:** Señal transmitida.

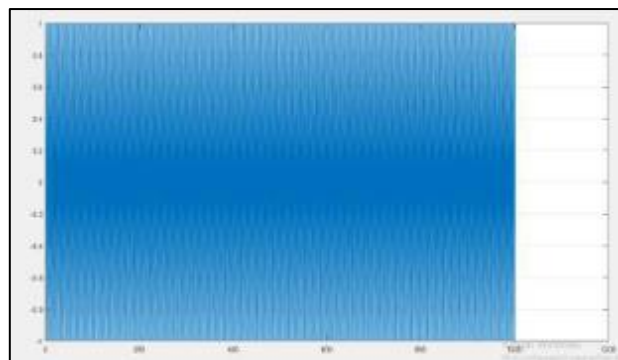
Donde:

$V_o$ = Velocidad de propagación.

$c$ = Velocidad de la luz.

$t$ = Tiempo.

$\varphi_o$ = Angulo de desfase.



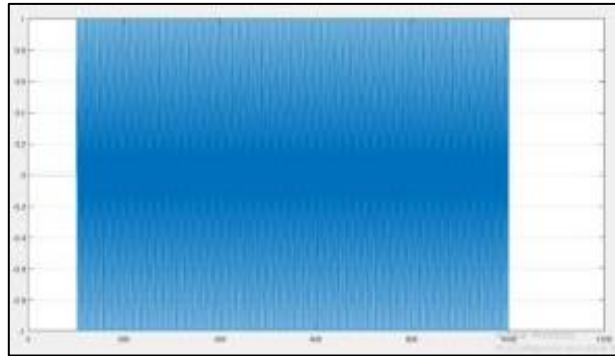
**Figura 36-2:** Señal transmitida.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

La señal transmitida se transmite al espacio libre y al ser reflejada por un objeto genera un retardo tanto en tiempo como en fase, donde el retardo es producido durante un tiempo de ida y uno de regreso de la señal.

$$V_r(t) = V_o K \cos(2\pi f(t - 2t_r) + \varphi_o) \mu(t - 2t_r)$$

**Ecuación 60-2:** Señal recibida.



**Figura 37-2:** Señal recibida.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

Para detectar un objeto se debe multiplicar la señal transmitida y la recibida, para ello se utiliza la transformada rápida de Fourier, pasando la señal de tiempo a frecuencia.

$$V_f(t) = V_t * V_r$$

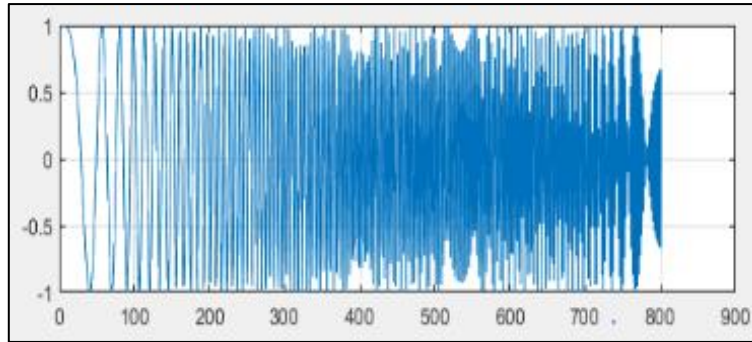
**Ecuación 61-2:** Multiplicación de señal transmitida y señal recibida.

#### 2.4.12.4. *Distancia del objeto detectado*

Para determinar la distancia a la que se encuentra el objeto hay que analizar la señal chirp, ya sea Down-chirp o up-chirp. La señal chirp transmitida viene dada por una amplitud  $K$ , frecuencia angular  $\omega_o$  y fase constante  $\varphi_o$ , donde  $f(t)$  es la función de la frecuencia que cambia en el tiempo como se observa en la Ecuación 62-2.

$$V(t) = V_o \cos(2\pi f(t)t + \varphi_o)$$

**Ecuación 62-2:** Señal chirp transmitida.



**Figura 38-2:** Señal chirp transmitida.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

$f(t)$  depende de la rapidez con la que cambia la frecuencia  $k$ , donde hay que tomar en cuenta la frecuencia inicial de la señal  $f_0$  y la frecuencia final  $f_1$  en una duración  $T$ .

$$f(t) = \frac{k}{2}t + f_0$$

**Ecuación 63-2:** Función de la frecuencia variante en tiempo.

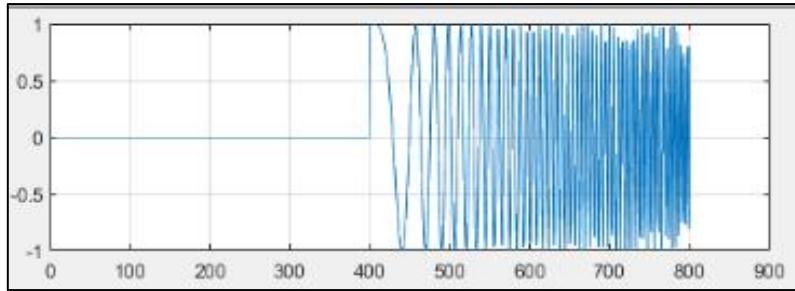
$$k = \frac{f_s - f_0}{t_{max} - t_0} = \frac{f_s - f_0}{T}$$

**Ecuación 64-2:** Rapidez con la que cambia la frecuencia.

Como se observa en la Ecuación 65-2, existe un retardo de tiempo entre la señal chirp recibida con respecto a la transmitida, la cual depende del retardo de tiempo y el desfase.

$$V_r(t) = V_o K \cos \left( 2\pi \left( \frac{k}{t} (t - 2t_r) + f_0 \right) (t - 2t_r) + \varphi_o \right) \mu(t - 2t_r)$$

**Ecuación 65-2:** Señal chirp recibida.



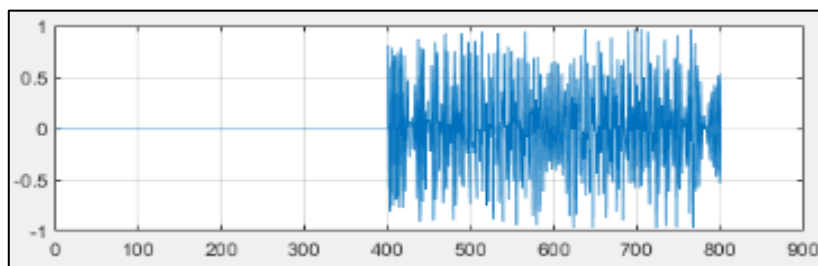
**Figura 39-2:** Señal chirp recibida.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

Como se explicó con anterioridad al multiplicar tanto la señal transmitida con la recibida se obtiene la posición del objeto, para ello se utiliza la Transformada Rápida de Fourier.

$$\begin{aligned}
 V_f(t) &= V_o \cos((2\pi f(t)t + \varphi_o)) * V_o K \cos\left(2\pi\left(\frac{k}{2}(t - 2t_r) + f_0\right)(t - 2t_r) + \varphi_o\right) \mu(t - 2t_r) \\
 &= \cos\left(2\pi k t_r (t - (t_r - f_0))\right)
 \end{aligned}$$

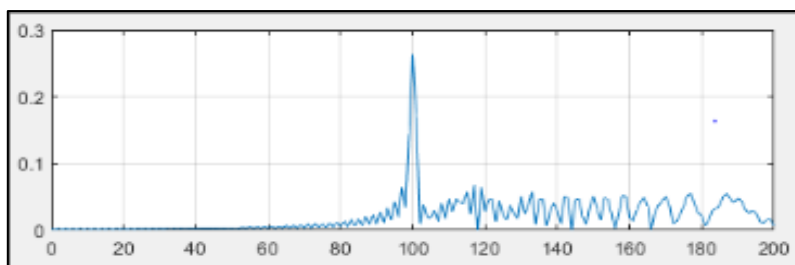
**Ecuación 66-2:** Multiplicación de señal chirp transmitida y recibida.



**Figura 40-2:** Multiplicación de señal chirp transmitida y recibida.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

Aplicando la FFT se obtiene el espectro de amplitud, donde los picos altos del espectro hacen referencia a la posición de objeto, a esto se lo conoce como Radargrama.



**Figura 41-2:** Radargrama.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

## 2.5. Tarjetas USRP

El Universal Software Radio Peripheral (USRP) es un periférico fabricado por Ettus Research, diseñado para trabajar en conjunto con un procesador externo a través de un FPGA, permitiendo la creación de software radios. (Domínguez I. & Murillo J., 2011, p.17). La mayoría de USRPs se conectan a un computador a través de un enlace de alta velocidad en el cual se encuentra el software que controlará el hardware USRP y los datos que se transmitan o reciban, también existen algunos modelos de USRP que integran funcionalidades de procesamiento de SW para operar en modo Stand-alone. (Hurtado Y., 2017, p.35)

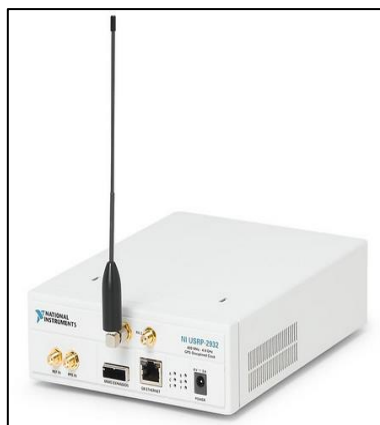
Permite a los ingenieros diseñar e implementar rápidamente sistemas de radio de software potentes y flexibles, de bajo costo. El diseño intuitivo de USRP, junto con una amplia selección de placas secundarias que cubren una amplia gama de frecuencias, le ayuda a poner en funcionamiento rápidamente su radio de software. La poderosa combinación de hardware flexible, software de código abierto y una comunidad de usuarios experimentados la convierte en la plataforma ideal para el desarrollo de su radio de software. (Ettus Research, p.1)

Está formado por dos módulos: tarjeta madre (motherboard) y el front-end que constituye la tarjeta hija (daughterboard). La tarjeta madre provee subsistemas para el procesamiento de la señal en banda base como: generación de reloj y sincronización, una Field-programmable gate array (FPGA), ADCs, DACs, interfaz de procesamiento y regulación de potencia. La tarjeta hija se encarga de realizar operaciones analógicas, conversión y filtrado. (Hurtado Y., 2017, p.35)

La comunicación entre el USRP y el procesador central localizado generalmente en una computadora se realiza a través del USRP Hardware Driver (UHD). Éste es provisto por Ettus Research para ser utilizado con la familia de productos USRP, es compatible con sistemas operativos Linux, MacOS y Windows. (Hurtado Y., 2017, p.35)

### 2.5.1. USRP 29-32

Las tarjetas USRP 2932 brindan anchos de banda de 20MHz, rangos de frecuencia que van de 400 MHz hasta 4.4 GHz. Incluye OCXO disciplinado por GPS. El USRP-2932 es un transceptor de RF ajustable con un convertidor analógico-digital de alta velocidad y un convertidor digital-analógico para la transmisión de señales de banda base I y Q a una PC principal por 1 Gigabit Ethernet. Son de gran ayuda para aplicaciones de comunicaciones como: WiFi, WiMax, transceptores de banda S y transceptores de banda industrial, científica y médica (ISM) de 2.4 GHz. (National Instruments, 2020)



**Figura 42-2:** Tarjeta USRP 2932.

**Fuente:** National Instruments, 2020

#### 2.5.1.1. Características

La Tabla 3-2 detalla las características del transmisor USRP-2932.

**Tabla 3-2:** Características transmisor USRP 2932

TRANSMISOR USRP 2932	
Rango de frecuencias	400 MHz a 4.4 GHz

Paso de frecuencia	<1 kHz
Potencia máxima de salida	50 mW a 100 mW (17 dBm a 20 dBm)
Rango de ganancia	0 dB a 31 dB
Paso de ganancia	0.5 dB
Ancho de banda máximo instantáneo en tiempo real	
Ancho de muestra 16-bits	20 MHz
Ancho de muestra 8-bits	40 MHz
Velocidad de muestreo máxima I/Q	
Ancho de muestra 16-bits	25 MS/s
Ancho de muestra 8-bits	50 MS/s
DAC	2 canales, 400 MS/s, 16 bit
Bit DAC spurious-free Dynamic range (sFDR)	80 dB

**Fuente:** National Instruments; 2017, p.2

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

La frecuencia central es sintonizable de 400 MHz a 4.4 GHz, cubriendo a los sistemas radar de banda celular, WiFi, GNSS y Banda L. La transmisión de ancho de banda I/Q de banda base es de hasta 20 MHz a 25 MS/s con 16 bits para un procesamiento que esté basado en host con LabView; gracias a que ofrece una transmisión a 8 bits es posible duplicar el ancho de banda a 40 MHz a 50 MS/s. Utiliza un controlador NI-USRP, módulo MathScript RT y Toolkit de modulación para la ejecución de archivos en LabView. (Ettus Research, 2016)

Permite una comunicación full-duplex, pero hay que tener en cuenta que interfaces como USB 3.0 no proporcionan rutas de datos separados (para transmitir y recibir) ya que solo utilizan un camino en modo semi-duplex, por ello el ancho de banda total se compartirá entre las funciones del transmisor y receptor. (Ettus Research, 2016)

La Tabla 4-2 detalla las características del receptor USRP-2932.

**Tabla 4-2:** Características receptor USRP 2932.

<b>RECEPTOR USRP 2932</b>	
Rango de frecuencias	400 MHz a 4.4 GHz
Paso de frecuencia	<1 kHz
Rango de ganancia	0 dB a 31.5 dB
Paso de ganancia	0.5 dB
Máxima potencia de entrada ( $P_{in}$ )	0 dBm
Figura de ruido	5 dB a 7 dB
Ancho de banda máximo instantáneo en tiempo real	
Ancho de muestra 16-bits	20 MHz
Ancho de muestra 8-bits	40 MHz
Velocidad de muestreo máxima I/Q	
Ancho de muestra 16-bits	25 MS/s
Ancho de muestra 8-bits	50 MS/s
DAC	2 canales, 100 MS/s, 14 bit
Bit DAC spurious-free Dynamic range (sFDR)	88 dB

Fuente: National Instruments; 2017, p.2-3

Realizado por: Merino, Daniela; 2020



La Tabla 5-2 detalla las características del Oscilador GPS.

**Tabla 5-2:** Características del oscilador GPS de USRP 2932.

<b>OSCILADOR DISCIPLINADO GPS</b>	
Precisión de frecuencia.	
OCXO (no bloqueada para GPS)	25 ppb
OCXO (bloqueada para GPS)	10 ppb
Antena Activa	
Voltaje	5 V
Potencia	0.7 W

**Fuente:** National Instruments; 2017, p.3

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

La precisión de frecuencia reduce la complejidad de los prototipos. El GPS integrado permite la sincronización y determinar la posición global del dispositivo, además de mejorar la precisión del reloj.

La Tabla 6-2 detalla las características de potencia.

**Tabla 6-2:** Características de potencia de USRP 2932.

<b>POTENCIA</b>	
Potencia total, operación típica	
Típica	12 W a 15 W
Máxima	18 W

Requerimiento de potencia.	Acepta 6v, conector de alimentación externo de 3 A.
----------------------------	---

**Fuente:** National Instruments; 2017, p.3

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

La Tabla 7-2 detalla las características físicas de las tarjetas USRP 2932.

**Tabla 7-2:** Características físicas de USRP 2932.

<b>DIMENSIONES FISICAS</b>	
L x W x H	15.875 cm x 4.826 cm x 21.209 cm (6.25 in x 1.9 in x 8.35 in)
Peso	1.193 kg (2.63 lb)

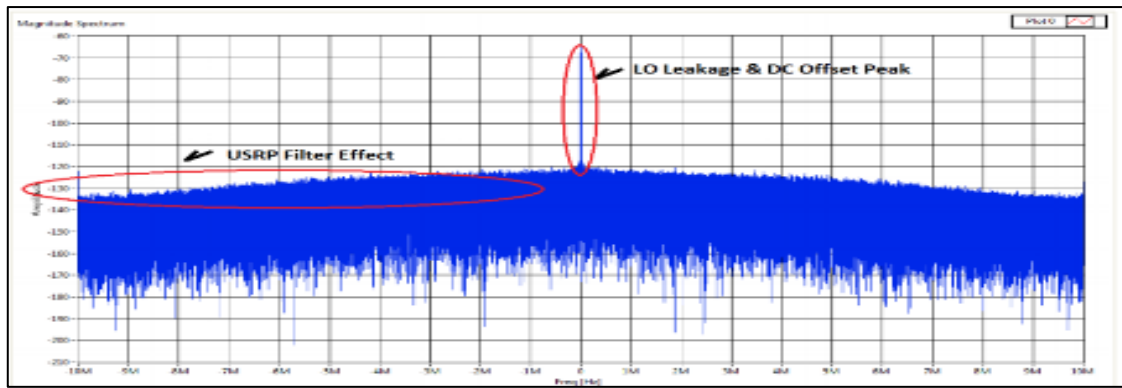
**Fuente:** National Instruments; 2017, p.4

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

### 2.5.1.2. Limitaciones

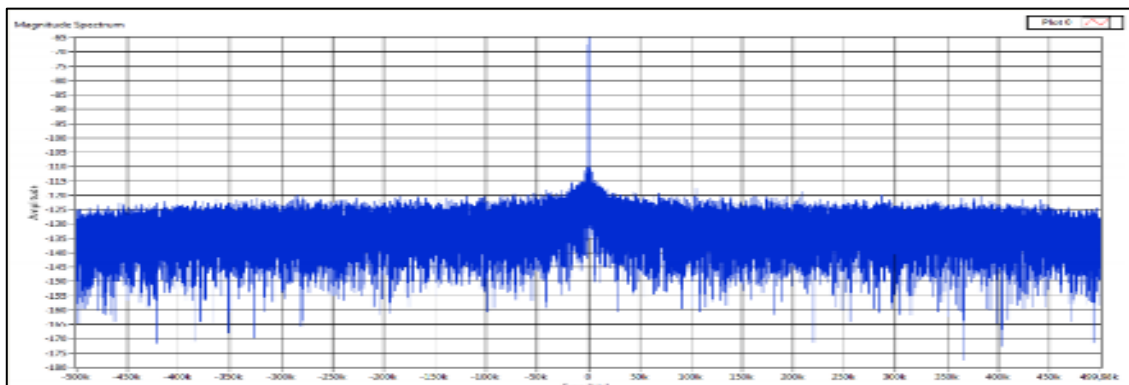
Aunque las tarjetas USRP sean un poderoso y eficiente modelo para los sistemas SDR, posee algunas limitaciones en el ambiente donde se vaya a implementar, El procesamiento de la señal excepto la conversión up/down y ejecución son realizados por el computador, es por ello que se requiere de un CPU con gran memoria, en especial cuando se procesa una gran banda de frecuencias.

USRP 2932 ofrece un ancho de banda de 20MHz (I/Q) para adquirir datos en tiempo real, pero el efecto del filtro es evidente cuando se adquieren datos al máximo del ancho de banda, como se observa en la Figura 43-2. Al comparar la Figura 43-1 con la Figura 44-1, es evidente que los efectos del filtro son más planos cuando el ancho de banda decrece. (Serrano M., 2019, p.33)



**Figura 43-2:** Espectro de frecuencia con 20 MHz sin ninguna señal conectada a la entrada.

Fuente: Serrano, María; 2019, p.33



**Figura 44-2:** Espectro de frecuencia con 1 MHz sin ninguna señal conectada a la entrada.

Fuente: Serrano, María; 2019, p.33

Al trabajar con Labview, las tarjetas USRP 2932 son muy sensibles a fuga de LO (Local Oscillator Leakage), por lo que la compensación DC introduce un pico muy agudo a la frecuencia de 0 Hz. Estas limitaciones proponen un reto para implementar algoritmos que aspiran encontrar una señal débil, en un rango de frecuencia amplio, como la detección de espectro. (Serrano M.; 2019, p.33)

## 2.6. Ansoft Designer

Ansoft Designer es un front-end integrado de gestión de esquemas y diseño para las tecnologías de simulación HFSS, Q3D Extractor y SIwave. Es la base de un flujo de diseño de alta precisión

que permite a los usuarios modelar y simular aplicaciones de señales analógicas, de RF y de señal mixta y realizar análisis de integridad de la señal y verificación del sistema de diseños de placas, paquetes o circuitos integrados de alto rendimiento. (IT Department, 2020)

El software es flexible y fácil de utilizar, además incluye captura de esquemas y edición de diseño, generación de netlist y herramientas de visualización y análisis de datos. Este programa es parte del paquete ANSYS EM disponible en CMF. No está disponible para Linux.Labview. (IT Department, 2020)

Ansoft Designer es un poderoso conjunto de herramientas de diseño de ingeniería que integran estrechamente circuitos, sistemas y EM planar en un solo entorno de diseño. Dentro de sus usos típicos están:

- Soluciones bajo demanda: se puede elegir entre modelos de circuitos o solucionadores EM planar.
- Comunicaciones Digitales: WCDMA, TD-SCDMA
- Modelado no lineal: balance armónico, circuito envolvente y análisis transitorio.
- Solución EM de grandes estructuras planares: grandes arreglos de antenas, planos de tierra periódicos. (Ansoft Corporation, 2003, p.3-4)
- Solución EM de antenas arbitrarias planares: patches, dipolos planares, F invertida, superficie selectiva de frecuencia. (Ansoft Corporation, 2003, p.3-4)
- EMC/EMI: cavidades rectangulares con ranuras arbitrarias.
- Integra IC y edito de diseño PCB: incluye JScript y VB Scripting.
- Subcircuitos parametrizados: variables globales y locales, alcance de parámetros.
- Modelos definidos por el usuario: compilados o interpretados.
- Utilidades de diseño: sintonización en tiempo real, línea de transmisión y síntesis de filtros, y carga-extracción multipuerto. (Ansoft Corporation, 2003, p.3-4)

En la Tabla 8-2 se indican los requerimientos para un correcto funcionamiento del programa.

**Tabla 8-2:** Requerimientos Ansoft Designer.

<b>MINIMO</b>	<b>RECOMENDADO</b>
Microsoft Windows XP o Windows 2000	Computadora personal compatible con PC con un procesador de 1.5GHz o superior.
PC con Pentium	512 MB o más de RAM física. Simulaciones más grandes o de diseños más complicado requieren más memoria RAM para prevenir un intercambio de disco excesivo.
128 MB de RAM	400 MB de espacio en la unidad de disco
8 MB de tarjeta de video	Windows 2000 o Windows XP
Mouse o algún otro dispositivo señalador	
Disco CD-ROM	

Fuente: Ansoft Corporation; 2003, p.3-4

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

## 2.7. LabView (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)

Es un entorno de desarrollo y diseño de sistemas con un lenguaje visual gráfico (lenguaje C) que acelera el desarrollo y productividad de programas para brindar una mejor eficiencia en el desarrollo de sistemas. Fue creado por National Instruments en 1976 y lo sacaron al mercado en 1986. (MASTERHACKS, 2015, p.5)

Los programas que se desarrollan en LabView se denominan instrumentos virtuales o VI, que este compuesto por una interfaz gráfica del programa y un diagrama de bloques (código). Al finalizar el programa, el usuario utiliza el panel frontal, el cual contiene controles e indicadores, aquí se encuentra todo lo necesario para controlar un sistema. Por su parte el diagrama de bloques

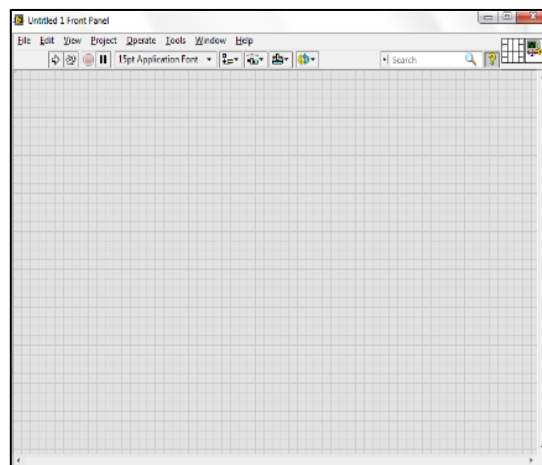
es donde el programador puede acceder para modificar o mantener el programa. (MASTERHACKS, 2015, p.5)



**Figura 45-2:** LabView.

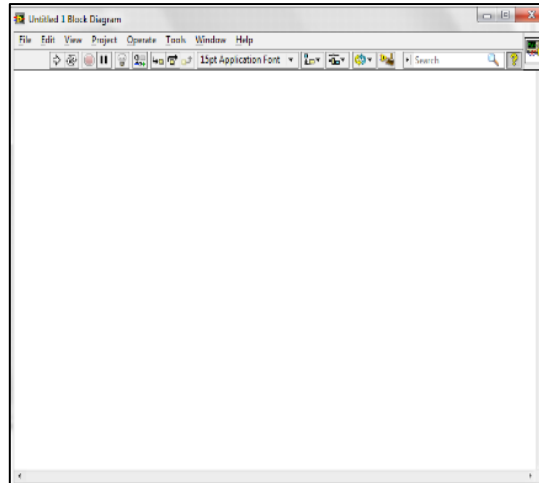
**Fuente:** MASTERHACKS; 2015, p.6

Se los denomina instrumentos virtuales debido a que su apariencia y operación imitan a los instrumentos físicos como osciloscopios o multímetros. LabView contiene una gran variedad de herramientas para adquisición, análisis, despliegue y almacenamiento de datos, así como herramientas que ayudan a resolver el código de ejecución. (National Instruments, 2003, p.11)



**Figura 46-2:** Panel frontal de LabView.

**Fuente:** MASTERHACKS; 2015, p.7



**Figura 47-2:** Diagrama de bloques LabView.

**Fuente:** MASTERHACKS; 2015, p.9

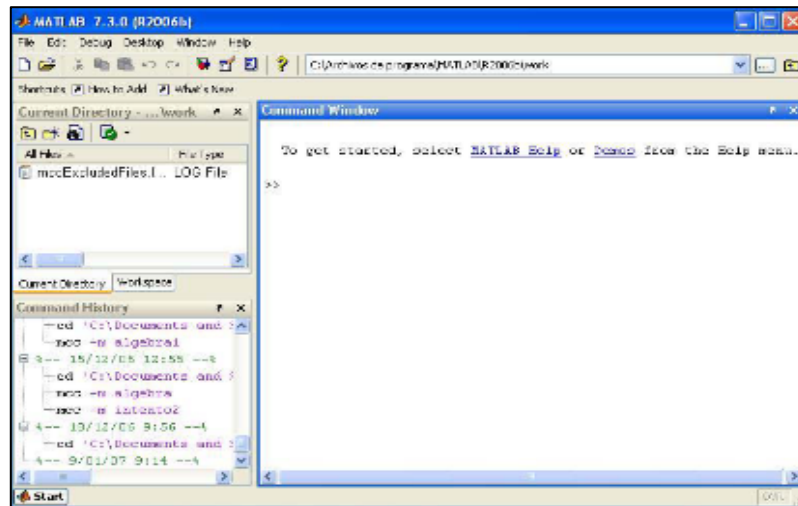
Se puede utilizar en sistemas operativos como Microsoft Windows, Mac OS X, GNU/Linux. Una de sus características es su facilidad de utilización, ya que no se requiere de bastos conocimientos en programación para la creación de programas, sin embargo, para desarrollar programas que se apliquen a la automatización, control, adquisición y manejo de datos, si es necesario tener conocimientos más avanzados no solo en programación sino en otras áreas específicas de cada aplicación. (National Instruments, 2003, p.11) (MASTERHACKS, 2015, p.5)

## 2.8. Matlab

MATLAB es la abreviatura de MATrix LABoratory, es una de las muchas sofisticadas herramientas de computación disponibles en el comercio para resolver problemas de matemáticas, tales como Maple, Mathematica y MathCades. Es un programa orientado al cálculo con matrices, al que se reducen muchos de los algoritmos que resuelven problemas de Matemática aplicada e ingeniería. (Moore H, 2007, p.1)

Es un lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos y al mismo tiempo es un entorno y lenguaje de programación. Permite construir nuestras propias herramientas reutilizables. Se pueden crear fácilmente funciones propias y programas especiales (conocidos como M-archivos) en código Matlab, los cuales pueden ser agrupados en Toolbox o librerías. Matlab, a parte del cálculo matricial y álgebra lineal, también puede manejar polinomios, funciones, ecuaciones diferenciales ordinarias, gráfico. (Casado C., s.f, p.4)

Ofrece un entorno interactivo sencillo mediante una ventana en la que se pueden generar ordenes en modo texto y en la que aparecen los resultados. Las gráficas se muestran en ventanas independientes. Cada ventana dispone de una barra de menús que controlan su funcionalidad. (Benítez J. & Hueso J., 2007, p.v-vi)



**Figura 48-2:** Matlab.

Fuente: Casado, Cristina; s.f, p.4

MATLAB opera directamente con números complejos y con números reales como caso particular. Lo que distingue a MATLAB de otros sistemas de cálculo es su facilidad para trabajar con vectores y matrices. Las operaciones ordinarias, suma, producto, potencia, operan por defecto sobre matrices, sin más restricción que la compatibilidad de tamaños en cada caso. (Benítez J. & Hueso J., 2007, p.v-vi)

MATLAB dispone de mandatos propios de un lenguaje de programación para efectuar bucles y bifurcaciones condicionales y puede ejecutar las órdenes contenidas en ficheros grabados en ASCII mediante un editor como el bloc de notas o el editor de ficheros de órdenes incorporado. (Benítez J. & Hueso J., 2007, p.v-vi)



## **CAPITULO III.**

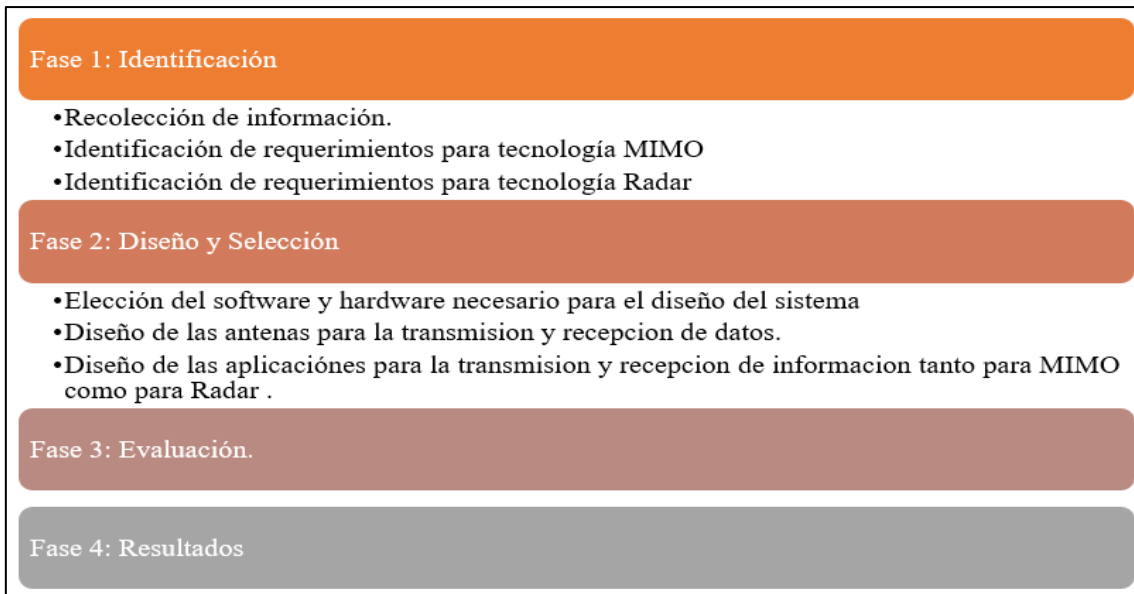
### **3. FASES Y PASOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO TÉCNICO**

En el presente capítulo se explicarán y detallarán los procedimientos realizados para el desarrollo del sistema de radiación mediante la tecnología SDR, tanto para aplicaciones MIMO como Radar, utilizando tarjetas USRP 2932 para el montaje de los escenarios, además de las antenas diseñadas en Ansoft Designer.

Para el desarrollo del trabajo de titulación se escogieron dos métodos:

- Se inició por una investigación bibliográfica, para profundizar conocimientos tanto de la tecnología MIMO como de la tecnología Radar, además se utilizaron datos y programas desarrollados en trabajos anteriores para un mejor diseño de los programas utilizados en el presente trabajo de titulación, en las plataformas LabView, Matlab y Ansoft Designer. También se recogió información necesaria para conocer las limitaciones de las tarjetas USRP.
- Seguido a la investigación bibliográfica se realizó también una investigación experimental, la cual basa sus resultados en el análisis de distintos escenarios tanto para MIMO como para Radar, identificando las características respectivas de cada uno de ellos.

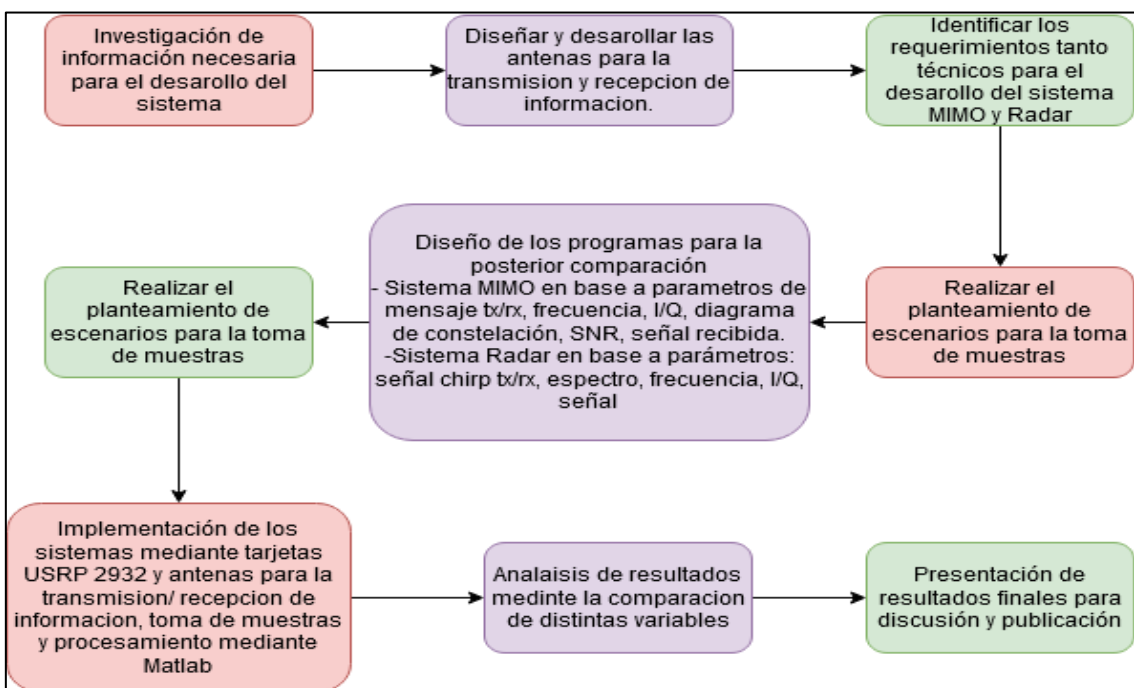
El Gráfico 1-3 muestra la secuencia de pasos o fases realizadas para el desarrollo del presente trabajo de titulación.



**Gráfico 1-3:** Fases para el desarrollo del sistema de radiación con SDR.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

El Gráfico 2-3 muestra el diagrama de flujo con los pasos que se realizaron de forma más detallada para el presente trabajo de titulación.



**Gráfico 3-3:** Secuencia de pasos realizados para el desarrollo del presente trabajo de titulación.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

### 3.1. Identificación técnica y teórica para tecnología SDR

#### 3.1.1. Resolución máxima

Como se explicó en la Tabla 3-2 del Capítulo II, las tarjetas USRP 2932, brindan un ancho de banda máximo instantáneo, de 40MHz a 8 bits con un I/Q de 50MS/s y de 20MHz a 16 bits con un I/Q de 25 MS/s. Es por ello por lo que en la Ecuación 1-3 se indica la resolución máxima del sistema.

$$R = \frac{c}{2B}$$

**Ecuación 1-3:** Resolución máxima.

Donde  $R$  es la resolución máxima,  $B$  el ancho de banda y  $c$  la velocidad de la luz

Reemplazando los parámetros de las tarjetas en la Ecuación 1-3, se obtiene:

$$R_{8 \text{ bits}} = \frac{3 \times 10^8}{2(40\text{MHz})} = 3.75\text{m}$$

**Ecuación 2-3:** Resolución máxima para un ancho de banda de 40 MHz.

$$R_{16 \text{ bits}} = \frac{3 \times 10^8}{2(20\text{MHz})} = 7.5\text{m}$$

**Ecuación 3-3:** Resolución máxima para un ancho de banda de 20 MHz.

Como se observa en la Ecuación 2-3 para 8-bits, el sistema radar tiene la capacidad de detectar un objeto a 3.75m o múltiplos de ello, así mismo en la Ecuación 3-3 para 16-bits, se puede detectar a 7.5m o múltiplo de ello. Tomando en cuenta que en el diseño del sistema radar se utilizó un I/Q de 50MS/s.

### 3.1.2. Ancho de banda

Como se explicó en el apartado 2.4.11, una señal chirp se caracteriza por ir de una frecuencia menor a una mayor o viceversa. Para el presente trabajo de titulación la señal chirp oscila de una frecuencia de inicio  $f_0$  a una frecuencia máxima  $f_{max}$ , el ancho de banda esta determinado por la Ecuación 4-3.

$$B = f_{max} - f_0 = 40 \text{ MHz} - 0 \text{ MHz} = 40 \text{ MHz}$$

**Ecuación 4-3:** Ancho de banda de señal chirp utilizada.

### 3.1.3. Distancia máxima

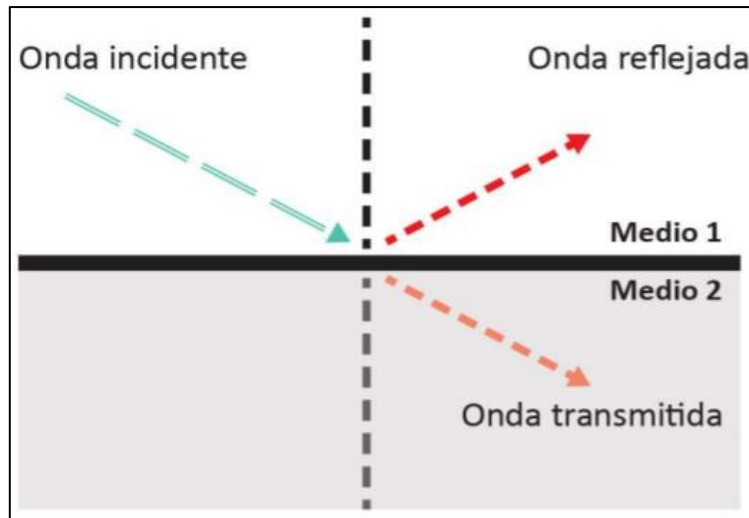
La distancia máxima depende del tiempo final de la señal recibida ( $t_f$ ), hay que tener en cuenta que mientras más tiempo más grande será la distancia máxima teórica.

$$d_{mt} = \frac{c * t_f}{2}$$

**Ecuación 5-3:** Distancia máxima.

### 3.1.4. Coeficiente de reflexión

Como se explicó en el apartado 2.1.4.1, la reflexión de una onda RF ocurre cuando esta se propaga en un medio 1 y cambia abruptamente a un medio 2, reflejando parte de la señal transmitida mientras que la otra es transmitida a lo largo del medio 2. Debido a la reflexión la señal sufre cambios en sus propiedades como cambio de fase, atenuación, velocidad de propagación reducida, etc.



**Figura 1-3:** Onda transmitida y reflejada.

**Fuente:** Espinoza, Patricio; 2020, p.38

Este cambio se mide mediante el coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ), el cual determina la relación entre la amplitud de la onda reflejada con la amplitud de la onda incidente. Mientras que el coeficiente de transmisión ( $T$ ), es un indicativo de la cantidad de onda transmitida por el medio.

$$A_{rfe}^2 = H\Gamma A_0^2$$

**Ecuación 6-3:** Relación de amplitudes.

Donde:

$A_{rfe}^2$  = Amplitud de reflexión.

$H$  = Función de efectos de atenuación

$\Gamma$  = Coeficiente de reflexión.

$A_0^2$  = Amplitud inicial.

Si todos los parámetros que hacen variar a la función  $H$  se mantienen y la reflexión es contra una superficie metálica, donde el coeficiente de reflexión será cercano a 1, se realiza una aproximación comparando las amplitudes de la señal obtenida cuando ocurre la reflexión y en el medio transmitido. La Ecuación 7-3 se obtiene al reemplazar el valor de amplitud por 1, debido a

que el material que produce la reflexión es de metal, y el coeficiente de reflexión, el cual depende del contraste entre la permitividad del material que existe entre la antena y la superficie, y la permitividad del medio. (Espinoza, P., 2020, p.39)

$$A_{rfe}^2 = \Gamma A_{me}^2 ; \Gamma = \frac{A_{rfe}^2}{A_{me}^2}$$

**Ecuación 7-3:** Relación de amplitud entre el metal y el material.

Donde:

$A_{rfe}^2$  = Amplitud en la superficie del material.

$A_{me}^2$  = Amplitud producida por la reflexión con el metal.

Cuando existe una discontinuidad en una línea de transmisión, el coeficiente de reflexión es el radio complejo de la intensidad de campo eléctrico de la onda reflejada sobre la onda incidente, como se muestra en la Ecuación 8-3. (Espinoza, P., 2020, p.39)

$$\Gamma = \frac{E^-}{E^+}$$

**Ecuación 8-3:** Coeficiente de reflexión en base a campo eléctrico.

### 3.2. Diseño de grupo de antenas.

El diseño de las 4 antenas utilizadas en el presente trabajo se realizó mediante el software Ansoft Designer, utilizando como referencia el diseño realizado en *“On Development of a MIMO Antenna for Coupling Reduction and WiMAX Suppression Purposes”* por *“Burhan Azarm, J. Nourinia, CH, Ghobadi y Maryam Majidzadeh”*.

Gracias al aumento de la capacidad del canal, las antenas MIMO han llamado la atención de muchos expertos en comunicación, sin embargo, como se explicó en el capítulo anterior, un

Sistema MIMO está conformado por dos o más antenas transmisoras y dos o más antenas receptoras, con adyacencia entre ellas. Dicha adyacencia produce ciertos problemas en el aislamiento, ya que al estar una a lado de la otra, la radiación de cada antena afecta al rendimiento de la antena adyacente, siendo un problema más crítico a medida que el número de antenas aumenta.

Por tal motivo la antena diseñada se basa en un parche rectangular radiante ranurado en la parte superior y un plano de tierra defectuoso en la parte trasera del sustrato. Hay que tener en cuenta que las líneas de transmisión son una de las propiedades más importantes para este tipo de antenas, además de la impedancia característica y la velocidad de propagación.

Tanto el ancho como el largo del parche vienen determinados por la frecuencia de resonancia, permitividad dieléctrica, espesor del sustrato, etc. En la Tabla 1-3 se detallan ciertos factores de rendimiento relevantes que permiten escoger cualitativamente las mejores condiciones para el diseño de la antena.

**Tabla 1-3:** Factores de rendimiento relevantes de antenas microstrip.

<b>Acoplamiento</b>	Es el terminal de entrada que este acoplado a la fuente de alimentación ( $Z_{in} = Z_s$ ) y esta relacionado con el $S_{11}$ que son las pérdidas por retorno.
<b>Lóbulo principal</b>	Relacionado con la ganancia de la antena y las propiedades del ancho del haz.
<b>Eficiencia de radiación</b>	Relación entre la potencia radiada y la potencia de entrada.
<b>Eficiencia de apertura</b>	Relacionado con la distribución de los radiadores, ganancia y patrones característicos.
<b>Ancho de banda</b>	Son los rangos de frecuencia sobre los cuales los parámetros antes mencionados satisfacen las especificaciones basadas en características de impedancia en el terminal de entrada.
<b>Requerimientos físicos</b>	Tamaño, peso, costo, etc.

**Fuente:** Rodríguez, Brayan; 2019, p.63

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

Con las características antes mencionadas, los parámetros que se tendrán en cuenta para el diseño y la simulación de la antena consisten en un parche microstrip para una frecuencia de operación de 3GHz, con sustrato de fabricación FR4 y material conductor cobre.

### 3.2.1. Cálculos de diseño de la Antena

#### 3.2.1.1. Cálculo del parche rectangular

Partiendo de la información antes mencionada, el diseño de la antena se realiza mediante los cálculos expresados en las siguientes ecuaciones. La Ecuación 9-3 representa el ancho del parche rectangular:

$$W = \frac{c}{2fr} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s}}{2(3 \times 10^9 \text{ Hz})} \left( \frac{4.4 + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} = 30.4 \text{ mm}$$

**Ecuación 9-3:** Ancho del parche rectangular.

Donde:

$c$ = Velocidad de la luz.

$fr$ = Frecuencia de operación.

$\epsilon_r$ = Permitividad relativa del sustrato.

La Ecuación 10-3 representa a la permitividad efectiva:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{1.6 \text{ mm}}{30.4 \text{ mm}} \right)^{-\frac{1}{2}} = 4.03090$$

**Ecuación 10-3:** Permitividad efectiva



Donde:

$\epsilon_r$ = Permitividad relativa del sustrato.

$W$ = Ancho del parche.

$h$ = Espesor del sustrato.

Por último, para calcular el largo del parche se debe calcular primero la extensión de  $L$  y longitud efectiva como se observa en la Ecuación 12-3:

$$\Delta L = 0.412 h \left( \frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \right) \left( \frac{\frac{W}{h} + 0.264}{\frac{W}{h} - 0.8} \right)$$
$$\Delta L = 0.412 (1.6 \text{ mm}) \left( \frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \right) \left( \frac{\frac{W}{h} + 0.264}{\frac{W}{h} - 0.8} \right)$$
$$\Delta L = 0.412 (1.6 \text{ mm}) \left( \frac{4.03090 + 0.3}{4.03090 - 0.258} \right) \left( \frac{\frac{30.4 \text{ mm}}{1.6 \text{ mm}} + 0.264}{\frac{30.4 \text{ mm}}{1.6 \text{ mm}} - 0.8} \right) = 0.73621 \text{ mm}$$

**Ecuación 11-3:** Extensión  $L$  del parche

Donde:

$\epsilon_{eff}$ = Permitividad efectiva

$W$ = Ancho del parche.

$h$ = Espesor del sustrato.

$$L_{eff} = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s}}{2(3 \times 10^6 \text{ Hz})\sqrt{4.03090}} = 23.4 \text{ mm}$$

**Ecuación 12-3:** Longitud efectiva del parche rectangular.

Donde:

$c$  = Velocidad de la luz.

$f_r$  = Frecuencia de operación.

$\epsilon_{eff}$  = Permitividad efectiva.

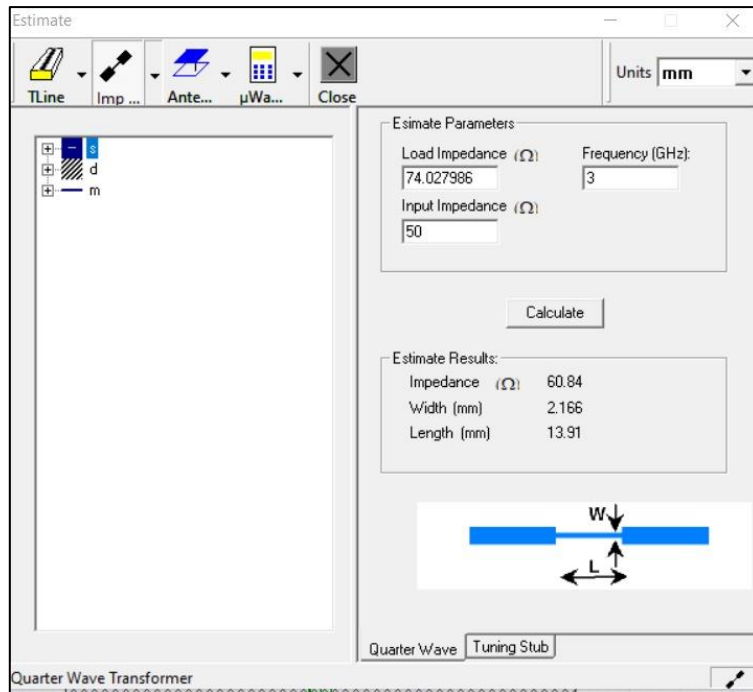
La Ecuación 13-3 determina la longitud del parche:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L = 24.9 \text{ mm} - 2(0.73621 \text{ mm}) = 23.4 \text{ mm}$$

**Ecuación 13-3:** Longitud efectiva del parche rectangular.

### 3.2.1.2. Cálculo de la línea de transmisión.

Una vez calculado el ancho y largo del parche, se procedió a calcular el ancho y largo de la línea de transmisión mediante la calculadora del software, para ello es necesaria la impedancia de la carga, la frecuencia de operación en GHz y la impedancia de salida de la línea, como se observa en la Figura 2-3.



**Figura 2-3:** Cálculo del acoplador cuarto de onda.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

Se obtiene una línea de 2.166mm de ancho y 13.91mm de largo, también es posible calcular mediante ecuaciones como se observa a continuación.

$$Z_0 = \frac{Z_\lambda}{4} = \frac{\sqrt{R_{load} * R_{in}}}{4} = \frac{\sqrt{74.027986 \Omega * 50 \Omega}}{4} = 60.83913 \Omega$$

**Ecuación 14-3:** Impedancia de a línea.

$$A = \frac{Z_0}{60 \Omega} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$A = \frac{60.83913 \Omega}{60 \Omega} \sqrt{\frac{4.4 + 1}{2}} + \left( \frac{4.4 - 1}{4.4 + 1} \right) \left( 0.23 + \frac{0.11}{4.4} \right) = 1.83$$

**Ecuación 15-3:** Primera condición para cálculo de W/d.

$$B = \frac{377\pi}{2 Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377\pi}{2 (60.83913 \Omega) \sqrt{4.4}} = 4.64036$$

**Ecuación 16-3:** Segunda condición para cálculo de W/d.

Donde:

$Z_0$  = Impedancia característica.

$\epsilon_r$  = Permitividad relativa.

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \frac{W}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left( B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left( \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \right) & \frac{W}{h} > 2 \end{cases}$$

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^{1.83}}{e^{2*1.83} - 2} = 1.35$$

**Ecuación 17-3:** Relación de aspecto en función de la impedancia característica.

Donde  $A$  será utilizado cuando  $\frac{W}{h} < 2$  y  $B$  cuando  $\frac{W}{h} > 2$ , donde  $Z_0$  es la impedancia característica. Debido a que la primera condición es verdadera,  $\frac{W}{h} = 1.35 < 2$ , se puede calcular el ancho de la línea de transmisión.

$$W = 1.35 * h = 1.35 (1.6 \text{ mm}) = 2.16 \text{ mm}$$

**Ecuación 18-3:** Ancho de la línea de Transmisión.

3.2.1.3. Cálculo de la línea de transmisión de 50  $\Omega$ .

Para calcular la Línea de transmisión de 50  $\Omega$ ., se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{Z_0}{60 \Omega} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$A = \frac{50 \Omega}{60 \Omega} \sqrt{\frac{4.4 + 1}{2}} + \left( \frac{4.4 - 1}{4.4 + 1} \right) \left( 0.23 + \frac{0.11}{4.4} \right) = 1.52986$$

**Ecuación 19-3:** Primera condición para cálculo de W/d.

$$B = \frac{377\pi}{2 Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377\pi}{2 (50 \Omega) \sqrt{4.4}} = 5.64621$$

**Ecuación 20-3:** Primera condición para cálculo de W/d.

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \frac{W}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left( B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left( \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \right) & \frac{W}{h} > 2 \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \frac{8e^{1.52986}}{e^{2 \cdot 1.52986} - 2} = 1.911 \\ \frac{2}{\pi} \left( 5.64621 - 1 - \ln(2 \cdot 5.64621 - 1) + \frac{4.4 - 1}{2 \cdot 4.4} \left( \ln(5.64621 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.4} \right) \right) = 1.43236 \end{cases}$$

**Ecuación 21-3:** Relación de aspecto en función de la impedancia característica.

Debido a que la primera condición es verdadera,  $\frac{W}{h} = 1.911 < 2$ , se puede calcular el ancho de la línea de transmisión.

$$W = 1.911 * h = 1.911 (1.6 \text{ mm}) = 3.0576 \text{ mm}$$

**Ecuación 22-3:** Ancho de la línea de Transmisión.

Para calcular el largo de la línea de transmisión se lo realizó mediante la Ecuación 18-3.

$$L = \frac{\left(90^\circ \frac{\pi}{180^\circ}\right)}{\sqrt{\varepsilon_e} \times K_0}$$

**Ecuación 23-3:** Largo de la línea de transmisión de 50  $\Omega$ .

Donde  $K_0 = \frac{2\pi f}{c}$  y  $\varepsilon_e$  es la constante dieléctrica efectiva que se calcula mediante la Ecuación 24-3.

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12 * h}{W}}} \right) = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12 * 1.6 \text{ mm}}{3.0576 \text{ mm}}}} \right) = 3.33009$$

**Ecuación 24-3:** Constante dieléctrica efectiva.

Reemplazando la Ecuación 23-3 en la Ecuación 22-3, se obtiene:

$$L = \frac{\left(90^\circ \frac{\pi}{180^\circ}\right)}{\sqrt{3.33009} \times \frac{2\pi * 3 \times 10^9}{3 \times 10^8}} = 13.1 \text{ mm}$$

**Ecuación 25-3:** Largo de la línea de transmisión de 50  $\Omega$ , 13.1mm.

3.2.1.4. *Cálculo de las dimensiones del plano de tierra.*

Para calcular el ancho y la longitud del plano de tierra, se emplean las siguientes ecuaciones.

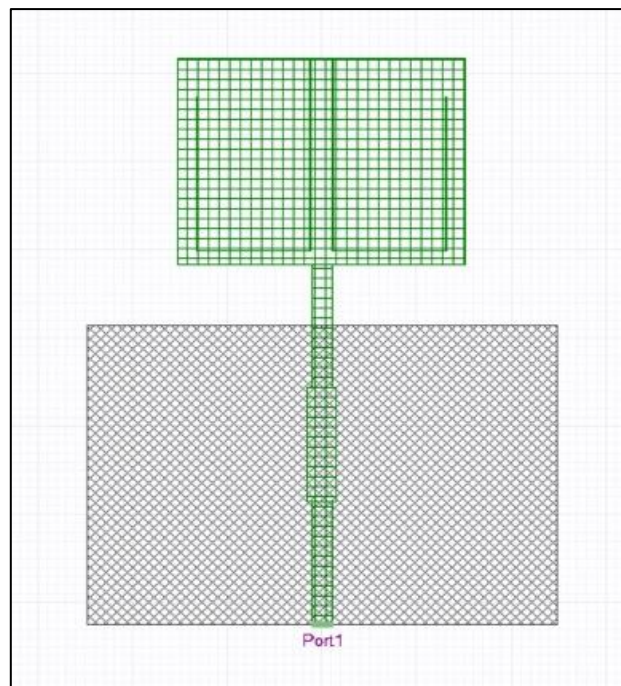
$$L_g = Gh + L = 6(1.6 \text{ mm}) + 23 \text{ mm} = 33 \text{ mm}$$

**Ecuación 26-3:** Largo del plano de tierra.

$$W_g = Gh + W = 6(1.6 \text{ mm}) + 30.4 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$$

**Ecuación 27-3:** Ancho del plano de tierra.

Una vez calculados todos los parámetros para el diseño de la antena, se insertaron dos ranuras en forma de L para aumentar el ancho de banda de esta, además el plano de tierra juega un papel importante en el rendimiento final. La Figura 3-2 representa el diseño de la Antena.



**Figura 3-3:** Diseño de la antena a 3GHz.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

La Tabla 2-3 refleja las dimensiones de la antena.

**Tabla 2-3:** Dimensiones de la antena.

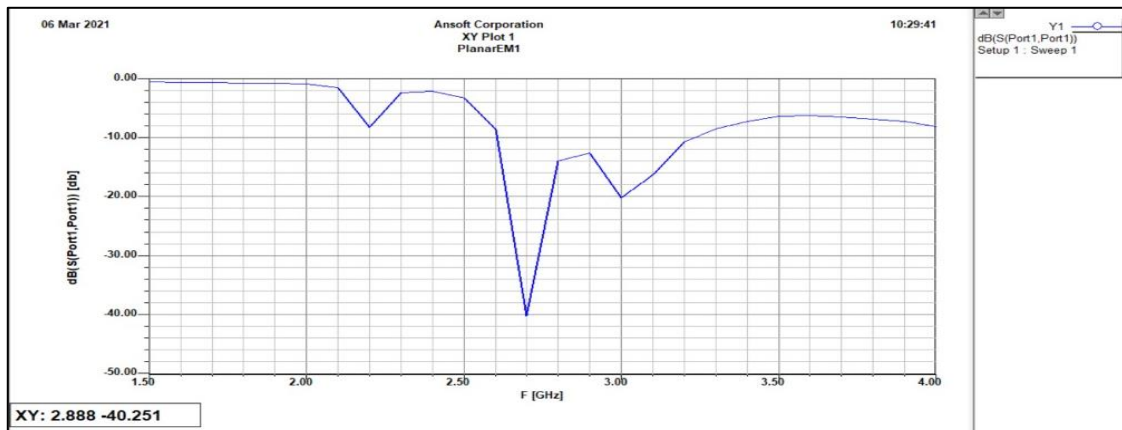
Ancho del parche (L)	30.4 mm
Largo del parche (W)	23.4 mm

Ancho de la línea de transmisión 1 y 2 (Ws)	2.166 mm
Largo de la línea de transmisión 1 y 2 (Ls)	13.91 mm
Ancho de la línea de 50 ohm (W50)	3.051 mm
Largo de la línea de 50 ohm (L50)	13 mm
Ancho del plano de Tierra (Wg)	49.6 mm
Largo del plano de Tierra (Lg)	34 mm
Ancho y Largo de la L (w x L1 x L2)	0.1 mm x 28.9 mm x 17.4 mm

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

### 3.2.2. Ancho de Banda

Una vez calculadas las dimensiones de la antena, se procedió a simular la misma en el software.



**Figura 4-3:** Parámetro S11 de la antena de 3GHz.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

Para la antena de 3GHz con sustrato de fabricación FR4 se obtuvo un ancho de banda de 2.6 GHz a 3.2 GHz, para  $S_{11} < -10$  dB, con una impedancia de  $Z = 51.594 \Omega - 2.554 j$  y atenuación de -41dB, como se observa en la Figura 5-3 y Figura 4-3.



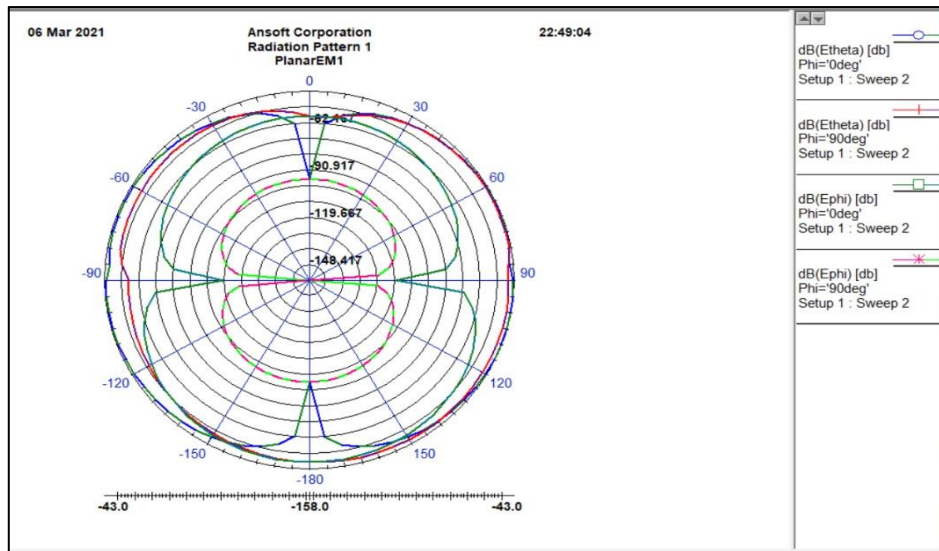
	F [GHz]	im(Z(Port 1,Port 1)) L1='17.4mm' L3=... Setup 1 : Swee...	re(Z(Port 1,Port 1)) L1='17.4mm' L3=... Setup 1 : Sweep 1
136	2.850000	-29.888723	63.559237
137	2.860000	-29.732643	61.536643
138	2.870000	-29.218093	59.572548
139	2.880000	-28.370221	57.708827
140	2.890000	-27.216559	55.980888
141	2.900000	-25.785905	54.418375
142	2.910000	-24.107536	53.045923
143	2.920000	-22.210709	51.883869
144	2.930000	-20.124381	50.948890
145	2.940000	-17.877056	50.254542
146	2.950000	-15.496764	49.811686
147	2.960000	-13.011092	49.628811
148	2.970000	-10.447249	49.712257
149	2.980000	-7.832133	50.066356
150	2.990000	-5.192391	50.693504
151	3.000000	-2.554452	51.594172
152	3.010000	0.055481	52.766881
153	3.020000	2.611462	54.208152
154	3.030000	5.087892	55.912437
155	3.040000	7.459649	57.872055
156	3.050000	9.702244	60.077136
157	3.060000	11.792029	62.515595
158	3.070000	13.706418	65.173125
159	3.080000	15.424150	68.033237
160	3.090000	16.925542	71.077348
161	3.100000	18.192750	74.284900
162	3.110000	19.210034	77.633549
163	3.120000	19.963985	81.099378
164	3.130000	20.443721	84.657174

**Figura 5-3:** Impedancia de la antena de 3GHz.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

### 3.2.3. Patrón de Radiación.

La Figura 6-3 muestra el patrón de radiación de la antena, el cual es de tipo omnidireccional con un valor de ancho de haz de 60°



**Figura 6-3:** Patrón de radiación de la antena de 3GHz.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

### 3.3. Configuración de tarjetas USRP 2932

Para el desarrollo de la presente tesis se utilizaron dos tarjetas USRP 2932 para la transmisión y recepción de la información tanto para la aplicación MIMO como para Radar. En el siguiente apartado se explicarán los pasos que se siguieron para la configuración de las tarjetas.

#### 3.3.1. Instalación del software USRP y conexión hacia la PC.

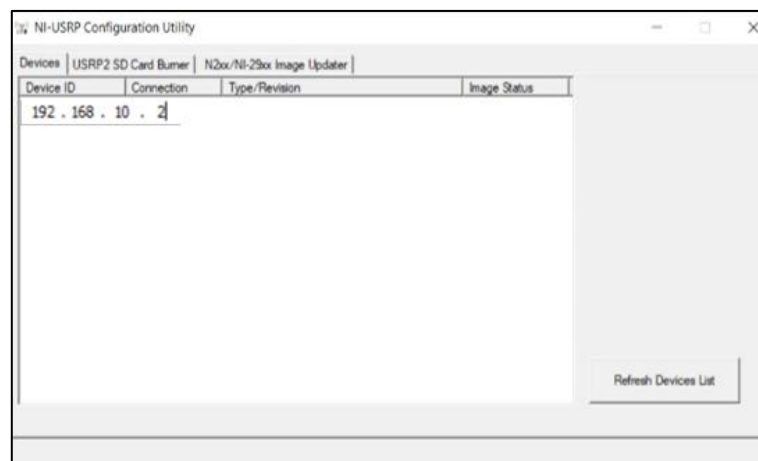
Antes de poder establecer comunicación entre la PC y las tarjetas USRP es necesario instalar su software, para ello hay que instalar el NI Package Manager el cual se puede descargar del sitio oficial de National Instruments. <https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/software-products/download.package-manager.html#322516>

Adicionalmente es necesario instalar los drivers para USRP, los cuales se encuentran en la siguiente dirección.

<https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/drivers/download.ni-usrp.html#369626>.

Hay que tener en cuenta que es necesario tener instalado el software Labview para poder utilizar las tarjetas, si no es el caso, al momento de instalar los paquetes para la USRP se da la opción de instalar Labview.

Una vez ya instalados todos los componentes, se procede a conectar la USRP al computador mediante el cable ethernet que viene dentro de los componentes de la tarjeta, se conecta el cargador AC/DC a la corriente y la antena a uno de los puertos mediante el cable SMA, como se observa en la Figura 7-3.

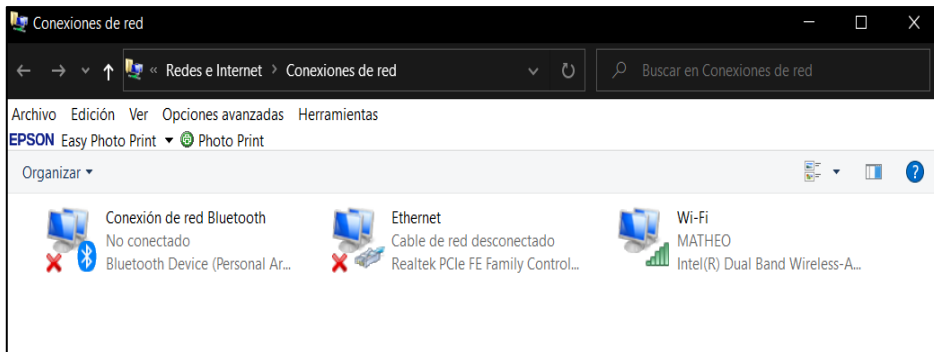


**Figura 7-3:** Conexión PC – USRP 932.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

### **3.3.2. Configuración de la dirección IP de las PCs**

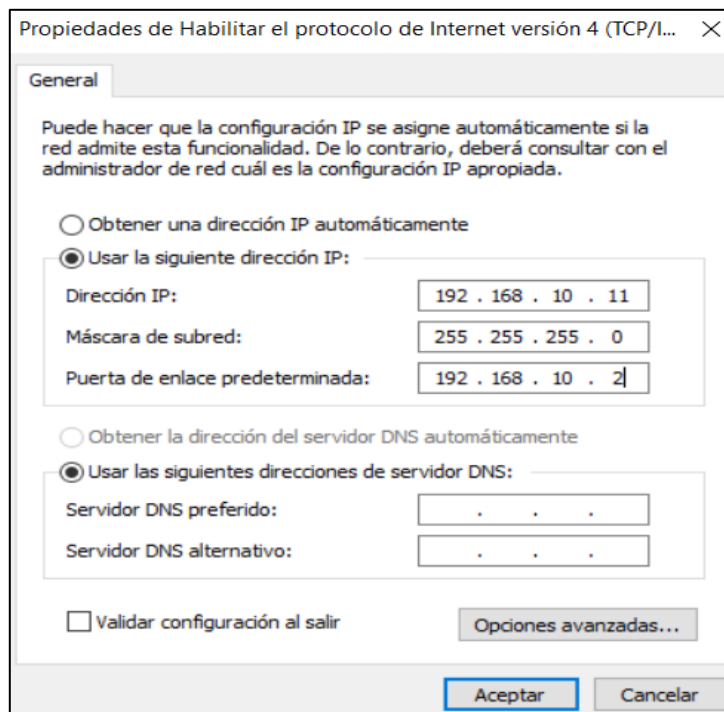
Las tarjetas USRP por defecto poseen una dirección IP 192.168.10.2, para que pueda ser reconocida por la PC es necesario configurar la dirección IPv4 del computador. Primero hay que ingresar al panel de control > Redes e Internet > Centro de redes y Recursos compartidos > Ethernet.



**Figura 8-3:** Configuración red ethernet.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

Se debe cambiar la dirección IPv4 de la red Ethernet con la dirección IP 192.168.10.11/24 y puerta de enlace 192.168.10.2, como se observa en la Figura 9-3.



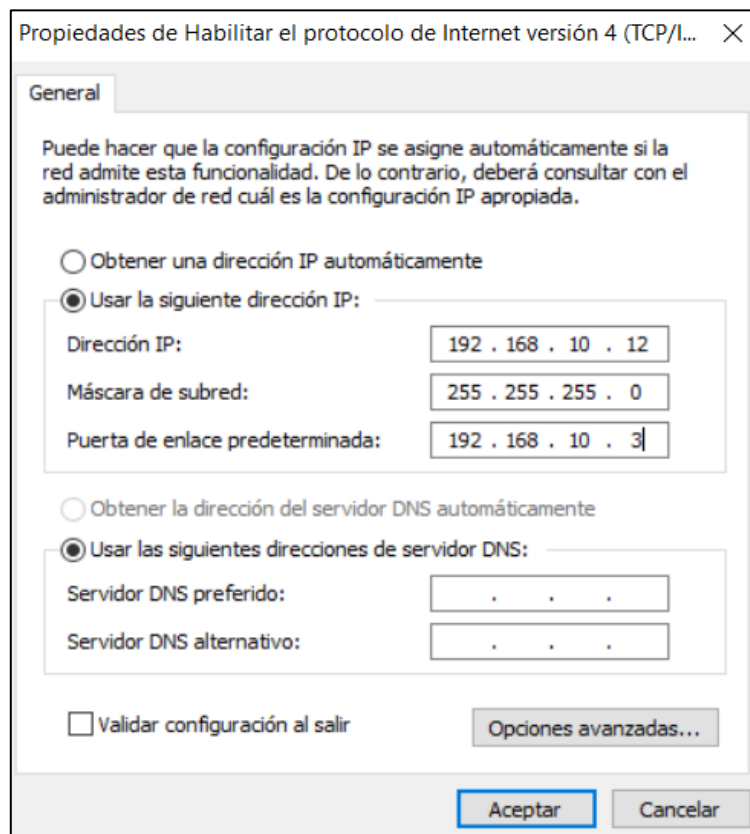
**Figura 9-3:** Configuración de dirección IP de USRP1 en PC1.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020

Como para el presente proyecto se requieren de dos tarjetas USRP, es necesario cambiar la IP de la tarjeta 2, para ello se debe ingresar a NI-USRP Configuration Utility, la cual se instala por defecto al momento de instalar los drivers USRP.

Se desplegará la siguiente pantalla como se observa en la Figura 10-3. Se debe seleccionar la pestaña Device y el dispositivo a cuál se desee cambiar la IP. Ir a la sección Selected IP Address e ingresar la IP por la que se desee hacer el cambio, en este caso 192.168.10.3, en la sección New IP Address. Click en Change IP Address, se desplegará una pantalla para confirmar el cambio se debe dar clic en OK.

Una vez realizado el cambio se procede a cambiar la IPv4 de la PC2 como se observa en la Figura 10-3.



**Figura 10-3:** Configuración de dirección IP de USRP2 en PC2.

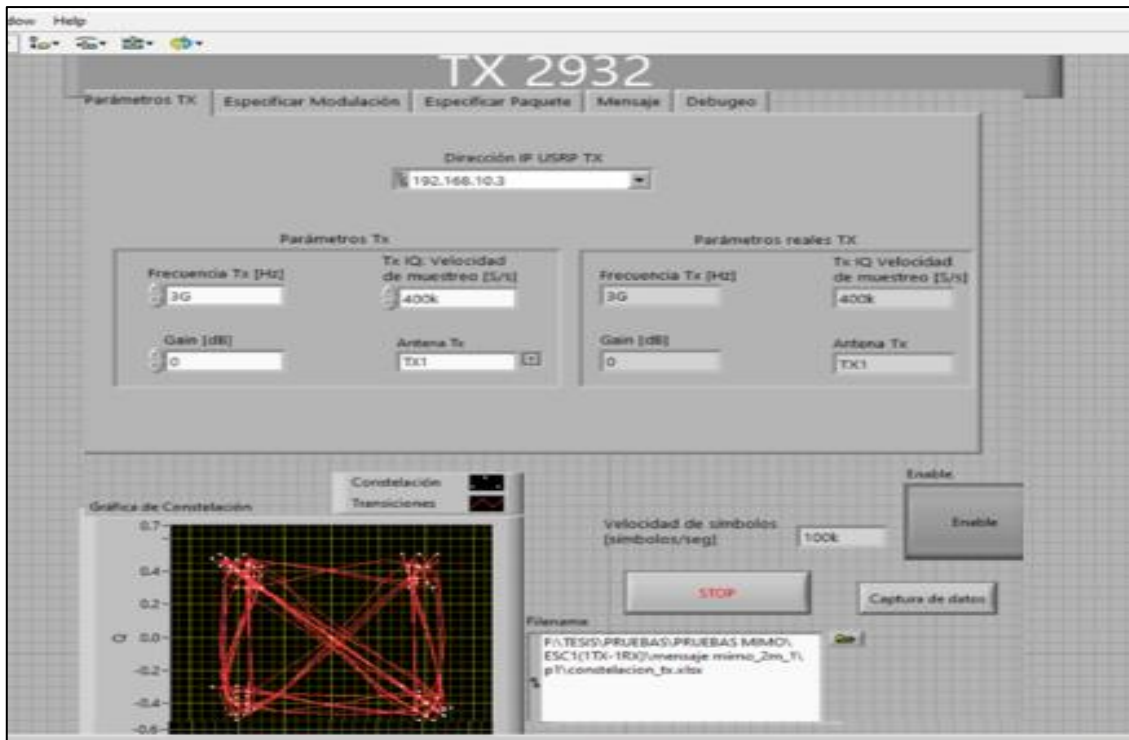
Realizado por: Merino, Daniela; 2020

### 3.4. Diseño de aplicación Tx – Rx de mensaje de texto.

Para realizar la toma de datos para los escenarios definidos en el presente trabajo de titulación, se diseñó una aplicación mediante el software LabView, la cual permite establecer un sistema transmisión – recepción de un mensaje de texto, mediante modulación QPSK, obteniendo el diagrama de constelación de la señal recibida, la señal recibida, valores de SNR y paquetes recibidos.

Tanto el transmisor como el receptor constan de parámetros configurables de la tarjeta USRP 2932, Figura 11-3, como:

- Dirección IP: permite ingresar la dirección IP de la tarjeta USRP 2932, las que eran 192.168.10.2 y 192.168.10.3, las mismas que se deben configurar una sola vez en el computador.
- Frecuencia: el rango de frecuencias es de 400MHz a 4.4GHz, con resolución de 1kHz. Para la presente tesis se utilizó una frecuencia de 3GHz.
- I/Q rate: se pueden configurar con valores máximos de 25MS/s a 16 bits o 50Ms/s a 9 bits, los cuales dependen de la configuración de la red y principalmente de la capacidad de las computadoras utilizadas.
- Ganancia de la antena: para el transmisor se puede configurar en un rango de 0 a 21 dB con una potencia máxima de salida de 50mW a 100mW, con resolución de 1dB. Para el receptor se puede configurar en un rango de 0 a 31,5dB con potencia máxima de entrada de 0dBm o 1mW, con resolución de 0,5dB.
- Antena Tx/RX: permite seleccionar el puerto de la tarjeta USRP por el que se va a transmitir y recibir.
- Ancho de banda: se trabajó con un ancho de banda de 40MHz ya que es el máximo ancho de banda que permite la tarjeta.
- Tiempo de muestreo

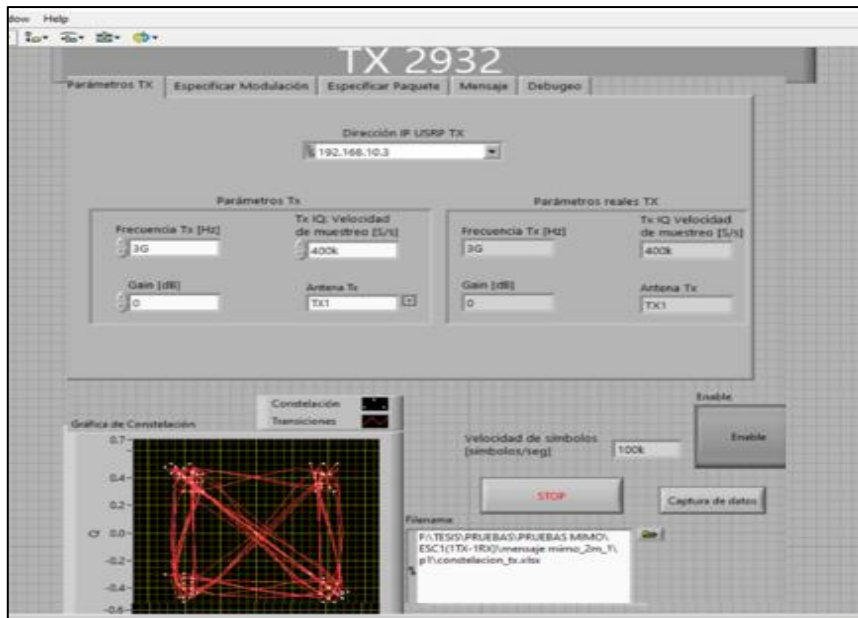


**Figura 11-3:** Configuración de parámetros para la comunicación con las tarjetas USRP.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

### 3.4.1. Transmisor

La Figura 12-3 muestra la parte frontal del programa diseñado para la transmisión del mensaje de texto, configurando los parámetros para establecer comunicación el software LabView y la tarjeta USRP 2932.



**Figura 12-3:** Panel Frontal Transmisor de mensaje.

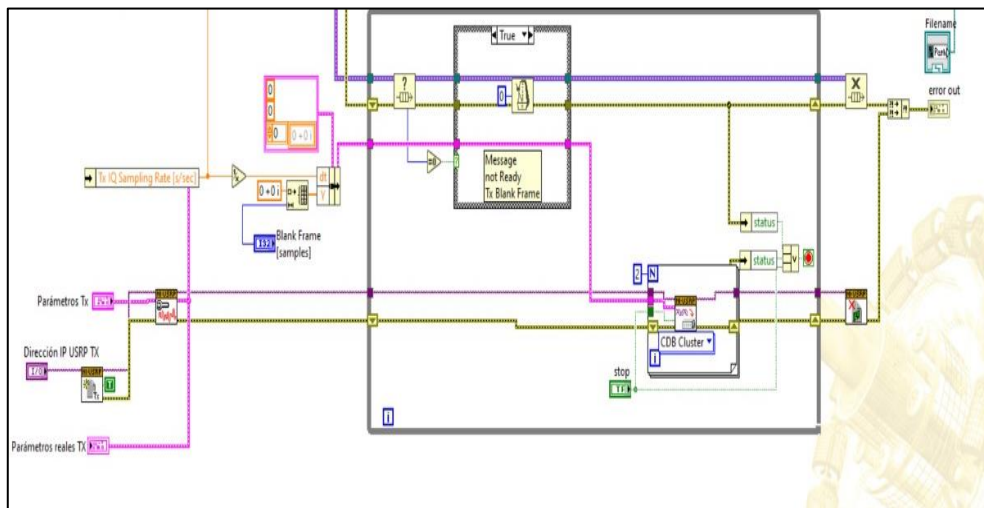
**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

El transmisor consta de varias secciones como: tipo de modulación, especificaciones del paquete a transmitir, mensaje y SNR. La Figura 13-23 indica el diagrama de bloques VI del transmisor donde se puede observar los bloques encargados de la transmisión mediante USRP, los mismos que están incluidos en el Modulation Toolkit de LabView, los cuales se describen a continuación.

- niUSRP Open Tx Session VI / niUSRP Open Rx Session Vi: permite crear una session entre la PC y la tarjeta USRP, estableciendo un id específico que permite identificar al dispositivo en posteriores VIs.
- niUSRP Configure Signal VI: se encarga de establecer los parámetros de la tarjeta USRP como: frecuencia portadora, I/Q rate, ganancia y Active Antena (puerto para la TX/RX)
- niUSRP Iniciate: se encarga de iniciar la sesión de recepción, informándole a la tarjeta USRP que todos sus parameros están configurados para iniciar la adquisición de IQ data.
- niUSRP Fetch TX Data/ niUSRP Fetch Rx Data: permite recuperar los datos IQ de la tarjeta USRP, la cual tiene una sesión de RX creada con el niUSRP Open Rx Session Vi. La información que proporciona se puede graficar tanto en el dominio del tiempo o digitalizado.



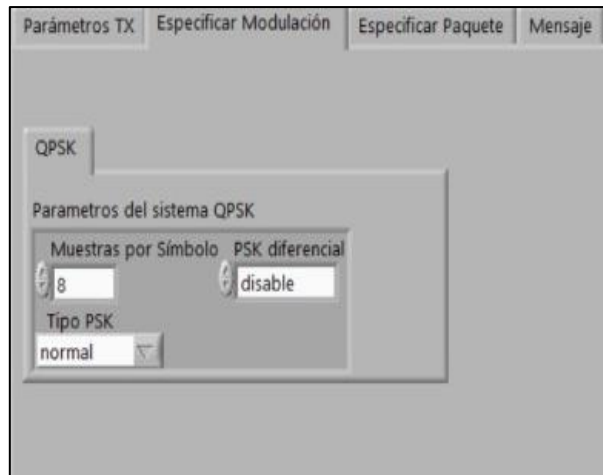
- niUSRP Abort VI: le indica a la tarjeta USRP que pare la toma de datos.
- niUSRP Close Session VI: se encarga de cerrar la sesión Tx o Rx, liberando la memoria. Una vez que este bloque es llamado en el programa ya no se pueden recibir datos hasta que se inicie una nueva sesión.



**Figura 13-3:** Panel Frontal Transmisor de mensaje.

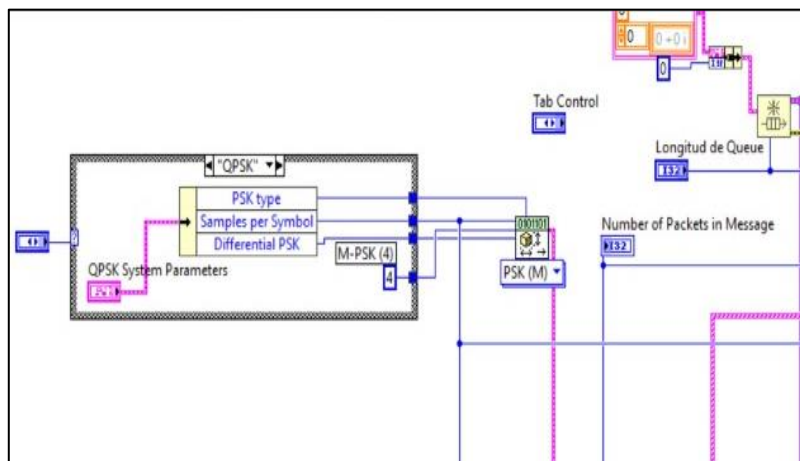
**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

El mensaje a transmitir se modula mediante QPSK, la cual se representa mediante la Figura 14-3, en la cual se establecen las muestras por símbolo y el tipo de PSK. El diagrama de bloques se indica en la Figura 15-3, el cual consta de un instrumento virtual que permite el cálculo de los parámetros necesarios para la modulación QPSK, los mismos que son definidos por el usuario, obteniendo a la salida una secuencia de símbolos compleja que permite generar la forma de onda.



**Figura 14-3:** Modulación QPSK panel frontal.

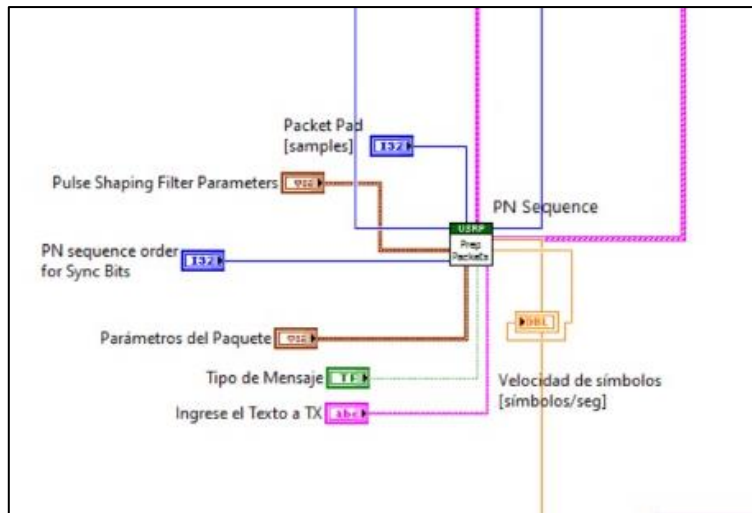
**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021



**Figura 15-3:** Diagrama de bloques Modulación QPSK en TX.

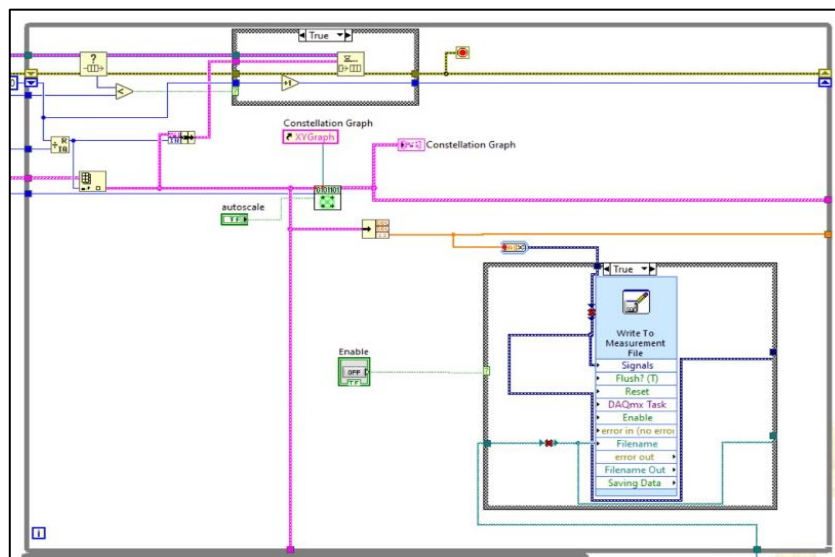
**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

La figura 16-3 muestra el almacenamiento del mensaje en formato txt, los cuales ingresan al instrumento virtual subGeneratePacket.vi, el cual me permite transmitir el mensaje, recopilando parámetros del paquete, tipo de mensaje, texto, dirección del paquete, secuencia PN.



**Figura 16-3:** Diagrama de bloques generación de mensaje.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



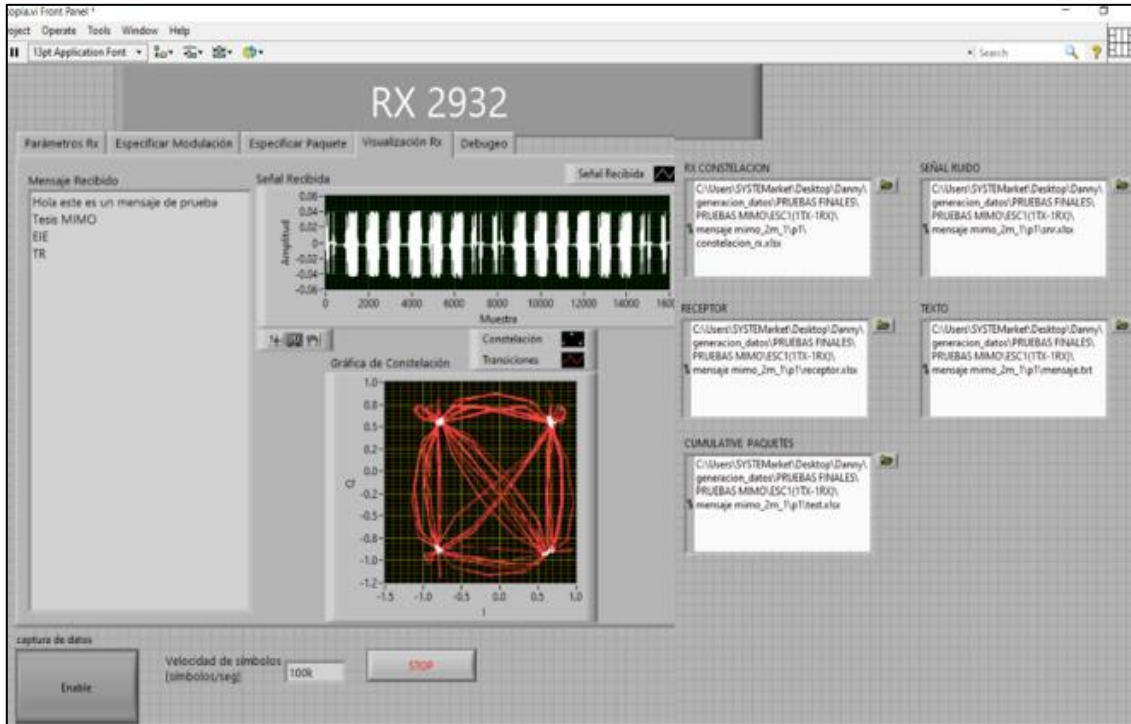
**Figura 17-3:** Diagrama de bloques para el procesamiento del mensaje.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

### 3.4.2. Receptor

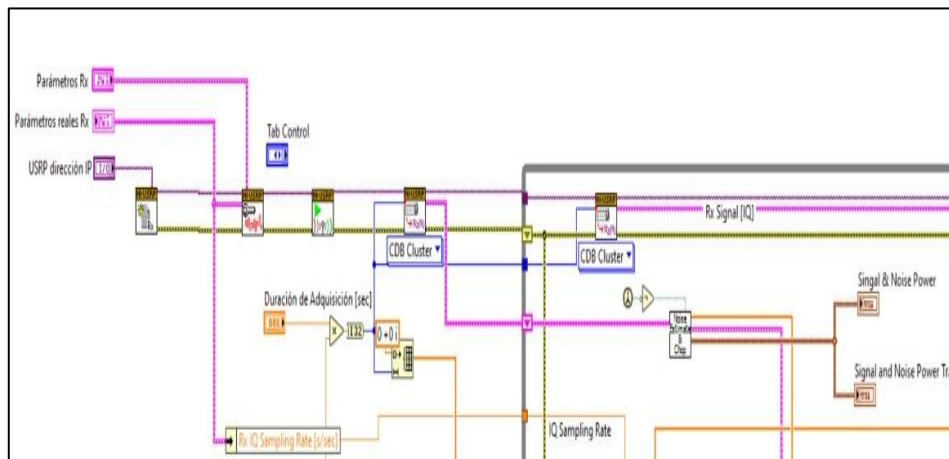
El Vi encargado para la recepción consta de bloques similares que el Vi del transmisor. Inicia con la configuración de la tarjeta USRP, la cual consta de los mismos bloques que en el apartado

anterior como IP, IQ rate, frecuencia portadora, ya que debe existir sincronización entre ambos dispositivos, caso contrario el receptor presentara problemas al momento de demodular la señal recibida. Ver Figura 18-3.



**Figura 18-3:** Panel Frontal Receptor de mensaje.

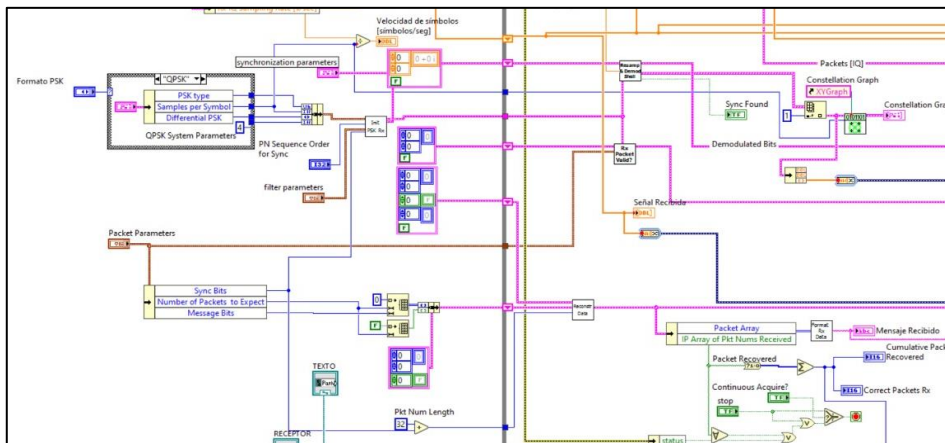
Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 19-3:** Diagrama de bloques RX de mensaje.

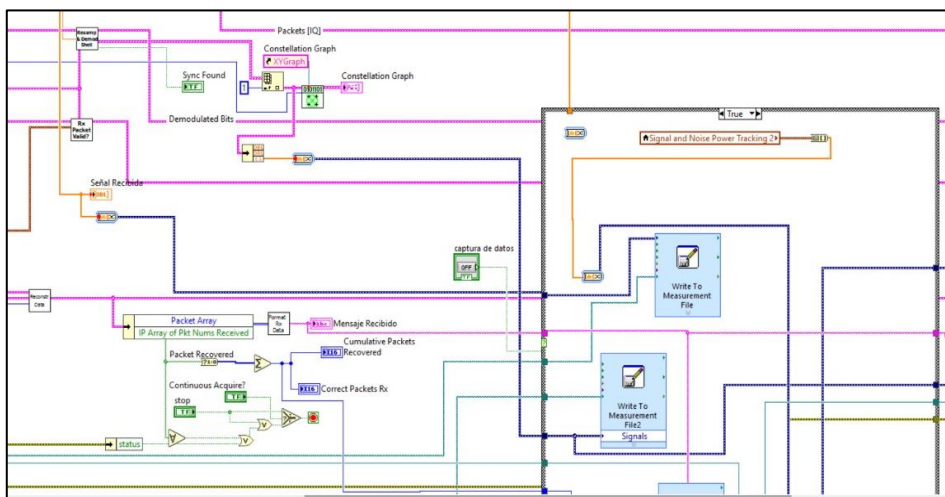
Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Para realizar la demodulación del mensaje recibido, es necesario conocer previamente el tipo de modulación con la que se transmitió y los parámetros necesarios de la misma, la cual se representa mediante la Figura 20-3. Se obtiene a la salida un flujo de datos y la forma de onda recibida, además del número de paquetes recibidos, los bits del mensaje recibido, los mismos que tras el procesamiento permite graficar el diagrama de constelación recibido. El bloque de validación de paquetes se encarga de analizar los bits de sincronía y agrupa los paquetes que han sido recibidos correctamente para después separar la información útil, de los bits que han sido concatenados durante la transmisión del mensaje.



**Figura 20-3:** Diagrama de bloques demodulación QPSK en RX.

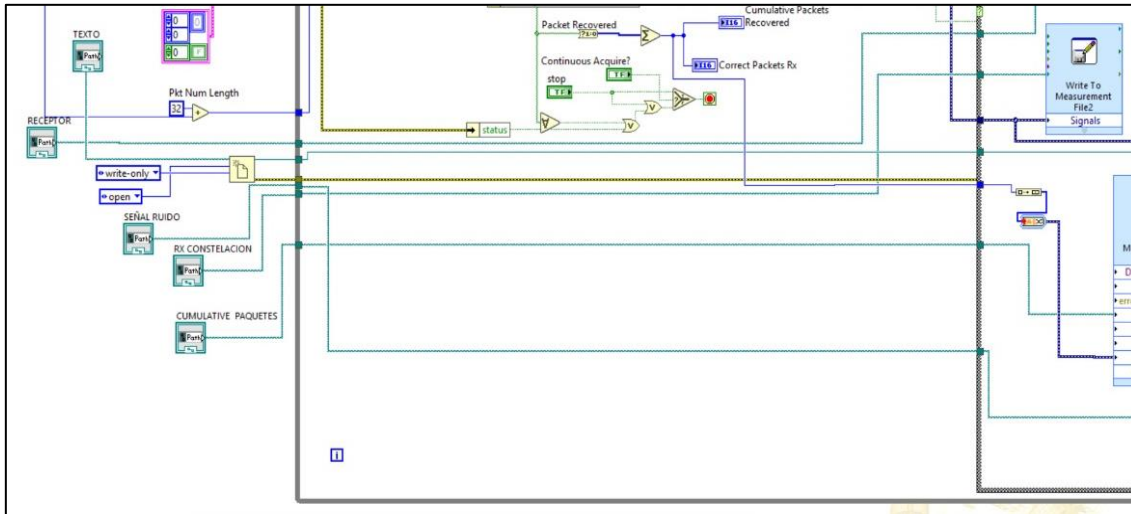
Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 21-3:** Diagrama de bloques procesamiento del mensaje recibido.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Como se observa en la Figura 22-3, los datos recibidos son almacenados en archivos de Excel (.xlsx) para su posterior procesamiento en el programa diseñado en Matlab, como son: señal recibida, señal/ruido, constelación recibida, paquetes recibidos.



**Figura 22-3:** Archivos .xlsx obtenidos.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

### 3.5. Diseño de aplicación para procesamiento de las señales MIMO (MATLAB)

Debido a la falta de memoria física y procesamiento de una de las computadoras utilizadas en la presente tesis, se desarrollaron el procesamiento mediante el software Matlab.

Como se explicó en el apartado anterior, mediante el software LabView se procedió a la recopilación y almacenamiento de los datos, los cuales se guardaron en 3 documentos de Excel, los cuales se detallan en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3:** Documentos y datos recopilados mediante LabView TX-RX del mensaje.

DOCUMENTOS EXCEL OBTENIDOS MEDIANTE LA APLICACIÓN MIMO EN LABVIEW	
DOCUMENTO DE EXCEL	DATOS ALMACENADOS

Constelación RX	Puntos de la constelación en 4 cuadrantes
Señal Recibida (SNR)	Ruido
Mensaje RX	Caracteres recibidos

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Se diseñaron tres aplicaciones mediante el Software Matlab, pero cabe mencionar que los datos obtenidos mediante LabView, Tabla 3-3, fueron utilizados únicamente para los escenarios SISO y SIMO, mientras que la tercera fue diseñada para simular el Escenario MIMO 2x2.

Como se mencionó se diseñaron dos programas para el procesamiento de los datos obtenidos mediante el sistema SISO y MISO mediante LabView, los cuales constan de 4 secciones principales:

- Parámetros de configuración: permite ingresar la distancia, polarización y número de prueba a procesar, los cuales se definen mediante sentencias IF que permiten ir buscando la información requerida en el repositorio que contiene los archivos de Excel obtenidos mediante LabView.
- Caracteres perdidos: codificado mediante sentencias If y For, calculando la longitud del mensaje original transmitido y comparando carácter por carácter respecto al archivo .xlsx obtenido mediante LabView,
- Diagrama de constelación y desviación estándar: codificado mediante sentencias If y For para calcular los puntos de los 4 cuadrantes del diagrama de constelación QPSK, estableciendo los rangos correspondientes de cada cuadrante y obteniendo la longitud de los datos para su previa grafica. Para el cálculo de las desviaciones estándar se utilizó la fórmula estadística que se indica en la Ecuación 28-3.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N}}$$

**Ecuación 28-3:** Desviación estándar.

Donde:

$x$ = variable.

$N$ = número de observaciones.

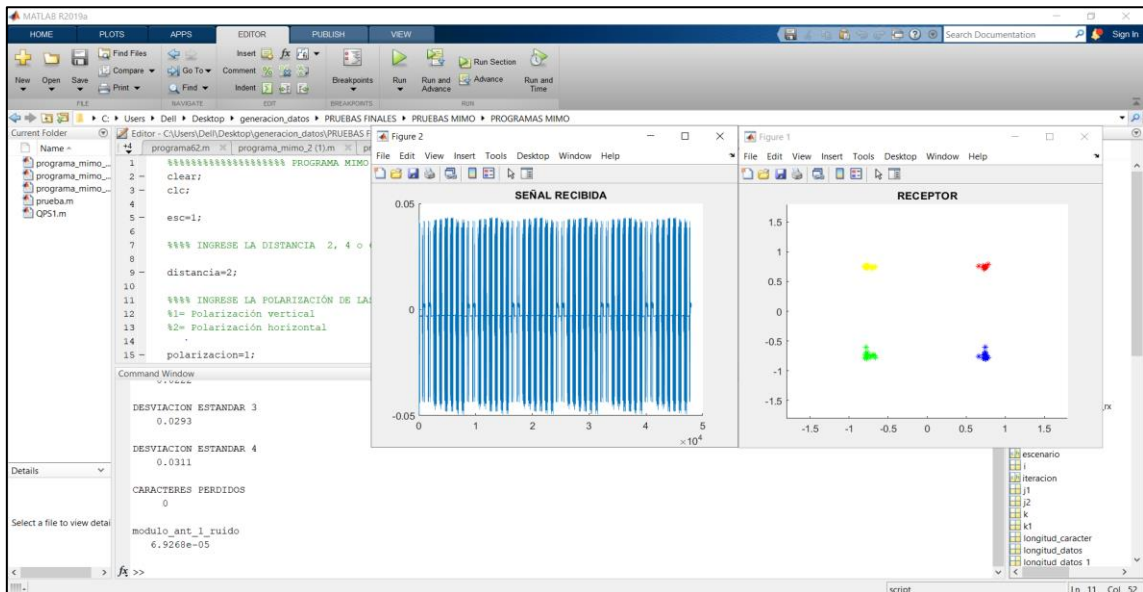
$\bar{X}$ = media de  $x$ .

- Relación señal/ruido (SNR): permite calcular los valores de relación SNR, calculando la norma de los vectores de la potencia de la señal recibida y la potencia del ruido, mediante la Ecuación 29-3.

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{S}{N} \right)$$

**Ecuación 29-3:** Cálculo SNR.

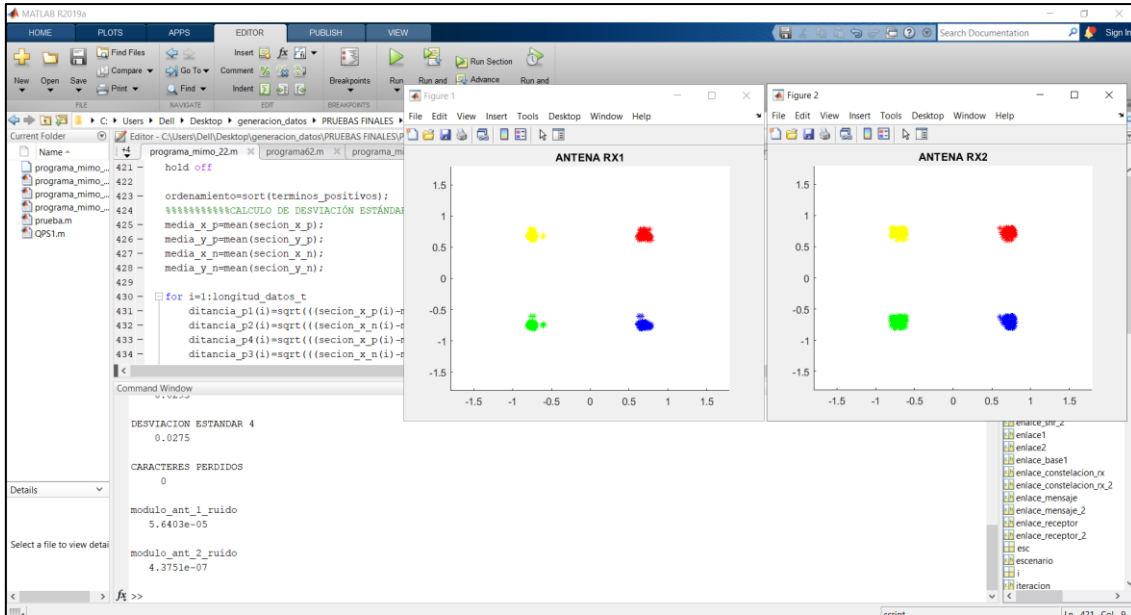
Obteniendo como resultado un programa para el procesamiento de las muestras obtenidas mediante LabVIEW, como se observa en las Figuras 23-3 y 24-3. La codificación se indica en el Anexo I y J.



**Figura 23-3:** Aplicación para procesamiento de datos Escenario SISO.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

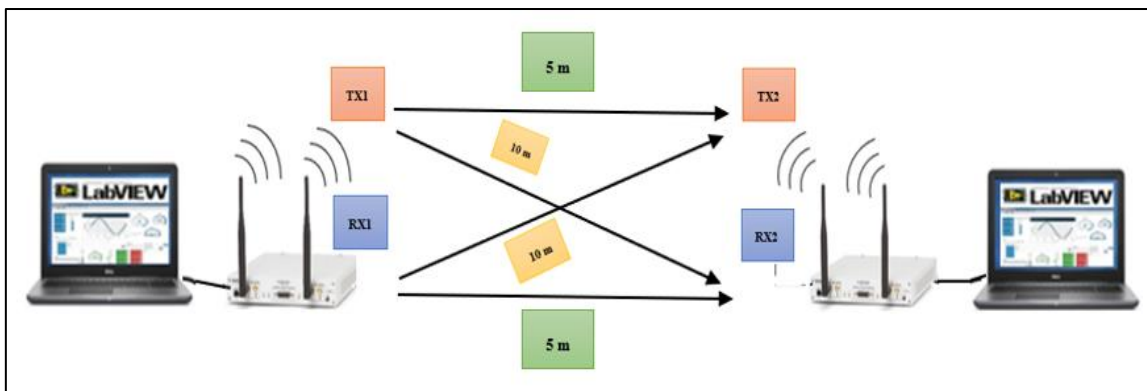




**Figura 24-3:** Aplicación para procesamiento de datos escenario SIMO.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020

La aplicación para el Escenario MIMO, consiste en una simulación de un escenario con 2 transmisores y 2 receptores, MIMO 2X2, representado en la Figura 25-3, mediante el cual se transmite una señal modulada mediante QPSK, a 3GHZ, simulando tiempos de retardo provocados en el medio de transmisión y retardos provocados por hardware.

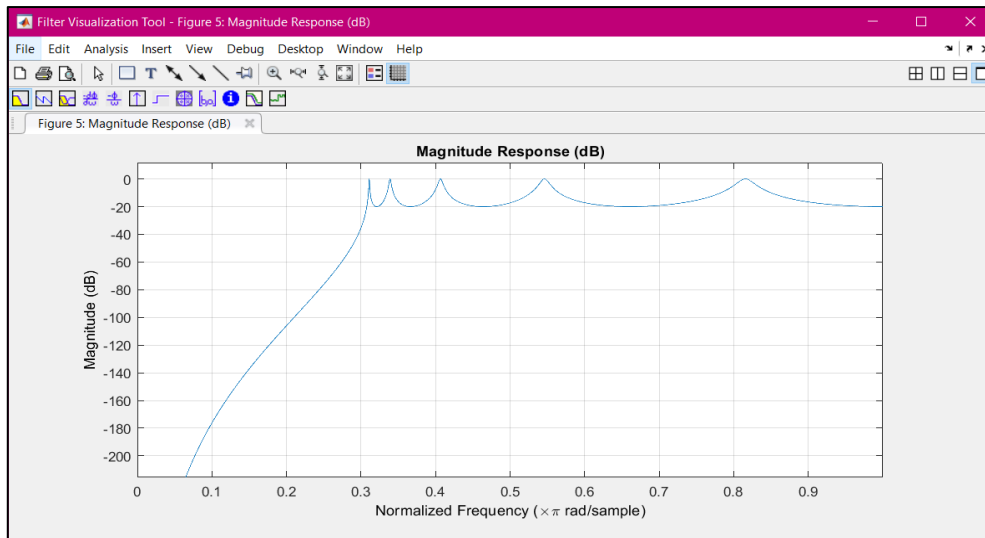


**Figura 25-3:** Sistema MIMO 2X2.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

El programa consta de varias secciones como:

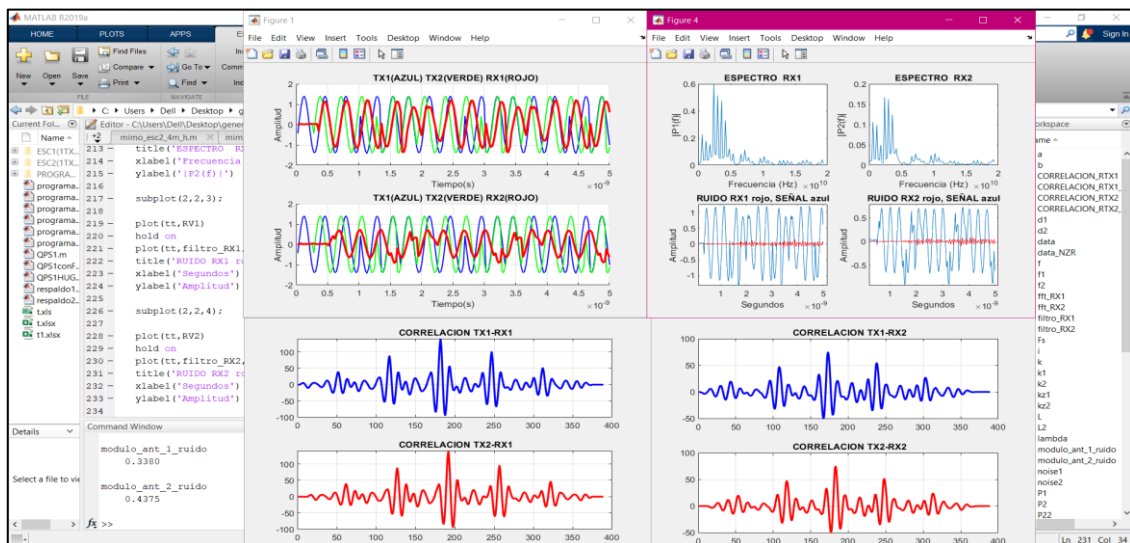
- Parámetros de la señal transmitida: se ingresa la frecuencia de operación, periodo, tiempo de muestro, duración de la modulación.
- Modulación QPSK: permite obtener las componentes de fase y cuadratura de la señal a transmitir, en forma de vectores, para generar un vector de señal modulada.
- Receptor RX1 y RX2: se definieron parámetros fundamentales para la obtención de la señal resultante como las distancias a las que se ubican los transmisores respecto a los receptores,  $\lambda$ , el número de onda, desplazamiento debido a la distancia entre Tx – Rx, constante de atenuación respecto a hardware, ruido.
- Correlación de señales TXs y RXs: se la realizó mediante la función `xcorr` propia de Matlab, la cual permite medir el grado de coincidencia o similitud entre señales.
- Relación señal/ruido: permite calcular los valores de relación SNR, mediante al archivo obtenido del software LabView, sacando la norma de los vectores de la potencia de la señal recibida y la potencia del ruido.
- Filtro: previamente al filtro se saca el espectro de la señal recibida para establecer el ancho de banda que se desea filtrar, el cual va de 0,6 a 5.5 GHz, posterior a ello se utiliza un filtro chebyshev pasa altos de orden 10 con factor de ondulación 20. El permitió filtrar la señal original para obtener únicamente el ruido producido en el medio, Figura 26-3.



**Figura 26-3:** Filtro chebyshev diseñado.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Cabe mencionar que el ruido aplicado se lo definió como aleatorio tanto para un sistema con ruido alto y uno con ruido bajo, para así tomar 30 muestras distintas, acercándolo a un escenario más real. Se obtienen gráficas de las señales transmitidas, señales recibidas, correlación de señales y etapa de filtración de la señal para obtener el ruido, como se observa en la Figura 27-3. La codificación se indica en el Anexo K.



**Figura 27-3:** Aplicación para procesamiento de datos Escenario MIMO 2x2.

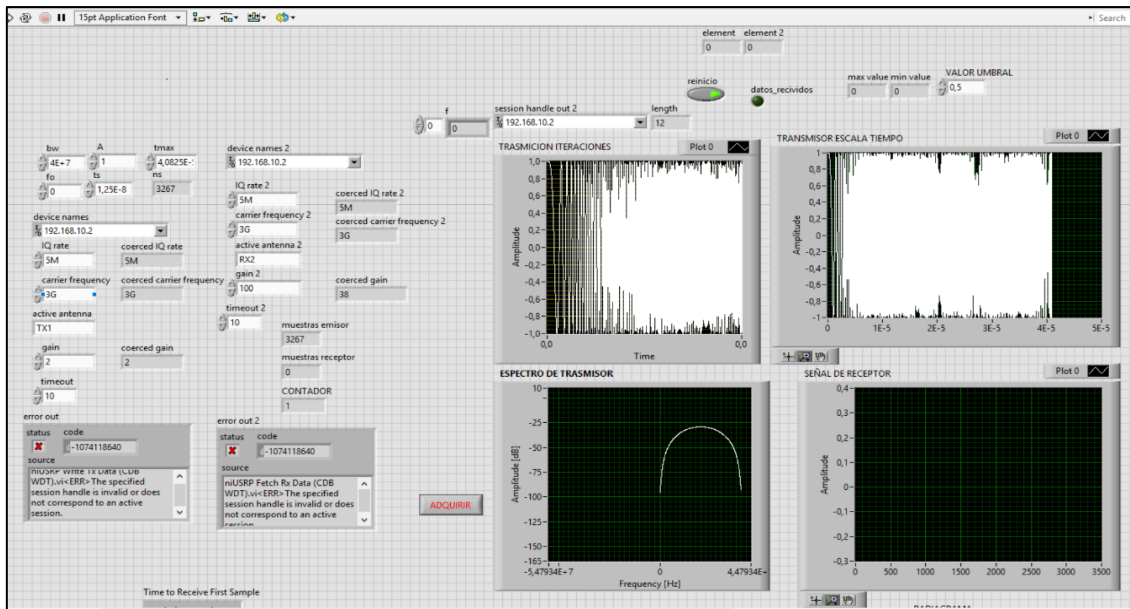
Realizado por: Merino, Daniela; 2021

### 3.6. Diseño de aplicación RADAR

Para realizar la toma de datos para los escenarios definidos en el presente trabajo de titulación, se diseñó una aplicación mediante el software LabView, la cual permite establecer un sistema radar FMCW, obteniendo gráficas de la señal transmitida, señal recibida, espectro de la señal transmitida, espectro de la señal recibida, radargrama.

Tanto el transmisor como el receptor requieren parámetros para su configuración mediante la tarjeta USRP 2932, Figura 28-3, como:

- Dirección IP: permite ingresar la dirección IP de la tarjeta USRP 2932, las que eran 192.168.10.2 y 192.168.10.3, las mismas que se deben configurar una sola vez en el computador.
- Frecuencia: el rango de frecuencias es de 400MHz a 4.4GHz, con resolución de 1kHz. Para la presente tesis se utilizó una frecuencia de 3GHz.
- I/Q rate: se pueden configurar con valores máximos de 25MS/s a 16 bits o 50Ms/s a 9 bits, los cuales dependen de la configuración de la red y principalmente de la capacidad de las computadoras utilizadas.
- Ganancia de la antena: para el transmisor se puede configurar en un rango de 0 a 21 dB con una potencia máxima de salida de 50mW a 100mW, con resolución de 1dB. Para el receptor se puede configurar en un rango de 0 a 31,5dB con potencia máxima de entrada de 0dBm o 1mW, con resolución de 0,5dB.
- Antena Tx/RX: permite seleccionar el puerto de la tarjeta USRP por el que se va a transmitir y recibir.

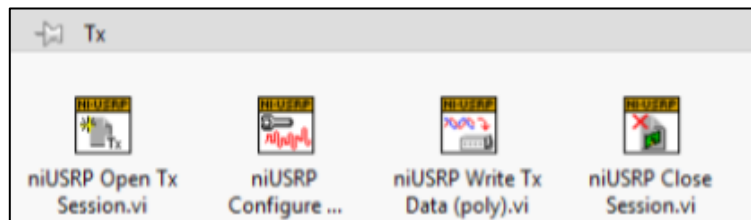


**Figura 28-3:** Panel frontal Sistema Radar.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

### 3.6.1. Transmisor

Como se explicó en la sección 3.4.1, para realizar la transmisión mediante las tarjetas, el software LabView posee bloques propios de USRP, los cuales cumple el propósito de transmisión /recepción, como se observa en la Figura 29-3.

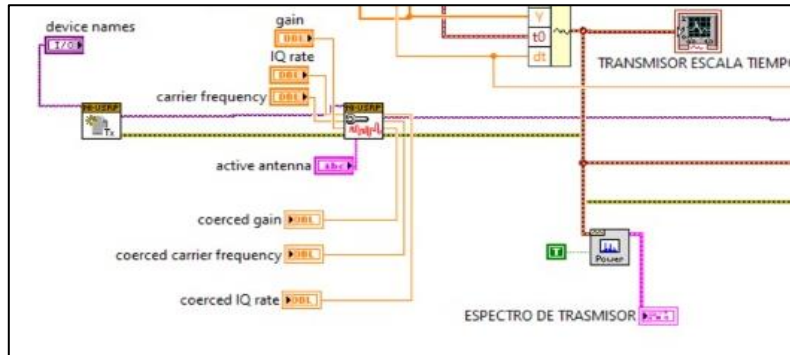


**Figura 29-3:** Bloques TX/RX USRP en LabView.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

El transmisor se basa en la transmisión de una señal chirp up que va de 0 a 40MHz. La Figura 30-3 muestra la etapa inicial del programa, donde se establece la comunicación entre la PC y la

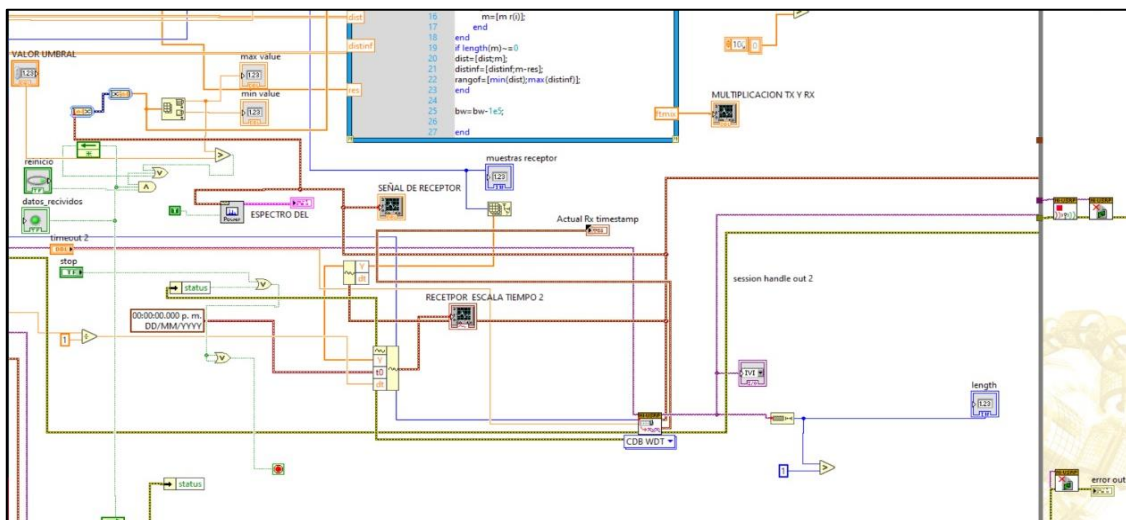
tarjeta USRP, además del bloque encargado de recibir la información a transmitir, frecuencia de corte, ganancia de la antena y la velocidad de muestreo.



**Figura 30-3:** Parámetros para la generación de señal chirp up.

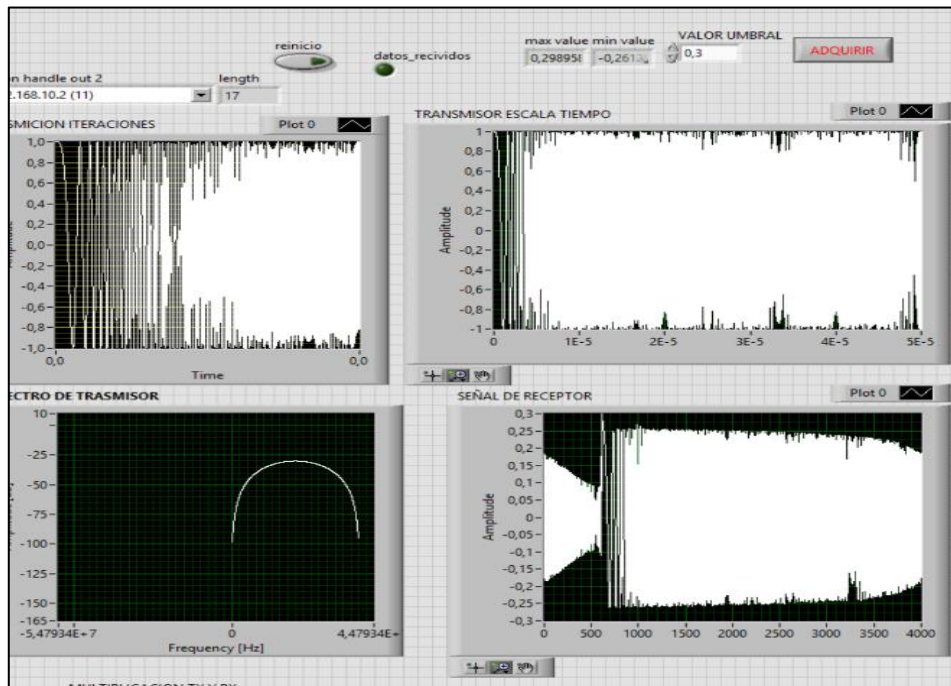
Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Una vez realizada la generación de la señal se procede a transmitirla a través de los bloques USRP para transmisión, para que rebote con la placa de metal y así obtener la señal recibida. Posterior a ello se cierra la sesión de la tarjeta USRP, la cual brinda un mensaje de error en caso de obtener alguno. Se grafica la respuesta en tiempo y frecuencia, como se observa en la Figura 31-3 y Figura 32-3.



**Figura 31-3:** Diagrama de bloques para la transmisión de la señal chirp.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 32-3:** Señal chirp transmitida en tiempo y frecuencia.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

### 3.6.2. Receptor

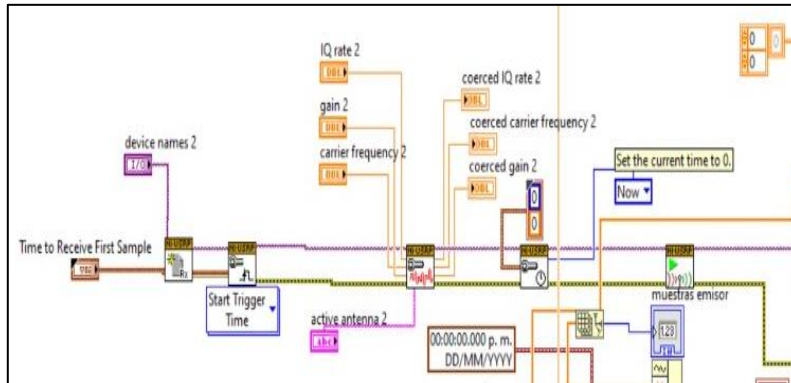
Al igual que el transmisor, el proceso de recepción de información consta de bloques propios para realizarlo mediante las tarjetas USRP, como se observa en la Figura 33-3.



**Figura 33-3:** Bloques RX USPR de LabView.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La recepción de la información se sincronizó con el transmisor para obtener la primera muestra emitida por el mismo, trabajando de forma full-duplex. Los parámetros de configuración deben ser los mismo que se utilizó para la transmisión como se observa en la Figura 34-3.

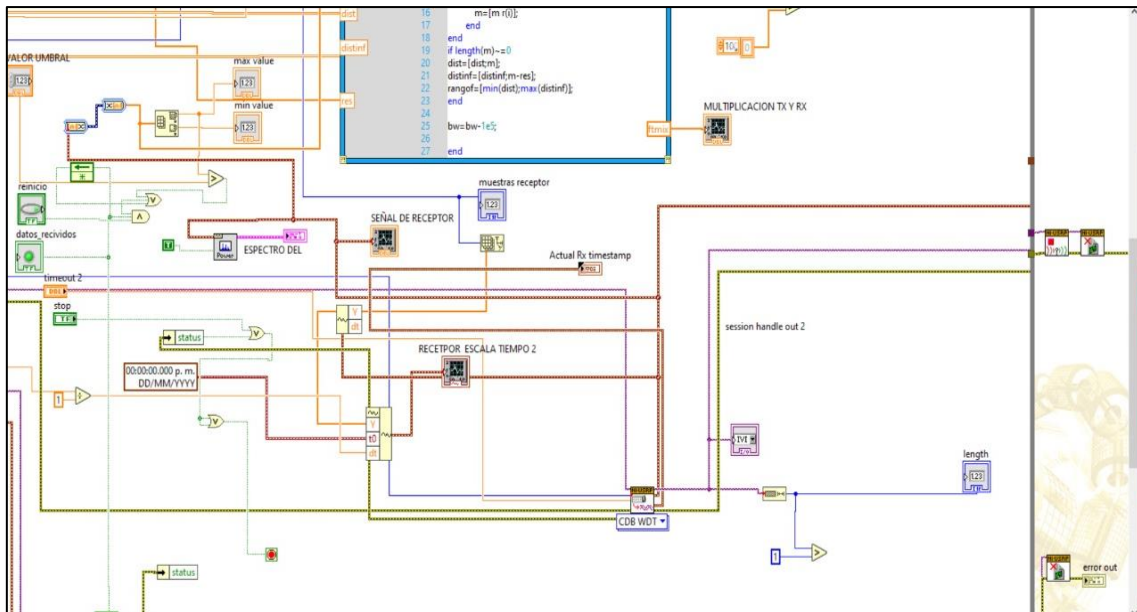


**Figura 34-3:** Bloques RX USRP de LabView.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

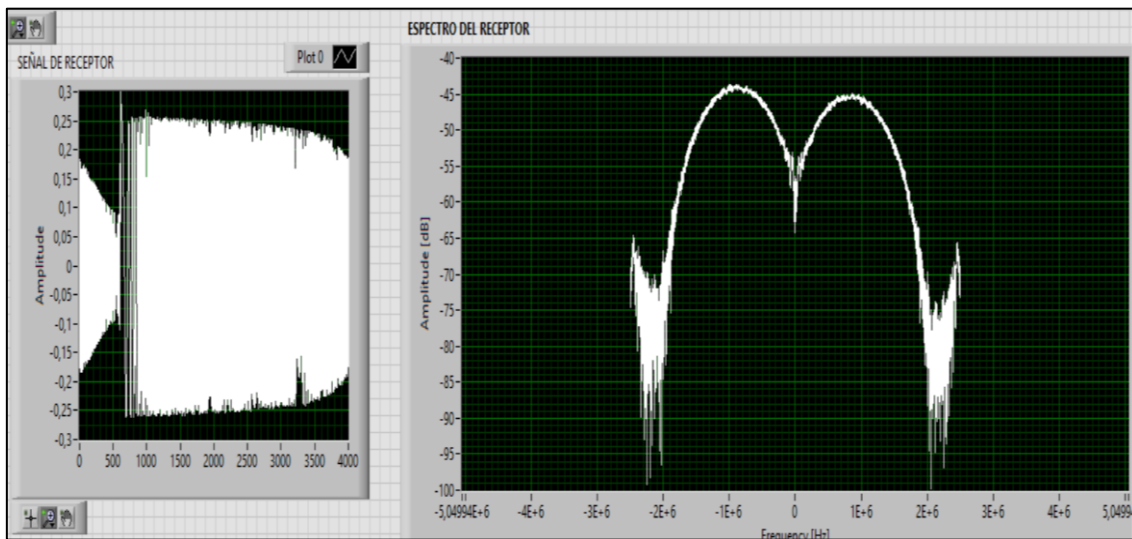
Una vez transmitida la señal chirp se procede a recibirla mediante los bloques de USRP tras el rebote que sufre la señal tx con la placa de cobre. Se realiza la reconstrucción de la señal chirp en base a las 108900 muestras que se enviaron mediante el transmisor obteniendo una variable del tipo waveform para convertirla a un tipo array, lo cual se realiza mediante un bucle while para repetir la acción hasta finalizar la recepción mediante los bloques de cierre de sesión de USRP. Se obtiene las gráficas de la señal recibida tanto en tiempo como su respuesta en frecuencia, como se observa en la Figura 35-3 y 36-3.





**Figura 35-3:** Diagrama de bloques para la recepción de la señal chirp.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

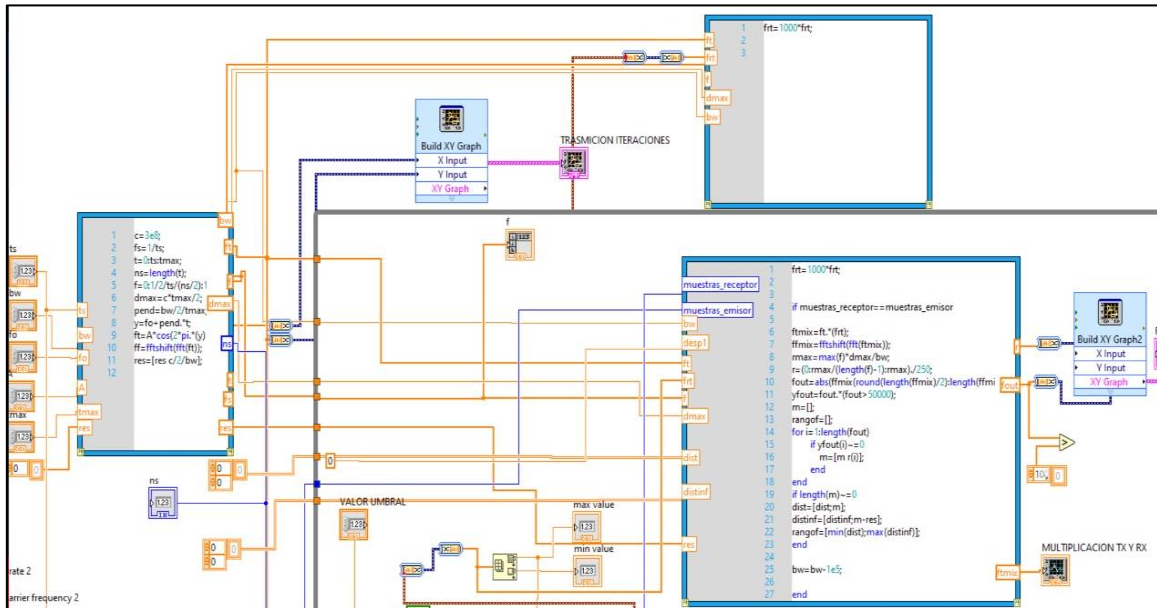


**Figura 36-3:** Diagrama de bloques para la transmisión de la señal chirp.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Figura 37-3 muestra la generación del radargrama mediante un mathscript, el cual se obtiene mediante la multiplicación de la señal transmitida con la señal recibida para posteriormente obtener la fft del resultado y así determinar la posición a la que se encuentra el objeto. Tiene como

entradas la frecuencia de muestreo, tiempo, número de muestras, pendiente, transformada fft de la señal transmitida, para obtener como resultado la posición a la que se detecta el objeto.



**Figura 37-3:** Generación del radargrama.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

### 3.7. Diseño de aplicación para procesamiento de las señales RADAR (Matlab)

Como se mencionó en el apartado 3.5 debido a la falta de memoria física y procesamiento de una de las computadoras utilizadas, se creó un programa en Matlab para el procesamiento de los datos recolectados mediante la aplicación para Radar desarrollada en LabView.

De igual manera se almacenaron los datos en documentos de Excel, los cuales contenían información sobre la amplitud de la señal transmitida y recibida, espectros de las señales Tx y Rx, distancia a la que se encuentra el objeto (radargrama).

El programa consta de varias etapas para el procesamiento de las señales receptadas mediante la tarjeta USRP, como se observa en la Figura 38-3.

- **Parámetros de configuración:** permite ingresar la distancia, polarización y número de prueba a procesar, los cuales se definen mediante sentencias IF que permiten ir buscando la

información requerida en el repositorio que contiene los archivos de Excel obtenidos mediante LabView.

- Gráfica de señal transmitida/recibida en función del tiempo y sus respectivos espectros en frecuencia: se calcula la amplitud de la señal recibida y transmitida para compararlas y determinar el retardo que sufre la señal Rx.
- Correlación de señales TXs y RXs: se la realizó mediante la función xcorr propia de Matlab, que me permite medir el grado de coincidencia o similitud entre señales. Obteniendo así gráficas con un pico pronunciado que me indica la posición en la cual las señales coinciden.
- Radargrama

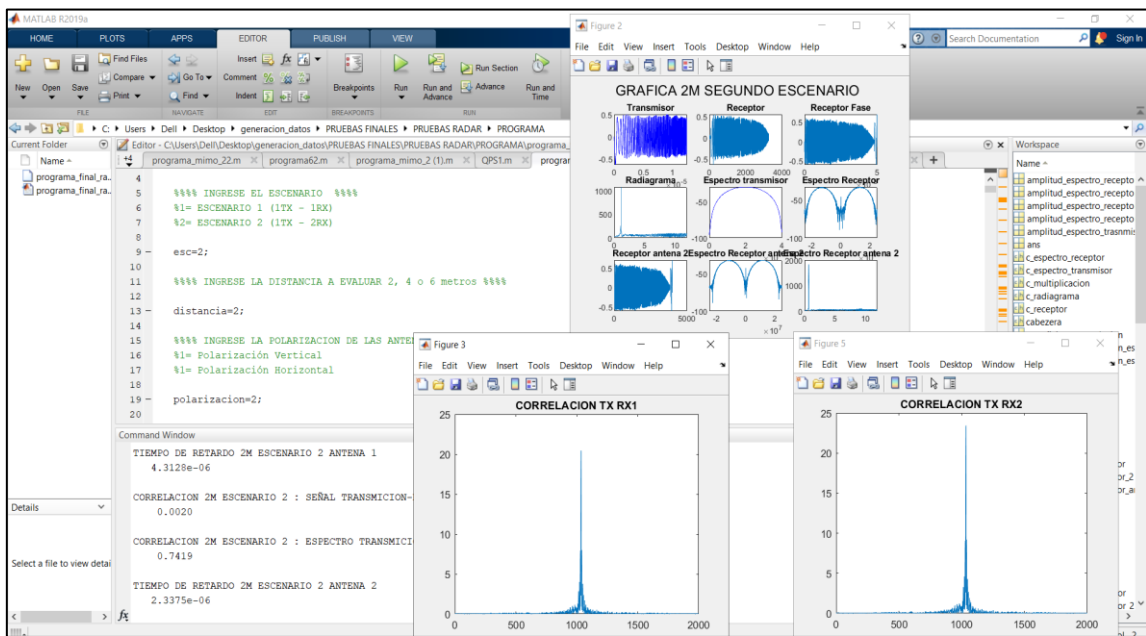


Figura 38-3: Programa de procesamiento Radar.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

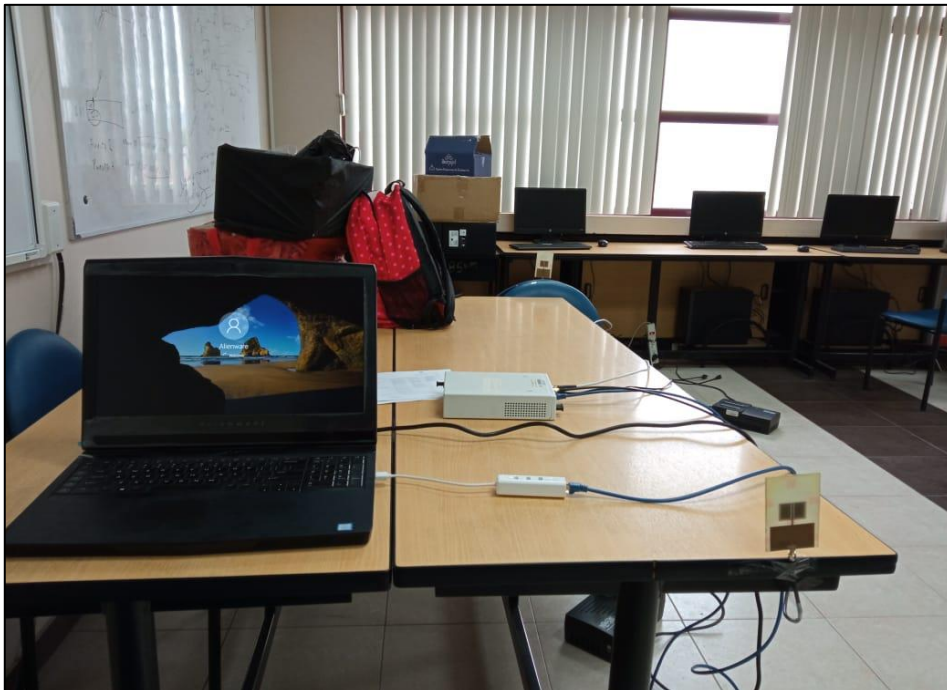
### 3.8. Identificación de las muestras e Implementación

#### 3.8.1. Definición de escenarios

Para la comparación de la aplicación MIMO se han definido 3 escenarios, de los cuales dos fueron desarrollados en un entorno real y controlado, mientras que el tercer escenario fue simulado en Matlab debido a que por la Pandemia del Covid-19 que está atravesando el mundo, fue complicado su desarrollo. En lo que respecta a la aplicación Radar se definieron 2 escenarios desarrollados en un ambiente controlado, los mismos que serán detallados a más profundidad a continuación.

### *3.8.1.1. Escenario SISO polarización vertical*

El primer escenario consiste en una configuración SISO polarizada verticalmente. Se estableció conexión entre la tarjeta USRP1 y la PC1. Las antenas se conectaron en los puertos TX1 y RX2 de la tarjeta USRP1. Evaluando el sistema a 2, 4 y 6 metros, como se observa en las siguientes figuras.



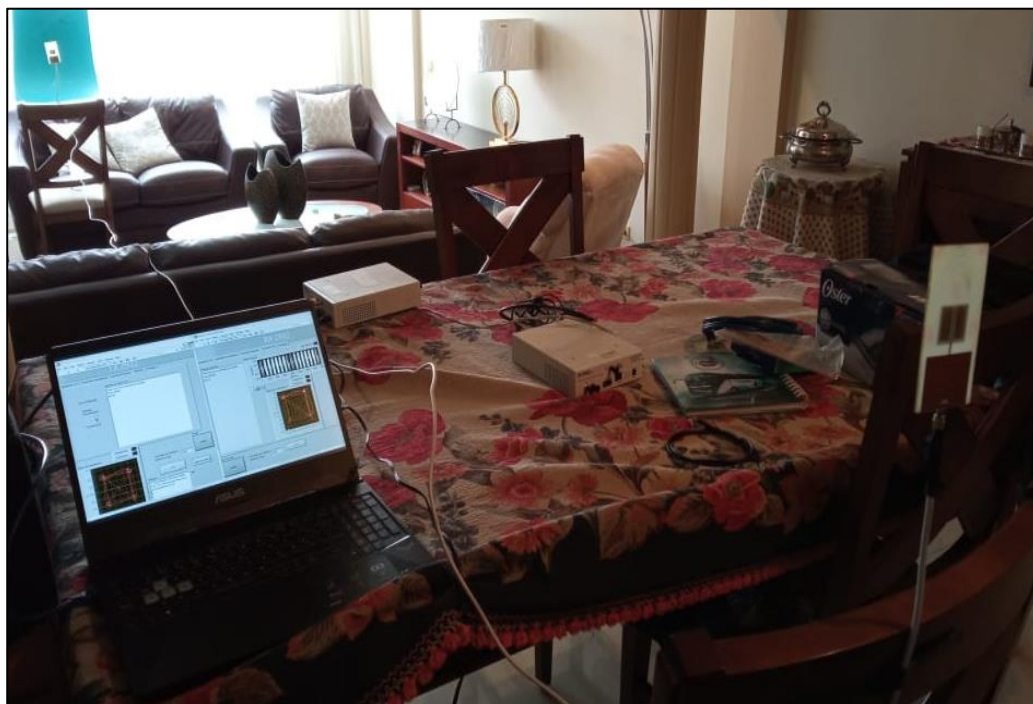
**Figura 39-3:** Escenario SISO polarización vertical a 2m.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021



**Figura 40-3:** Escenario SISO polarización vertical a 4m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 41-3:** Escenario SISO polarización vertical a 6 m.

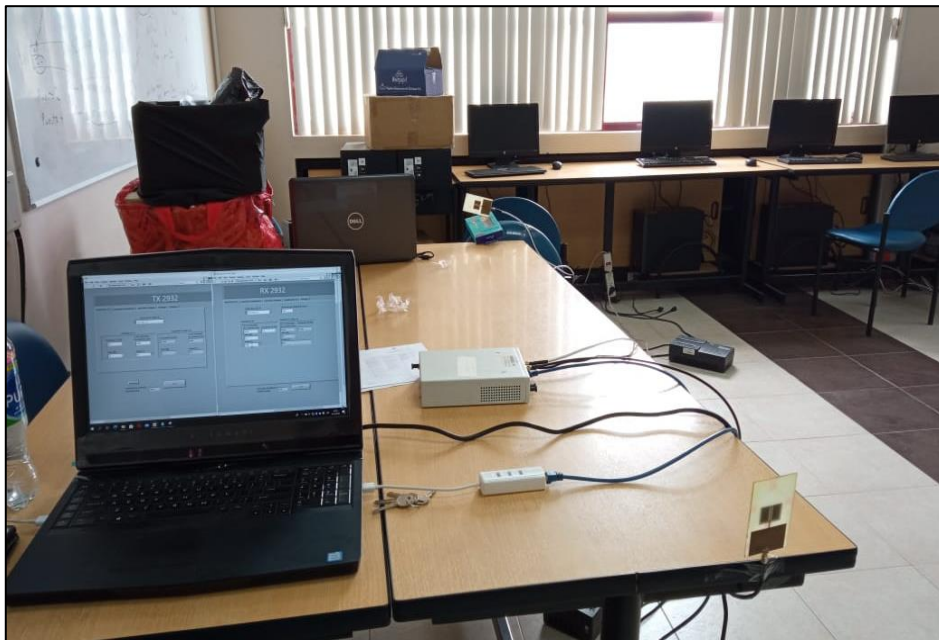
Realizado por: Merino, Daniela; 2021



### 3.8.1.2. Escenario SISO polarización horizontal

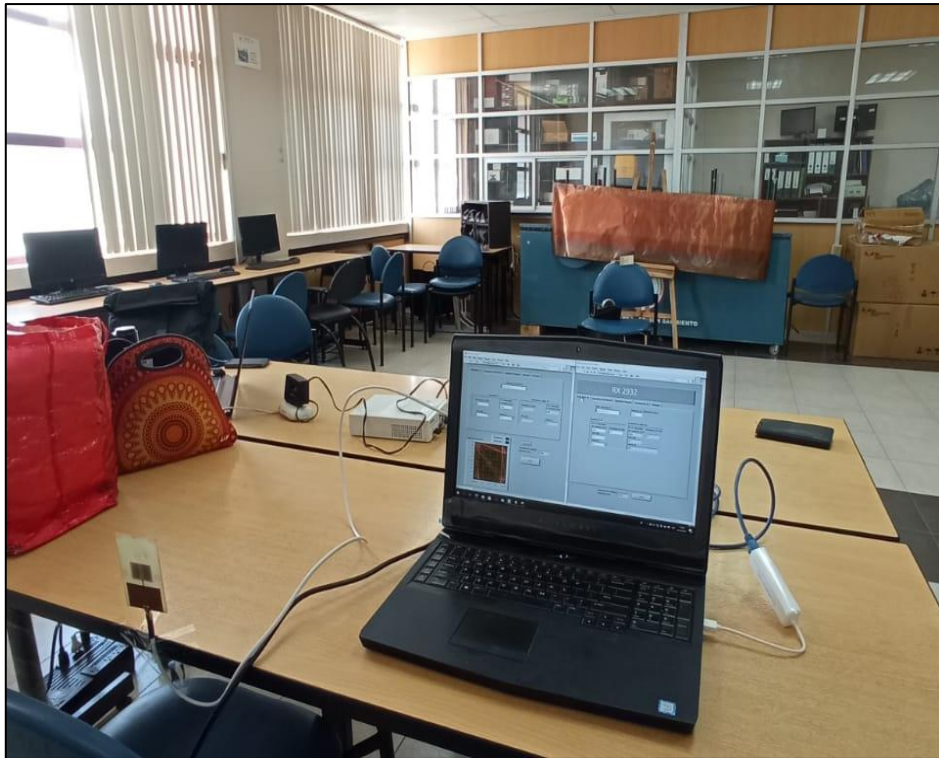
El presente escenario consiste en una configuración SISO polarizada horizontalmente. Se estableció la conexión entre la tarjeta USRP1 y la PC1, las antenas transmisoras y receptoras se conectaron hacia los puertos TX1 y RX2 de la tarjeta USRP1.

La antena transmisora estaba polarizada verticalmente mientras que la antena receptora estaba polarizada horizontalmente. Se consideraron 3 distancias para su evaluación, 2, 4 y 6m, como se observa en las siguientes figuras.



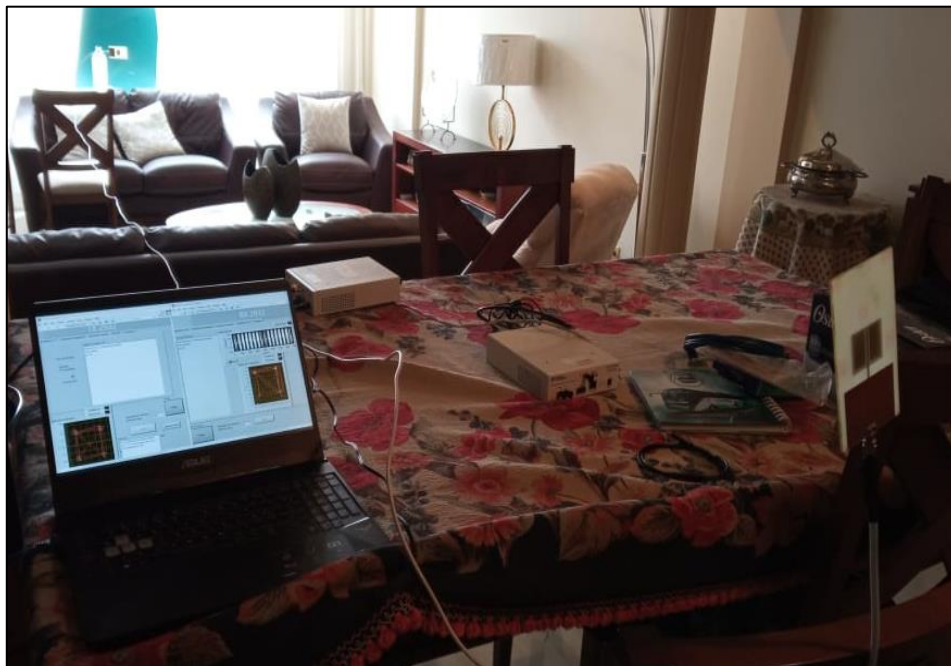
**Figura 42-3:** Escenario SISO polarización horizontal a 2 m.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021



**Figura 43-3:** Escenario SISO polarización horizontal a 4 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



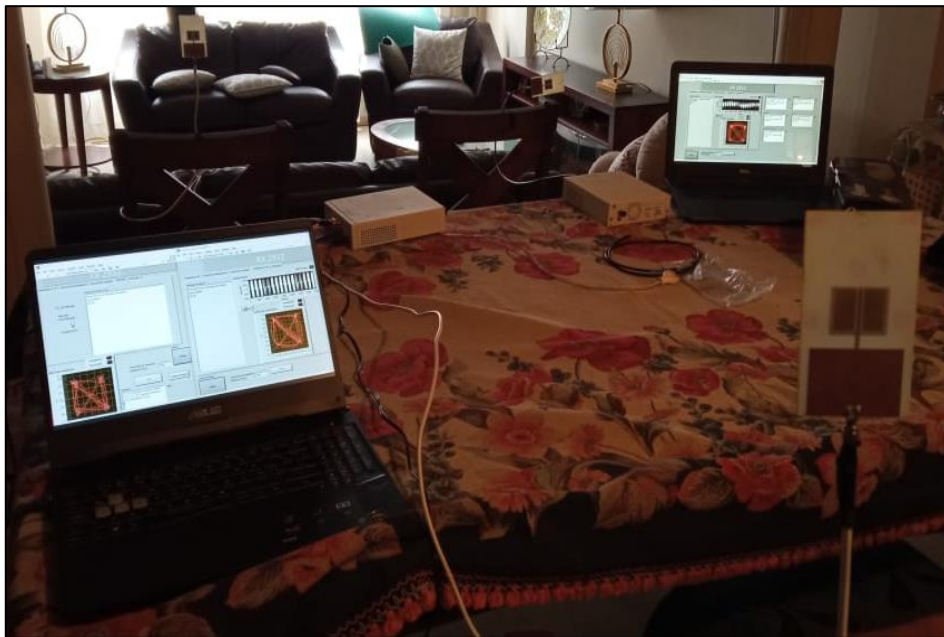
**Figura 44-3:** Escenario SISO polarización horizontal a 6 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

### 3.8.1.3. Escenario SIMO polarización vertical

Para el escenario SIMO se estableció la conexión entre la tarjeta USRP1 hacia la PC1 y la tarjeta USRP2 hacia la PC2. La antena transmisora 1 y receptora 1 se conectaron a los puertos TX1 y RX2 de la USRP1, mientras que la antena receptora 2 se conectó al puerto RX1 de la tarjeta USRP2.

Todas las antenas estaban polarizadas verticalmente, evaluando el sistema a 2, 4 y 6m, como se observa en las siguientes figuras.



**Figura 45-3:** Escenario 2 SIMO polarización vertical a 2 m.

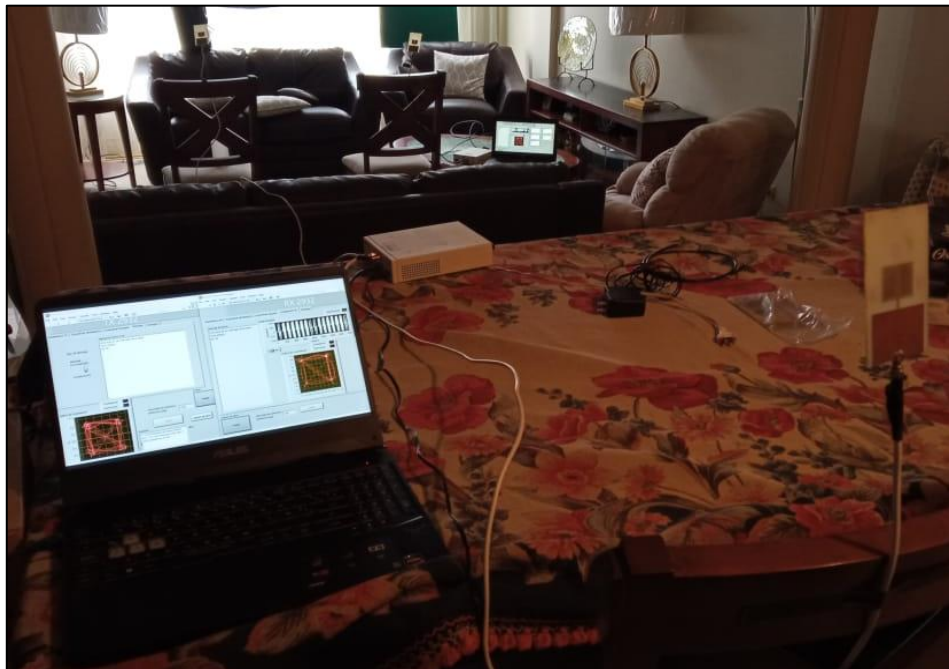
**Realizado por:** Merino, Daniela; 2020





**Figura 46-3:** Escenario SIMO polarización vertical a 4 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



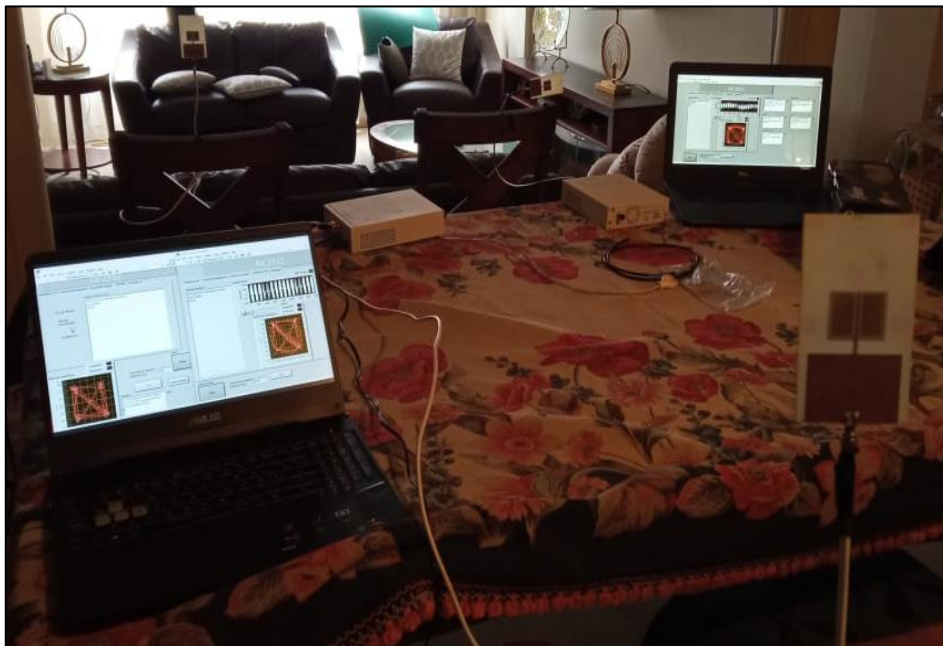
**Figura 47-3:** Escenario SIMO polarización vertical a 6 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 3.8.1.4. Escenario SIMO polarización horizontal

Para el escenario SIMO se estableció conexión entre la tarjeta USRP1 hacia la PC1 y la tarjeta USRP2 hacia la PC2. La antena transmisora 1 se conectó al puerto TX1, la antena receptora 1 al puerto RX2 de la USRP1, mientras que la antena receptora 2 se conectó al puerto RX1 de la tarjeta USRP2.

Las antenas TX1 y RX1 estaban polarizadas verticalmente mientras que la antena receptora 2 estaba polarizada horizontalmente. Se evaluó el sistema a 2, 4 y 6m, como se observa en las siguientes figuras.



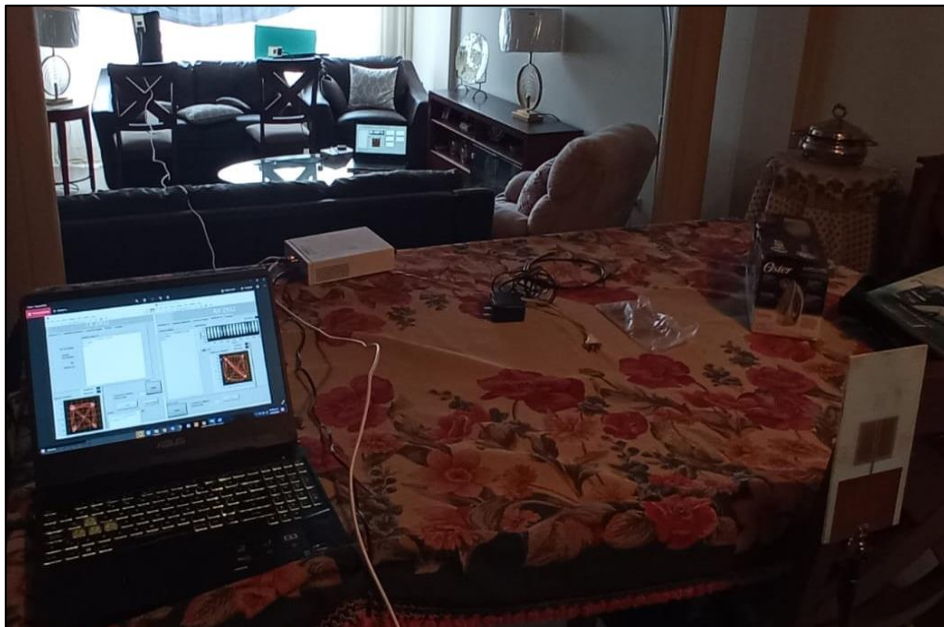
**Figura 48-3:** Escenario SIMO polarización horizontal a 2 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 49-3:** Escenario SIMO polarización horizontal a 4 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



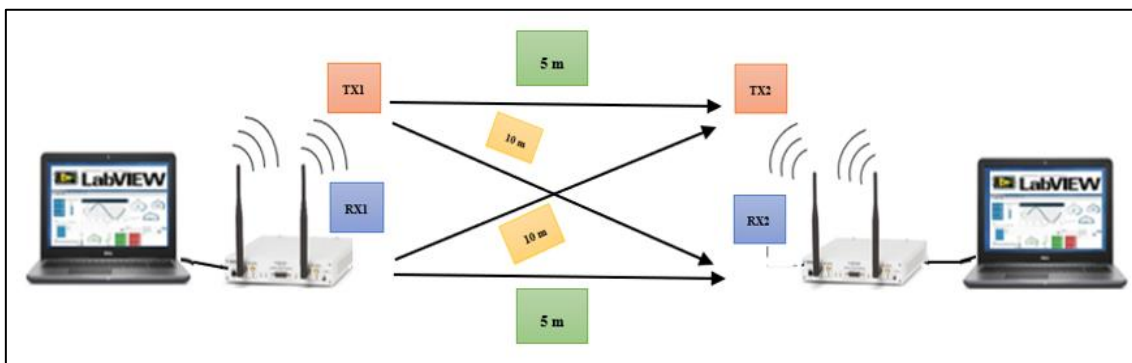
**Figura 50-3:** Escenario SIMO polarización horizontal a 6 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

### 3.8.1.5. Escenario MIMO 2X2

A diferencia de los escenarios anteriores, este escenario fue simulado debido a que por la pandemia del covid-19 que actualmente está atravesando la población mundial, no fue posible su realización.

El escenario consiste en una configuración MIMO con polarización vertical. Como se explicó en el capítulo anterior, consiste en dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras, conectadas a las dos tarjetas USRP 2932 (cada una con un TX y un RX), separadas una distancia de 5m respectivamente, como se observa en la Figura 51-3



**Figura 51-3:** Escenario MIMO 2X2 polarización vertical.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

### 3.8.1.6. Escenario 1 RADAR (1TX-1RX) polarización vertical

La configuración del primer escenario para la aplicación RADAR consiste en dos antenas, una transmisora y una receptora, polarizadas verticalmente, conectadas a los puertos TX1 y RX2 de la tarjeta USRP 2932, la misma que está conectada a la PC1 mediante el cable ethernet.

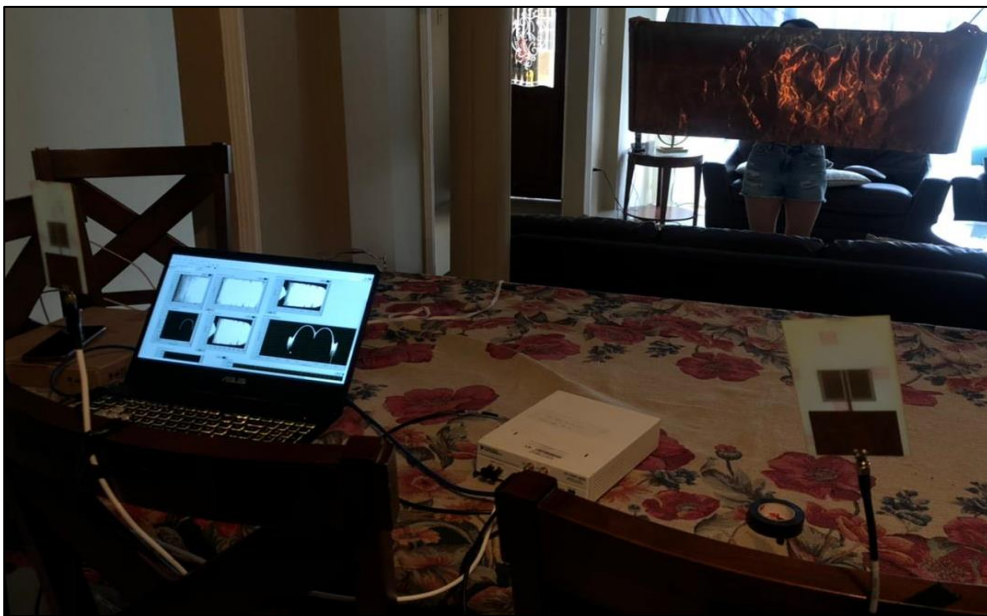
Se utilizó una placa de cobre para producir la reflexión de la onda transmitida, la cual se evaluó a 2, 4 y 6 m, como se observa en las siguientes figuras.





**Figura 52-3:** Escenario 1 RADAR polarización vertical a 2 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 53-3:** Escenario 1 RADAR polarización vertical a 4 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



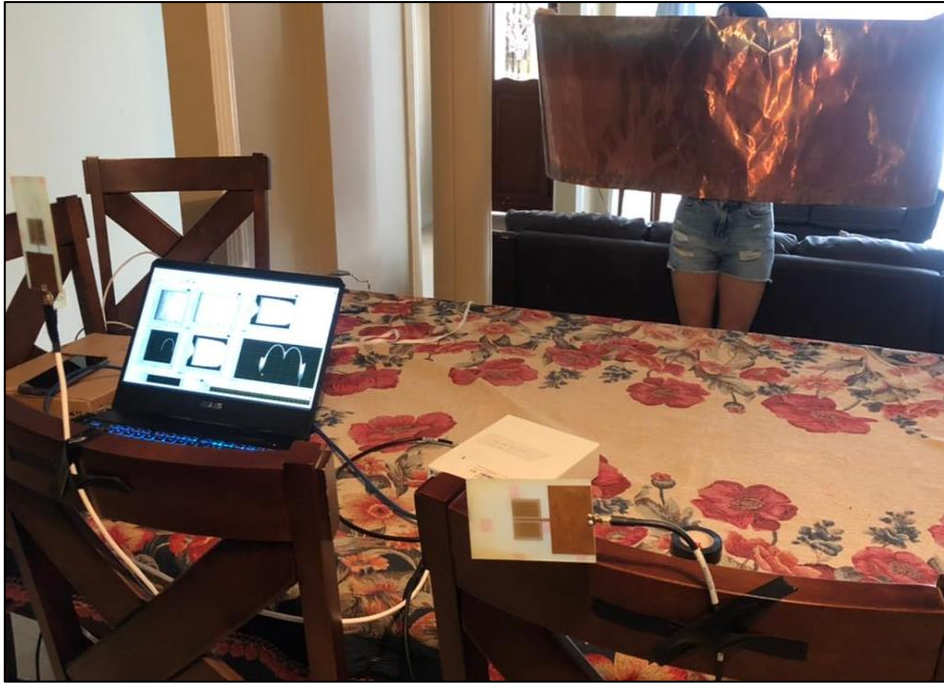
**Figura 54-3:** Escenario 1 RADAR polarización vertical a 6 m.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

#### *3.8.1.7. Escenario 1 RADAR (1TX-1RX) polarización horizontal*

La configuración del presente escenario para la aplicación RADAR consiste en dos antenas, una transmisora y una receptora, las cuales estaban polarizadas horizontalmente.

La antena transmisora estaba conectada al puerto TX1, mientras que la antena receptora 1 estaba conectada al puerto RX2 de la tarjeta USRP 1. Se utilizó una PC conectada a una tarjeta USRP mediante un cable ethernet y una placa de cobre que actuó como plano conductor. El sistema se evaluó a 2, 4 y 6 m, como se observa en las siguientes Figuras.



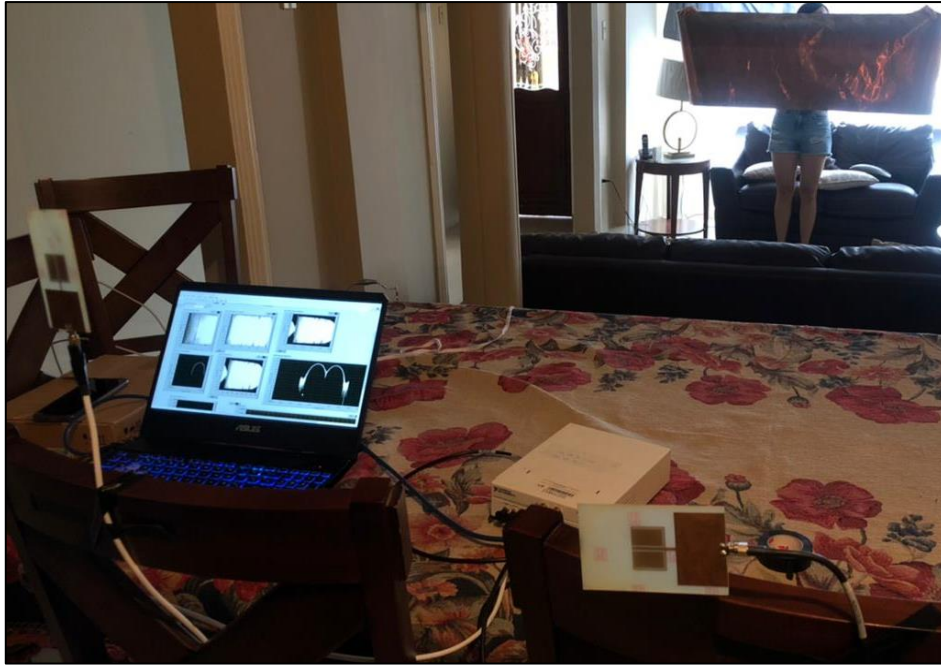
**Figura 55-3:** Escenario 1 RADAR polarización horizontal a 2 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 56-3:** Escenario 1 RADAR polarización horizontal a 4 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 57-3:** Escenario 1 RADAR polarización horizontal a 6 m.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

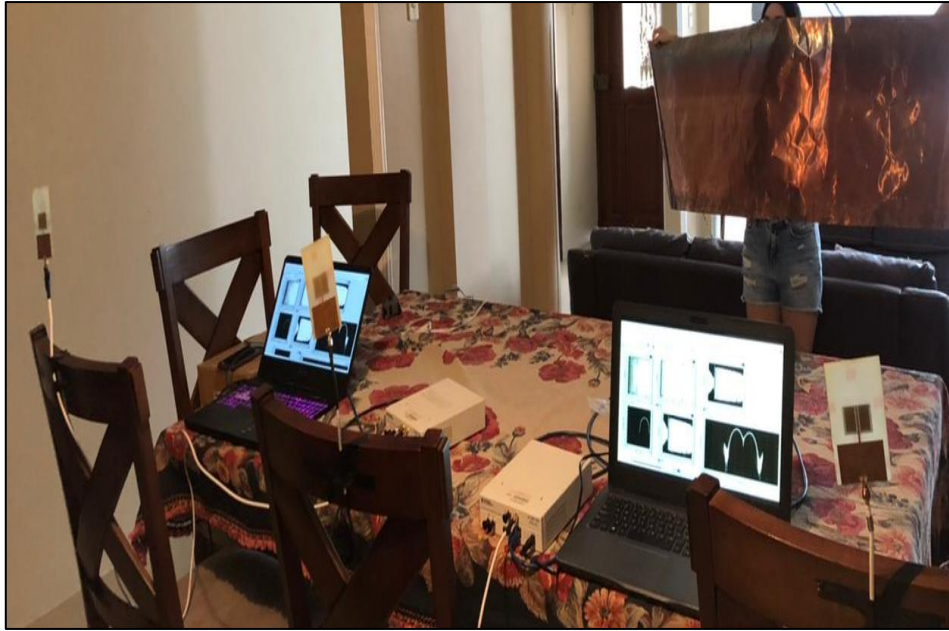
#### *3.8.1.8. Escenario 2 RADAR (1TX-2RX) polarización vertical.*

La configuración del presente escenario consiste en un conjunto de tres antenas, una transmisora y dos receptoras, las cuales estaban polarizadas verticalmente.

La antena transmisora estaba conectada al puerto TX1, mientras que la antena receptora 1 estaba conectada al puerto RX2 de la tarjeta USRP 1, por su parte la antena receptora 2 se encontraba conectada al puerto RX1 de la tarjeta USRP 2.

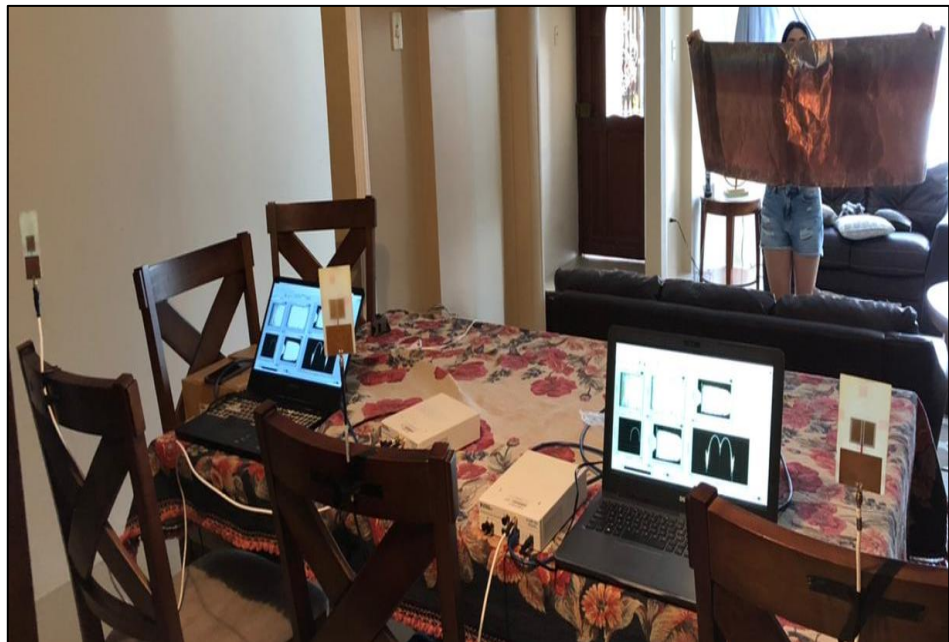
Se utilizaron dos PCs, cada una conectada a su respectiva USRP mediante cables ethernet y una placa de cobre el cual actuó como plano conductor. El sistema se evaluó a 2, 4 y 6 m, como se observa en las siguientes figuras.





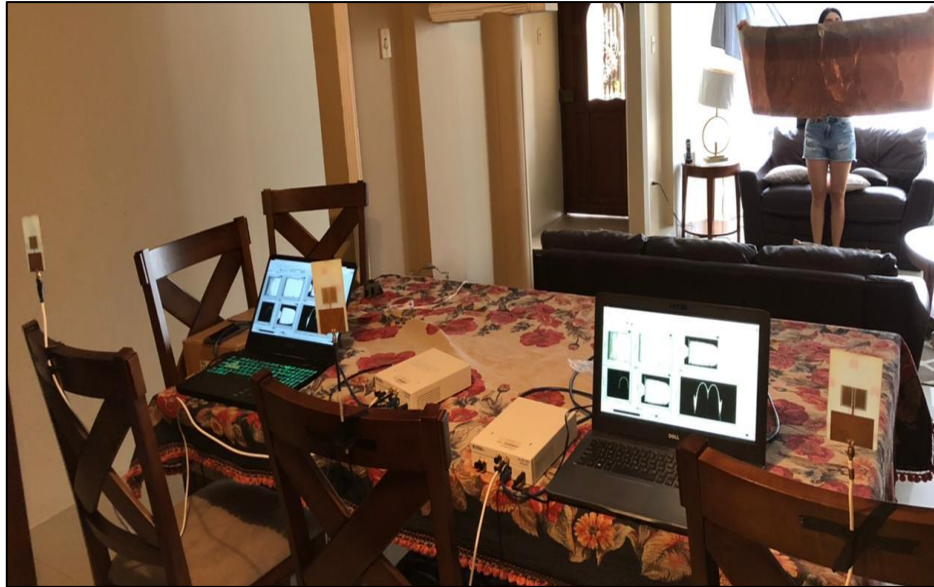
**Figura 58-3:** Escenario 2 RADAR polarización vertical a 2 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 59-3:** Escenario 2 RADAR polarización vertical a 4 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 60-3:** Escenario 2 RADAR polarización vertical a 6 m.

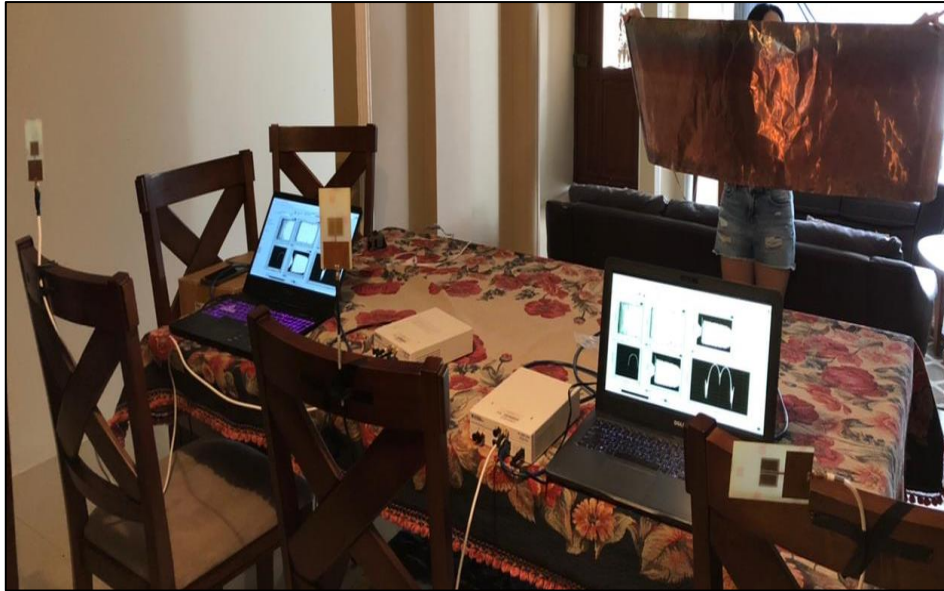
**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

#### *3.8.1.9. Escenario 2 RADAR (1TX-2RX) polarización horizontal.*

La configuración del presente escenario consiste en un conjunto de tres antenas, una transmisora y dos receptoras, las cuales estaban polarizadas horizontalmente.

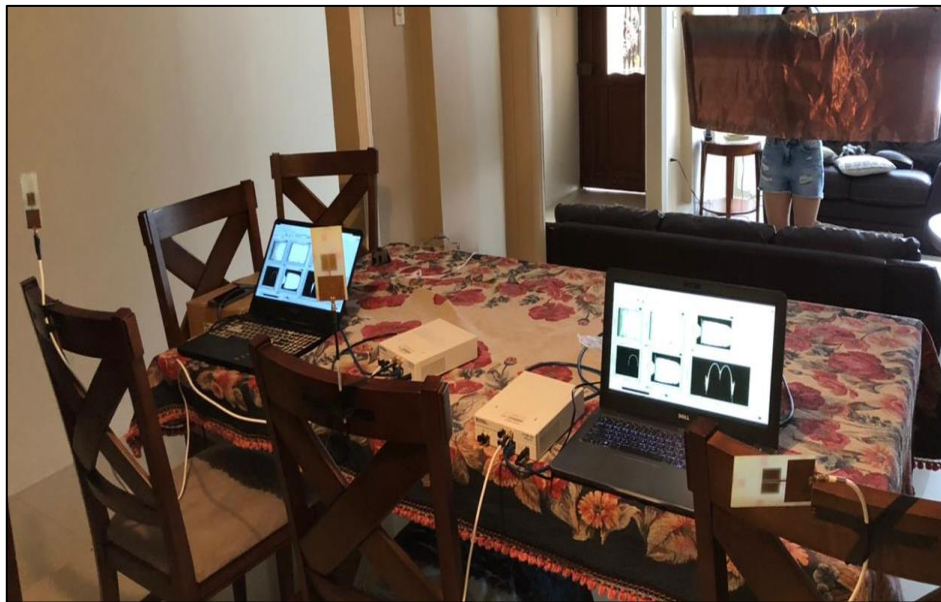
La antena transmisora estaba conectada al puerto TX1, mientras que la antena receptora 1 estaba conectada al puerto RX2 de la tarjeta USRP 1, por su parte la antena receptora 2 se encontraba conectada al puerto RX1 de la tarjeta USRP 2.

Se utilizaron dos PCs, cada una conectada a su respectiva USRP mediante cables ethernet y una placa de cobre la cual actúa como plano conductor, evaluando el sistema a 2, 4 y 6 m, como se observa en las siguientes figuras.



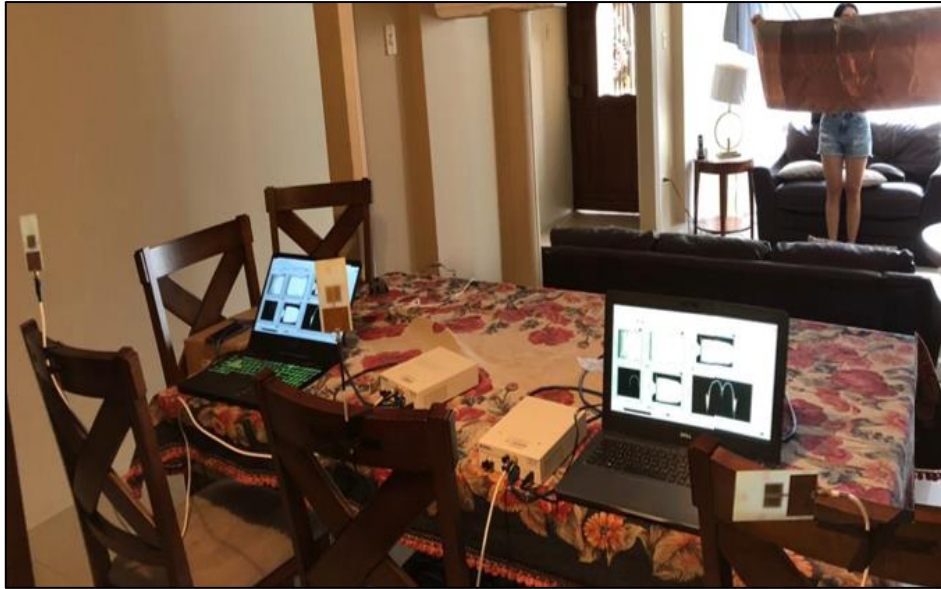
**Figura 61-3:** Escenario 2 RADAR polarización horizontal a 2 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2020



**Figura 62-3:** Escenario 2 RADAR polarización horizontal a 4 m.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 63-3:** Escenario 2 RADAR polarización horizontal a 6 m.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

### **3.8.2. Área de muestro e Implementación**

Los distintos escenarios fueron implementados en el Laboratorio de Microondas de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, para así establecer un ambiente controlado, libre de obstáculos, teniendo en cuenta factores como: facilidad de movilización y de conexión, ya que, debido a la disponibilidad y costo de los mismo, es más factible realizarlo en las instalaciones de la ESPOCH, además de que requieren de una alimentación continua de 6V.

Cada uno fue realizado con dos polarizaciones para las antenas, horizontal y vertical, para cumplir con uno de los objetivos de la tesis. Cada fue evaluado a distancias de 2, 4 y 6 metros y por cada uno se tomaron 30 muestras, teniendo en cuenta las 2 polarizaciones aplicadas, se obtuvo un total de 60 muestras por cada distancia y 180 muestras en total por cada escenario. Cabe mencionar que únicamente para el escenario 3 de configuración MIMO se tomaron 30 muestras, simulando ambientes de bajo ruido, ruido medio y ruido alto, dando un total de 90 muestras.

La Tabla 4-3 muestra los equipos y materiales utilizados en la implementación de los diferentes escenarios.



**Tabla 4-3:** Factores de evaluación de pruebas.

<b>EQUIPOS</b>	<b>Cantidad</b>
Tarjeta USRP 2932	2
PC Dell	1
PC Assus	1
PC Alienware	1
<b>MATERIALES</b>	<b>Cantidad</b>
Cable Gigabit Ethernet	2
Cable SMA-SMA	4
Adaptador Gigabit Ethernet – USB 3.0	1
Cargador USRP de 6V	2
Antena 3GHz	4
Caballote	1
Placa de Cobre (2x0.62x0.01 m)	1
<b>SOFTWARE</b>	
LabView	
Matlab	

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

## CAPITULO IV.

### 4. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente trabajo de titulación se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales serán evaluados de la siguiente manera.

**Tabla 1-4:** Factores de evaluación de pruebas.

<b>Polarización Vertical/ Polarización Horizontal</b>			
<b>Escenario SISO</b>	2 metros	4 metros	6 metros
<b>Escenario SIMO</b>	2 metros	4 metros	6 metros
<b>Escenario MIMO 2X2</b>	2/3 metros		
<b>Escenario 1 RADAR</b>	2 metros	4 metros	6 metros
<b>Escenario 2 RADAR</b>	2 metros	4 metros	6 metros

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

Los parámetros por evaluar para los escenarios SISO, SIMO y MIMO son:

- Comparación de mensaje: se lo realizo mediante la comparación de caracteres.
- Desviación de estándar:
- Relación señal/ruido (SNR)

Los parámetros para evaluar en la aplicación Radar son:

- Comparación de señales mediante correlación:

- Tiempo de retardo
- Radargrama

#### **4.1. Resultados de Campo**

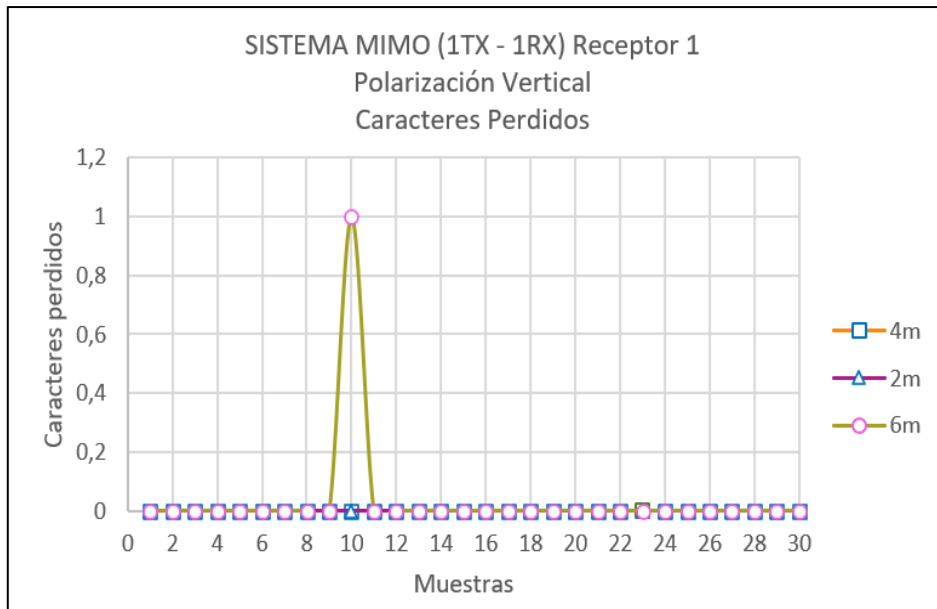
Una vez implementados los diferentes escenarios, recopilando 30 muestras por cada distancia a evaluar, se obtuvieron los siguientes resultados:

##### ***4.1.1. Datos escenario SISO polarización vertical***

###### ***4.1.1.1. Comparación de caracteres del mensaje enviado.***

Durante las pruebas para el escenario SISO polarizado verticalmente, se envió un mensaje de texto de 41 caracteres. Al finalizar, se obtuvieron los resultados que se indican en el Gráfico 1-4, el cual refleja los caracteres perdidos en cada una de las pruebas.

Se observa que a 2 y 4 metros no se perdió ningún carácter obteniendo así una confiabilidad del 100%. Sin embargo, a una distancia de 6 metros durante la prueba 10, se perdió un carácter en la recepción. Obteniendo una eficiencia del 97,56% y una confiabilidad de transmisión – recepción del 99,91%.



**Gráfico 1-4:** Caracteres perdidos, SISO con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

4.1.1.2. Comparación de puntos de la constelación TX respecto a RX mediante desviación estándar.

Luego de realizar las pruebas mediante la antena receptora RX1 polarizada verticalmente, a distancias de 2, 4 y 6 metros, con 30 muestras c/u, se obtuvieron los valores de desviación estándar de los cuatro cuadrantes del diagrama de constelación recibido reflejados en la Tabla 3-4. Cada cuadrante del diagrama de constelación fue representado por un color específico para identificarlos con mayor facilidad, como se observa en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4:** Identificadores de desviación estándar para los cuadrantes del diagrama de constelación.

Desviación estándar	Cuadrante
$\sigma_1$	1
$\sigma_2$	2



$\sigma_3$	3
$\sigma_4$	4

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

**Tabla 3-4:** Resultado de desviación estándar SISO polarización vertical.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	DESVIACIÓN ESTÁNDAR		
	2 metros	4 metros	6 metros
Muestra 1	0,0163	0,0277	0,0321
	0,0400	0,0230	0,0376
	0,0487	0,0212	0,0374
	0,0335	0,0234	0,0306
Muestra 2	0,0238	0,0302	0,0318
	0,0246	0,0338	0,0396
	0,0299	0,0318	0,0424
	0,0270	0,0289	0,0332
Muestra 3	0,0207	0,0336	0,0298
	0,0222	0,0386	0,0237
	0,0293	0,0358	0,0244
	0,0311	0,0281	0,0285
Muestra 4	0,0206	0,0241	0,0328
	0,0247	0,0221	0,0331
	0,0309	0,0181	0,0355
	0,0267	0,0205	0,0330
Muestra 5	0,0307	0,0253	0,0309
	0,0322	0,0227	0,0333
	0,0343	0,0236	0,0391
	0,0309	0,0251	0,0330
Muestra 6	0,0238	0,0261	0,0299
	0,0173	0,0240	0,0355
	0,0161	0,0229	0,0361
	0,0220	0,0237	0,0265
Muestra 7	0,0163	0,0248	0,0256
	0,0225	0,0238	0,0211
	0,0287	0,0200	0,0185
	0,0257	0,0208	0,0212
Muestra 8	0,0255	0,0234	0,0300
	0,0231	0,0205	0,0281
	0,0184	0,0200	0,0262

	0,0204	0,0229	0,0272
Muestra 9	0,0254	0,0252	0,0262
	0,0221	0,0204	0,0205
	0,0174	0,0186	0,0164
	0,0212	0,0236	0,0213
Muestra 10	0,0257	0,0160	0,0382
	0,0209	0,0392	0,0468
	0,0182	0,0460	0,0489
	0,0224	0,0349	0,0403
Muestra 11	0,0335	0,0169	0,0263
	0,0452	0,0172	0,0231
	0,0475	0,0190	0,0159
	0,0357	0,0183	0,0192
Muestra 12	0,0300	0,0165	0,0281
	0,0318	0,0202	0,0284
	0,0354	0,0231	0,0226
	0,0332	0,0214	0,0208
Muestra 13	0,0257	0,0181	0,0277
	0,0182	0,0155	0,0250
	0,0173	0,0277	0,0201
	0,0231	0,0289	0,0232
Muestra 14	0,0227	0,0212	0,0251
	0,0207	0,0232	0,0218
	0,0175	0,0209	0,0194
	0,0186	0,0180	0,0206
Muestra 15	0,0288	0,0250	0,0283
	0,0230	0,0204	0,0259
	0,0270	0,0198	0,0211
	0,0212	0,0237	0,0218
Muestra 16	0,0277	0,0269	0,0239
	0,0239	0,0251	0,0272
	0,0182	0,0222	0,0220
	0,0222	0,0225	0,0174
Muestra 17	0,0243	0,0160	0,0300
	0,0234	0,0387	0,0254
	0,0261	0,0467	0,0222
	0,0212	0,0345	0,0246
Muestra 18	0,0340	0,0185	0,0177
	0,0447	0,0225	0,0228
	0,0487	0,0319	0,0287
	0,0396	0,0262	0,0245
Muestra 19	0,0216	0,0253	0,0178
	0,0193	0,0212	0,0241

	0,0199	0,0175	0,0303
	0,0203	0,0206	0,0254
Muestra 20	0,0304	0,0300	0,0134
	0,0206	0,0325	0,0209
	0,0203	0,0345	0,0201
	0,0265	0,0311	0,0183
Muestra 21	0,0258	0,0255	0,0395
	0,0219	0,0234	0,0451
	0,0182	0,0197	0,0465
	0,0207	0,0206	0,0400
Muestra 22	0,0306	0,0252	0,0265
	0,0321	0,0206	0,0212
	0,0332	0,0185	0,0177
	0,0318	0,0219	0,0222
Muestra 23	0,0255	0,0250	0,0347
	0,0224	0,0204	0,0449
	0,0220	0,0198	0,0463
	0,0245	0,0237	0,0368
Muestra 24	0,0285	0,0181	0,0265
	0,0276	0,0398	0,0219
	0,0251	0,0464	0,0164
	0,0272	0,0312	0,0217
Muestra 25	0,0302	0,0261	0,0278
	0,0299	0,0229	0,0221
	0,0294	0,0212	0,0187
	0,0286	0,0253	0,0236
Muestra 26	0,0288	0,0167	0,0196
	0,0356	0,0409	0,0199
	0,0391	0,0481	0,0212
	0,0323	0,0356	0,0174
Muestra 27	0,0241	0,0270	0,0293
	0,0202	0,0246	0,0235
	0,0204	0,0232	0,0171
	0,0222	0,0252	0,0235
Muestra 28	0,0277	0,0297	0,0318
	0,0195	0,0332	0,0292
	0,0157	0,0362	0,0292
	0,0220	0,0321	0,0300
Muestra 29	0,0211	0,0345	0,0241
	0,0206	0,0422	0,0228
	0,0254	0,0462	0,0194
	0,0203	0,0377	0,0209
Muestra 30	0,0184	0,0252	0,0289

	0,0185	0,0230	0,0274
	0,0182	0,0192	0,0261
	0,0184	0,0201	0,0259

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

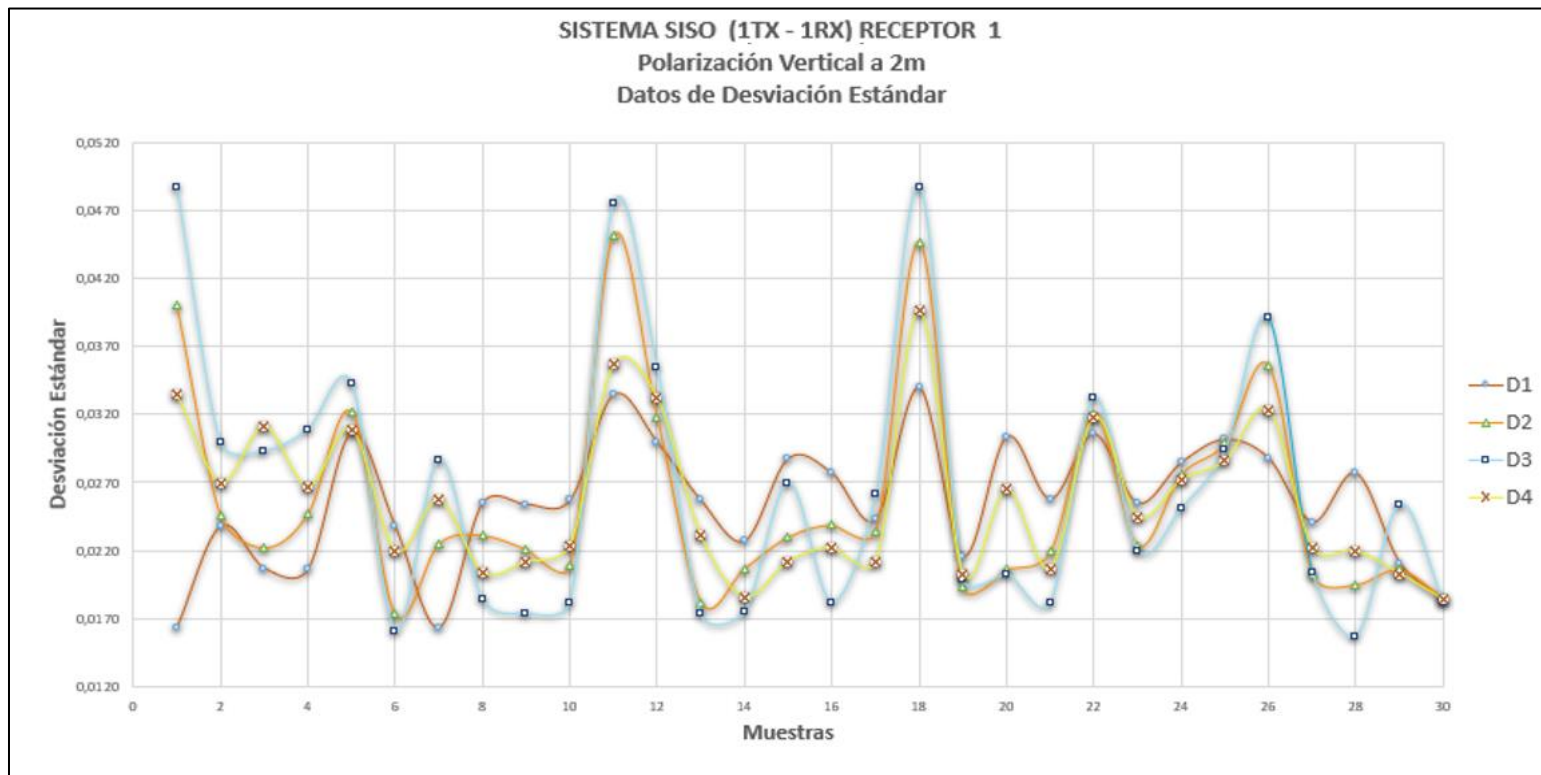
La Tabla 4-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de desviación estándar, obtenidos en cada cuadrante del diagrama de constelación, para las 3 distancia a evaluar por la antena RX1.

**Tabla 4-4:** Desviación estándar mínima, máxima y promedio SISO polarización vertical

SISTEMA MIMO 1 TX/ 1 RX	DESVIACIÓN ESTÁNDAR				
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$
2 m	Valor Mínimo	0,0163	0,0173	0,0157	0,0184
	Valor Máximo	0,0340	0,0452	0,0487	0,0396
	Promedio	0,0256	0,0256	0,0266	0,0257
4 m	Valor Mínimo	0,0160	0,0155	0,0175	0,0180
	Valor Máximo	0,0345	0,0422	0,0481	0,0377
	Promedio	0,0241	0,0265	0,0273	0,0257
6 m	Valor Mínimo	0,0134	0,0199	0,0159	0,0174
	Valor Máximo	0,0395	0,0468	0,0489	0,0403
	Promedio	0,0282	0,0281	0,0269	0,0258

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

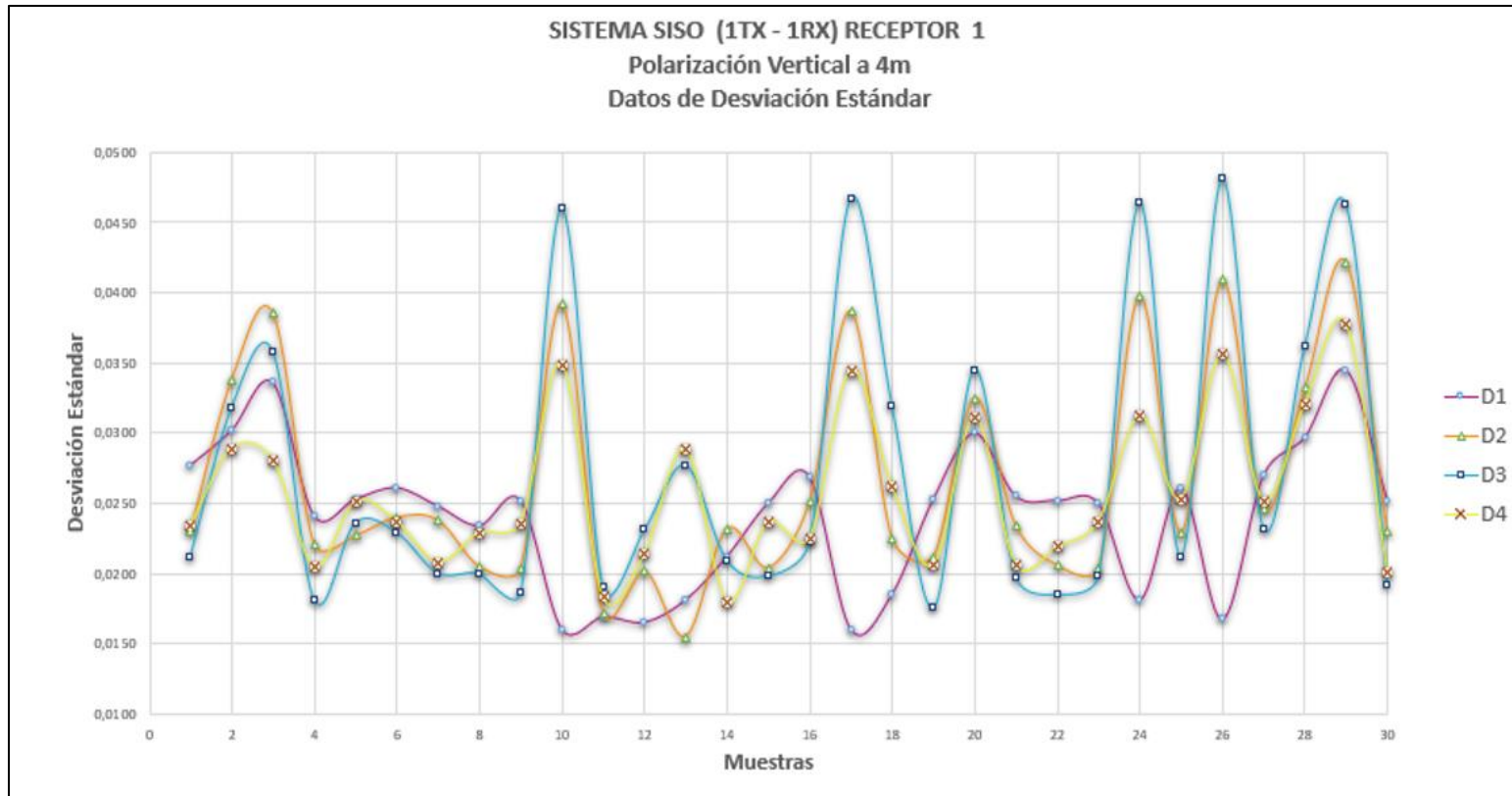
A partir de la Tabla 4-4 se concluye que, a 2 metros la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0487, es decir, el 4,87%, respecto a su promedio. Por lo tanto, a 2 metros la confiabilidad transmisión - recepción es del 95,13%, la misma que se representa en el Gráfico 2-4.



**Gráfico 2-4:** Datos de desviación estándar, SISO a 2 metros con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

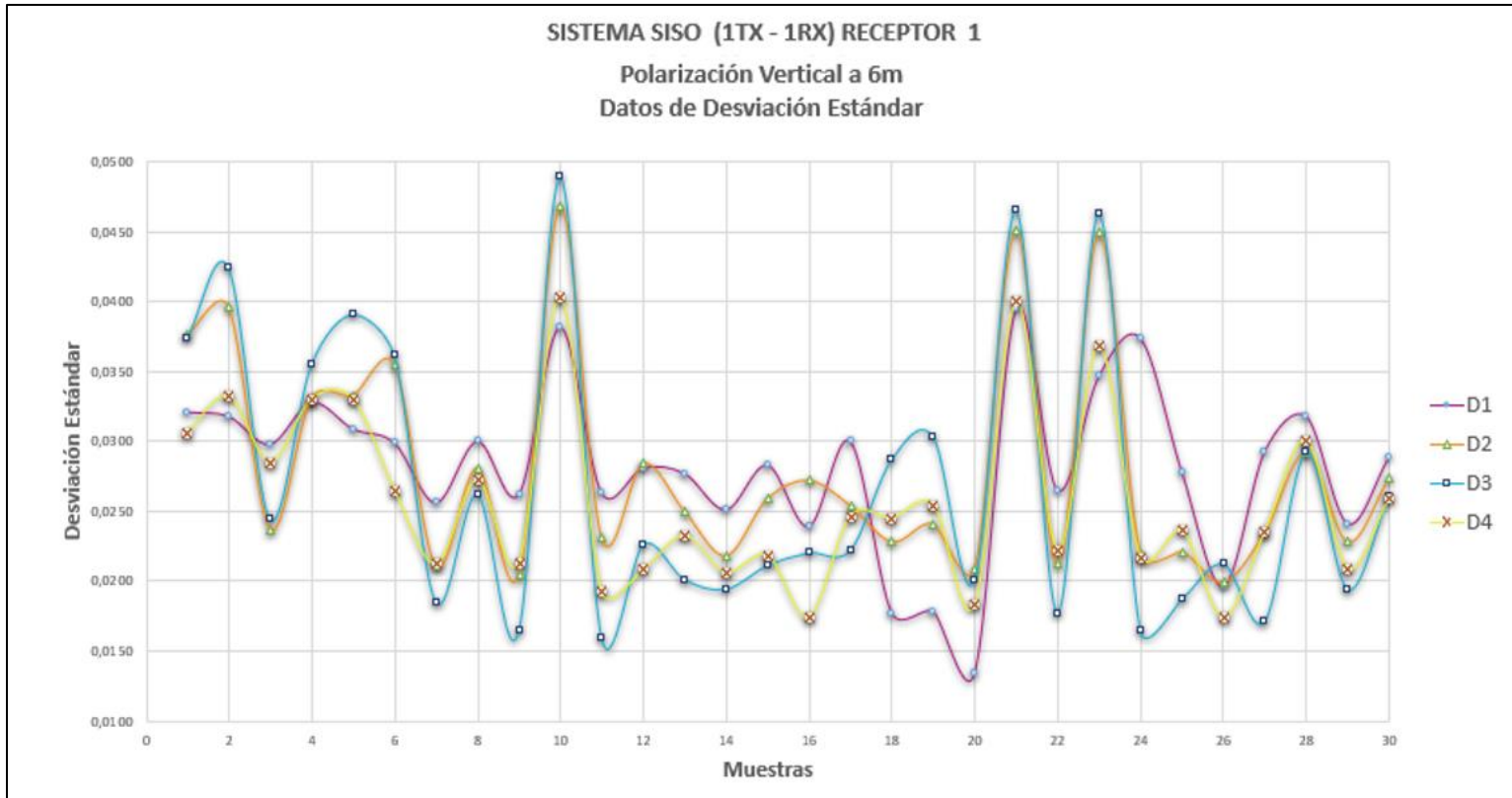
A 4 metros la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0481, es decir el 4,81%, respecto a su promedio. Por lo tanto, a 4 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,19%. La misma que se representa en el Gráfico 3-4.



**Gráfico 3-4:** Datos de desviación estándar, SISO a 4 metros con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

A 6 metros la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0489%, es decir el 4,89%, respecto a su promedio. Por lo tanto, a 6 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,11%. La misma que se representa en el Gráfico 4-4.



**Gráfico 4-4:** Datos de desviación estándar, SISO a 6 metros con polarización vertical.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.1.3. Relación señal/ruido SNR

En la Tabla 5-4 se detallan los datos de relación señal a ruido (SNR) obtenidos por la antena receptora RX1 polarizada verticalmente, en las 30 muestras a 2, 4 y 6 metros.

**Tabla 5-4:** Resultado de SNR escenario SISO con polarización vertical.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	RELACION SEÑAL/RUIDO (SNR)		
	dB		
	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	20,88	20,69	21,28
Muestra 2	21,12	20,58	21,39
Muestra 3	21,17	20,49	21,5
Muestra 4	21,52	20,51	21,66
Muestra 5	21,23	20,69	21,6
Muestra 6	21,08	20,61	21,24
Muestra 7	20,96	20,52	21,33
Muestra 8	21,72	21,37	20,89
Muestra 9	20,77	20,93	21,06
Muestra 10	21,14	20,76	20,89
Muestra 11	20,57	20,84	21,7
Muestra 12	20,89	21,45	21,07



Muestra 13	21,18	21,72	21,05
Muestra 14	21,75	20,79	21,21
Muestra 15	21,09	21,27	21,32
Muestra 16	21,1	20,48	21,78
Muestra 17	20,84	21,22	21,26
Muestra 18	20,89	20,34	21,28
Muestra 19	21,51	20,73	21,6
Muestra 20	22,01	20,65	21,62
Muestra 21	21	20,71	21,06
Muestra 22	21,01	20,86	21,21
Muestra 23	21,01	20,86	20,77
Muestra 24	20,95	20,63	21,22
Muestra 25	20,82	20,55	21,37
Muestra 26	20,08	20,95	21,84
Muestra 27	20,77	20,81	21,32
Muestra 28	21,33	20,75	21,27
Muestra 29	21,02	20,86	21,23
Muestra 30	20,83	22,02	21,27

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Se procedió a calcular los valores mínimos, máximos y promedios de SNR para cada distancia a evaluar, expresados en la Tabla 6-4 e ilustrados en el Gráfico 5-4. La cual presenta los siguientes resultados:

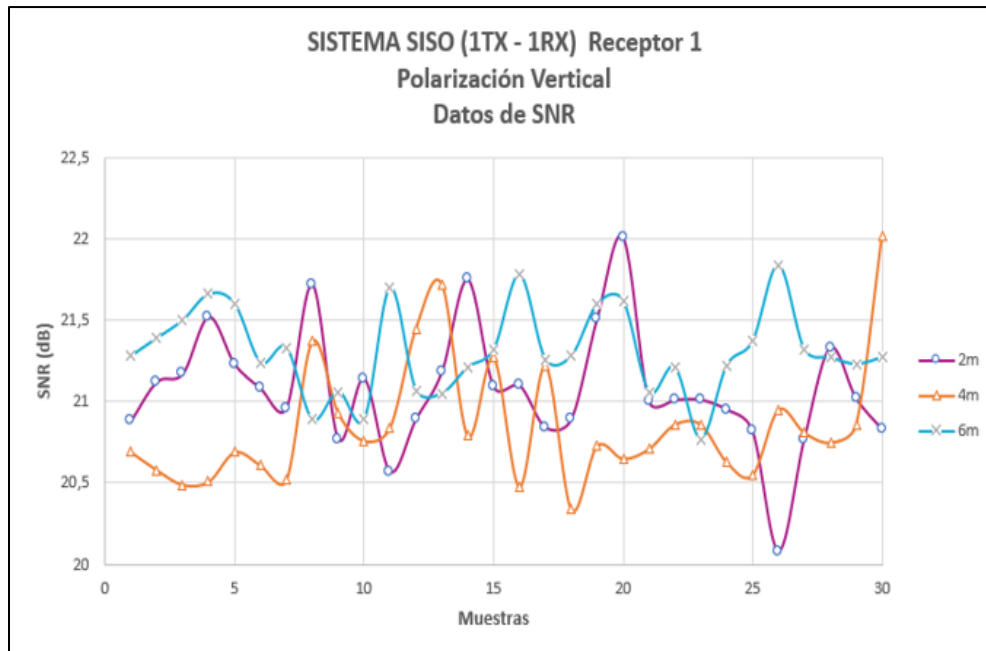
- A 2 metros se obtuvo un SNR mínimo de 20,08 dB y como máximo de 22,01 dB.
- A 4 metros se obtuvo un SNR mínimo de 20,34 dB y como máximo de 22,02 dB.
- A 6 metros se obtuvo un SNR mínimo de 20,77 dB y como máximo de 21,84 dB.

Por lo tanto, se comprobó que existe una buena relación SNR, ya que la potencia de la señal es superior a la potencia del ruido tanto para 2, 4 y 6 metros. Los valores de SNR se encuentran dentro del rango de valores óptimos ( $> 20dB$ ), garantizando así un sistema de transmisión - recepción eficiente.

**Tabla 6-4:** SNR mínimo, máximo y promedio SISO polarización vertical

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	RELACION SEÑAL/RUIDO (SNR)		
	dB		
	2 m	4 m	6 m
Valor Mínimo	20,08	20,34	20,77
Valor Máximo	22,01	22,02	21,84
Promedio	21,08	20,86	21,30

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 5-4:** Datos de SNR, SISO con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

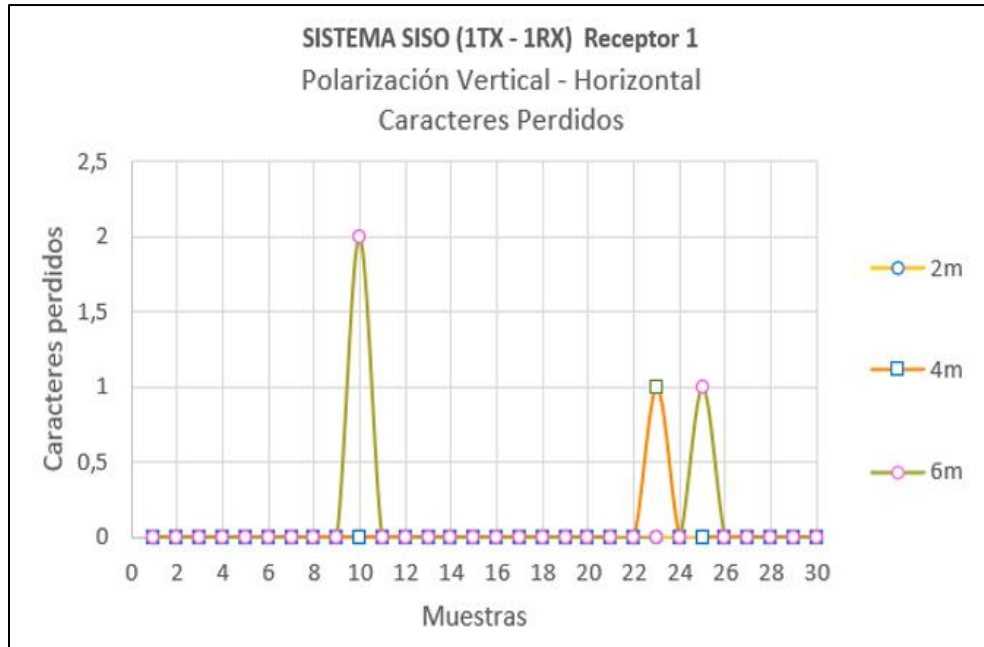
#### 4.1.2. Datos escenario SISO polarización horizontal

##### 4.1.2.1. Comparación de caracteres del mensaje enviado.

Al realizar las pruebas para el escenario SISO polarizado horizontalmente, se envió un mensaje de texto de 41 caracteres. Una vez realizadas las pruebas correspondientes, se obtuvieron los resultados que se indican en el Gráfico 6-4, el cual refleja los caracteres perdidos en cada una de las pruebas.

Se observa que a 2 metros no se perdió ningún carácter, obteniendo así una confiabilidad del 100%, a 4 metros se perdió un carácter en la recepción en la prueba 23 obteniendo una eficiencia del 97,56% en dicha prueba y una confiabilidad transmisión – recepción del 99,91%.

Mientras que, a 6 metros, en las pruebas 10 y 25 se perdió 1 un carácter en c/u, obteniendo una eficiencia del 95,12% en mencionadas pruebas y una confiabilidad de transmisión – recepción a 6 metros del 99,84%.



**Gráfico 6-4:** Caracteres perdidos, SISO con polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

4.1.2.2. Comparación de puntos de la constelación TX respecto a RX mediante desviación estándar.

En la Tabla 7-4 se detallan los valores de desviación estándar de los cuatro cuadrantes del diagrama de constelación obtenido por parte de la antena receptora RX1 polarizada horizontalmente, los mismos que fueron evaluados a 2, 4 y 6 metros, con 30 muestras c/u.

**Tabla 7-4:** Resultado de desviación estándar escenario SISO polarización horizontal

SISTEMA MIMO 1 TX/ 1 RX	DESVIACIÓN ESTÁNDAR		
	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	0,0294	0,0258	0,0397
	0,0366	0,0230	0,0436
	0,0349	0,0190	0,0414
	0,0267	0,0231	0,0328

Muestra 2	0,0368	0,0262	0,0271
	0,0464	0,0218	0,0225
	0,0468	0,0195	0,0276
	0,0387	0,0237	0,0300
Muestra 3	0,0158	0,0231	0,0232
	0,0235	0,0231	0,0188
	0,0352	0,0196	0,0179
	0,0310	0,0202	0,0205
Muestra 4	0,0264	0,0317	0,0395
	0,0228	0,0320	0,0424
	0,0162	0,0301	0,0456
	0,0214	0,0291	0,0460
Muestra 5	0,0267	0,0305	0,0317
	0,0235	0,0322	0,0369
	0,0201	0,0352	0,0347
	0,0231	0,0325	0,0281
Muestra 6	0,0181	0,0323	0,0299
	0,0413	0,0319	0,0361
	0,0493	0,0304	0,0402
	0,0357	0,0302	0,0344
Muestra 7	0,0225	0,0306	0,0223
	0,0214	0,0353	0,0244
	0,0197	0,0312	0,0216
	0,0161	0,0246	0,0223
Muestra 8	0,0249	0,0245	0,0269
	0,0228	0,0201	0,0221
	0,0184	0,0188	0,0191
	0,0200	0,0218	0,0223
Muestra 9	0,0235	0,0250	0,0310
	0,0223	0,0205	0,0340
	0,0151	0,0182	0,0369
	0,0119	0,0218	0,0334
Muestra 10	0,0281	0,0317	0,0369
	0,0225	0,0304	0,0451
	0,0200	0,0351	0,0451
	0,0235	0,0351	0,0417
Muestra 11	0,0320	0,0340	0,0315
	0,0427	0,0448	0,0297
	0,0462	0,0487	0,0322
	0,0377	0,0376	0,0331

Muestra 12	0,0274	0,0218	0,0253
	0,0219	0,0201	0,0222
	0,0182	0,0196	0,0172
	0,0250	0,0199	0,0212
Muestra 13	0,0310	0,0256	0,0339
	0,0310	0,0223	0,0441
	0,0312	0,0193	0,0451
	0,0300	0,0217	0,0353
Muestra 14	0,0196	0,0307	0,0268
	0,0414	0,0299	0,0221
	0,0495	0,0316	0,0181
	0,0345	0,0315	0,0212
Muestra 15	0,0197	0,0218	0,0193
	0,0305	0,0407	0,0172
	0,0287	0,0464	0,0157
	0,0176	0,0362	0,0166
Muestra 16	0,0226	0,0314	0,0361
	0,0193	0,0323	0,0441
	0,0188	0,0340	0,0465
	0,0165	0,0343	0,0367
Muestra 17	0,0219	0,0225	0,0265
	0,0161	0,0203	0,0245
	0,0216	0,0189	0,0239
	0,0215	0,0197	0,0264
Muestra 18	0,0277	0,0214	0,0385
	0,0247	0,0176	0,0411
	0,0236	0,0160	0,0431
	0,0255	0,0180	0,0396
Muestra 19	0,0283	0,0248	0,0197
	0,0238	0,0215	0,0234
	0,0225	0,0197	0,0294
	0,0255	0,0206	0,0265
Muestra 20	0,0311	0,0239	0,0310
	0,0303	0,0348	0,0348
	0,0303	0,0401	0,0334
	0,0295	0,0299	0,0284
Muestra 21	0,0148	0,0262	0,0332
	0,0413	0,0276	0,0348
	0,0470	0,0219	0,0374
	0,0346	0,0191	0,0334

Muestra 22	0,0270	0,0350	0,0192
	0,0209	0,0440	0,0240
	0,0179	0,0469	0,0320
	0,0229	0,0383	0,0291
Muestra 23	0,0236	0,0328	0,0283
	0,0162	0,0444	0,0204
	0,0158	0,0453	0,0202
	0,0210	0,0321	0,0268
Muestra 24	0,0369	0,0180	0,0289
	0,0445	0,0417	0,0413
	0,0463	0,0426	0,0467
	0,0384	0,0249	0,0364
Muestra 25	0,0249	0,0308	0,0338
	0,0211	0,0318	0,0405
	0,0255	0,0348	0,0435
	0,0235	0,0327	0,0365
Muestra 26	0,0272	0,0237	0,0328
	0,0224	0,0228	0,0378
	0,0224	0,0189	0,0418
	0,0267	0,0196	0,0368
Muestra 27	0,0236	0,0177	0,0383
	0,0202	0,0156	0,0458
	0,0170	0,0283	0,0470
	0,0208	0,0286	0,0393
Muestra 28	0,0252	0,0328	0,0315
	0,0228	0,0394	0,0311
	0,0165	0,0405	0,0369
	0,0159	0,0337	0,0352
Muestra 29	0,0264	0,0281	0,0204
	0,0235	0,0213	0,0343
	0,0176	0,0187	0,0424
	0,0217	0,0232	0,0392
Muestra 30	0,0250	0,0198	0,0328
	0,0171	0,0256	0,0336
	0,0145	0,0356	0,0378
	0,0216	0,0317	0,0351

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 8-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de desviación estándar, obtenidos en cada cuadrante del diagrama de constelación, para las 3 distancia a evaluar por la antena receptora RX1.

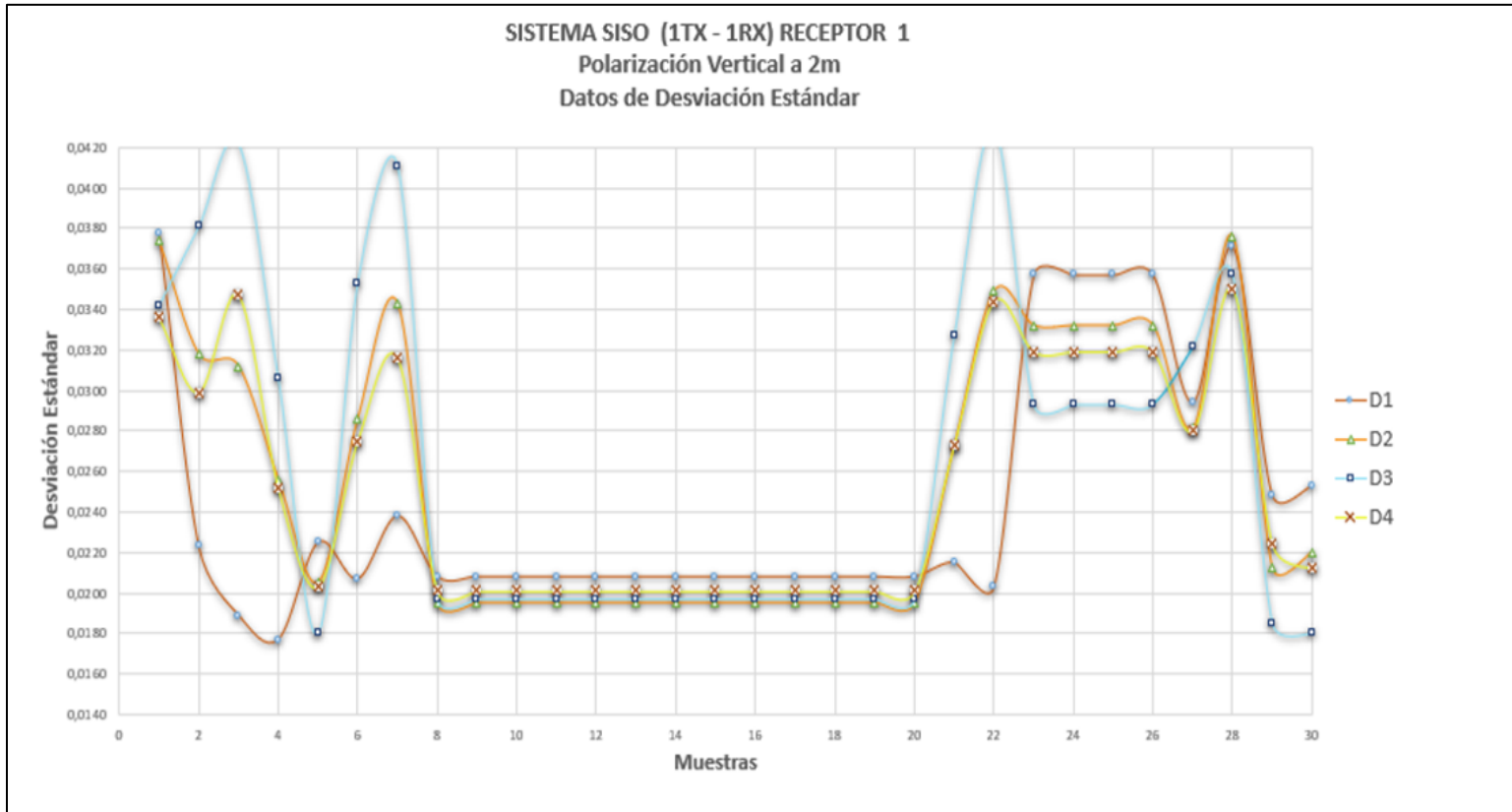
**Tabla 8-4:** Desviación estándar mínima, máxima y promedio SISO p.h

SISTEMA MIMO 1 TX/ 1 RX	DESVIACIÓN ESTÁNDAR				
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$
2 m	Valor Mínimo	0,0148	0,0161	0,0145	0,0119
	Valor Máximo	0,0369	0,0464	0,0495	0,0387
	Promedio	0,0256	0,0272	0,0269	0,0253
4 m	Valor Mínimo	0,0177	0,0156	0,0160	0,0180
	Valor Máximo	0,0350	0,0448	0,0487	0,0383
	Promedio	0,0268	0,0290	0,0295	0,0272
6 m	Valor Mínimo	0,0192	0,0172	0,0157	0,0166
	Valor Máximo	0,0414	0,0458	0,0470	0,0460
	Promedio	0,0303	0,0324	0,0340	0,0315

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

A partir de la Tabla 8-4 se concluye que, 2 metros la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0495, es decir el 4,95% respecto a su promedio. Por lo tanto, a 2 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,05%. La misma que se representa en el Gráfico 7-4.

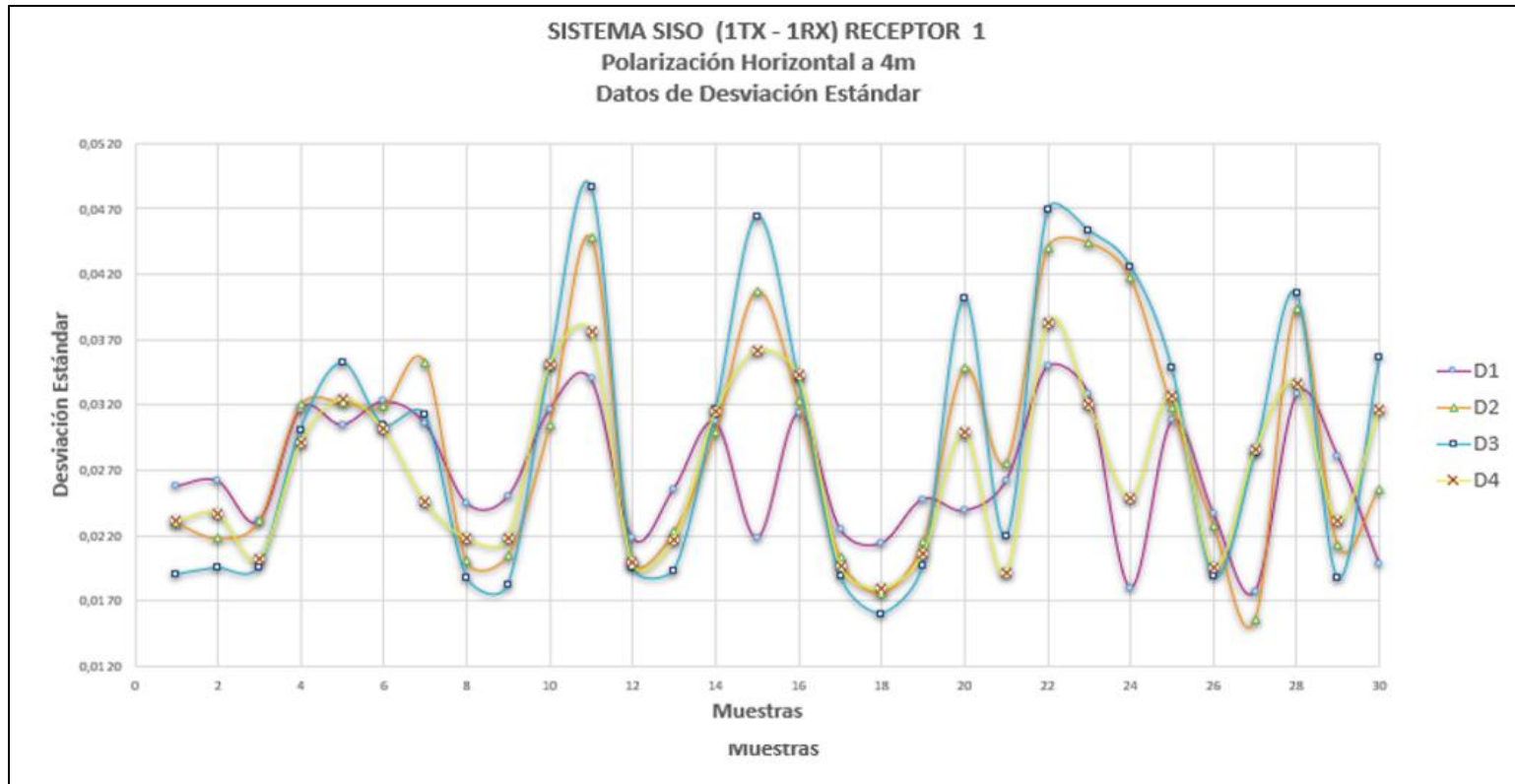




**Gráfico 7-4:** Datos de desviación estándar, SISO a 2 metros con polarización horizontal.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

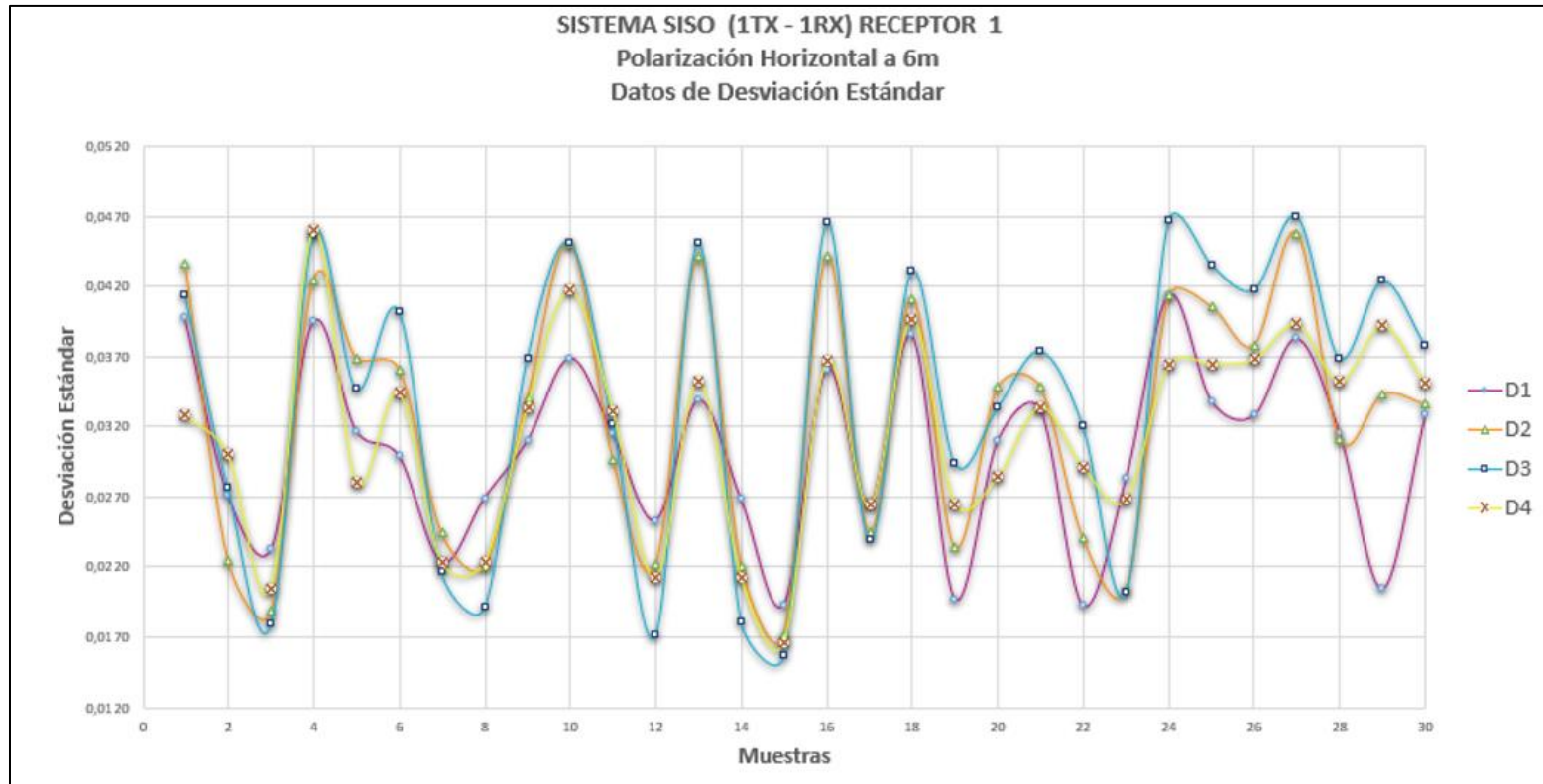
A 4 metros, la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0487, es decir el 4,87% respecto a su promedio, por lo tanto, a 4 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,13%. La misma que se representa en el Gráfico 8-4.



**Gráfico 8-4:** Datos de desviación estándar, SISO a 4 metros con polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

A 6 metros, la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0470, es decir el 4,7% respecto a su promedio, por lo tanto, a 6 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,33% y se representa en el Gráfico 9-4.



**Gráfico 9-4:** Datos de desviación estándar, SISO a 6 metros con polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.2.3. Relación señal/ruido SNR

En la Tabla 9-4 se detallan los datos de relación señal a ruido (SNR) obtenidos por la antena receptora RX1 polarizada horizontalmente en las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros.

**Tabla 9-4:** Resultado de SNR escenario SISO polarización horizontal.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	RELACION SEÑAL/RUIDO (SNR)		
	dB		
	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	20,82	21,25	20,84
Muestra 2	21,04	20,80	20,64
Muestra 3	20,95	20,47	21,01
Muestra 4	20,69	20,69	21,25
Muestra 5	21,29	20,77	20,29
Muestra 6	20,97	19,74	20,67
Muestra 7	20,86	20,71	21,61
Muestra 8	20,88	21,99	21,54
Muestra 9	21,82	21,58	20,87
Muestra 10	21,33	20,5	21,16
Muestra 11	20,95	20,73	20,35
Muestra 12	20,86	21,65	21,04

Muestra 13	20,8	21,99	20,9
Muestra 14	21,02	20,59	21,10
Muestra 15	21,49	20,59	20,90
Muestra 16	20,99	21,38	21,34
Muestra 17	21,52	21,95	20,51
Muestra 18	20,94	21,77	20,31
Muestra 19	20,95	20,21	21,38
Muestra 20	20,57	21,55	20,79
Muestra 21	21	20,96	20,91
Muestra 22	20,91	20,45	21,66
Muestra 23	21,64	20,68	21,15
Muestra 24	21,07	20,25	20,82
Muestra 25	21,28	20,88	21,16
Muestra 26	21,01	20,86	21,22
Muestra 27	20,82	21,32	20,62
Muestra 28	21,10	20,89	21,17
Muestra 29	20,86	21,22	20,72
Muestra 30	21,54	21,33	20,38

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Se procedió a calcular los valores mínimos, máximos y promedios de SNR para cada distancia a evaluar, expresados en la Tabla 10-4 e ilustrados en el Gráfico 10-4. La cual presenta los siguientes resultados:

- A 2 metros se obtuvo un SNR mínimo de 20,57 dB y como máximo de 21,82 dB.
- A 4 metros se obtuvo un SNR mínimo de 19,74 dB y como máximo de 21,99 dB.
- A 6 metros se obtuvo un SNR mínimo de 20,29 dB y como máximo de 22,16 dB.

Por lo tanto, se comprobó que:

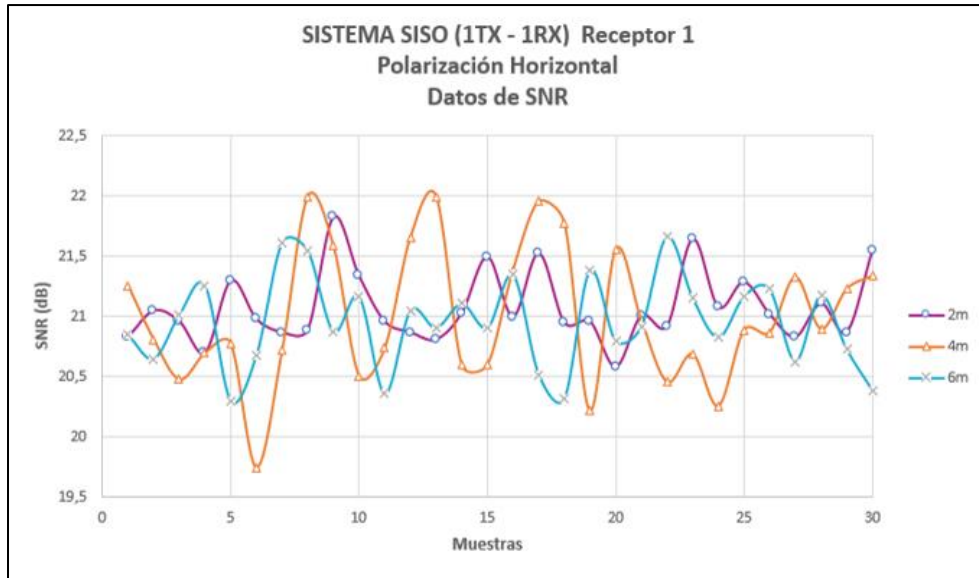
- Existe una buena relación SNR, ya que la potencia de la señal es superior a la potencia del ruido tanto para 2, 4 y 6m.
- Los valores de SNR se encuentran dentro del rango de valores óptimos,  $> 20dB$ .
- A pesar de que a 4 metros se obtuvo como mínimo un SNR de 19,74 dB, se encuentra dentro del rango apropiado ya que los valores mínimos recomendados son de 18dB.

Por tales motivos, se puede garantizar sistema de transmisión - recepción eficiente.

**Tabla 10-4:** SNR mínimo, máximo y promedio SISO polarización horizontal.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	RELACION SEÑAL/RUIDO (SNR)		
	dB		
	2 m	4 m	6 m
Valor Mínimo	20,57	19,74	20,29
Valor Máximo	21,82	21,99	22,16
Promedio	21,07	20,99	20,96

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 10-4:** Datos de SNR, SISO con polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

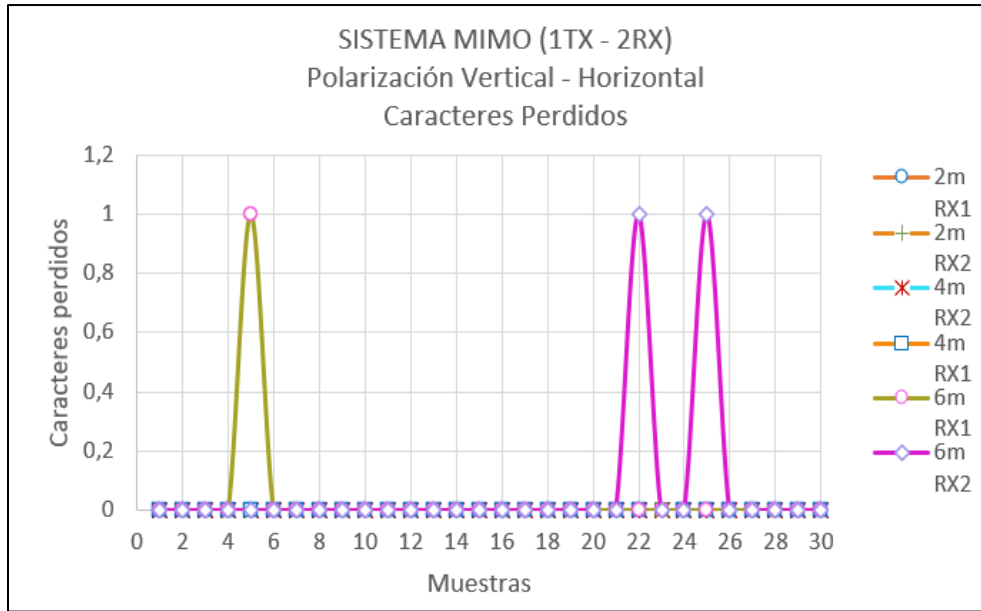
#### 4.1.3. Datos escenario SIMO polarización vertical

##### 4.1.3.1. Comparación de caracteres del mensaje enviado.

Al realizar las pruebas para el escenario SIMO con las dos antenas receptoras polarizadas verticalmente, se envió un mensaje de texto de 41 caracteres. Una vez realizadas las pruebas correspondientes se obtuvieron los resultados que se indican en los Gráficos 11-4 y 12-4, respecto a los caracteres perdidos en cada una de las pruebas.

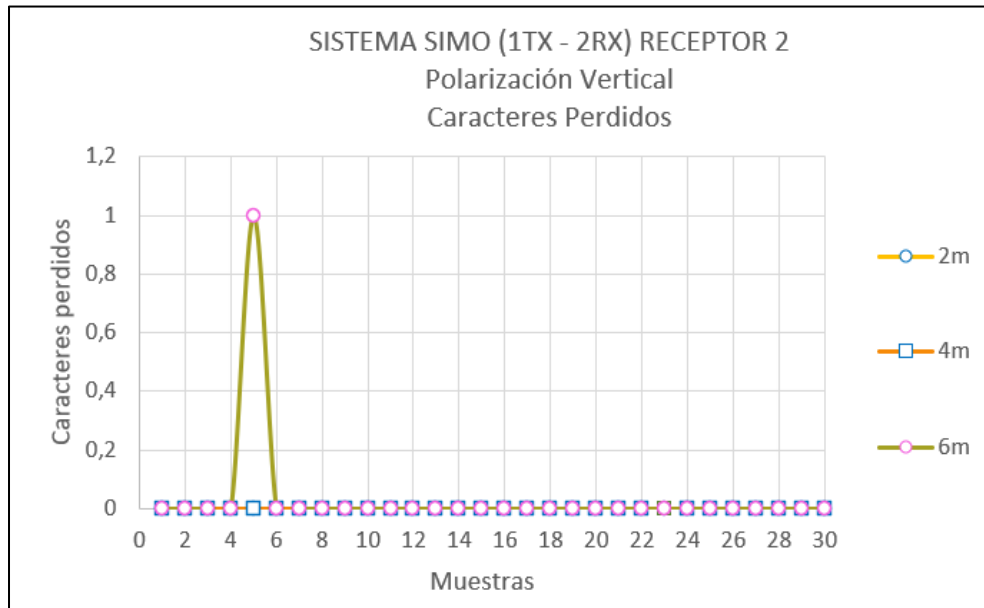
Se observa que a 2 y 4 metros tanto en el RX1 y en el RX2 no se perdió ningún carácter obteniendo así una confiabilidad del 100% en ambas recepciones.

A 6 metros en el RX1, en la prueba 5 se perdió 1 un carácter, obteniendo una eficiencia del 97,56% y una confiabilidad de transmisión – recepción del 99,91%. Mientras que a 6 metros en el RX2 se perdió un carácter tanto en la prueba 22 y la prueba 25 obteniendo una eficiencia del 97,56% y una confiabilidad transmisión – recepción del 99,83%.



**Gráfico 11-4:** Datos de SNR escenario SIMO, RX1 con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 12-4:** Datos de SNR escenario SIMO, RX2 con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



4.1.3.2. Comparación de puntos de la constelación TX respecto a RX mediante desviación estándar.

En la Tabla 11-4 se detallan los valores de desviación estándar de los cuatro cuadrantes del diagrama de constelación obtenido por las antenas receptoras RX1 y RX2, los mismos que fueron evaluados a 2, 4 y 6 metros, con 30 muestras cada uno.

**Tabla 11-4:** Resultado de desviación estándar escenario SIMO polarización vertical.

SISTEMA MIMO 1 TX/ 1 RX	DESVIACIÓN ESTÁNDAR					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	0,0210	0,0205	0,0260	0,0301	0,0193	0,0222
	0,0199	0,0314	0,0496	0,024	0,0336	0,0241
	0,0180	0,0388	0,0595	0,0199	0,0388	0,0282
	0,0187	0,0296	0,0326	0,0261	0,0302	0,027
Muestra 2	0,0230	0,0279	0,0321	0,0308	0,0171	0,0304
	0,0236	0,0225	0,0376	0,0306	0,0182	0,025
	0,0248	0,0192	0,0374	0,0311	0,0207	0,0218
	0,0233	0,0236	0,0306	0,0335	0,0197	0,0262
Muestra 3	0,0392	0,0278	0,0274	0,0385	0,0264	0,0374
	0,0425	0,0237	0,0571	0,031	0,0251	0,0377
	0,0404	0,0217	0,0771	0,0266	0,0253	0,0225
	0,0376	0,0246	0,0476	0,0324	0,0248	0,0305
Muestra 4	0,0184	0,0161	0,0243	0,034	0,0268	0,0259
	0,0336	0,0301	0,0237	0,03	0,0244	0,0279
	0,0446	0,0362	0,0400	0,0221	0,0252	0,0288
	0,0374	0,0281	0,0416	0,0303	0,0264	0,0251
Muestra 5	0,0210	0,0277	0,0337	0,0293	0,0253	0,0268
	0,0199	0,0199	0,0558	0,0253	0,0237	0,0277
	0,0188	0,0159	0,0662	0,0209	0,0255	0,027
	0,0196	0,0207	0,0445	0,0245	0,0261	0,0269
Muestra 6	0,0358	0,0150	0,0263	0,017	0,0233	0,018
	0,0365	0,0241	0,0227	0,0343	0,023	0,0221
	0,0350	0,0360	0,0340	0,0405	0,0241	0,0221
	0,0329	0,0323	0,0341	0,0329	0,021	0,0211
Muestra 7	0,0201	0,0263	0,0332	0,0339	0,0272	0,0292

	0,0204	0,0234	0,0595	0,0273	0,026	0,03
	0,0196	0,0203	0,0631	0,0205	0,0254	0,0327
	0,0191	0,0226	0,0517	0,0283	0,0245	0,0295
Muestra 8	0,0203	0,0268	0,0320	0,0275	0,0261	0,0298
	0,0195	0,0237	0,0523	0,023	0,0245	0,0263
	0,0188	0,0203	0,0498	0,0212	0,0233	0,0259
	0,0191	0,0236	0,0484	0,0236	0,0245	0,0258
Muestra 9	0,0306	0,0298	0,0310	0,0189	0,0215	0,025
	0,0286	0,0306	0,0498	0,0312	0,0269	0,0258
	0,0290	0,0288	0,0649	0,037	0,0321	0,0277
	0,0300	0,0281	0,0469	0,0312	0,0264	0,0267
Muestra 10	0,0176	0,0274	0,0332	0,0289	0,027	0,0267
	0,0142	0,0226	0,0559	0,0287	0,0242	0,0266
	0,0174	0,0198	0,0591	0,0302	0,0213	0,0286
	0,0199	0,0237	0,0495	0,0278	0,0239	0,0261
Muestra 11	0,0395	0,0389	0,0289	0,0294	0,0194	0,0251
	0,0396	0,0408	0,0562	0,0266	0,0315	0,0259
	0,0369	0,0394	0,0585	0,0267	0,0381	0,0251
	0,0343	0,0363	0,0513	0,0272	0,0303	0,0246
Muestra 12	0,0239	0,0200	0,0254	0,0281	0,0251	0,0297
	0,0207	0,0200	0,0430	0,0242	0,0253	0,0261
	0,0171	0,0191	0,0731	0,0217	0,0249	0,0249
	0,0202	0,0185	0,0598	0,0233	0,0242	0,029
Muestra 13	0,0239	0,0222	0,0321	0,0277	0,0191	0,0256
	0,0212	0,0196	0,0465	0,0279	0,0175	0,0307
	0,0194	0,0179	0,0592	0,0297	0,0194	0,0300
	0,0215	0,0202	0,0433	0,0275	0,0194	0,0275
Muestra 14	0,0199	0,0254	0,0356	0,026	0,019	0,0306
	0,0205	0,0216	0,0578	0,0274	0,0254	0,0290
	0,0209	0,0190	0,0532	0,0294	0,0297	0,0272
	0,0208	0,0224	0,0487	0,0272	0,0242	0,0259
Muestra 15	0,0167	0,0230	0,0219	0,0166	0,0272	0,0254
	0,0410	0,0311	0,0718	0,0272	0,0315	0,0241
	0,0463	0,0423	0,0928	0,0275	0,0385	0,0269
	0,0351	0,0327	0,0534	0,0276	0,0325	0,0239
Muestra 16	0,0278	0,0244	0,0263	0,0281	0,0208	0,0167
	0,0244	0,0220	0,0231	0,0281	0,0198	0,0212
	0,0217	0,0175	0,0159	0,0306	0,0226	0,0224
	0,0238	0,0196	0,0192	0,0281	0,0219	0,0208
Muestra 17	0,0216	0,0171	0,0229	0,0293	0,0311	0,0202

	0,0205	0,0305	0,0258	0,0237	0,03	0,0254
	0,0211	0,0362	0,0348	0,0234	0,0287	0,0273
	0,0211	0,0308	0,0294	0,0279	0,0289	0,0234
Muestra 18	0,0327	0,0268	0,0172	0,0243	0,0257	0,0165
	0,0280	0,0230	0,0780	0,0238	0,0252	0,0191
	0,0250	0,0203	0,0694	0,0242	0,0266	0,0237
	0,0283	0,0238	0,0385	0,0233	0,0261	0,0206
Muestra 19	0,0401	0,0173	0,0318	0,0261	0,0233	0,0251
	0,0413	0,0241	0,0292	0,0265	0,0236	0,0259
	0,0420	0,0322	0,0292	0,03	0,028	0,0251
	0,0370	0,0274	0,0300	0,0274	0,0258	0,0246
Muestra 20	0,0208	0,0205	0,0208	0,0299	0,022	0,0168
	0,0182	0,0314	0,0660	0,0318	0,0258	0,0255
	0,0198	0,0388	0,0631	0,0338	0,0281	0,0261
	0,0226	0,0296	0,0276	0,0323	0,0253	0,0259
Muestra 21	0,0212	0,0291	0,0253	0,0252	0,0279	0,0311
	0,0203	0,0349	0,0507	0,0236	0,0283	0,0287
	0,0188	0,0395	0,0531	0,0213	0,0276	0,0288
	0,0182	0,0317	0,0485	0,0288	0,0261	0,0278
Muestra 22	0,0202	0,0275	0,0322	0,0327	0,0279	0,0342
	0,0312	0,0327	0,0423	0,0285	0,0272	0,0322
	0,0435	0,0388	0,0593	0,0253	0,0295	0,0248
	0,0375	0,0319	0,0459	0,0268	0,0278	0,0298
Muestra 23	0,0236	0,0198	0,0283	0,0167	0,0322	0,029
	0,0215	0,0316	0,0259	0,0234	0,028	0,0245
	0,0176	0,0404	0,0211	0,0279	0,0229	0,0198
	0,0188	0,0343	0,0218	0,0248	0,0264	0,024
Muestra 24	0,0222	0,0325	0,0314	0,0299	0,0252	0,0271
	0,0203	0,0276	0,0558	0,0305	0,0227	0,0256
	0,0181	0,0240	0,0694	0,0309	0,0216	0,0268
	0,0198	0,0286	0,0576	0,028	0,0225	0,0259
Muestra 25	0,0395	0,0325	0,0285	0,0175	0,0239	0,0331
	0,0415	0,0276	0,0682	0,0309	0,025	0,0338
	0,0407	0,0240	0,0833	0,0342	0,0274	0,0338
	0,0375	0,0286	0,0652	0,0296	0,0259	0,0326
Muestra 26	0,0197	0,0325	0,0318	0,0178	0,0267	0,0241
	0,0332	0,0276	0,0396	0,027	0,0243	0,0235
	0,0446	0,0240	0,0424	0,032	0,0219	0,0274
	0,0393	0,0286	0,0332	0,0276	0,0232	0,0238
Muestra 27	0,0251	0,0325	0,0281	0,0242	0,0169	0,025

	0,0287	0,0276	0,0545	0,0266	0,0202	0,0215
	0,0357	0,0240	0,0704	0,03	0,0221	0,0221
	0,0302	0,0286	0,0506	0,0258	0,0208	0,0231
Muestra 28	0,0252	0,0325	0,0324	0,0164	0,021	0,0112
	0,0272	0,0276	0,0358	0,0316	0,0227	0,0248
	0,0342	0,0240	0,0350	0,0395	0,0266	0,0274
Muestra 29	0,0299	0,0286	0,0408	0,0341	0,0243	0,0211
	0,0296	0,0325	0,0313	0,0175	0,0202	0,0173
	0,0258	0,0276	0,0331	0,0276	0,0254	0,0214
Muestra 30	0,0211	0,0240	0,0400	0,0345	0,0293	0,025
	0,0267	0,0286	0,0413	0,0287	0,0237	0,0239
	0,0271	0,0222	0,0258	0,0312	0,0179	0,0289
	0,0343	0,0196	0,0298	0,0283	0,0191	0,0274
	0,0402	0,0179	0,0293	0,0279	0,0216	0,0261
	0,0310	0,0202	0,0275	0,0279	0,0194	0,0259

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 12-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de desviación estándar, obtenidos en cada cuadrante del diagrama de constelación del recibido por las antenas receptoras RX1 y RX2, para las 3 distancia a evaluar.

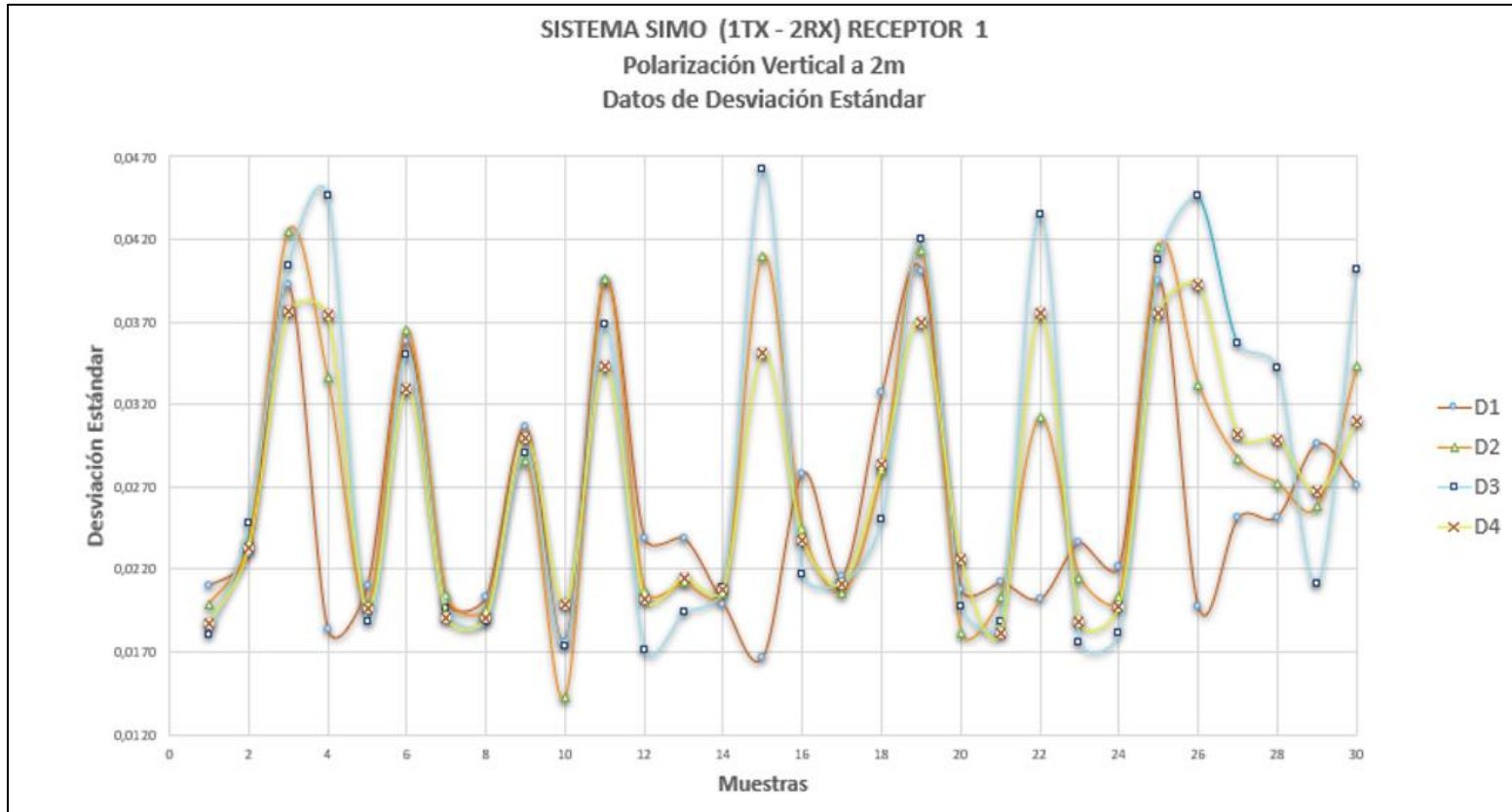
**Tabla 12-4:** Resultado de desviación estándar escenario SIMO p.v

SISTEMA	MIMO 1 TX/ 1 RX	DESVIACION ESTANDAR							
		RECEPTOR 1				RECEPTOR 2			
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$
2 m	Valor Mínimo	0,0167	0,0142	0,0171	0,0182	0,0164	0,0230	0,0199	0,0233
	Valor Máximo	0,0401	0,0425	0,0463	0,0393	0,0385	0,0343	0,0405	0,0341
	Promedio	0,0256	0,0273	0,0284	0,0270	0,0261	0,0277	0,0284	0,0282
4 m	Valor Mínimo	0,0150	0,0196	0,0159	0,0185	0,0169	0,0175	0,0194	0,0194
	Valor Máximo	0,0389	0,0408	0,0423	0,0363	0,0322	0,0336	0,0388	0,0325
	Promedio	0,0258	0,0267	0,0273	0,0269	0,0238	0,0249	0,0266	0,0249

6 m	Valor Mínimo	0,0172	0,0170	0,0159	0,0192	0,0112	0,0191	0,0198	0,0206
	Valor Máximo	0,0356	0,0498	0,0500	0,0495	0,0374	0,0377	0,0338	0,0326
	Promedio	0,0286	0,0364	0,0365	0,0381	0,0255	0,0263	0,0262	0,0256

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

A partir de la Tabla 12-4 se concluye que, 2 metros la desviación estándar máxima obtenida en RX1 se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0463, es decir el 4,63% respecto a su promedio, por lo tanto, la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,37%. La misma que se representa en el Gráfico 13-4.



**Gráfico 13-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 2 metros, RX1 con p.v.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

A 2 metros la desviación estándar máxima obtenida en RX2 se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0405, es decir el 4,05% respecto a su promedio, por lo tanto, la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,95%. La misma que se representa en el Gráfico14-4.

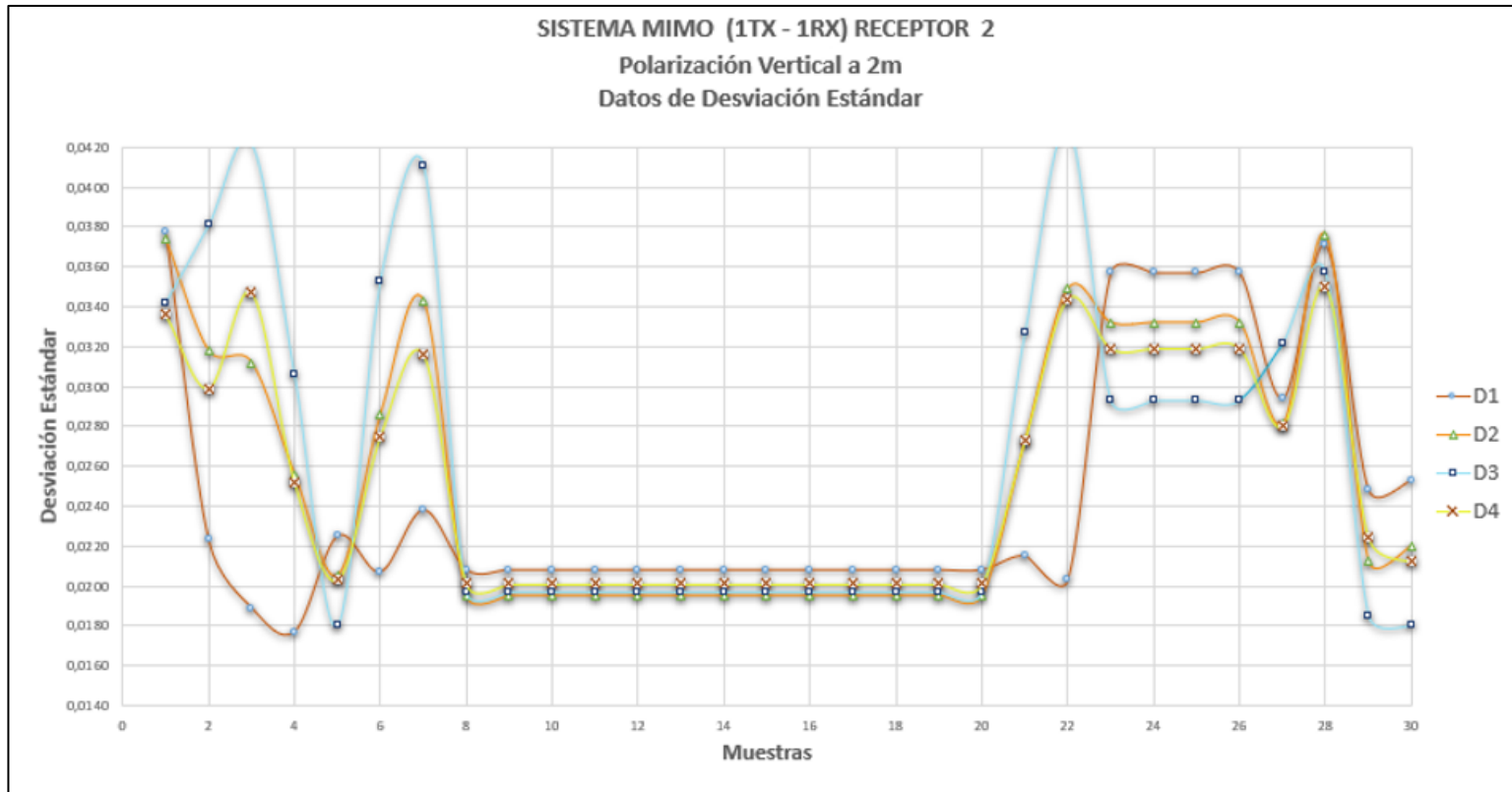
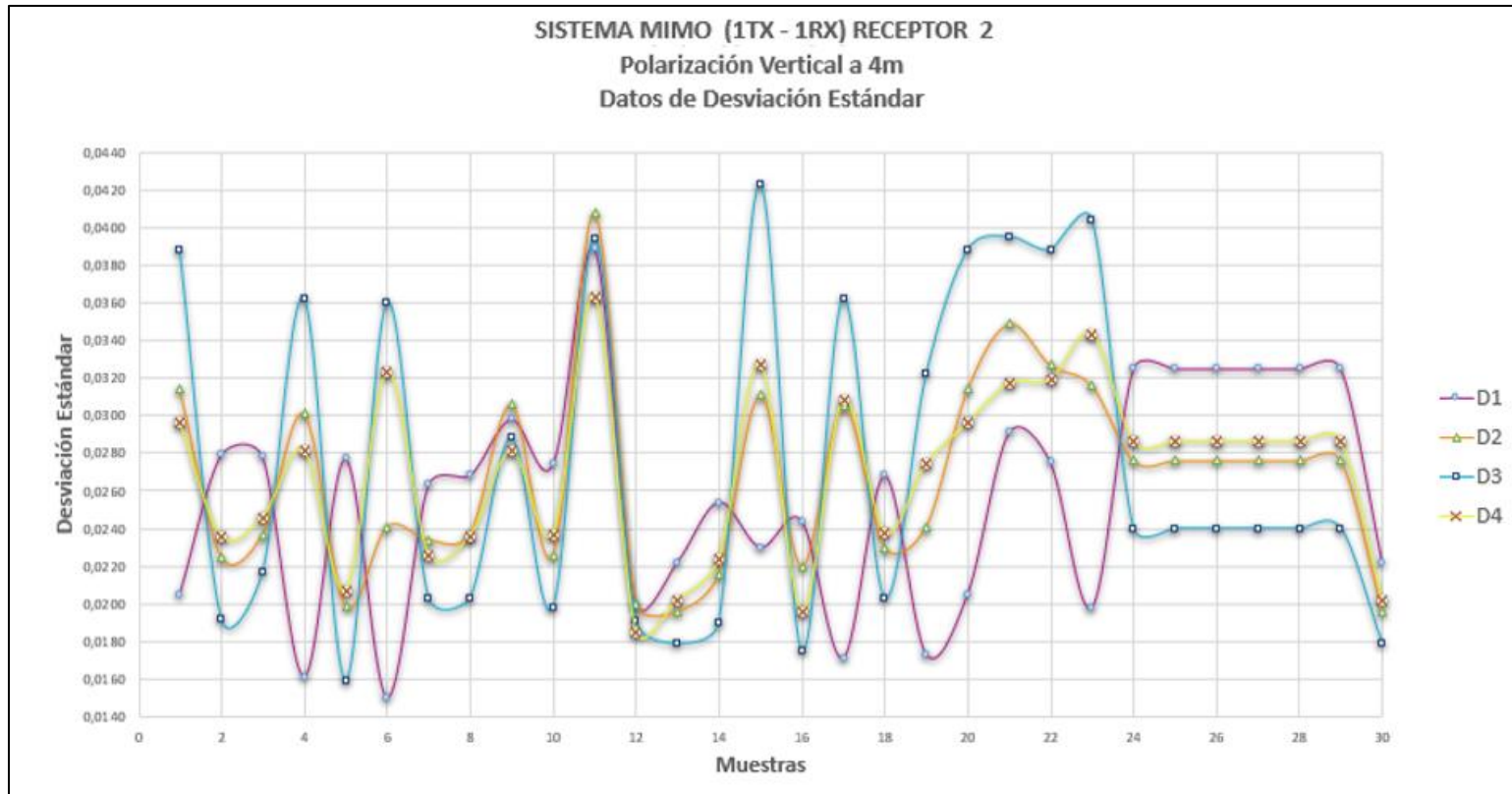


Gráfico 14-4: Datos de desviación estándar SIMO a 2 metros, RX2 con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

A 4 metros la desviación estándar máxima obtenida en RX1 se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0423, es decir el 4,23% respecto a su promedio, por lo tanto, la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,77%. La misma que se representa en el Gráfico15-4.

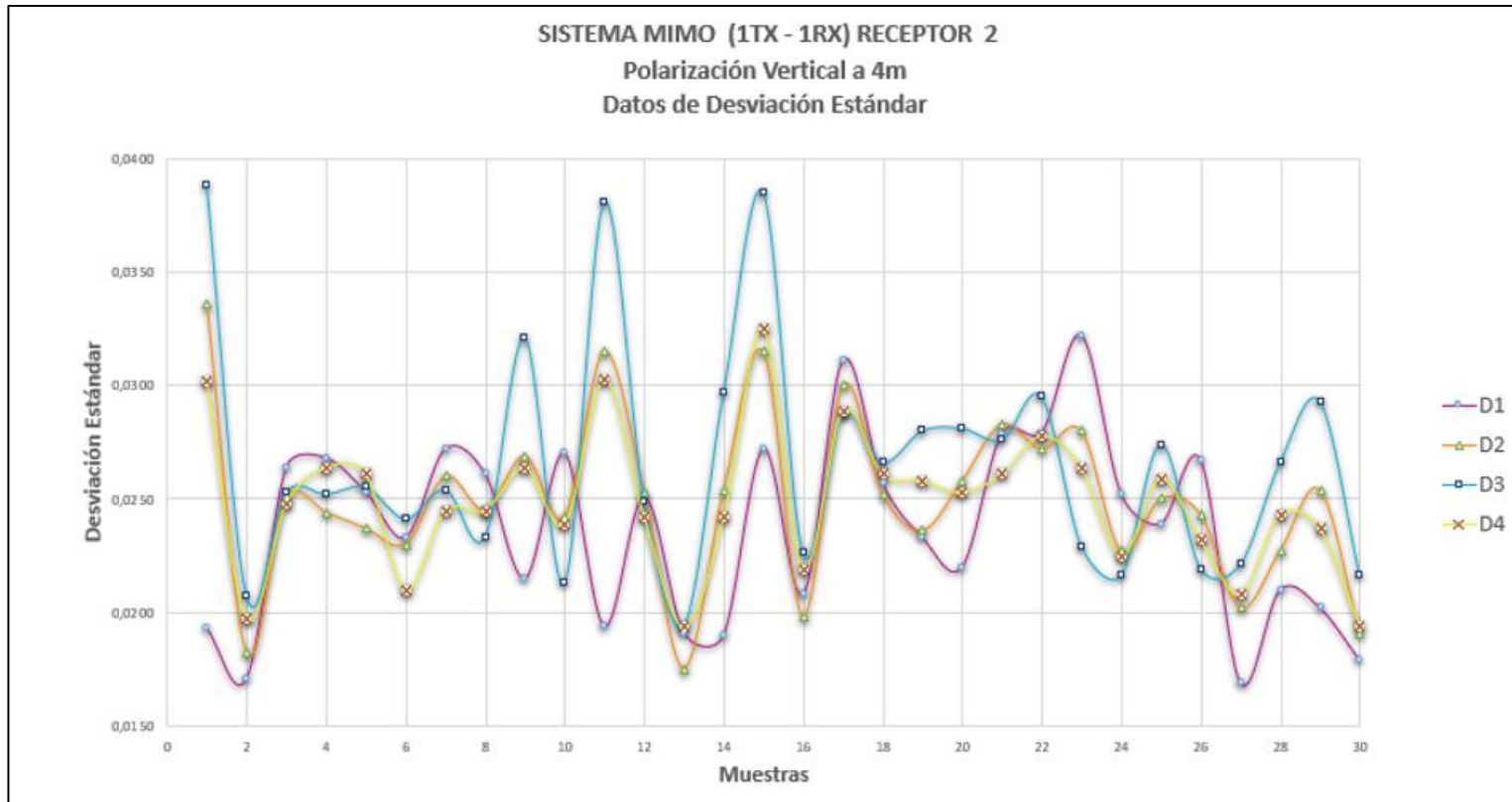


**Gráfico 15-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 4 metros, RX1 con p.v.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021



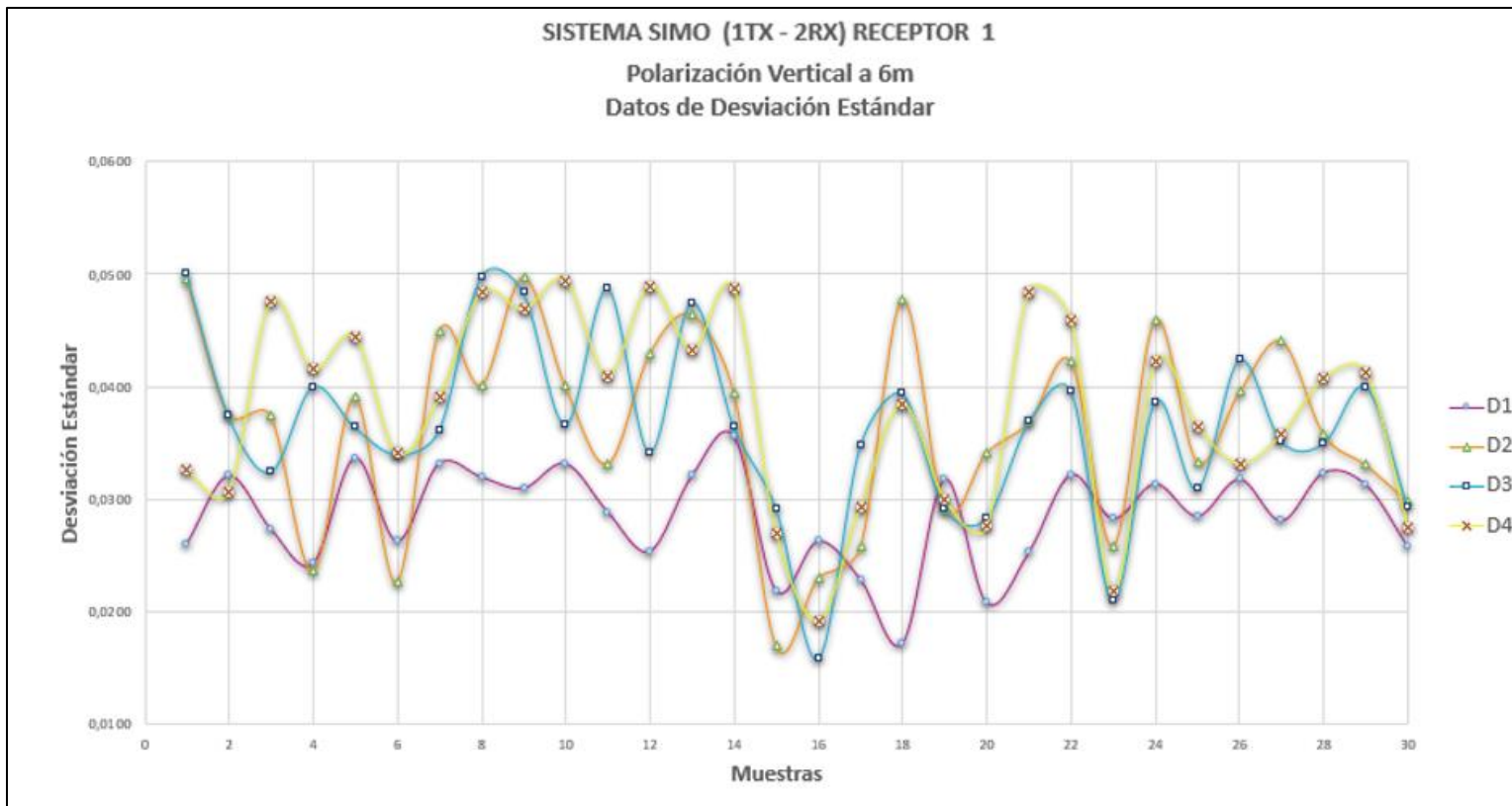
A 4 metros la desviación estándar máxima obtenida en RX2 se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0388, es decir el 3,885% respecto a su promedio, por lo tanto, la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,62%. La misma que se representa en el Gráfico 16-4.



**Gráfico 16-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 4 metros, RX2 con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

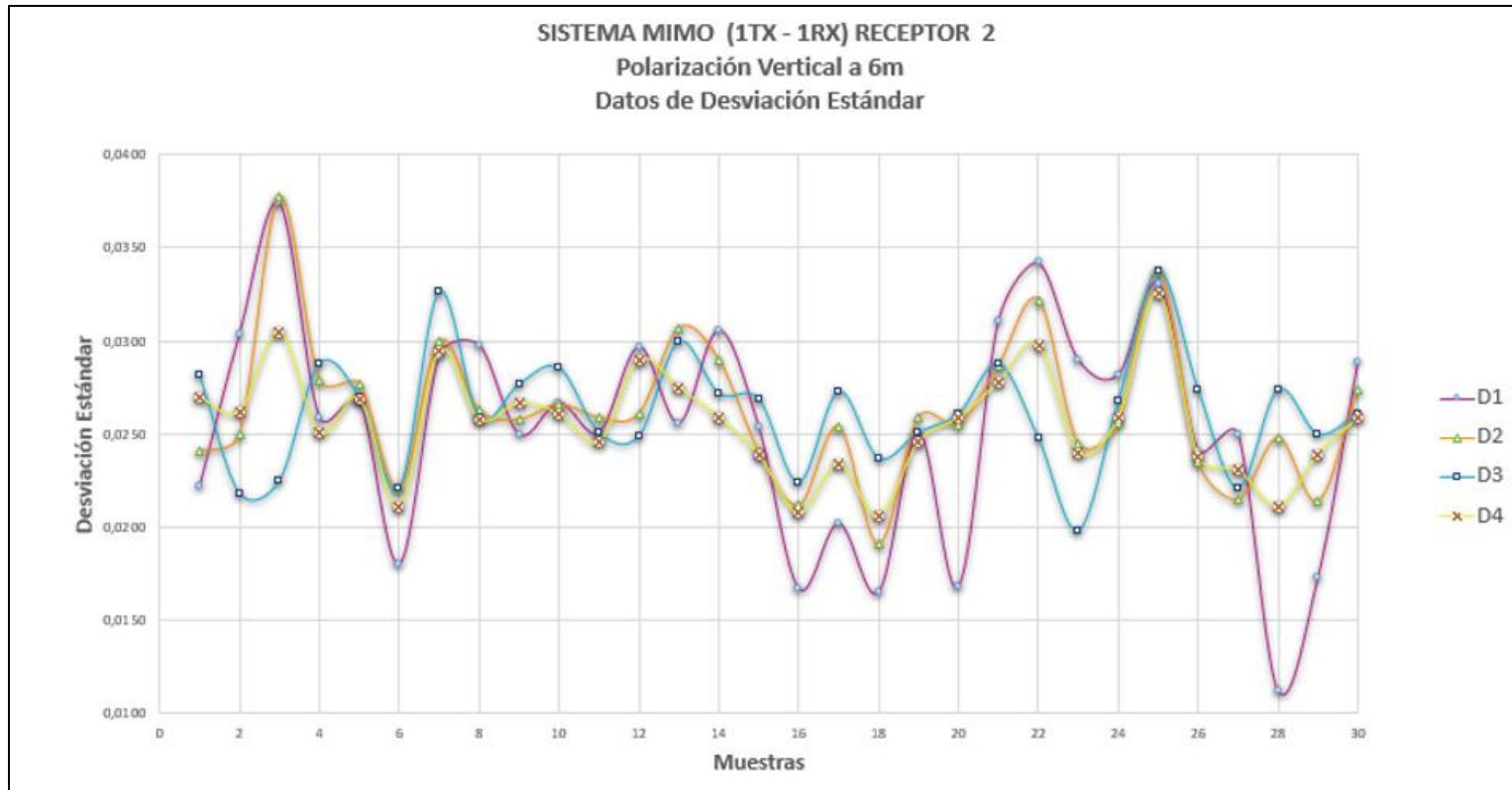
A 6 metros la desviación estándar máxima obtenida en RX1 se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0500, es decir el 5% respecto a su promedio, por lo tanto, la confiabilidad transmisión – recepción es del 95%. La misma que se representa en el Gráfico 17-4.



**Gráfico 17-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 6 metros, RX1 con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

A 6 metros la desviación estándar máxima obtenida e RX2 se encuentra en el cuadrante 2 y es de 0,0377, es decir el 3,77% respecto a su promedio, por lo tanto, la confiabilidad transmisión – recepción es del 96,23%. La misma que se representa en el Gráfico 18-4.



**Gráfico 18-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 6 metros, RX2 con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.3.3. Relación señal/ruido SNR

En la Tabla 13-4 se detallan los datos de relación señal a ruido (SNR) obtenidos en las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros, obtenidos por las antenas receptoras RX1 y RX2.

**Tabla 13-4:** Resultado de SNR escenario SIMO polarización vertical.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 2 RXs	RELACIÓN SEÑAL/RUIDO (SNR)					
	dB					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	21,13	20,57	20,36	29,01	30,21	35,72
Muestra 2	21,06	20,29	21,28	28,2	32,97	36,19
Muestra 3	20,97	20,97	20,37	28,2	33,5	37,05
Muestra 4	21,12	20,35	20,55	30,92	36,08	36,7
Muestra 5	21,06	21,34	20,63	30,64	37,05	38,11
Muestra 6	21,11	20,83	20,52	28,78	36,87	37,98
Muestra 7	21,19	20,76	20,52	28,97	37,53	39,6
Muestra 8	20,96	20,81	20,53	29,43	35,01	39,21
Muestra 9	21,03	20,89	20,59	28,18	34,41	38,38
Muestra 10	21,5	20,6	20,52	27,91	37	38,15
Muestra 11	20,96	20,65	20,55	26,53	35,54	37,81

Muestra 12	21,3	20,48	20,62	27,27	36,26	37,74
Muestra 13	21,29	20,45	20,41	27,19	32,14	36,5
Muestra 14	21,08	20,49	20,55	28,64	35,92	37,49
Muestra 15	20,67	20,42	20,52	30,6	37,43	37,64
Muestra 16	20,97	20,46	21,7	29,88	38,79	37,98
Muestra 17	21,07	20,45	20,56	30,22	38,24	37,11
Muestra 18	21,09	20,32	20,55	29,81	39,81	37,12
Muestra 19	21	20,43	21,26	30,58	38,76	37,81
Muestra 20	21,44	20,57	20,55	30,74	37,68	33,86
Muestra 21	21,23	20,44	20,55	29,25	40,02	34,88
Muestra 22	21,16	20,34	20,55	29,13	36,48	36,77
Muestra 23	21,13	20,57	21,31	30,17	38,53	35,31
Muestra 24	21,05	20,53	20,55	29,74	39,06	32,51
Muestra 25	21,12	20,53	20,55	31,85	34,24	26,54
Muestra 26	20,98	20,53	21,4	30,23	36,6	27,64
Muestra 27	20,91	20,53	20,55	31,11	38,69	31,09
Muestra 28	21,01	20,53	20,41	30,25	33,66	34,11
Muestra 29	21	20,53	20,41	26,68	38,03	35,31
Muestra 30	21,01	20,45	21,27	30,57	40,46	36,5

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Se procedió a calcular los valores mínimos, máximos y promedios de SNR para cada distancia a evaluar, expresados en la Tabla 14-4 e ilustrados en los Gráficos 18-4 y 19-4. La cual presenta los siguientes resultados:

- A 2 metros en RX1 se obtuvo un SNR mínimo de 20,67 dB y como máximo de 21,05 dB. En RX2 se obtuvo un SNR mínimo de 26,53 dB y máximo de 31,85dB.
- A 4 metros en RX1 se obtuvo un SNR mínimo de 20,29 dB y como máximo de 21,34 dB. En RX2 se obtuvo un SNR mínimo de 30,21 dB y máximo de 40,46 dB.
- A 6 metros en RX1 se obtuvo un SNR mínimo de 20,36 dB y como máximo de 21,7 dB. En RX2 se obtuvo un SNR mínimo de 26,54 dB y máximo de 39,6dB.

Por lo tanto, se comprobó que:

- Existe una buena relación SNR, ya que la potencia de la señal es superior a la potencia del ruido tanto para 2, 4 y 6m para RX1 y RX2. Sin embargo, la antena receptora RX2 presenta mejores relaciones de SNR que RX1.
- Los valores de SNR se encuentran dentro del rango de valores óptimos,  $> 20dB$ .

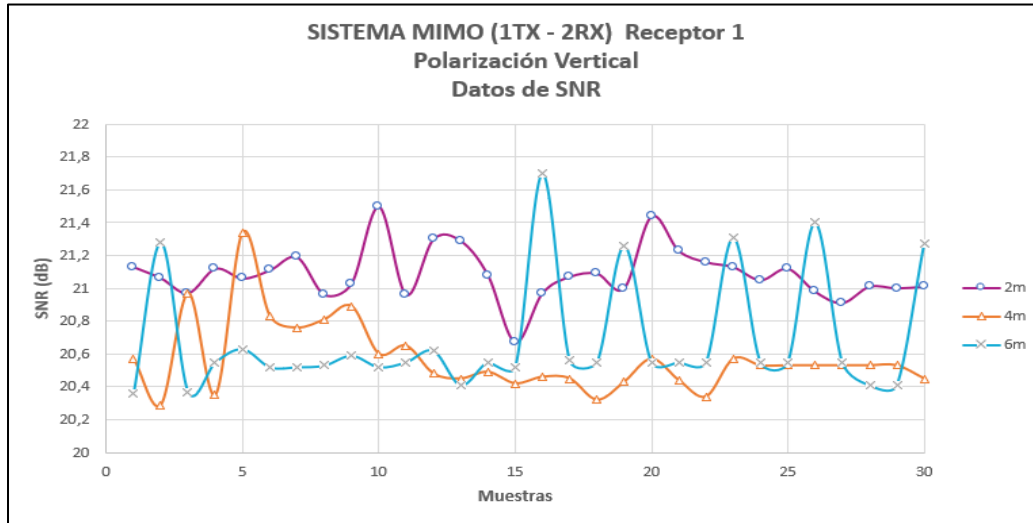
Por tales motivos, se puede garantizar un sistema de transmisión - recepción eficiente.

**Tabla 14-4:** SNR mínimo, máximo y promedio SIMO polarización vertical.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	RELACION SEÑAL/RUIDO (SNR)					
	dB					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
<b>Valor Mínimo</b>	20,67	20,29	20,36	26,53	30,21	26,54
<b>Valor Máximo</b>	21,5	21,34	21,7	31,85	40,46	39,6

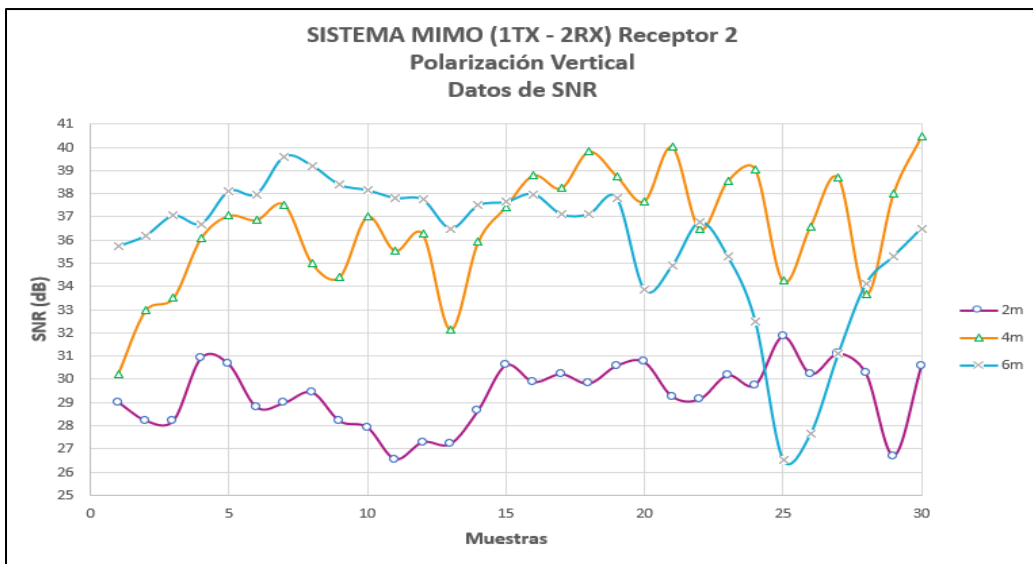
<b>Promedio</b>	21,09	20,57	20,69	29,36	36,57	35,96
-----------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 19-4:** Datos de SNR SIMO, RX1 con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 20-4:** Datos de SNR SIMO, RX2 con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### ***4.1.4. Datos escenario SIMO polarización horizontal***

##### *4.1.4.1. Comparación de caracteres del mensaje enviado.*

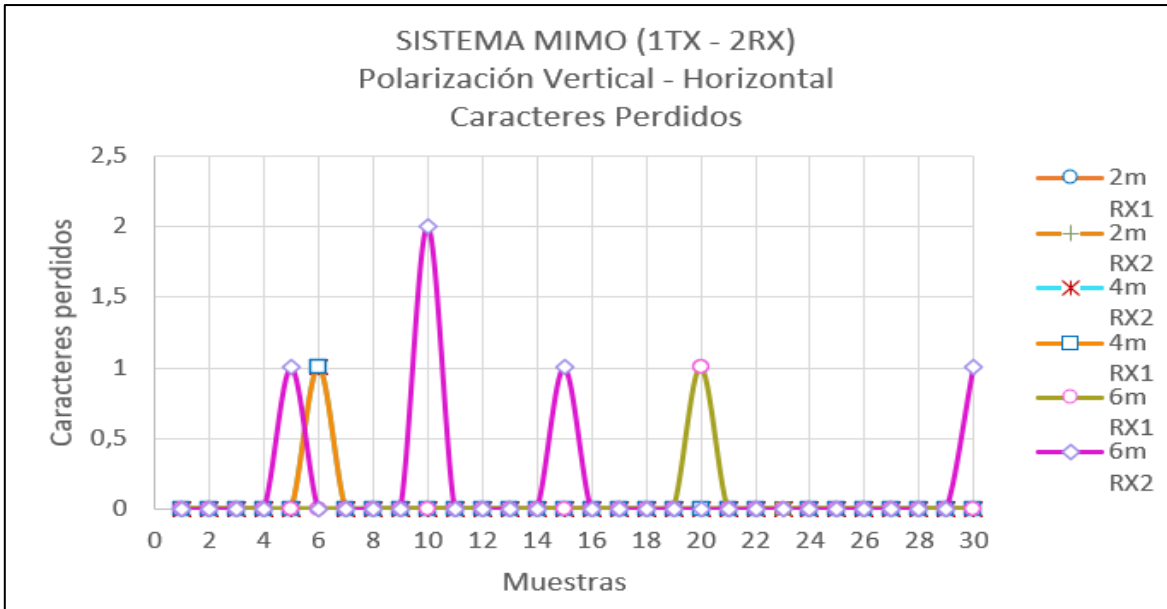
Durante las pruebas del escenario SIMO con polarización vertical – horizontal, se envió un mensaje de texto de 41 caracteres. Al finalizar, se obtuvieron los resultados que se indican en el Gráfico 21-4, respecto a los caracteres perdidos en cada una de las pruebas.

Se observa que a 2 metros tanto en RX1 como en RX2 no se perdió ningún carácter obteniendo así una eficiencia y confiabilidad transmisión – recepción del 100% en ambas recepciones.

A 4 metros en RX2 no se perdió ningún carácter obteniendo una confiabilidad del 100%, mientras que en RX1 a 4 metros en la prueba 6 se perdió un carácter obteniendo una eficiencia del 97,56% y una confiabilidad de transmisión – recepción del 99,91%.

A 6 metros en RX1, se perdió 1 un carácter en la prueba 20, obteniendo una eficiencia del 97,56% y una confiabilidad de transmisión – recepción del 99,91%. Mientras que a 6 metros en RX2 se perdió un carácter en las pruebas 5, 1 y 30, obteniendo una eficiencia del 97,56%; y dos caracteres en la prueba 10 obteniendo una eficiencia del 95,12%. La confiabilidad transmisión – recepción de RX2 a 6 metros es del 99,59%.





**Gráfico 21-4:** Caracteres perdidos SIMO con polarización vertical - horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

4.1.4.2. Comparación de puntos de la constelación TX respecto a RX mediante desviación estándar.

Luego de realizar las pruebas con ambas antenas receptoras, a 2, 4 y 6 metros, con 30 muestras c/u, se obtuvieron los valores de desviación estándar de los cuatro cuadrantes de los diagramas de constelación recibidos.

**Tabla 15-4:** Resultado de desviación estándar SIMO polarización vertical- horizontal.

SISTEMA MIMO 1 TX/ 1 RX	DESVIACIÓN ESTÁNDAR					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	0,0214	0,0345	0,0293	0,0378	0,0251	0,0269
	0,0264	0,0275	0,0292	0,0374	0,0206	0,0731
	0,0323	0,0242	0,0281	0,0342	0,0182	0,0849
	0,0273	0,0308	0,0283	0,0336	0,0225	0,0528

Muestra 2	0,0254	0,0322	0,0309	0,0223	0,0177	0,0255
	0,0311	0,0296	0,0288	0,0318	0,037	0,0386
	0,0371	0,0307	0,0289	0,0381	0,0447	0,0486
	0,0308	0,0300	0,0311	0,0299	0,0308	0,0406
Muestra 3	0,0278	0,0322	0,0300	0,0189	0,0384	0,0249
	0,0270	0,0373	0,0254	0,0312	0,043	0,0260
	0,0266	0,0418	0,0222	0,0422	0,0433	0,0276
	0,0280	0,0354	0,0246	0,0347	0,0391	0,0267
Muestra 4	0,0262	0,0274	0,0286	0,0177	0,0267	0,0285
	0,0256	0,0271	0,0272	0,0256	0,0201	0,0383
	0,0305	0,0289	0,0309	0,0306	0,0184	0,0523
	0,0275	0,0288	0,0311	0,0252	0,0246	0,0363
Muestra 5	0,0265	0,0203	0,0242	0,0225	0,0188	0,0132
	0,0314	0,0281	0,0286	0,0205	0,0432	0,0190
	0,0338	0,0341	0,0280	0,018	0,046	0,0207
	0,0303	0,0290	0,0218	0,0203	0,0304	0,0120
Muestra 6	0,0278	0,0210	0,0340	0,0207	0,0387	0,0282
	0,0296	0,0308	0,0320	0,0286	0,0403	0,0345
	0,0353	0,0382	0,0291	0,0353	0,0423	0,0420
	0,0295	0,0320	0,0293	0,0275	0,039	0,0522
Muestra 7	0,0313	0,0360	0,0231	0,0238	0,0209	0,0161
	0,0301	0,0318	0,0255	0,0343	0,0202	0,0468
	0,0280	0,0258	0,0295	0,0411	0,0193	0,0351
	0,0302	0,0319	0,0249	0,0316	0,02	0,0280
Muestra 8	0,0269	0,0214	0,0280	0,0208	0,0216	0,0280
	0,0325	0,0206	0,0296	0,0195	0,0186	0,0296
	0,0334	0,0202	0,0311	0,0197	0,0197	0,0311
	0,0297	0,0206	0,0312	0,0201	0,02015	0,0312
Muestra 9	0,0306	0,0363	0,0373	0,0208	0,0161	0,0274
	0,0325	0,0326	0,0306	0,0195	0,0412	0,0479
	0,0335	0,0294	0,0284	0,0197	0,0484	0,0549
	0,0304	0,0319	0,0319	0,0201	0,0344	0,0544
Muestra 10	0,0290	0,0216	0,0291	0,0208	0,0332	0,0299
	0,0314	0,0284	0,0276	0,0195	0,0323	0,0524
	0,0335	0,0305	0,0293	0,0197	0,0289	0,0776
	0,0317	0,0252	0,0296	0,0201	0,0291	0,0606
Muestra 11	0,0245	0,0379	0,0306	0,0208	0,0294	0,0327
	0,0262	0,0307	0,0278	0,0195	0,0239	0,0608
	0,0315	0,0202	0,0269	0,0197	0,0209	0,0784
	0,0261	0,0308	0,0273	0,0201	0,0275	0,0649

Muestra 12	0,0315	0,0362	0,0339	0,0208	0,0233	0,0290
	0,0294	0,0335	0,0284	0,0195	0,0286	0,0624
	0,0287	0,0277	0,0281	0,0197	0,0323	0,0856
	0,0299	0,0319	0,0304	0,0201	0,0249	0,0628
Muestra 13	0,0328	0,0364	0,0328	0,0208	0,0149	0,0250
	0,0320	0,0380	0,0295	0,0195	0,0194	0,0388
	0,0314	0,0381	0,0280	0,0197	0,0213	0,0373
	0,0318	0,0369	0,0297	0,0201	0,0187	0,0449
Muestra 14	0,0313	0,0374	0,0382	0,0208	0,0376	0,0282
	0,0314	0,0359	0,0323	0,0195	0,0404	0,0555
	0,0314	0,0331	0,0316	0,0197	0,039	0,0547
	0,0302	0,0331	0,0326	0,0201	0,0349	0,0473
Muestra 15	0,0344	0,0317	0,0263	0,0208	0,0178	0,0281
	0,0323	0,0286	0,0300	0,0195	0,0338	0,0511
	0,0325	0,0225	0,0306	0,0197	0,0418	0,0715
	0,0315	0,0302	0,0279	0,0201	0,0347	0,0476
Muestra 16	0,0343	0,0246	0,0300	0,0208	0,0227	0,0250
	0,0326	0,0227	0,0281	0,0195	0,0199	0,0258
	0,0310	0,0194	0,0262	0,0197	0,018	0,0277
	0,0328	0,0217	0,0272	0,0201	0,0203	0,0267
Muestra 17	0,0330	0,0306	0,0285	0,0208	0,0252	0,0371
	0,0341	0,0275	0,0279	0,0195	0,0214	0,0677
	0,0327	0,0247	0,0296	0,0197	0,0225	0,0633
	0,0331	0,0277	0,0297	0,0201	0,025	0,0444
Muestra 18	0,0310	0,0190	0,0292	0,0208	0,0292	0,0327
	0,0312	0,0211	0,0252	0,0195	0,0314	0,0436
	0,0321	0,0238	0,0257	0,0197	0,0276	0,0651
	0,0306	0,0214	0,0290	0,0201	0,0239	0,0492
Muestra 19	0,0265	0,0351	0,0254	0,0208	0,0271	0,0303
	0,0272	0,0313	0,0238	0,0195	0,0248	0,0495
	0,0306	0,0252	0,0280	0,0197	0,0219	0,0775
	0,0280	0,0305	0,0265	0,0201	0,0242	0,0565
Muestra 20	0,0330	0,0269	0,0320	0,0208	0,0271	0,0299
	0,0318	0,0227	0,0490	0,0195	0,0248	0,0467
	0,0319	0,0208	0,0543	0,0197	0,0219	0,0573
	0,0316	0,0243	0,0392	0,0201	0,0242	0,0398
Muestra 21	0,0281	0,0212	0,0275	0,0215	0,0271	0,0276
	0,0268	0,0208	0,0283	0,0273	0,0248	0,0421
	0,0305	0,0228	0,0293	0,0327	0,0219	0,0754
	0,0289	0,0225	0,0271	0,0273	0,0242	0,0598

Muestra 22	0,0304	0,0372	0,0310	0,0203	0,0271	0,0259
	0,0280	0,0321	0,0281	0,0349	0,0248	0,0524
	0,0288	0,0244	0,0301	0,043	0,0219	0,0756
	0,0272	0,0328	0,0306	0,0344	0,0242	0,0585
Muestra 23	0,0312	0,0265	0,0289	0,0357	0,0271	0,0278
	0,0317	0,0262	0,0308	0,0332	0,0248	0,0573
	0,0333	0,0230	0,0320	0,0293	0,0219	0,0799
	0,0317	0,0241	0,0277	0,0319	0,0242	0,0562
Muestra 24	0,0288	0,0204	0,0249	0,0357	0,0271	0,0243
	0,0310	0,0248	0,0286	0,0332	0,0248	0,0737
	0,0348	0,0281	0,0311	0,0293	0,0219	0,0854
	0,0310	0,0262	0,0272	0,0319	0,0242	0,0439
Muestra 25	0,0273	0,0316	0,0265	0,0357	0,0271	0,0268
	0,0301	0,0257	0,0212	0,0332	0,0248	0,0277
	0,0324	0,0232	0,0177	0,0293	0,0219	0,0270
	0,0288	0,0288	0,0222	0,0319	0,0242	0,0269
Muestra 26	0,0274	0,0197	0,0296	0,0357	0,0271	0,0363
	0,0276	0,0203	0,0302	0,0332	0,0248	0,0678
	0,0295	0,0208	0,0273	0,0293	0,0219	0,0848
	0,0278	0,0194	0,0299	0,0319	0,0242	0,0558
Muestra 27	0,0263	0,0313	0,0269	0,0294	0,0271	0,0246
	0,0296	0,0270	0,0278	0,0281	0,0248	0,0648
	0,0349	0,0253	0,0274	0,0322	0,0219	0,0866
	0,0303	0,0296	0,0275	0,028	0,0242	0,0674
Muestra 28	0,0292	0,0313	0,0343	0,0371	0,0271	0,0297
	0,0284	0,0254	0,0319	0,0376	0,0248	0,0417
	0,0302	0,0234	0,0272	0,0357	0,0219	0,0745
	0,0283	0,0276	0,0294	0,035	0,0242	0,0606
Muestra 29	0,0290	0,0305	0,0283	0,0248	0,0271	0,0295
	0,0278	0,0273	0,0281	0,0212	0,0248	0,0535
	0,0298	0,0277	0,0293	0,0185	0,0219	0,0677
	0,0299	0,0290	0,0279	0,0224	0,0242	0,0609
Muestra 30	0,0285	0,0275	0,0322	0,0253	0,0292	0,0281
	0,0304	0,0254	0,0258	0,022	0,0314	0,0645
	0,0333	0,0275	0,0226	0,018	0,0276	0,0921
	0,0306	0,0266	0,0293	0,0212	0,0239	0,0673

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

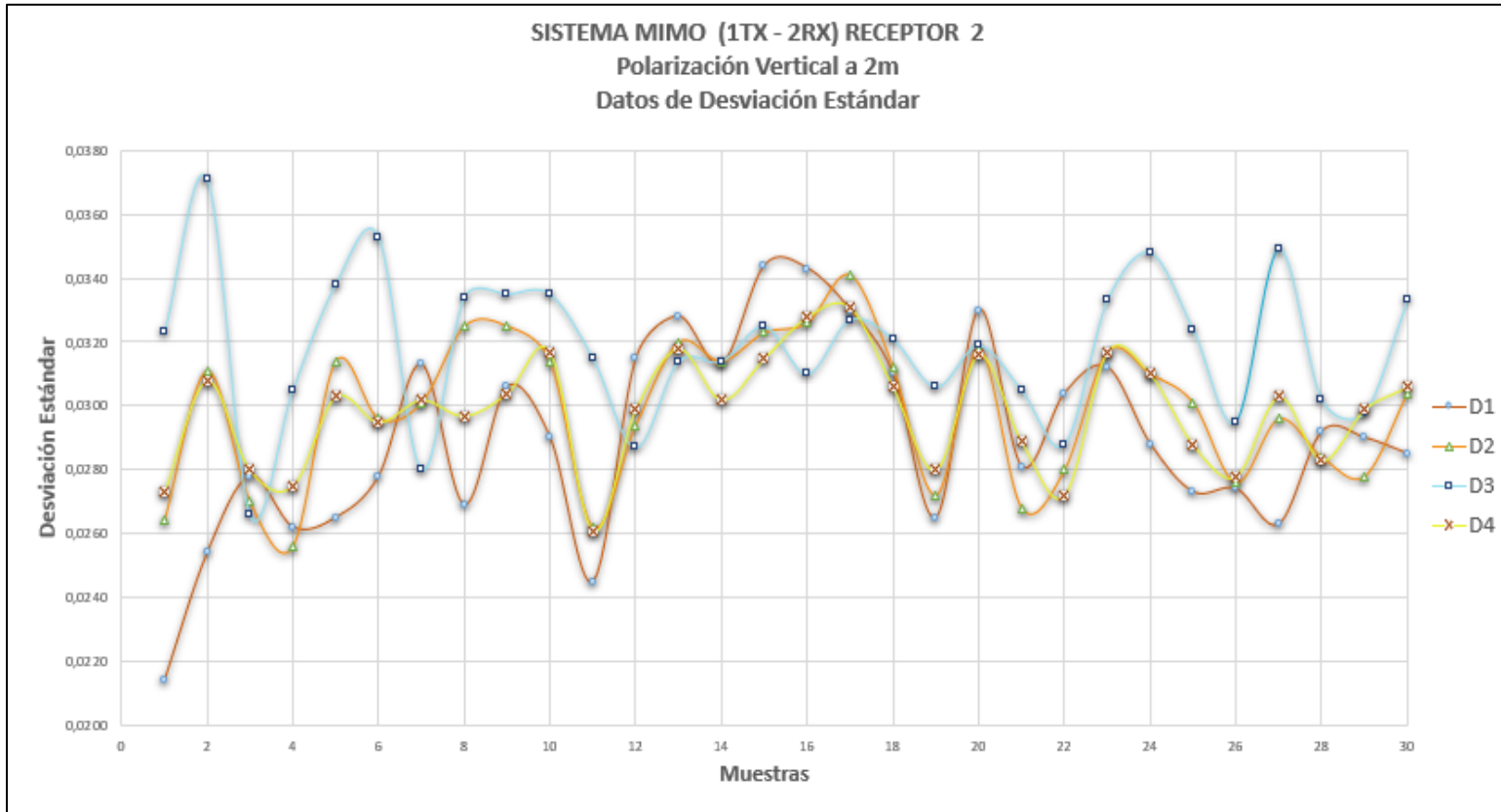
La Tabla 16-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de desviación estándar, obtenidos en cada cuadrante del diagrama de constelación del recibido por las antenas, para las 3 distancia a evaluar.

**Tabla 16-4:** Resultado de desviación estándar SIMO polarización vertical - horizontal.

SISTEMA MIMO 1 TX/ 1 RX	DESVIACION ESTANDAR								
		RECEPTOR 1				RECEPTOR 2			
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$
2 m	Valor Mínimo	0,0214	0,0256	0,0266	0,0261	0,0177	0,0195	0,0180	0,0201
	Valor Máximo	0,0344	0,0341	0,0371	0,0331	0,0378	0,0376	0,0430	0,0350
	Promedio	0,0290	0,0299	0,0318	0,0299	0,0245	0,0256	0,0264	0,0253
4 m	Valor Mínimo	0,0190	0,0203	0,0194	0,0194	0,0149	0,0186	0,0180	0,0187
	Valor Máximo	0,0379	0,0380	0,0418	0,0369	0,0387	0,0432	0,0484	0,0391
	Promedio	0,0292	0,0280	0,0269	0,0284	0,0262	0,0280	0,0274	0,0263
6 m	Valor Mínimo	0,0231	0,0212	0,0177	0,0218	0,0132	0,0190	0,0207	0,0120
	Valor Máximo	0,0382	0,0490	0,0543	0,0392	0,0849	0,0737	0,0921	0,0674
	Promedio	0,0298	0,0289	0,0290	0,0287	0,0296	0,0485	0,0614	0,0479

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

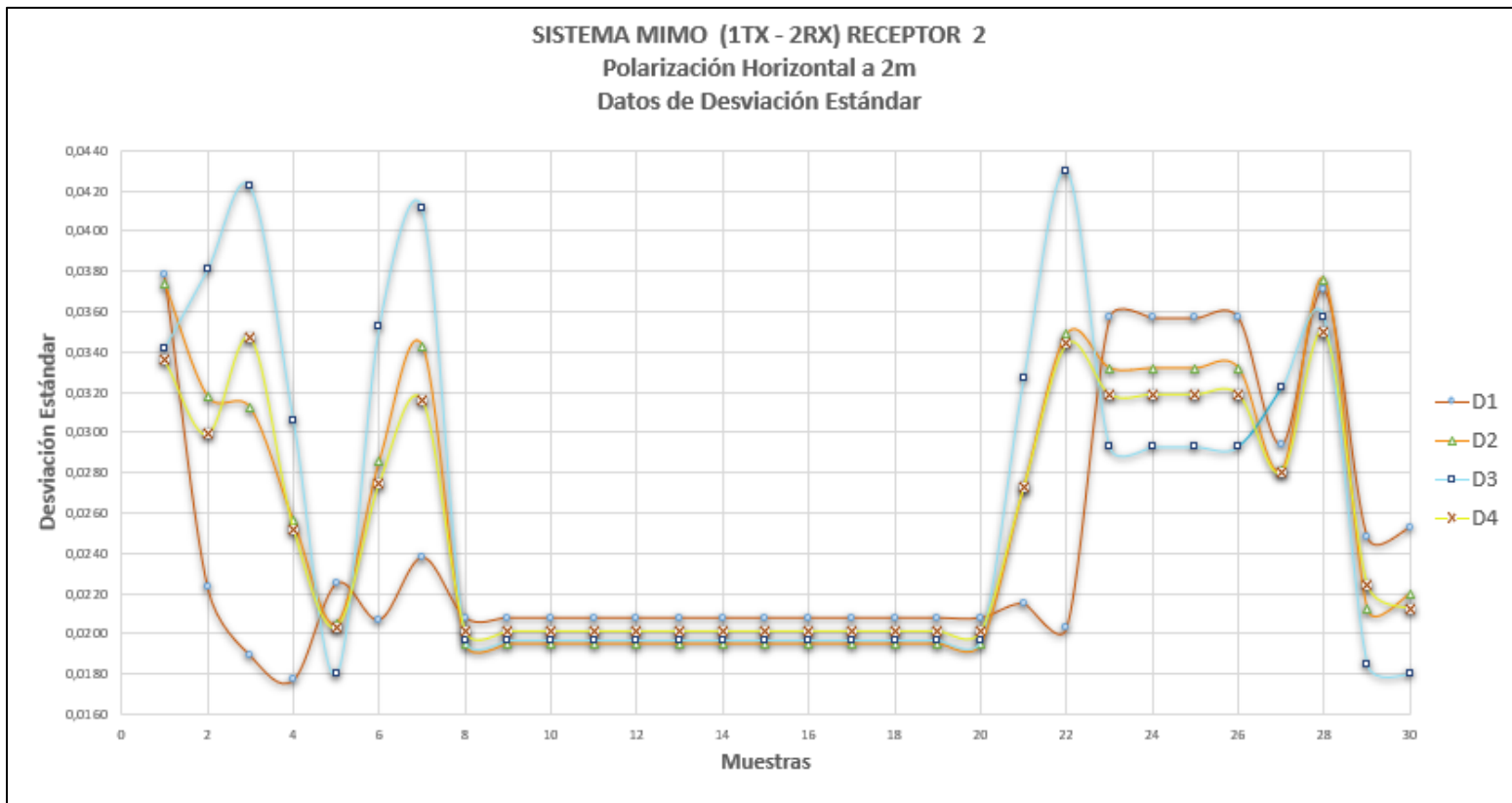
A partir de la Tabla 16-4 se concluye que, 2 metros en RX1 la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0371, es decir el 3,71% respecto a su promedio, por lo tanto, a 2 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 96,29%. La misma que se representa en el Gráfico 22-4.



**Gráfico 22-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 2 metros, RX1 con polarización vertical.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

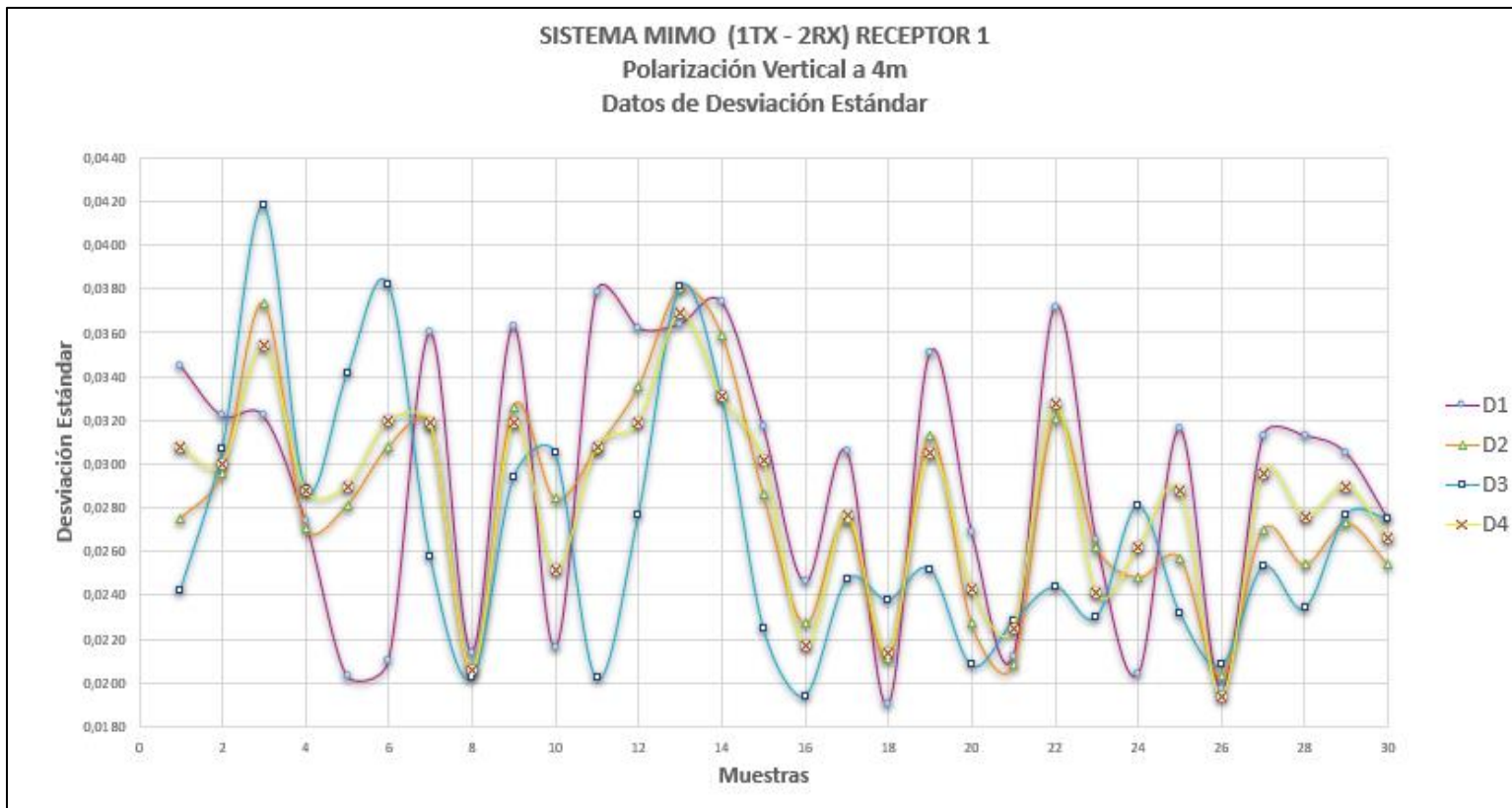
A 2 metros en RX2, la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0430, es decir el 4,3% respecto a su promedio, por lo tanto, a 2 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,7%. La misma que se representa en el Gráfico 23-4.



**Gráfico 23-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 2 metros, RX2 con polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

A 4 metros en RX1, la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0418, es decir el 4,18% respecto a su promedio, por lo tanto, a 4 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,82%. La misma que se representa en el Gráfico 24-4.

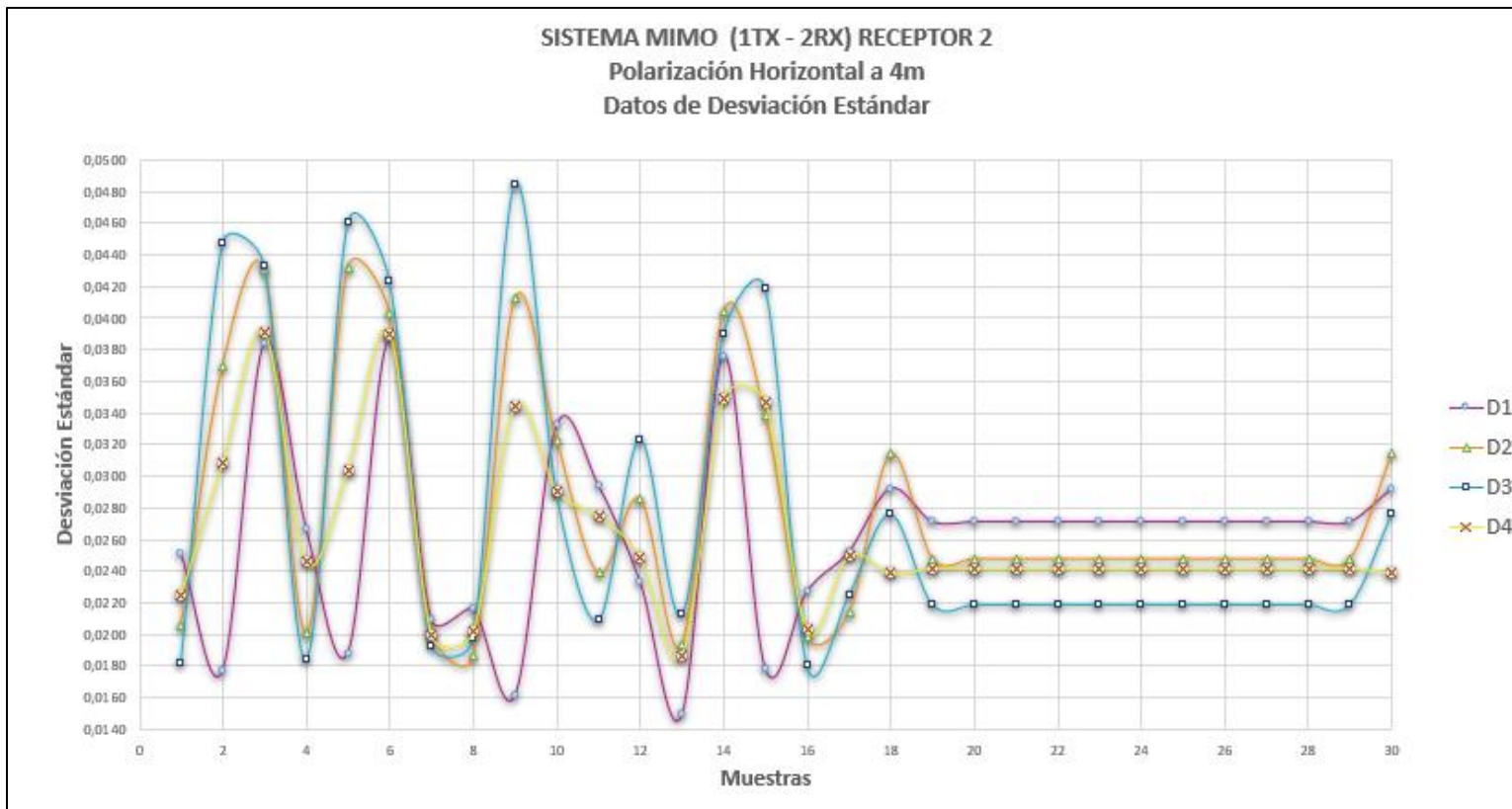


**Gráfico 24-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 4 metros, RX1 con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



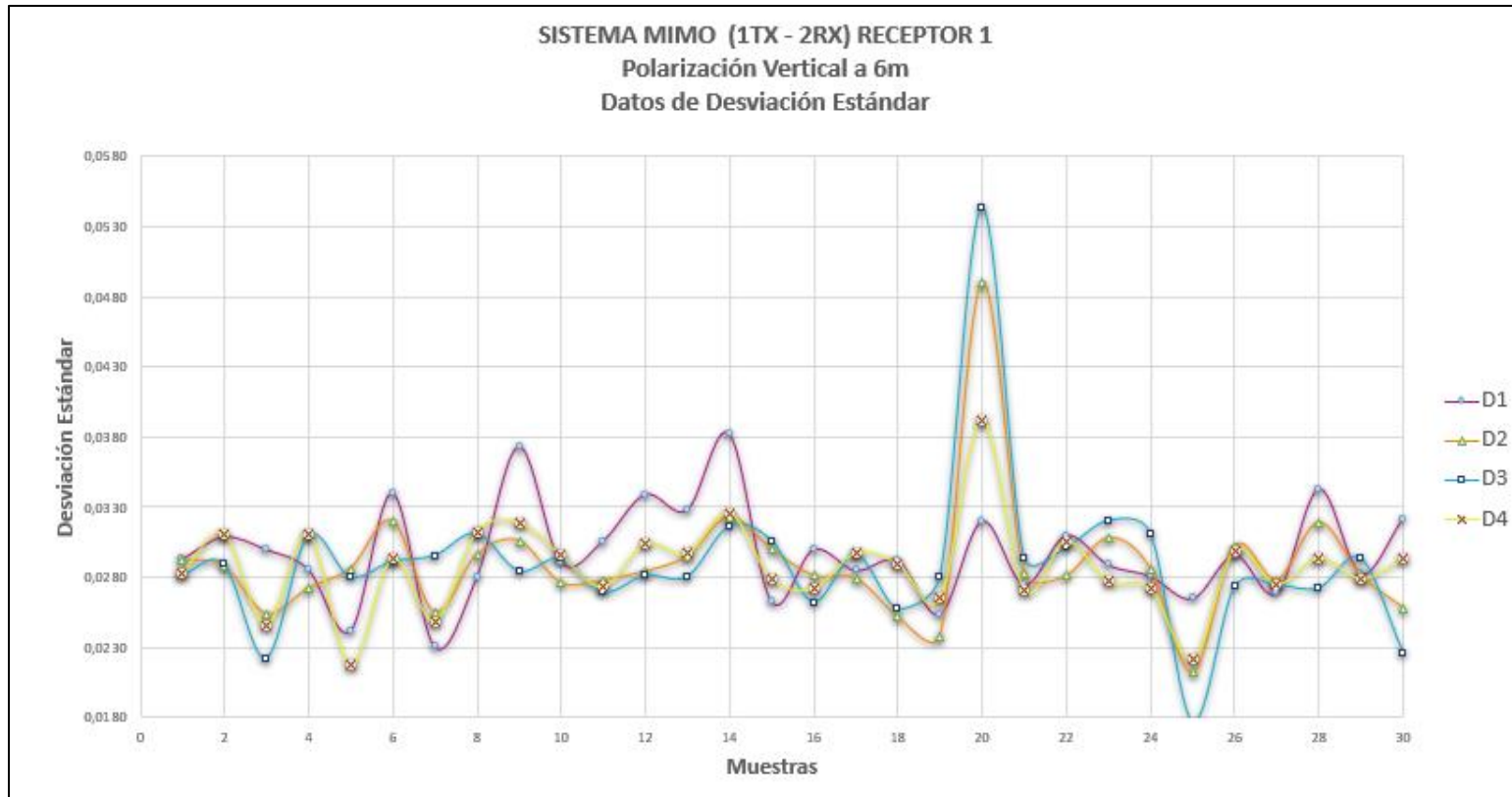
A 4 metros en RX2, la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0484, es decir el 4,84% respecto a su promedio, por lo tanto, a 4 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 95,16%. La misma que se representa en el Gráfico 25-4.



**Gráfico 25-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 4 metros, RX2 con polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

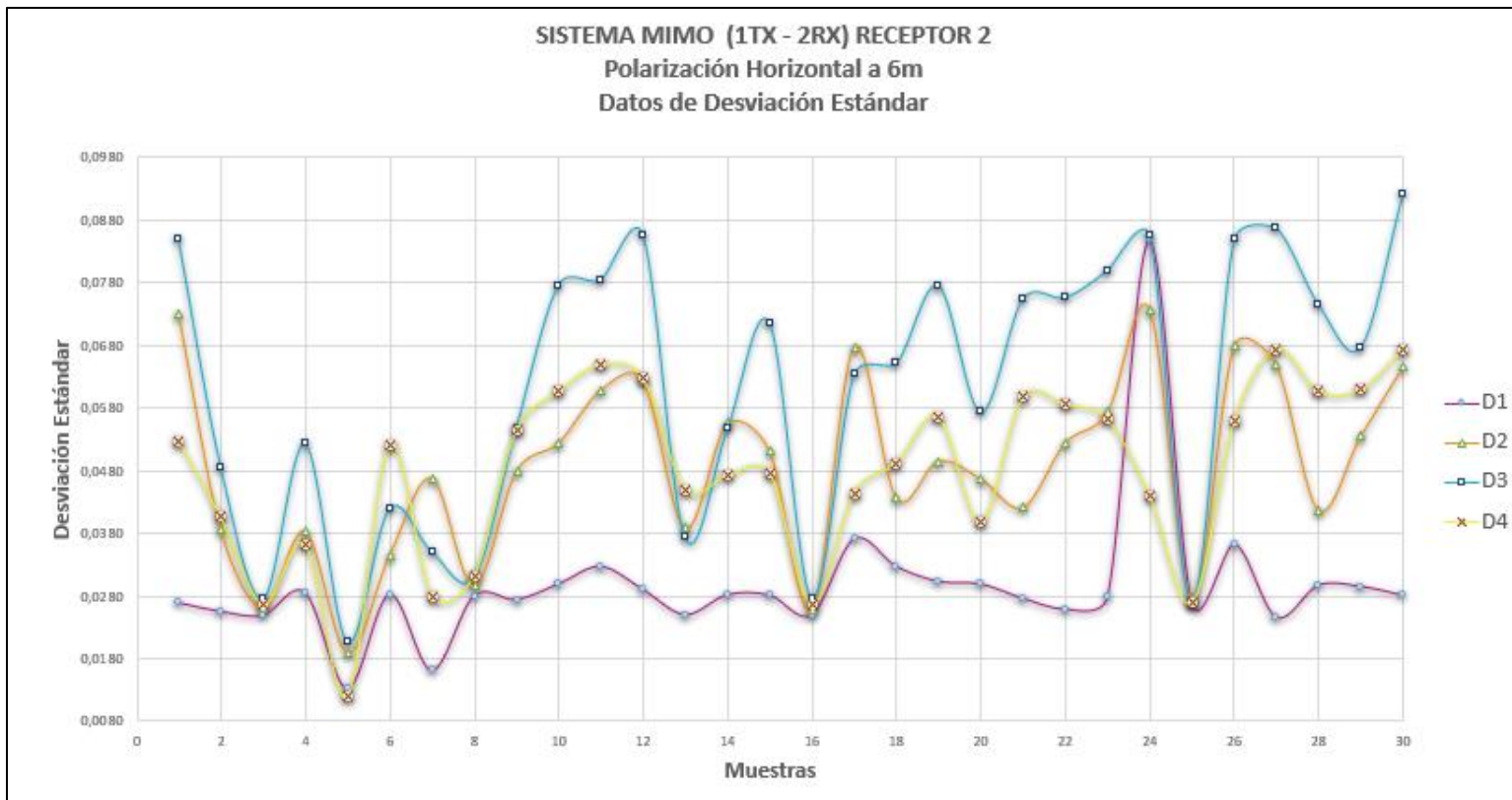
A 6 metros en RX, la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0543, es decir el 5,43% respecto a su promedio, por lo tanto, a 6 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 94,57%. La misma que se representa en el Gráfico 26-4.



**Gráfico 26-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 6 metros, RX1 con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

A 6 metros en RX1, la desviación estándar máxima obtenida se encuentra en el cuadrante 3 y es de 0,0921, es decir el 9,21% respecto a su promedio, por lo tanto, a 6 metros la confiabilidad transmisión – recepción es del 90,79%. La misma que se representa en el Gráfico 27-4.



**Gráfico 27-4:** Datos de desviación estándar SIMO a 6 metros, RX2 con polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.4.3. Relación señal/ruido SNR

En la Tabla 17-4 se detallan los datos de relación señal a ruido obtenidos en las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros por parte de las antenas receptoras RX1 polarizada verticalmente y RX2 polarizada horizontalmente.

**Tabla 17-4:** Resultado de SNR escenario SIMO polarización vertical - horizontal.

SISTEMA MIMO 1 TX/ 2 RXs	RELACIÓN SEÑAL/RUIDO (dB)					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	28,98	31,9	30	20,34	21,49	20,7
Muestra 2	24,69	28,1525	31,31	20,88	20	20,56
Muestra 3	27,48	28,25	31,97	21,67	20,57	21,55
Muestra 4	23,39	30,7	30,55	20,46	20,4	20,55
Muestra 5	25,76	31,33	27,7	20,69	20,3	20,56
Muestra 6	25	32,23	27,06	20,58	21,1	19,56
Muestra 7	23,36	30,25	28,44	19,32	20,76	20,64
Muestra 8	28,22	30,15	31,47	20,76	23	21,7
Muestra 9	22,76	28,55	29,98	20,76	20,5	20,53
Muestra 10	23,93	27,46	29,97	20	22,33	20,61
Muestra 11	19,38	25,2	29,11	22,5	20,37	18,5

Muestra 12	19,44	30,98	29,37	20,75	20,42	20,55
Muestra 13	25,1	26,8	30,41	20,76	24,6	19,12
Muestra 14	19,76	31,07	30,18	21,9	20,33	20,2
Muestra 15	21,89	30,09	29,37	21,15	21,08	20,55
Muestra 16	25,73	29,065	29,795	20,76	20,49	25,94
Muestra 17	26,15	29,51	29,97	18,5	19,61	20,55
Muestra 18	21,42	29,78	30,63	20,76	20,28	20,55
Muestra 19	22,63	34,14	30,02	21,45	22,3	20,55
Muestra 20	23,84	30,03	30,38	20,76	20,54	19,46
Muestra 21	25,46	31,51	30,06	20,68	21,8	20,55
Muestra 22	22,7	31,79	30,83	21,51	20,54	20,58
Muestra 23	20,635	29,51	28,96	20,6	20,1	21,55
Muestra 24	24,315	32,25	30,98	20,87	20,54	20,59
Muestra 25	22,67	30,0675	25,21	18,6	20	25,11
Muestra 26	23,79	31,34	29,53	19,7	21,54	20,59
Muestra 27	20,53	32,47	30,13	20,64	21,52	20,59
Muestra 28	25,27	27,09	30,39	20,76	20,54	21,90
Muestra 29	23,85	27,09	29,74	19,9	22,56	20,59
Muestra 30	20,44	29,18	31,01	21,23	20,28	20,64

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 18-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de SNR para cada distancia a evaluar, expresados en la Tabla 18-3 e ilustrados en los Gráficos 28-4 y 29-4. La cual presenta los siguientes resultados:

- A 2 metros en RX1 se obtuvo un SNR mínimo de 19,38 dB y máximo de 28,98dB. En RX2 se obtuvo un SNR mínimo de 18,5 dB y como máximo de 22,5 dB.
- A 4 metros en RX1 se obtuvo un SNR mínimo de 25,2 dB y máximo de 34,14 dB. En RX2 se obtuvo un SNR mínimo de 19,61 dB y como máximo de 23 dB
- A 6 metros en RX1 se obtuvo un SNR mínimo de 25,21 dB y máximo de 31,94 dB. En RX2 se obtuvo un SNR mínimo de 18,5 dB y como máximo de 21,9 dB.

Por lo tanto, se comprobó que:

- Existe una buena relación SNR, ya que la potencia de las señales es superior a la potencia del ruido. Sin embargo, la antena receptora RX1 presenta mejores relaciones de SNR que RX2 que se encuentra polarizada horizontalmente.
- Los valores de SNR se encuentran dentro del rango de valores óptimos,  $> 20dB$ , garantizando así un sistema de transmisión - recepción eficiente.
- A pesar de que hay valores mínimos de SNR como: 18.5, 19.38 y 19,61dB, se encuentra dentro del rango apropiado ya que los valores mínimos recomendados son de 18dB.

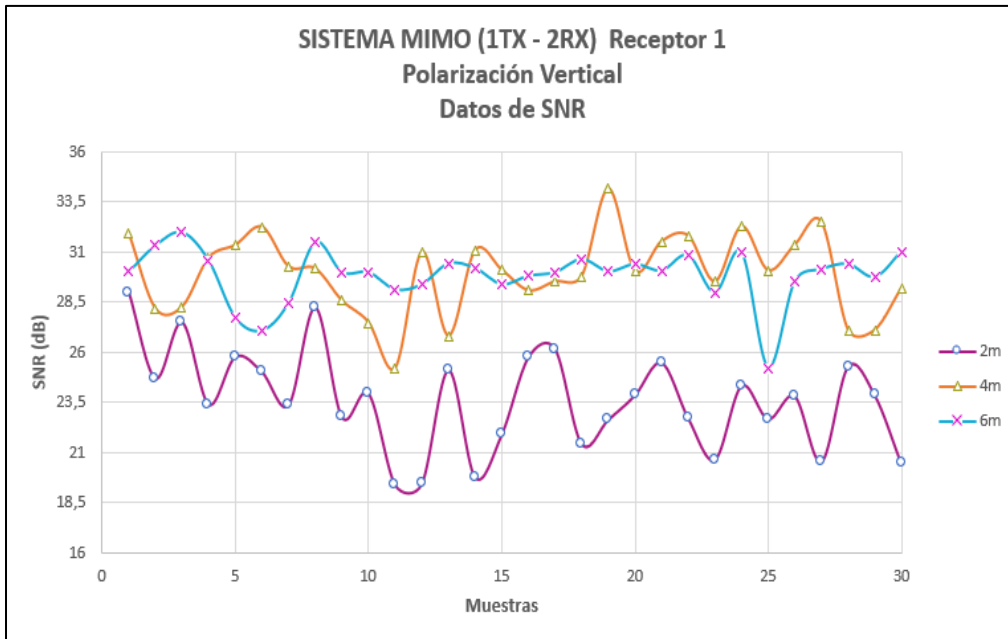
Por tales motivos se puede garantizar un sistema de transmisión - recepción eficiente.

**Tabla 18-4:** Resultado de SNR escenario SIMO polarización vertical - horizontal

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	RELACION SEÑAL/RUIDO (SNR)					
	dB					
	Receptor 1			Receptor 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
<b>Valor Mínimo</b>	19,38	25,2	25,21	18,5	19,61	18,5

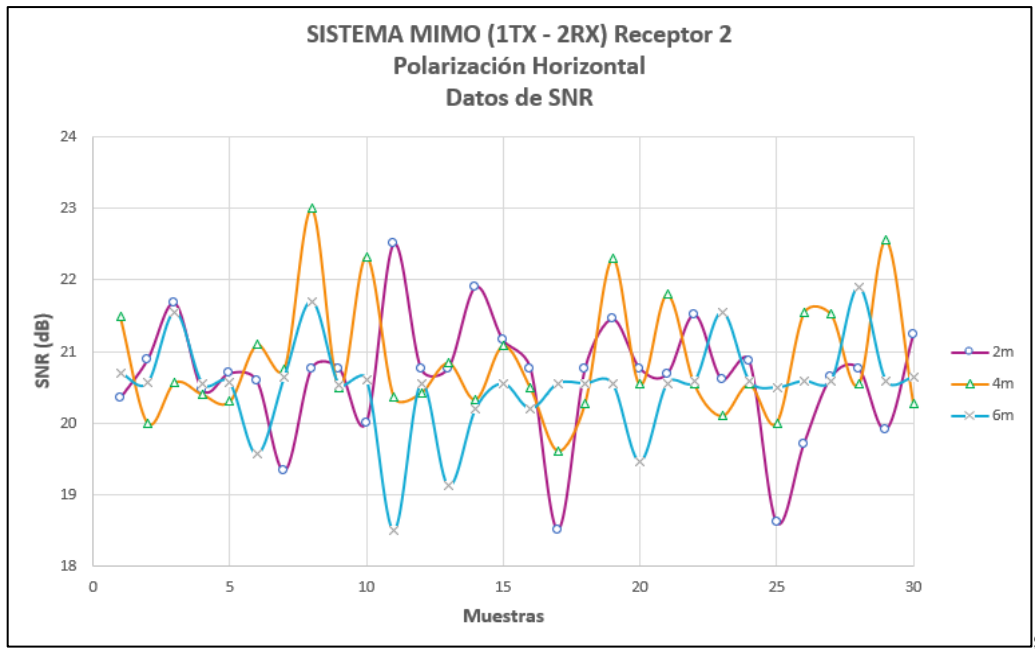
<b>Valor Máximo</b>	28,98	34,14	31,97	22,5	23	21,9
<b>Promedio</b>	23,62	29,93	29,82	20,64	20,87	20,51

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 28-4:** Datos de SNR SIMO, Rx1 con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 29-4:** Datos de SNR SIMO, RX2 con polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.5. Datos escenario MIMO 2X2.

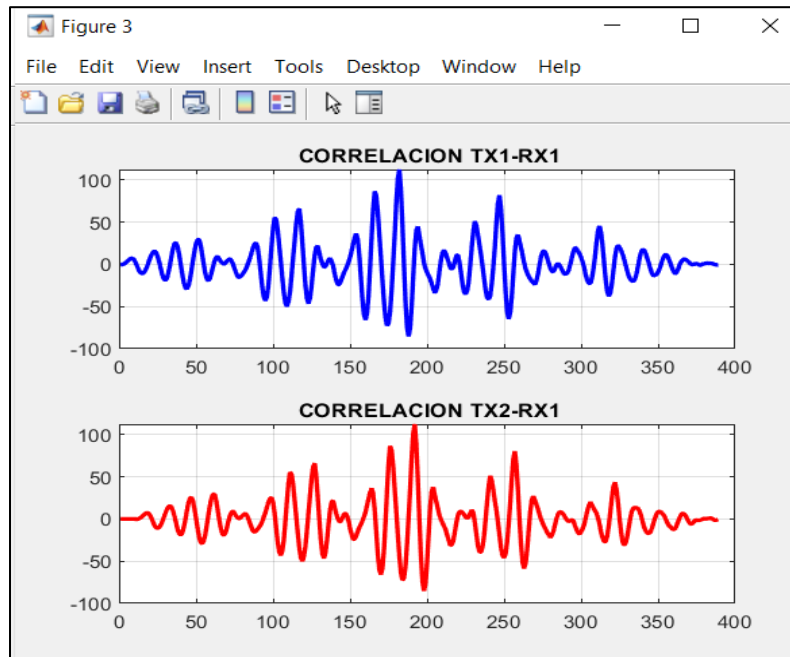
##### 4.1.5.1. Comparación de señales mediante correlación

Como se explicó en el capítulo anterior, el programa diseñado en Matlab para la simulación de un sistema MIMO 2x2 con llevaba una parte importante en su programación, ya que al realizar la transmisión y recepción de información una forma de comprobar que se recibe lo mismo que se transmite, es mediante la correlación de señales ya que esta proporciona una medida de la correspondencia o interrelación entre dos señales, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa.

Se realizó la correlación para cada una de las pruebas obtenidas por los receptores en un sistema con ruido bajo, ruido medio y ruido alto. Se muestran ejemplos de ellos mediante los Gráficos 30-4 a 32-4. Comprobando mediante el pico alto la similitud entre las señales transmitidas y recibidas, demostrando así que las señales están correladas, tanto para un ambiente de bajo ruido como para un

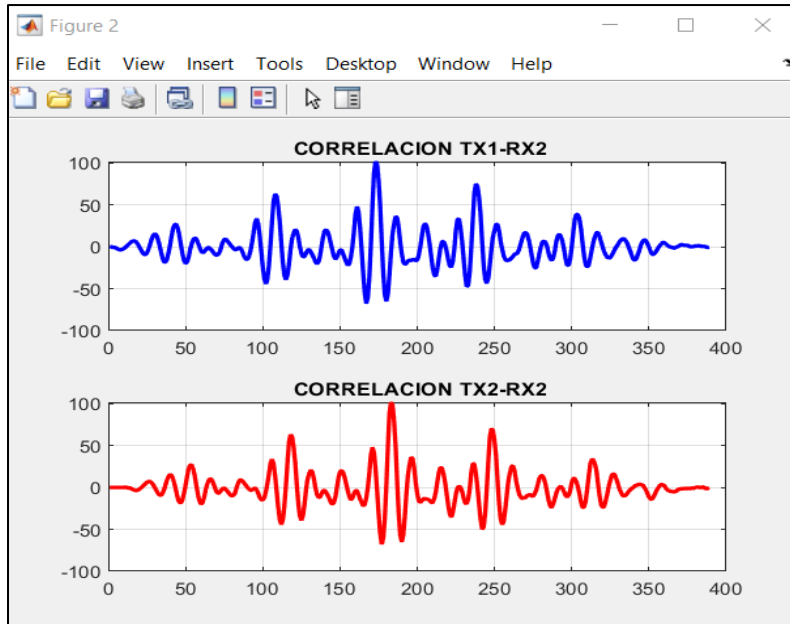


ambiente de ruido medio, sin embargo para ambientes de ruido alto se observa que no existe correlación entre las señales.



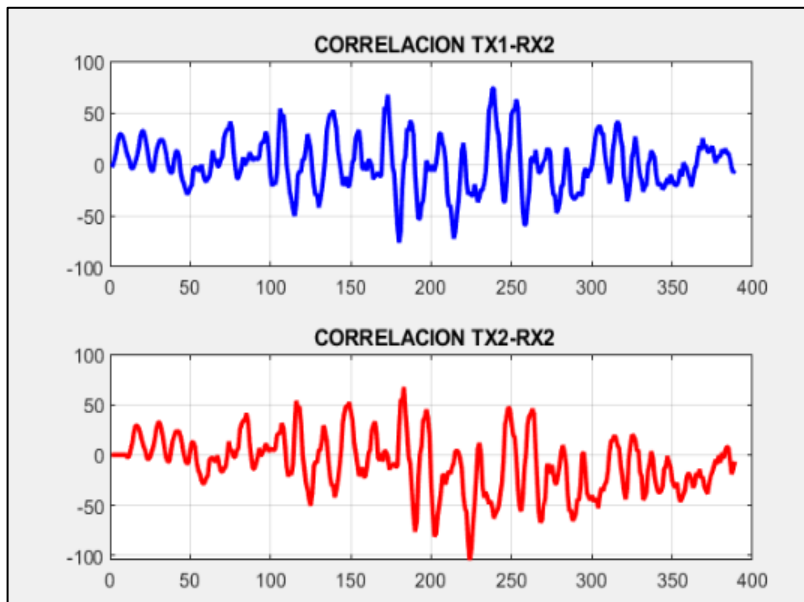
**Gráfico 30-4:** Correlación de señales con ruido bajo.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 31-4:** Correlación de señales con ruido medio.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

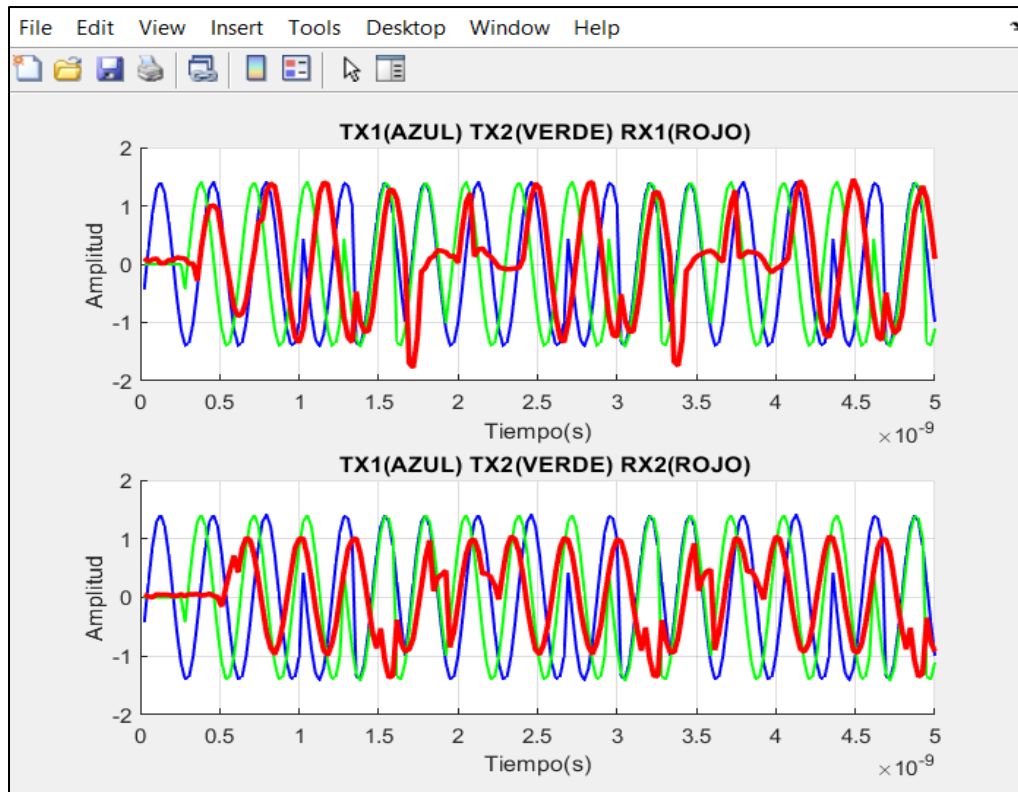


**Gráfico 32-4:** Correlación de señales con ruido alto.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.5.2. Relación señal/ruido SNR

En la Tabla 19-4 se detallan los datos de relación señal a ruido obtenidos en las 30 muestras por parte de las antenas receptoras RX1 y RX2, en un ambiente con ruido bajo.



**Gráfico 33-4:** Señales recibidas en cada receptor con ruido bajo, escenario MIMO 2x2.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

**Tabla 19-4:** Resultado de SNR escenario MIMO 2X2 con ruido bajo.

SISTEMA MIMO	RELACIÓN SEÑAL/RUIDO (SNR)	
	dB	
1 TX/ 2 RXs	RECEPTOR 1	RECEPTOR 2

Muestra 1	48,59	50,28
Muestra 2	45,02	50,81
Muestra 3	45,78	46,01
Muestra 4	45,67	49,3
Muestra 5	32,76	55,76
Muestra 6	42,39	55,79
Muestra 7	41,77	55,8
Muestra 8	45,87	55,49
Muestra 9	45,51	48,93
Muestra 10	48,63	47,74
Muestra 11	47,9	49,61
Muestra 12	46,9	41,11
Muestra 13	48,71	48,36
Muestra 14	48,2	48,23
Muestra 15	48,73	46,5
Muestra 16	48,31	52,08
Muestra 17	49,17	44,79
Muestra 18	47,65	49,87
Muestra 19	48,83	50,5
Muestra 20	49,17	48,48

Muestra 21	49,51	50,81
Muestra 22	45,35	50,74
Muestra 23	46,84	49,17
Muestra 24	45,22	46,76
Muestra 25	46,29	51,34
Muestra 26	44,85	47,12
Muestra 27	46,56	49,06
Muestra 28	52,7	49,62
Muestra 29	46,01	50,25
Muestra 30	43,31	49,67

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

La Tabla 20-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de SNR ilustrados en el Gráfico 34-4. La cual presenta los siguientes resultados:

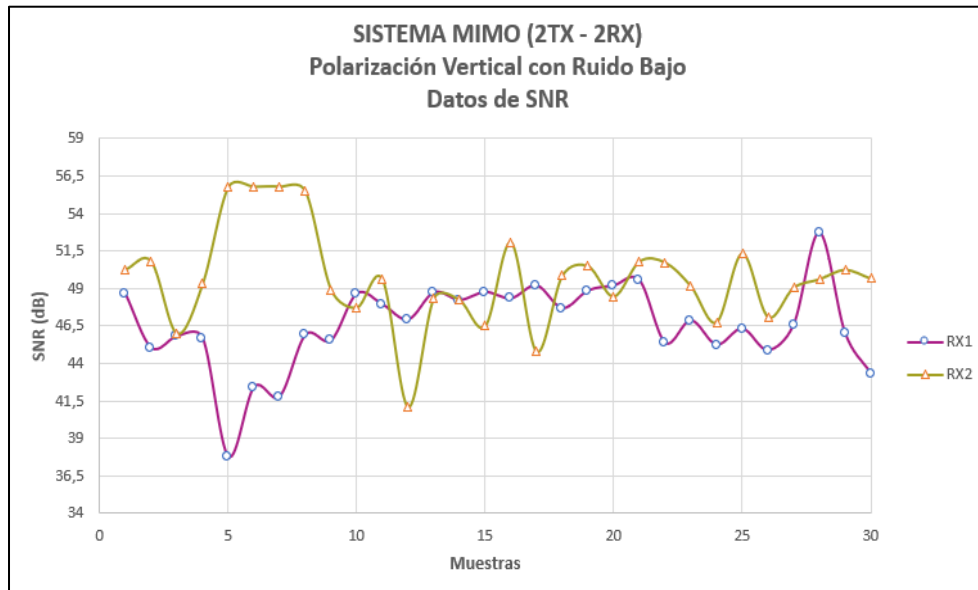
El valor mínimo de SNR obtenido en RX1 es de 32,76 dB y en RX2 es de 41,11 dB, mientras que el valor máximo obtenido en RX1 es de 52,7dB y en Rx2 es de 55,8dB.

Por lo tanto, se puede comprobar que existe una excelente relación SNR, ya que la potencia de la señal es superior a la potencia del ruido con creces. Sin embargo, la antena receptora RX1 presenta mejores relaciones de SNR que RX2. Los valores de SNR se encuentran muy por encima del rango de valores óptimos,  $> 20dB$ , garantizando así un sistema de transmisión - recepción eficiente.

**Tabla 20-4:** SNR mínimos, máximos y promedios MIMO 2x2 con ruido bajo.

SISTEMA MIMO  2TX – 2RX	RELACIÓN SEÑAL/ RUIDO (SNR)	
	dB	
	RECEPTOR 1	RECEPTOR 2
Valor Mínimo	32,76	41,11
Valor Máximo	52,7	55,8
Promedio	46,41	49,67

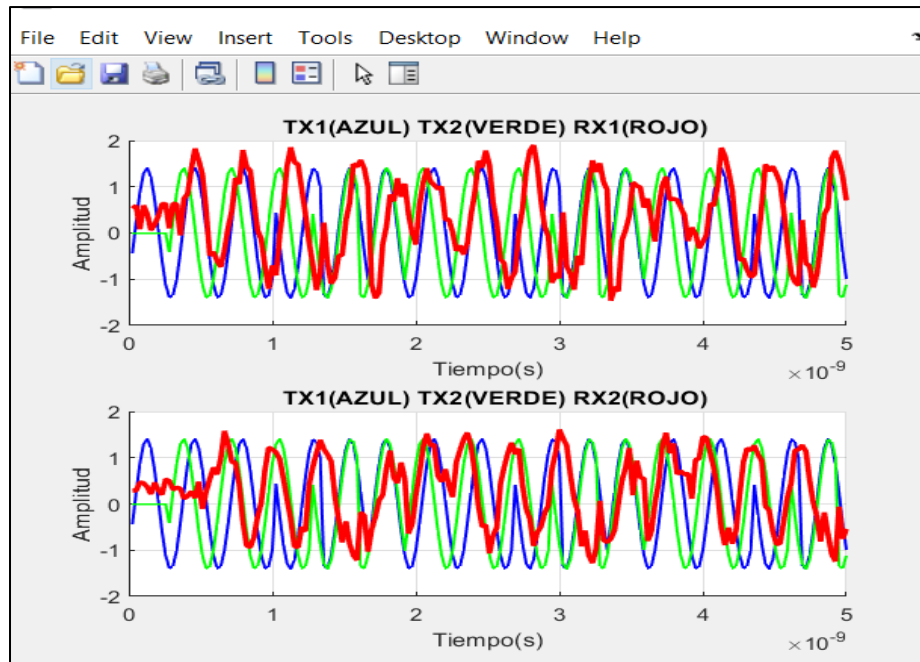
Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 34-4:** Datos de SNR escenario MIMO 2x2 con ruido bajo.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

En la Tabla 21-4 se detallan los datos de relación señal a ruido obtenidos en las 30 muestras por parte de las antenas receptoras RX1 y RX2, en un ambiente con ruido medio.



**Gráfico 35-4:** Señales recibidas en cada receptor con ruido medio, MIMO 2x2.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021X

**Tabla 21-4:** Resultado de SNR escenario MIMO 2X2 con ruido medio.

SISTEMA MIMO 2 TX/ 2 RXs	RELACIÓN SEÑAL/RUIDO (dB)	
	RECEPTOR 1	RECEPTOR 2
Muestra 1	38,78	27,31
Muestra 2	36,73	31,19
Muestra 3	33,13	36,8
Muestra 4	39,79	38,05
Muestra 5	20,67	34,20
Muestra 6	36,73	43,44

Muestra 7	34,67	20,68
Muestra 8	29,39	22,04
Muestra 9	40,4	36,02
Muestra 10	37,02	27,92
Muestra 11	20,26	38,42
Muestra 12	31,9	40,48
Muestra 13	26,87	40,68
Muestra 14	22,6	36,78
Muestra 15	32,9	34,11
Muestra 16	26,96	22,74
Muestra 17	38,98	22,23
Muestra 18	43,37	28,47
Muestra 19	44,58	28,09
Muestra 20	25,33	33,52
Muestra 21	38,33	32,86
Muestra 22	36,84	34,16
Muestra 23	37,88	36,11
Muestra 24	30,68	25,87
Muestra 25	35,28	28,12
Muestra 26	27,23	28,82



Muestra 27	34,87	33,36
Muestra 28	37,34	32,53
Muestra 29	25,62	35,55
Muestra 30	21,92	28,31

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 22-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de SNR para cada distancia a evaluar, e ilustrados en el Gráfico 36-3. La cual presenta los siguientes resultados:

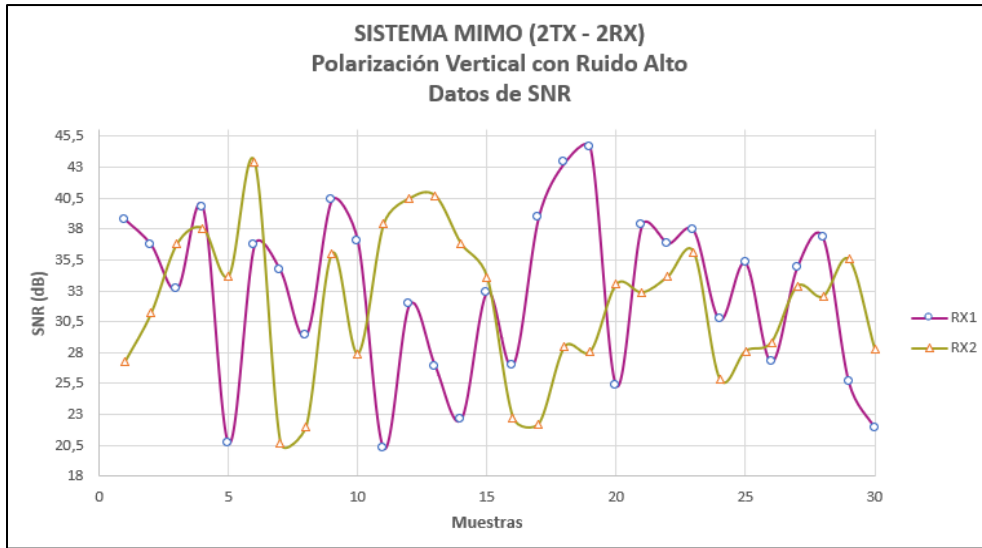
El valor mínimo de SNR obtenido en RX1 es de 20,26 dB y en RX2 es de 20,68dB, mientras que el valor máximo obtenido en RX1 es de 44,58dB y en Rx2 es de 43,44dB.

Por tal motivo, se comprobó que existe una buena relación SNR, ya que la potencia de la señal es superior a la potencia del ruido. Sin embargo, la antena receptora RX1 presenta mejores relaciones de SNR que RX2. Los valores de SNR se encuentran dentro del rango de valores óptimos,  $> 20dB$ , garantizando así un sistema de transmisión - recepción eficiente.

**Tabla 22-4:** SNR mínimos, máximos y promedios MIMO 2X2 con ruido medio.

SISTEMA MIMO  2 TX/ 2 RXs	RELACIÓN SEÑAL/RUIDO (dB)	
	RECEPTOR 1	RECEPTOR 2
Valor Mínimo	20,26	20,68
Valor Máximo	44,58	43,44
Promedio	32,9	31,96

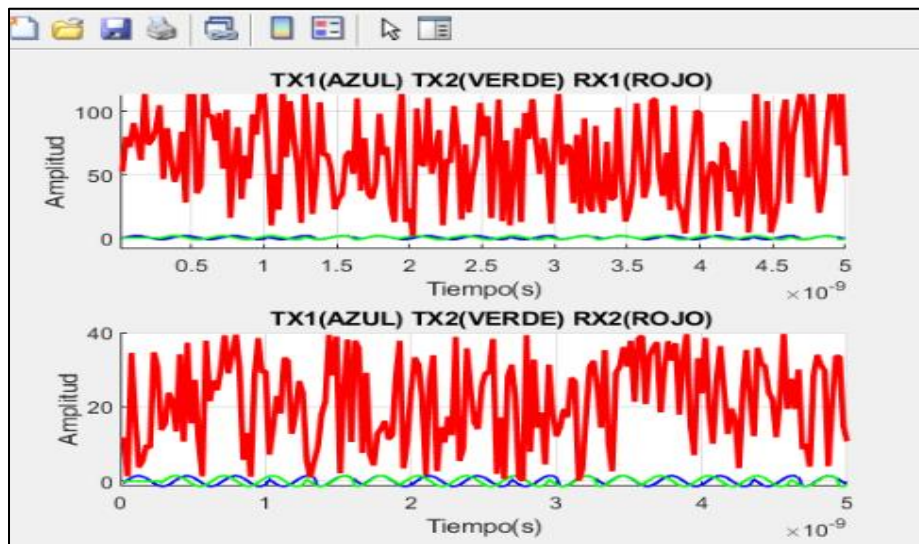
Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 36-4:** Datos de SNR escenario MIMO 2X2, con ruido medio.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

En la Tabla 23-4 se detallan los datos de relación señal a ruido obtenidos en las 30 muestras por parte de las antenas receptoras RX1 y RX2, en un ambiente con ruido alto.



**Gráfico 37-4:** Señales recibidas en cada receptor con ruido alto, MIMO 2x2.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021X

**Tabla 23-4:** Resultado de SNR escenario MIMO 2X2 con ruido alto.

<b>SISTEMA MIMO</b>  <b>1 TX/ 2 RXs</b>	<b>RELACIÓN SEÑAL/RUIDO (dB)</b>	
	<b>RECEPTOR 1</b>	<b>RECEPTOR 2</b>
Muestra 1	4.23	4.29
Muestra 2	3.66	0.24
Muestra 3	1.71	3.56
Muestra 4	2.81	0.59
Muestra 5	2.45	2.25
Muestra 6	0.6	3.31
Muestra 7	5.76	1.65
Muestra 8	1.89	0.19
Muestra 9	3.01	1.33
Muestra 10	1.73	2.91
Muestra 11	0.76	2
Muestra 12	2.51	3.07
Muestra 13	1.77	3.85
Muestra 14	1.55	2.54
Muestra 15	3.47	2.71
Muestra 16	3.67	2.31
Muestra 17	1.32	1.51

Muestra 18	2.83	3.19
Muestra 19	0.87	1.62
Muestra 20	3.74	2.45
Muestra 21	0.5	1.97
Muestra 22	1.37	0.74
Muestra 23	3.22	3.84
Muestra 24	1.40	1.19
Muestra 25	2.12	3.29
Muestra 26	0.54	0.7
Muestra 27	2.9	1.52
Muestra 28	0.83	1.06
Muestra 29	3	2.03
Muestra 30	1.62	1.21

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

La Tabla 24-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de SNR para cada distancia a evaluar, e ilustrados en el Gráfico 38-4. La cual presenta los siguientes resultados:

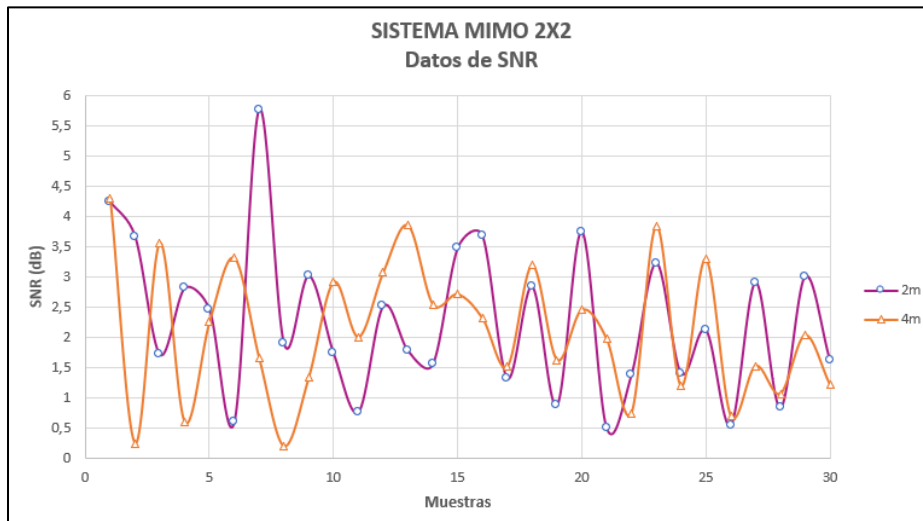
El valor mínimo de SNR obtenido en RX1 es de 0,5 dB y en RX2 es de 0,19 dB, mientras que el valor máximo obtenido en RX1 es de 5,76dB y en Rx2 es de 4,29 dB.

Se comprobó que los valores obtenidos de SNR son malos, ya que la potencia del ruido es superior a la potencia de la señal, por lo tanto, no se puede garantizar un sistema de transmisión - recepción eficiente ni confiable

**Tabla 24-4:** SNR mínimos, máximos y promedios MIMO 2x2 con ruido alto.

SISTEMA MIMO  2TX – 2RX	RELACIÓN SEÑAL/ RUIDO (dB)	
	RECEPTOR 1	RECEPTOR 2
Valor Mínimo	0,50	0,19
Valor Máximo	5,76	4,29
Promedio	2,26	2,10

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 38-4:** Señales recibidas en cada receptor con ruido alto, MIMO 2x2.

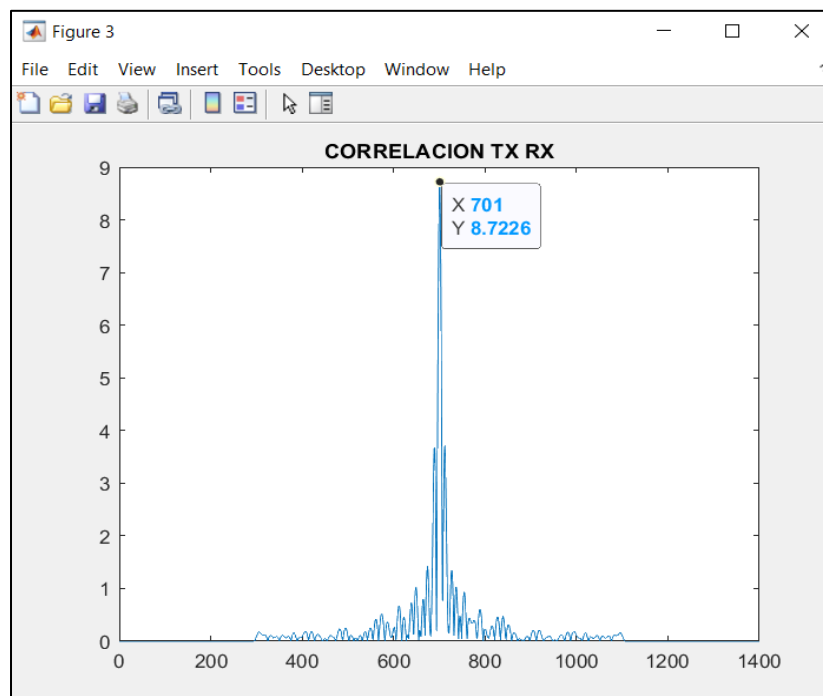
Realizado por: Merino, Daniela; 2021X

#### 4.1.6. Datos escenario 1 RADAR polarización vertical

##### 4.1.6.1. Comparación de señal TX y RX mediante correlación.

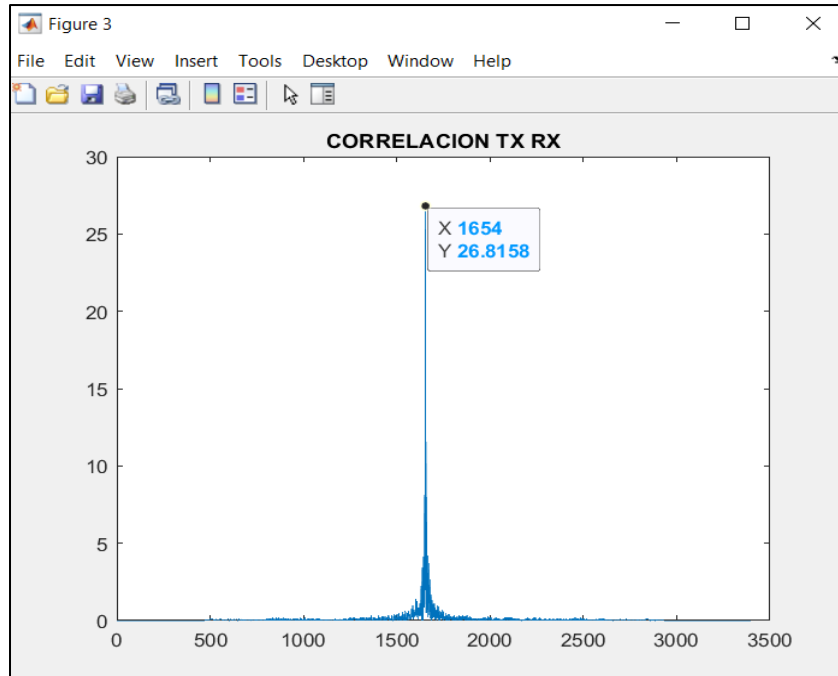
Una forma de comprobar que la información recibida es la misma que se transmitió se lo realiza mediante la correlación de señales ya que esta proporciona una medida de la correspondencia o interrelación entre dos señales, además también del retardo que sufre la señal recibida, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa.

Se realizó la correlación para las muestras obtenidas en el escenario 1 Radar mediante el receptor RX1, a las 3 distancias a evaluar. Se muestran ejemplos de ellos mediante los Gráficos 39-4 a 41-4. Comprobando que existe correlación entre las señales.



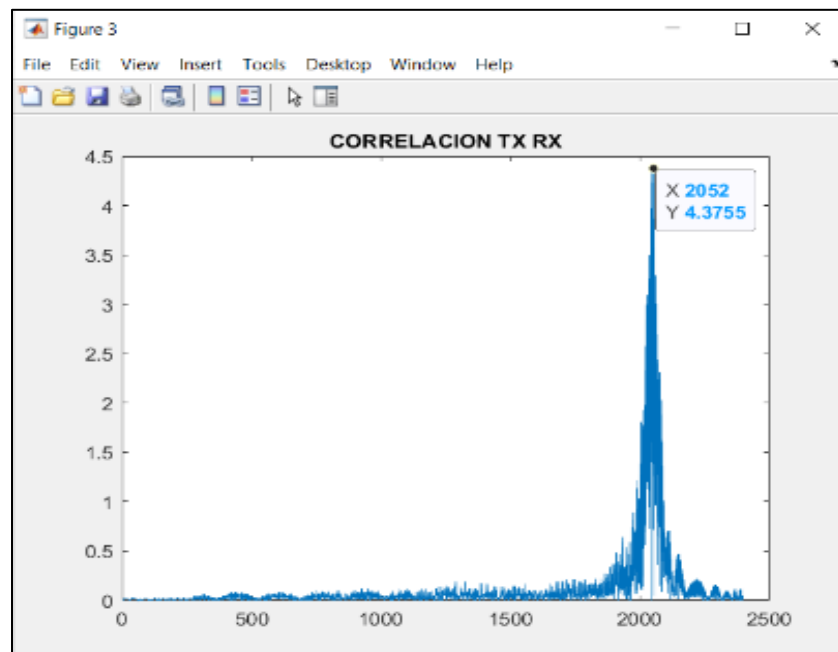
**Gráfico 39-4:** Correlación TX – RX1 a 2 metros, polarización vertical.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 40-4:** Correlación TX – RX1 a 4 metros, polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 41-4:** Correlación TX – RX1 a 6 metros, polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

4.1.6.2. *Tiempos de retardo.*

En la Tabla 25-4 se detallan los tiempos de retardo obtenidos en las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros, receptados por parte de la antena receptora RX1 polarizada verticalmente.

**Tabla 25-4:** Resultado de tiempos de retardo escenario 1 radar con polarización vertical.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 1 RX	TIEMPOS DE RETARDO  ( $\mu$ s)		
	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	3,25	7,78	9,39
Muestra 2	3,75	8,25	9,2
Muestra 3	3,75	8,25	10,17
Muestra 4	3,75	7,31	11,14
Muestra 5	3,63	7,31	11,72
Muestra 6	5,49	7,47	11,14
Muestra 7	3,5	7,93	11,72
Muestra 8	5,74	6,85	11,92
Muestra 9	5,24	7,78	11,92
Muestra 10	4,74	7,31	11,92
Muestra 11	3,5	6,85	9,2
Muestra 12	3,5	6,85	10,17



Muestra 13	4,28	8,25	9,78
Muestra 14	4,25	7,31	9,8
Muestra 15	5,49	7,51	11,72
Muestra 16	3,24	8,09	11,14
Muestra 17	5,24	6,38	9,2
Muestra 18	3	6,85	11,14
Muestra 19	3	7,47	9,2
Muestra 20	3,5	7,62	9,78
Muestra 21	5,49	6,38	11,14
Muestra 22	4,25	7,62	11,92
Muestra 23	4,9	8,4	11,14
Muestra 24	5,74	7,78	9,2
Muestra 25	5,24	6,69	9,2
Muestra 26	3,25	6,54	11,14
Muestra 27	3,5	6,85	9,2
Muestra 28	3,25	7,78	11,14
Muestra 29	3,25	6,54	11,72
Muestra 30	5,74	6,69	11,14

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 26-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de los retardos para cada distancia a evaluar e ilustrados en el Gráfico 42-4. La cual presenta los siguientes resultados:

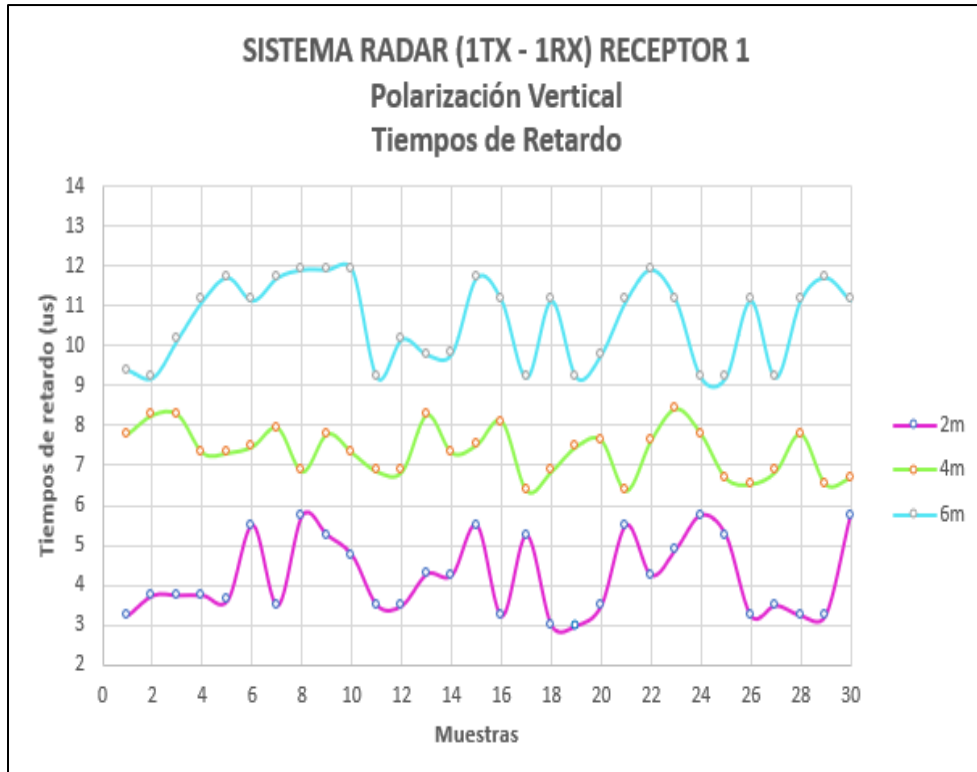
- A 2 metros se obtuvo un retardo mínimo de  $3 \mu s$  y como retardo máximo de  $6,49 \mu s$ .
- A 4 metros se obtuvo un retardo mínimo de  $6,38 \mu s$  y como retardo máximo de  $8,4 \mu s$ .
- A 6 metros se obtuvo un retardo mínimo de  $9,2 \mu s$  y como retardo máximo de  $11,92 \mu s$ .

Observando que a medida que aumenta la distancia a la que se encuentra el objeto el retardo aumenta, sin embargo, los resultados obtenidos en el escenario son tiempos de retardo óptimos para un sistema radar.

**Tabla 26-4:** Mínimo, máximo y promedio de tiempos de retardo escenario 1 radar p.v.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 1 RX	TIEMPOS DE RETARDO  ( $\mu s$ )		
	2 metros	4 metros	6 metros
Valor Mínimo	3	6,38	9,2
Valor Máximo	5,74	8,4	11,92
Promedio	4,16	7,36	10,61

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 42-4:** Tiempos de retardo, escenario 1 RADAR con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.6.3. Radargrama

En la Tabla 27-4 se detallan las distancias a las que fue detectada la placa de cobre obtenidas en las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6m, obtenidos por parte de la antena receptora RX1 polarizada verticalmente.

**Tabla 27-4:** Resultado de Radargrama escenario 1 radar con polarización vertical.

SISTEMA RADAR	RADARGRAMA
	(Metros)

<b>1 TX/ 1 RX</b>	<b>2 metros</b>	<b>4 metros</b>	<b>6 metros</b>
Muestra 1	1,4	4,2	5,6
Muestra 2	1,6	4,5	5,5
Muestra 3	1,6	4,5	6
Muestra 4	1,6	3,9	6,5
Muestra 5	2,7	3,9	6,8
Muestra 6	2,3	4	6,5
Muestra 7	1,5	4,3	6,8
Muestra 8	2,4	3,6	6,9
Muestra 9	2,2	4,2	6,9
Muestra 10	2	3,9	6,9
Muestra 11	1,5	3,6	5,5
Muestra 12	1,5	4,6	6
Muestra 13	1,3	4,5	5,8
Muestra 14	1,8	3,9	6
Muestra 15	2,7	4,6	6,8
Muestra 16	1,4	4,4	6,5
Muestra 17	2,2	3,3	5,5
Muestra 18	1,3	3,6	6,5
Muestra 19	1,3	4	5,5

Muestra 20	1,5	4,1	5,8
Muestra 21	2,3	3,3	6,5
Muestra 22	1,8	4,1	6,9
Muestra 23	1,2	4,7	6,5
Muestra 24	2,4	4,2	5,5
Muestra 25	2,2	3,5	5,5
Muestra 26	1,4	3,4	6,5
Muestra 27	1,5	3,6	5,5
Muestra 28	1,4	4,2	6,5
Muestra 29	1,4	3,4	6,8
Muestra 30	2,4	3,5	6,5

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

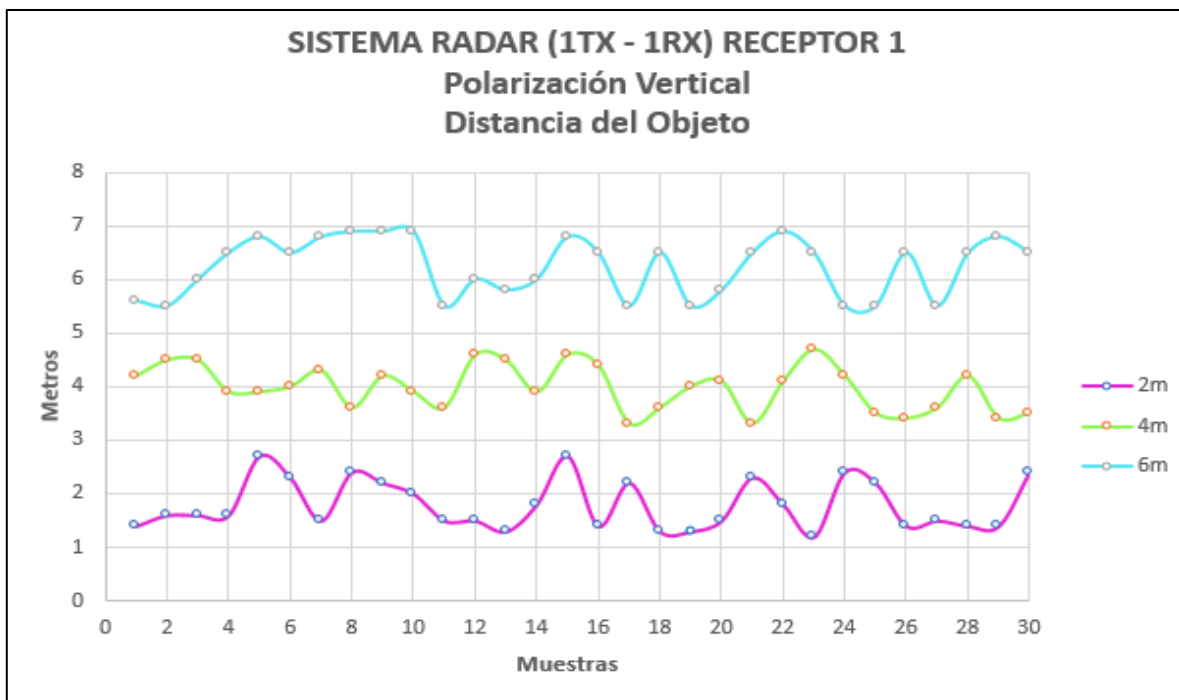
La Tabla 28-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de las distancias a las que se detectó el objeto, e ilustrados en el Gráfico 43-4. La cual presenta los siguientes resultados:

- A 2 metros se obtuvo una distancia mínima de 1,2 metros y como máximo de 2,7 metros, dando como promedio una distancia de 1,9 metros, lo cual es apropiado ya que tiene una diferencia de 0,1 metros respecto al valor real al que se ubicó la placa de cobre.
- A 4 metros se obtuvo una distancia mínima de 3,3 metros y como máximo de 4,7 metros, dando como promedio una distancia de 4 metros, lo cual es excelente ya que no tiene diferencia respecto al valor real al que se ubicó la placa de cobre.
- A 6 metros se obtuvo una distancia mínima de 5,5 metros y como máximo de 6,2 metros, dando como promedio una distancia de 6,2 metros, lo cual es apropiado ya que tiene una diferencia de 0,2 metros respecto al valor real al que se ubicó la placa de cobre.

**Tabla 28-4:** Mínimo, máximo y promedio de distancias del objeto escenario 1 radar p.v.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 1 RX	RADARGRAMA (Metros)		
	2 m	4 m	6 m
Valor Mínimo	1,2	3,3	5,5
Valor Máximo	2,7	4,7	6,9
Promedio	1,9	4,0	6,2

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 43-4:** Distancia del objeto detectado, escenario 1 RADAR con p.v.

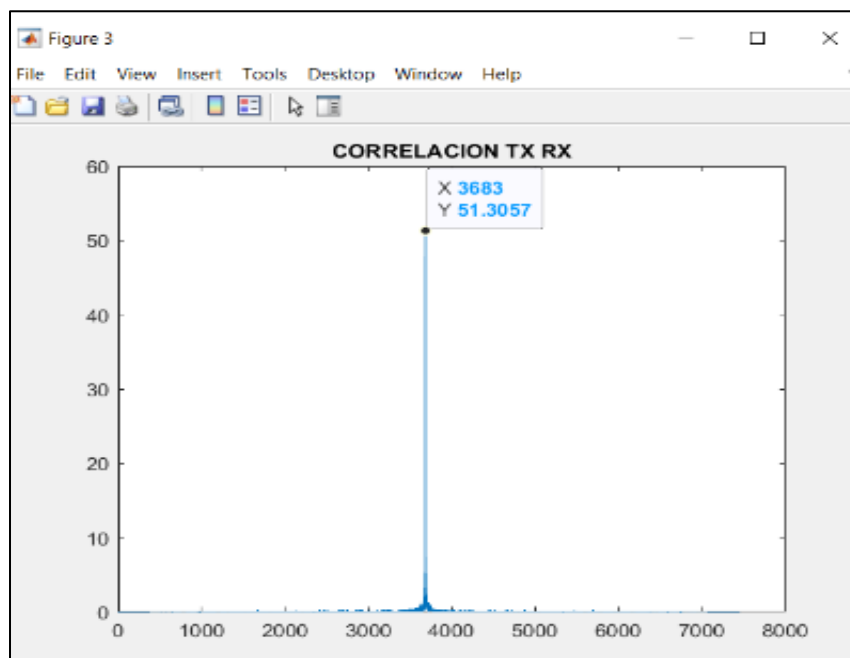
Realizado por: Merino, Daniela; 2021

**4.1.7. Datos escenario 1 RADAR polarización horizontal**

#### 4.1.7.1. Comparación de señal tx y Rx mediante correlación.

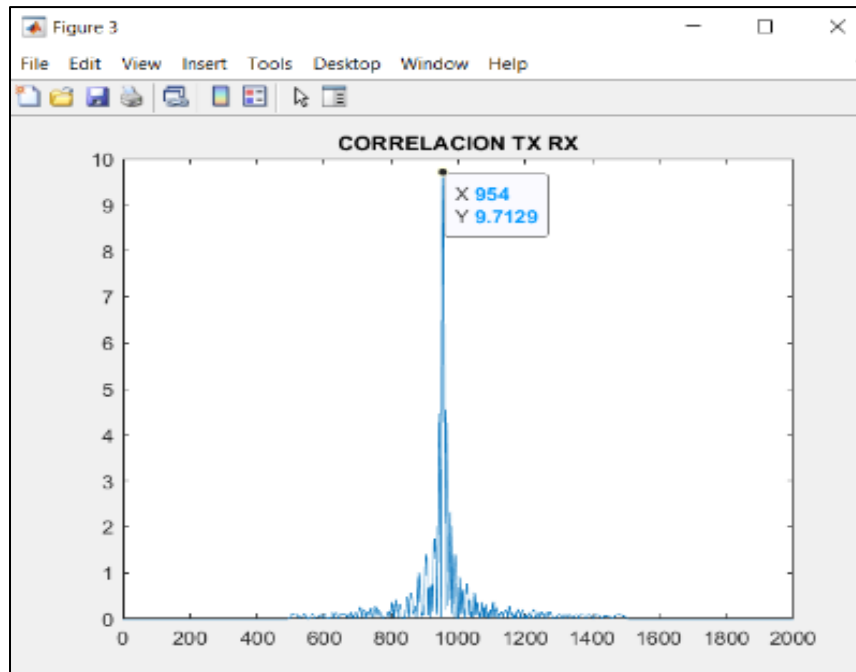
Para asegurar que la información recibida es la misma que se transmitió, se realizó la correlación de señales ya que esta proporciona una medida de la correspondencia o interrelación, además también del retardo que sufre la señal recibida, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa.

Se realizó la correlación para las muestras obtenidas en el escenario 1 Radar mediante el receptor RX1 polarizado horizontalmente, a las 3 distancias a evaluar. Se muestran ejemplos de ellos mediante los Gráficos 44-4 a 46-4. Comprobando de esta manera la similitud entre la señal chirp TX y la señal chirp RX a las diferentes distancias, ya que al obtener un pico alto este indica que las señales transmitidas están presentes en la señal recibida, demostrando así que las señales están correladas.



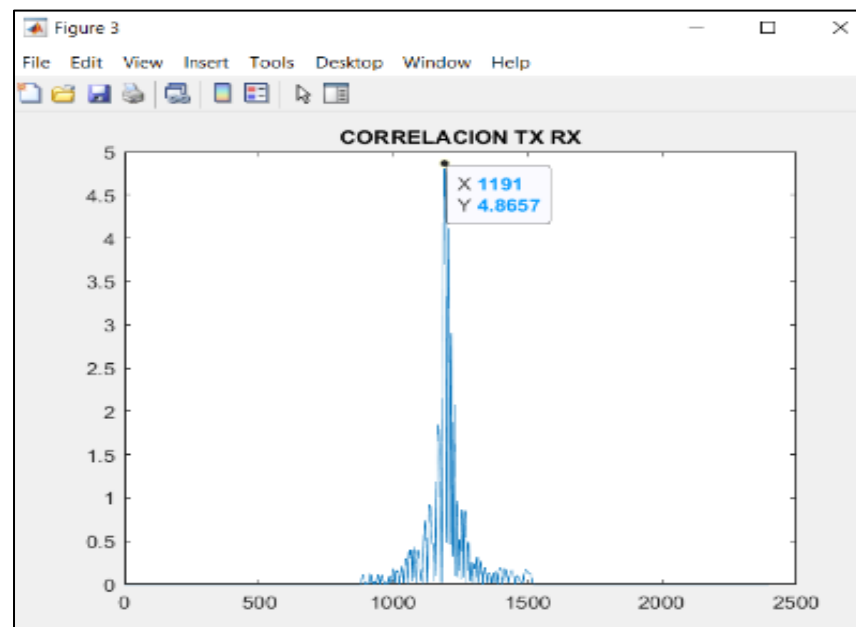
**Gráfico 44-4:** Correlación TX – RX1 a 2 metros, polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 45-4:** Correlación TX – RX1 a 4 metros, polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 46-4:** Correlación TX – RX1 a 6 metros, polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



4.1.7.2. *Tiempos de retardo.*

En la Tabla 29-4 se detallan los tiempos de retardo obtenidos en las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros, receptados por parte de la antena receptora RX1 polarizada horizontalmente.

**Tabla 29-4:** Resultado de tiempos de retardo, escenario 1 radar polarización horizontal.

SISTEMA RADAR  1 TX / 1 RX	TIEMPOS DE RETARDO  ( $\mu s$ )		
	2 metros	4 metros	6 metros
Muestra 1	3,11	8,45	13,27
Muestra 2	3,64	9,44	13,22
Muestra 3	3,64	7,27	10,25
Muestra 4	5,44	8,24	9,39
Muestra 5	4,44	8,85	10,68
Muestra 6	5,1	8,45	11,11
Muestra 7	4,44	9,53	11,11
Muestra 8	5,31	8,65	11,11
Muestra 9	5,76	7,05	11,11
Muestra 10	5,14	8,85	11,11
Muestra 11	3,4	7,05	10,25
Muestra 12	3,77	8,85	11,98

Muestra 13	3,77	8,65	11,11
Muestra 14	4,44	8,65	11,98
Muestra 15	3,9	8,45	11,98
Muestra 16	4,21	6,43	10,25
Muestra 17	3,77	7,55	11,98
Muestra 18	5,76	6,03	11,98
Muestra 19	5,76	7,04	11,11
Muestra 20	3,4	6,03	11,98
Muestra 21	3,4	6,63	10,25
Muestra 22	3,77	7,64	9,82
Muestra 23	5,32	9,25	9,39
Muestra 24	5,1	9,05	10,96
Muestra 25	4,44	9,05	11,11
Muestra 26	3,61	9,05	12,4
Muestra 27	3,11	9,25	9,82
Muestra 28	5,1	9,25	10,18
Muestra 29	4,21	9,25	9,82
Muestra 30	3,68	9,25	9,82

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 30-4 los valores mínimos, máximos y promedios de los retardos para cada distancia a evaluar, e ilustrados en el Gráfico 47-4. La cual presenta los siguientes resultados:

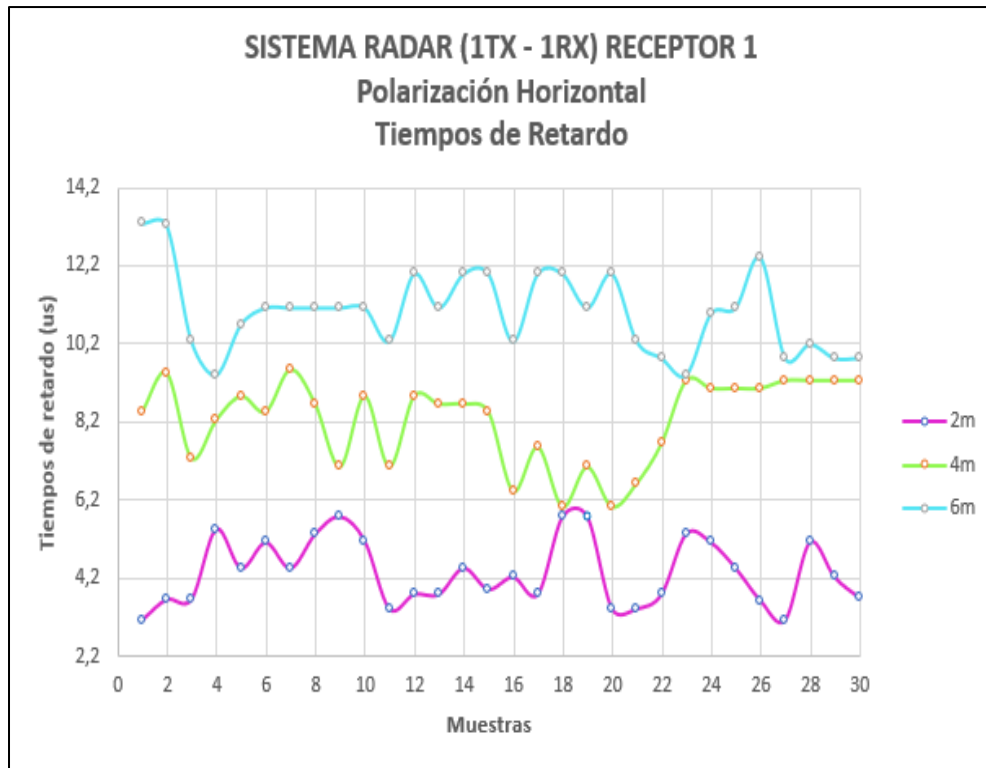
- A 2 metros se obtuvo un retardo mínimo de 3,11  $\mu s$  y como retardo máximo de 5,76  $\mu s$ .
- A 4 metros se obtuvo un retardo mínimo de 6,03  $\mu s$  y como retardo máximo de 9,53  $\mu s$ .
- A 6 metros se obtuvo un retardo mínimo de 9,39  $\mu s$  y como retardo máximo de 13,27  $\mu s$ .

Observando que a medida que aumenta la distancia a la que se encuentra el objeto el retardo aumenta, sin embargo, los resultados obtenidos en el escenario son tiempos de retardo óptimos para un sistema radar.

**Tabla 30-4:** Mínimo, máximo y promedio de tiempos de retardo, escenario 1 radar p.h.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 1 RX	TIEMPOS DE RETARDO ( $\mu s$ )		
	2 metros	4 metros	6 metros
Valor Mínimo	3,11	6,03	9,39
Valor Máximo	5,76	9,53	13,27
Promedio	4,33	8,24	11,02

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 47-4:** Tiempos de retardo, escenario 1 RADAR con p.h.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.7.3. Radargrama

En la Tabla 31-4 se detallan las distancias a las que fue detectada la placa de cobre obtenidas en las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros, obtenidos por parte de la antena receptora RX1 polarizada horizontalmente.

**Tabla 31-4:** Resultado de Radargrama, escenario 1 radar con polarización horizontal.

SISTEMA RADAR	RADARGRAMA (Metros)		
	1 TX/ 1 RX	2 metros	4 metros

Muestra 1	1,5	4,4	6,6
Muestra 2	1,7	5,2	6,6
Muestra 3	1,7	3,8	5,9
Muestra 4	2,7	4,3	5,7
Muestra 5	2,1	4,6	6
Muestra 6	2,4	4,4	6,1
Muestra 7	2,1	5,4	6,1
Muestra 8	2,5	4,5	6,1
Muestra 9	2,7	3,7	6,1
Muestra 10	2,2	4,6	6,1
Muestra 11	1,6	3,7	5,9
Muestra 12	1,8	4,6	6,3
Muestra 13	1,8	4,5	6,1
Muestra 14	2,1	4,5	6,3
Muestra 15	1,6	4,4	6,3
Muestra 16	2	3,4	5,9
Muestra 17	1,8	4	6,3
Muestra 18	2,7	3,2	6,3
Muestra 19	2,7	3,7	6,1
Muestra 20	1,6	3,2	6,3

Muestra 21	1,6	3,5	5,9
Muestra 22	1,8	4	5,8
Muestra 23	2,5	4,8	5,7
Muestra 24	2,4	4,7	6,1
Muestra 25	2,1	4,7	6,1
Muestra 26	1,7	4,7	6,4
Muestra 27	1,5	4,8	5,8
Muestra 28	2,4	4,8	6
Muestra 29	2	4,8	5,8
Muestra 30	1,7	4,8	5,8

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

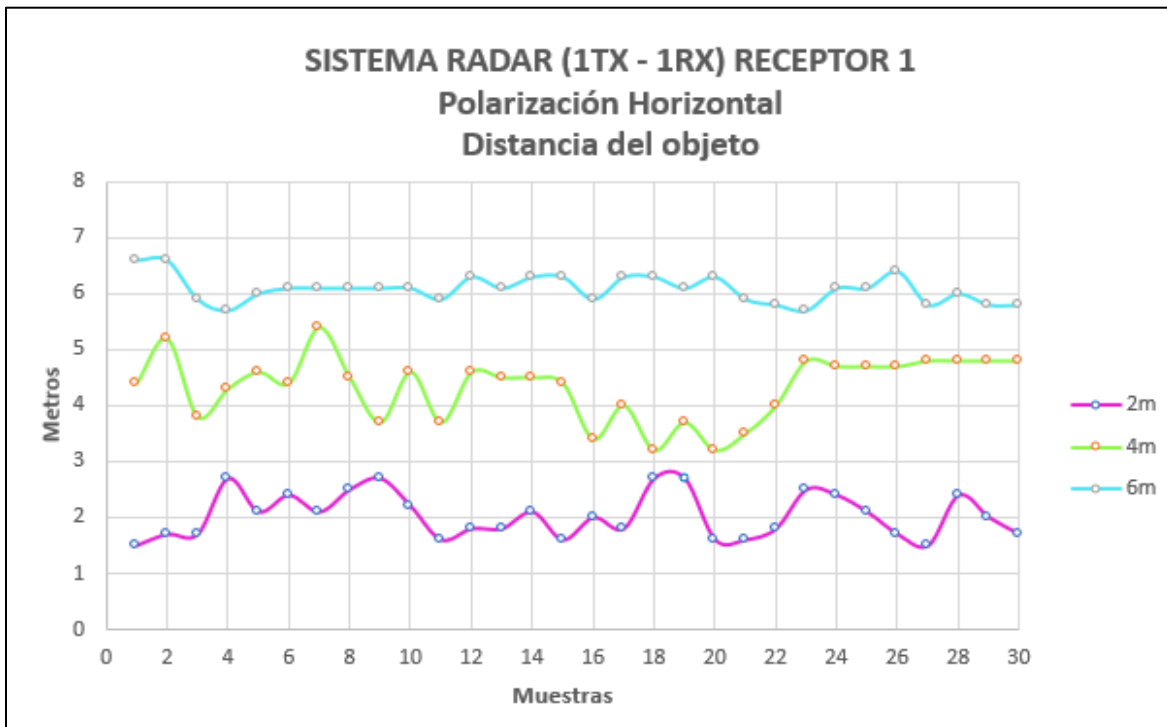
La Tabla 32-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de las distancias a las que se detectó el objeto, e ilustrados en el Gráfico 48-4. La cual presenta los siguientes resultados:

- A 2 metros se obtuvo una distancia mínima de 1,5 metros y como máximo de 2,7 metros, dando como promedio una distancia de 2 metros, lo cual es excelente ya que no tiene diferencia respecto al valor real al que se ubicó la placa de cobre.
- A 4 metros se obtuvo una distancia mínima de 3,2 metros y como máximo de 5,4 metros, dando como promedio una distancia de 4,3 metros, lo cual es apropiado ya que tiene una diferencia de 0,3 metros respecto al valor real al que se ubicó la placa de cobre.
- A 6 metros se obtuvo una distancia mínima de 5,7 metros y como máximo de 6,6 metros, dando como promedio una distancia de 6,1 metros, lo cual es apropiado ya que tiene una diferencia de 0,1 metros respecto al valor real al que se ubicó la placa de cobre.

**Tabla 32-4:** Mínimo, máximo y promedio de distancias del objeto, escenario 1 radar p.h.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 1 RX	RADARGRAMA (Metros)		
	2 metros	4 metros	6 metros
Valor Mínimo	1,5	3,2	5,7
Valor Máximo	2,7	5,4	6,6
Promedio	2,0	4,3	6,1

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 48-4:** Distancia del objeto detectado, escenario 1 RADAR con p.h.

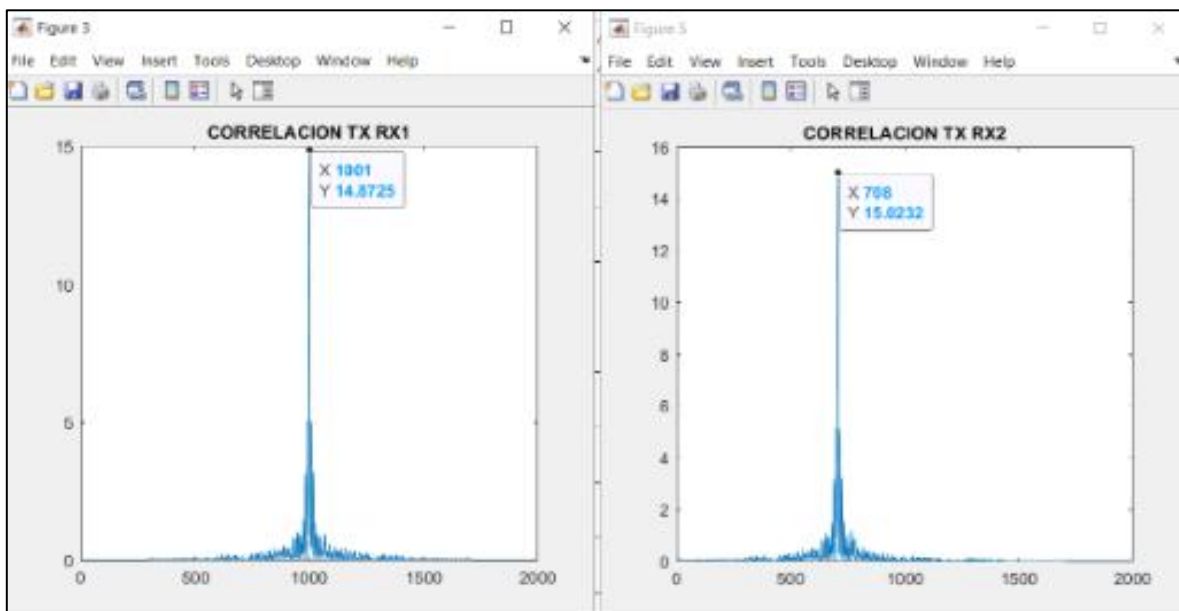
Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.8. Datos escenario 2 RADAR polarización vertical

##### 4.1.8.1. Comparación de señal TX y RX mediante correlación.

Para asegurar que la información recibida es la misma que se transmitió en el escenario 2 radar con polarización vertical, se realizó la correlación de señales ya que esta proporciona una medida de la correspondencia o interrelación, además también del retardo que sufre la señal recibida, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa.

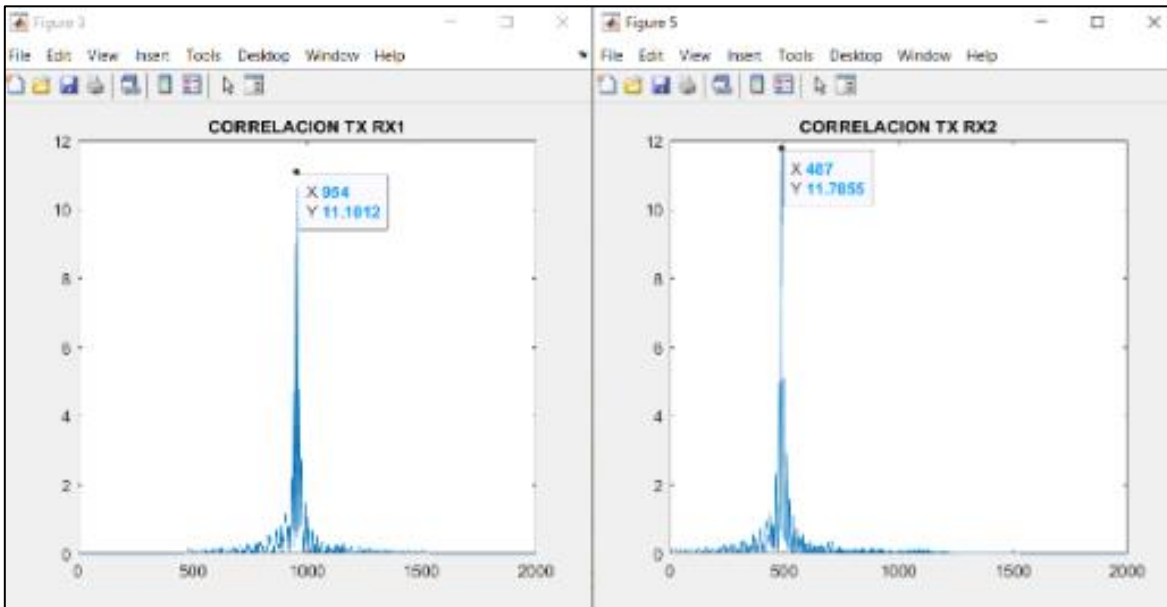
Se realizó la correlación para las muestras obtenidas en el escenario 2 Radar mediante las antenas receptoras RX1 y RX2, polarizadas verticalmente, a las 3 distancias a evaluar. Se muestran ejemplos de ello mediante los Gráficos 49-4 a 51-4. Comprobando de esta manera la similitud entre la señal chirp TX y las señales chirp recibidas por los 2 receptores, ya que al obtener un pico alto este indica que la señal transmitida está presente en las señales recibidas, demostrando así que las señales están correladas.



**Gráfico 49-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 a 2 metros, escenario 2 RADAR p.v.

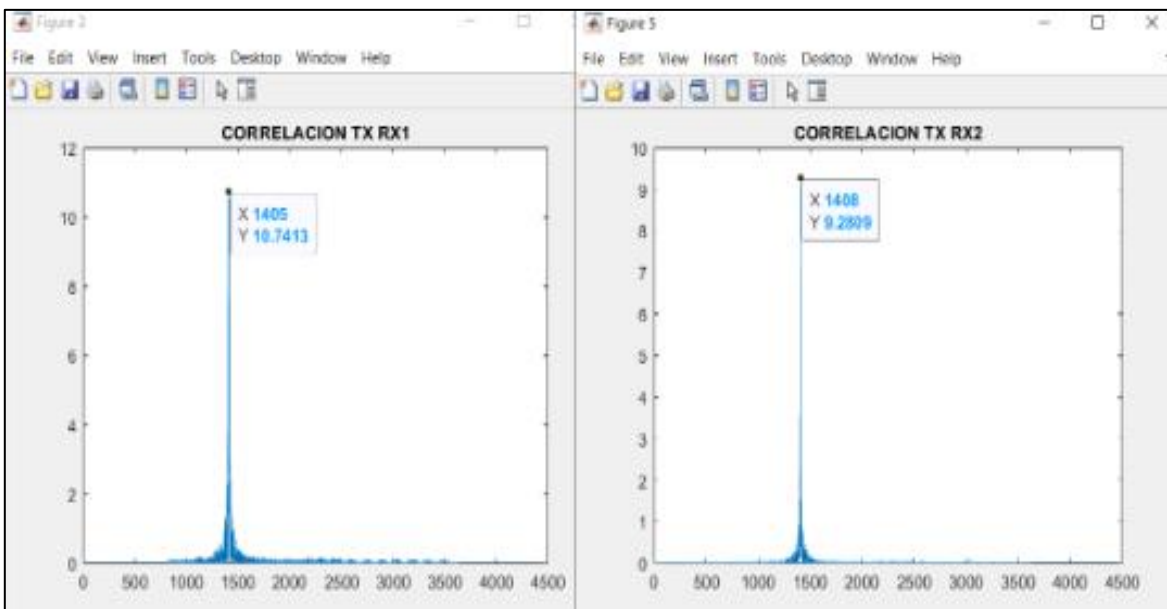
Realizado por: Merino, Daniela; 2021





**Gráfico 50-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 a 4 metros, escenario 2 RADAR p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 51-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 a 6 metros, escenario 2 RADAR p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.8.2. Tiempos de retardo

En la Tabla 33-4 se detallan los tiempos de retardo obtenidos en las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros, receptados por parte de las antenas receptoras RX1 y RX2, polarizadas verticalmente.

**Tabla 33-4:** Resultado de los tiempos de retardo escenario 2 radar polarización vertical.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 2 RXs	TIEMPOS DE RETARDO  ( $\mu$ s)					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	3,58	7,76	10,62	3,44	8,09	12,14
Muestra 2	3,91	7,55	10,62	5,74	8,4	12,14
Muestra 3	3,91	8,35	11,46	4,9	7,3	12,73
Muestra 4	3,91	7,35	11,29	3,25	8,21	10,61
Muestra 5	5,74	7,35	12,64	3,63	8,53	10,45
Muestra 6	5,14	9,03	11,46	4,2	6,76	10,45
Muestra 7	3,74	8,05	12,64	4,59	6,03	12,72
Muestra 8	5,26	6,88	10,62	4,9	7,74	12,73
Muestra 9	4,9	7,74	12,72	5,26	6,88	11,26
Muestra 10	4,59	6,03	12,72	3,63	8,05	11,91
Muestra 11	4,28	6,76	10,45	5,09	9,03	12,73

Muestra 12	3,62	8,52	10,45	5,74	7,35	12,56
Muestra 13	4,31	8,35	11,29	3,82	7,35	10,45
Muestra 14	4,59	7,3	10,62	3,82	8,35	13,08
Muestra 15	5,74	8,52	11,46	3,82	7,54	10,45
Muestra 16	3,58	8,09	12,14	3,44	7,76	10,61
Muestra 17	4,68	6,38	12,64	5,74	7,35	12,56
Muestra 18	3,74	6,59	12,14	3,44	7,76	10,61
Muestra 19	3,48	7,55	10,45	3,82	8,53	11,91
Muestra 20	4,28	7,66	12,14	3,82	8,35	13,08
Muestra 21	5,14	8,35	11,14	3,82	7,35	10,45
Muestra 22	4,28	7,59	10,62	5,74	7,35	12,56
Muestra 23	3,25	8,68	12,14	5,09	9,03	12,73
Muestra 24	5,41	7,76	10,45	3,63	8,05	11,91
Muestra 25	5,04	6,59	10,45	5,26	6,88	12,73
Muestra 26	3,65	6,49	12,14	4,9	7,74	12,73
Muestra 27	3,74	7,35	11	4,59	6,03	12,73
Muestra 28	3,65	7,76	12,14	5,26	6,76	10,45
Muestra 29	3,65	6,49	10,45	4,2	8,53	12,73
Muestra 30	5,38	6,59	12,14	3,25	8,21	12,73

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 34-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de los retardos para cada distancia a evaluar, e ilustrados en los Gráficos 52-4 y 53-4. La cual presenta los siguientes resultados:

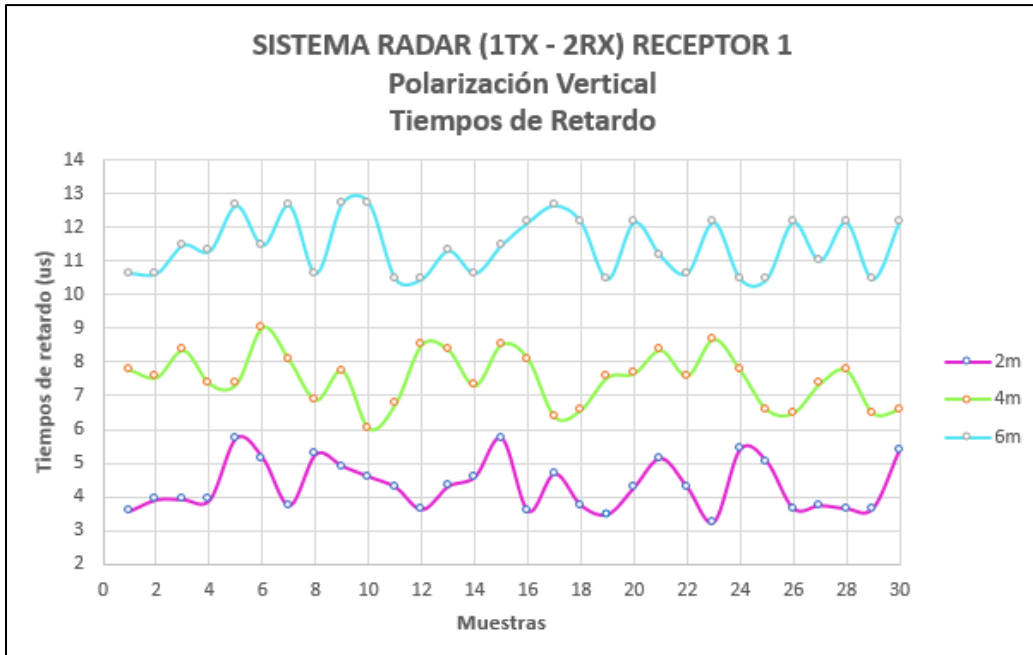
- A 2 metros para RX1 y RX2, se obtuvo un retardo mínimo de 3,25  $\mu s$  y como retardo máximo de 5,74  $\mu s$ .
- A 4 metros para RX1 y RX2, se obtuvo un retardo mínimo de 6,03  $\mu s$  y como retardo máximo de 9,03  $\mu s$ .
- A 6 metros para Rx1 y RX2, se obtuvo un retardo mínimo de 10,45  $\mu s$  y como retardo máximo de 12,73  $\mu s$ ; y un retardo máximo para RX2 de 13,08  $\mu s$

Observando que a medida que aumenta la distancia a la que se encuentra el objeto el retardo aumenta, sin embargo, los resultados obtenidos en el escenario son tiempos de retardo óptimos para un sistema radar.

**Tabla 34-4:** Resultado de tiempo de retardo escenario 2 radar con polarización vertical.

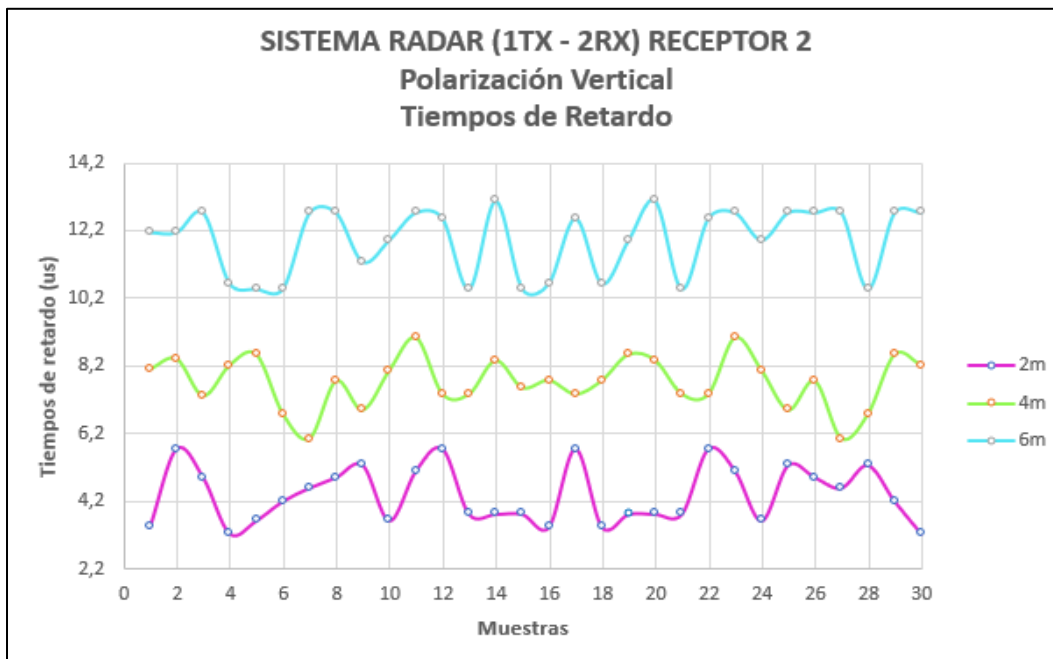
SISTEMA RADAR  1 TX/ 2 RX	TIEMPOS DE RETARDO  ( $\mu s$ )					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Valor Mínimo	3,25	6,03	10,45	3,25	6,03	10,45
Valor Máximo	5,74	9,03	12,73	5,74	9,03	13,08
Promedio	4,34	7,51	11,44	4,39	7,7	11,9

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 52-4:** Tiempos de retardo escenario 2 RADAR, RX1 con p.v.

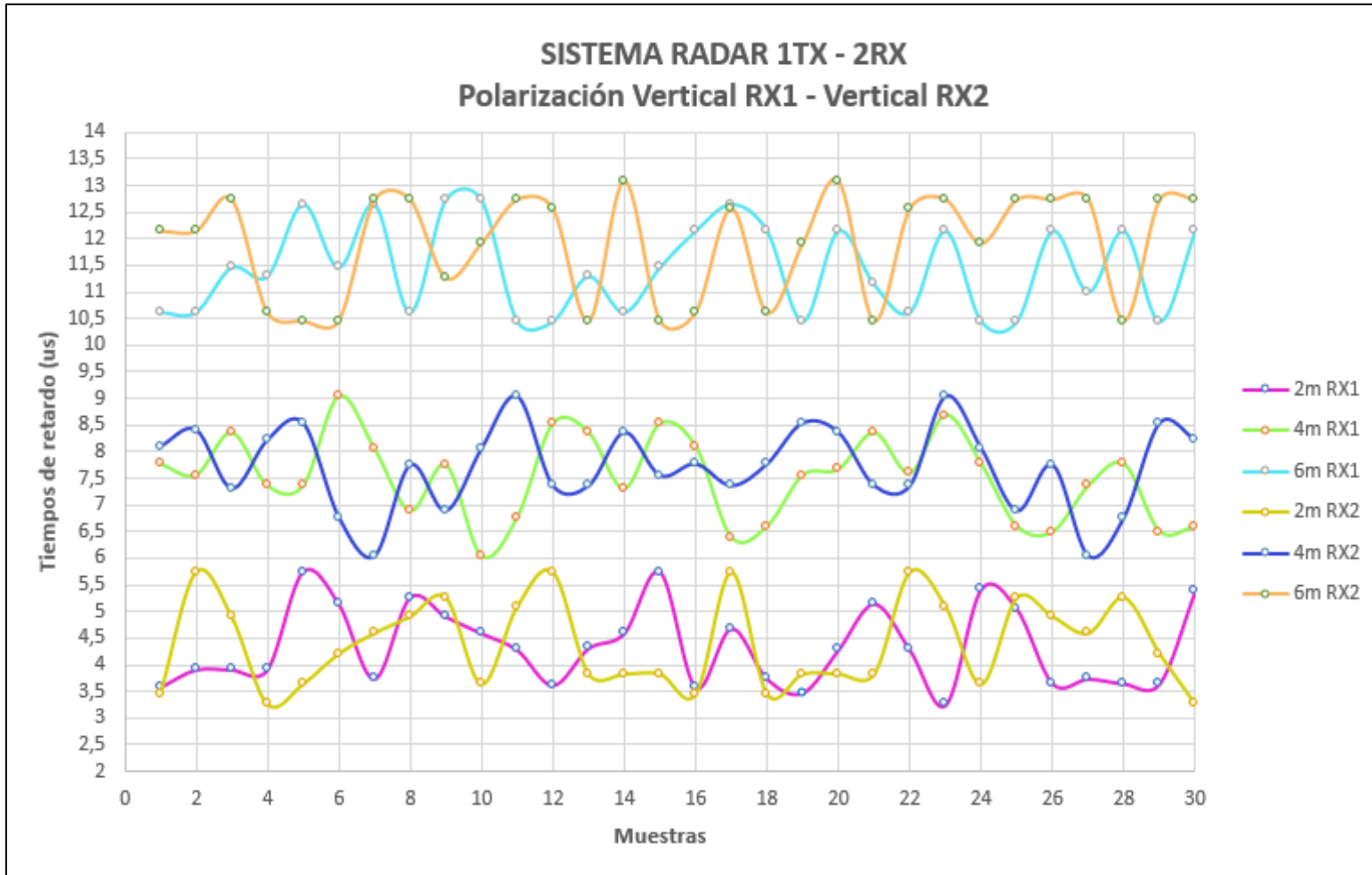
Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 53-4:** Tiempos de retardo escenario 2 RADAR, RX2 con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Se observa a través del Gráfico 54-4, que tanto para RX1 como para RX2 los tiempos de retardo se encuentran dentro del mismo rango, dependiendo de cada distancia a evaluar, por lo que se evidencia que, al estar polarizadas verticalmente las dos antenas receptoras, las señales reflejadas que llegan son de potencias similares, ya que las ondas al estar polarizadas verticalmente no presentan diferencias significativas en su atenuación.



**Gráfico 54-4:** Tiempos de retardo escenario 2 RADAR , RX1 y RX2 con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.8.3. Radargrama

En la Tabla 35-4 se detallan las distancias a las que fue detectada la placa de cobre para las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros, obtenidos por parte de las antenas receptoras RX1 y RX2 polarizadas verticalmente.

**Tabla 35-4:** Resultado de Radargrama escenario 2 radar con polarización vertical.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 2 RXs	RADARGRAMA (Metros)					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	1,4	4,2	5,6	1,4	4,4	6,5
Muestra 2	1,6	4	5,6	2,7	4,6	6,5
Muestra 3	1,6	4,5	6,1	2,2	3,9	6,9
Muestra 4	1,6	3,9	6	1,3	4,5	5,6
Muestra 5	2,7	3,9	6,8	1,5	4,6	5,5
Muestra 6	2,3	4,9	6,1	1,8	3,6	5,5
Muestra 7	1,5	4,3	6,8	2	3,1	6,9
Muestra 8	2,4	3,6	5,6	2,2	4,2	6,9
Muestra 9	2,2	4,2	6,9	2,4	3,6	6
Muestra 10	2	3,1	6,9	1,5	4,3	6,4
Muestra 11	1,8	3,6	5,5	2,3	4,9	6,9



Muestra 12	1,4	4,6	5,5	2,7	3,9	6,8
Muestra 13	1,3	4,5	6	1,6	3,9	5,5
Muestra 14	2	3,9	5,6	1,6	4,5	6,1
Muestra 15	2,7	4,6	6,1	1,6	4	5,5
Muestra 16	1,4	4,4	6,5	1,4	4,2	5,6
Muestra 17	1,7	3,3	6,8	2,7	3,9	6,8
Muestra 18	1,5	3,5	6,5	1,4	4,2	5,6
Muestra 19	1,3	4	5,5	1,6	4,6	6,4
Muestra 20	1,8	4,1	6,5	1,6	4,5	6,1
Muestra 21	2,3	4,5	6,5	1,6	3,9	5,5
Muestra 22	1,8	4,1	5,6	2,7	3,9	6,8
Muestra 23	1,2	4,7	6,5	2,3	4,9	6,9
Muestra 24	2,4	4,2	5,5	1,5	4,3	6,4
Muestra 25	2,2	3,5	5,5	2,4	3,6	6,9
Muestra 26	1,4	3,4	6,5	2,2	4,2	6,9
Muestra 27	1,5	3,9	6,1	2	3,1	6,9
Muestra 28	1,4	4,2	6,5	2,4	3,6	5,5
Muestra 29	1,4	3,4	5,5	1,8	4,6	6,9
Muestra 30	2,4	3,5	6,5	1,3	4,5	6,9

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 36-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de las distancias a las que se detectó el objeto, e ilustrados en los Gráficos 55-4 y 56-4. La cual presenta los siguientes resultados:

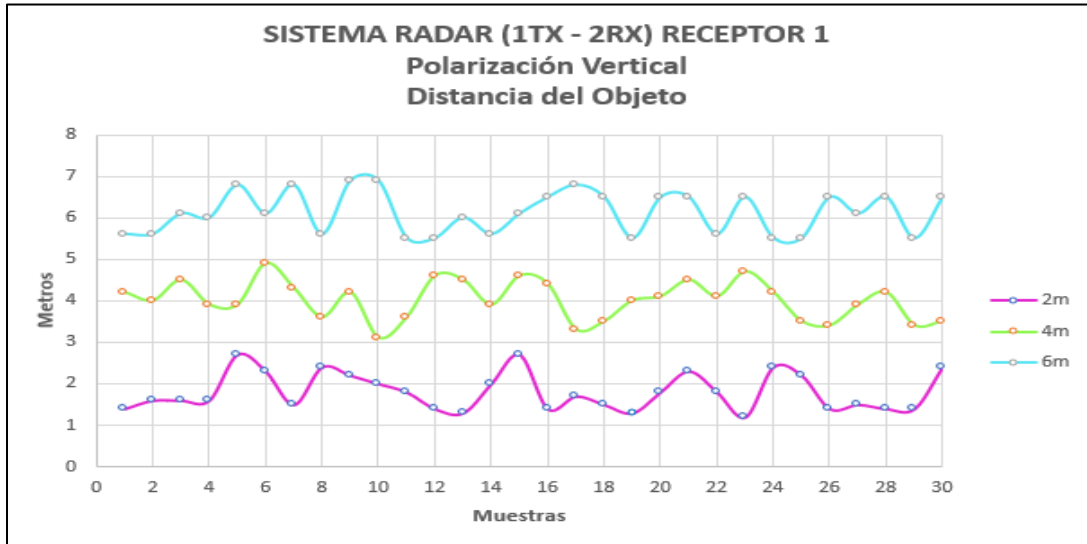
- A 2 metros para RX1 se obtuvo una distancia mínima de 1,2 metros y como máximo de 2,7 metros, dando como promedio una distancia de 1,8 metros, lo cual es apropiado ya que tiene una diferencia de 0,2 metros respecto al valor real al que se ubicó la placa de cobre. A diferencia de RX2 donde se obtuvo una distancia mínima de 1,3 metros y como máximo 2,7 metros, dando como promedio una distancia de 1,9, lo cual es apropiado ya que tiene una diferencia de 0,1 metros respecto al valor real al que fue ubicada la placa de cobre.
- A 4 metros tanto para RX1 como para RX2 se obtuvo una distancia mínima de 3,1 metros y como máximo de 4,9 metros. Sin embargo, sus promedios cambian, ya que para RX1 se obtuvo en promedio una distancia de 4 metros, lo cual es excelente ya que no hay una diferencia respecto al valor real al que se ubicó la placa de cobre y para RX2 un promedio de 4,1 metros, lo cual es apropiado ya que solo existe una diferencia de 0,1 metros respecto al valor real.
- A 6 metros tanto para RX1 como para RX2 se obtuvo una distancia mínima de 5,5 metros y como máximo de 6,9 metros. Sin embargo, sus promedios cambian, ya que para RX1 se obtuvo en promedio una distancia de 6,1 metros, lo cual es apropiado ya que hay una diferencia de 0,1 metros respecto al valor real al que se ubicó la placa de cobre y para RX2 un promedio de 6,3 metros, lo cual es apropiado ya que solo existe una diferencia de 0,3 metros respecto al valor real.

**Tabla 36-4:** Mínimo, máximo y promedio de distancias del objeto, escenario 2 radar p.v.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 2 RX	RADARGRAMA  (Metros)					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Valor Mínimo	1,2	3,1	5,5	1,3	3,1	5,5
Valor Máximo	2,7	4,9	6,9	2,7	4,9	6,9

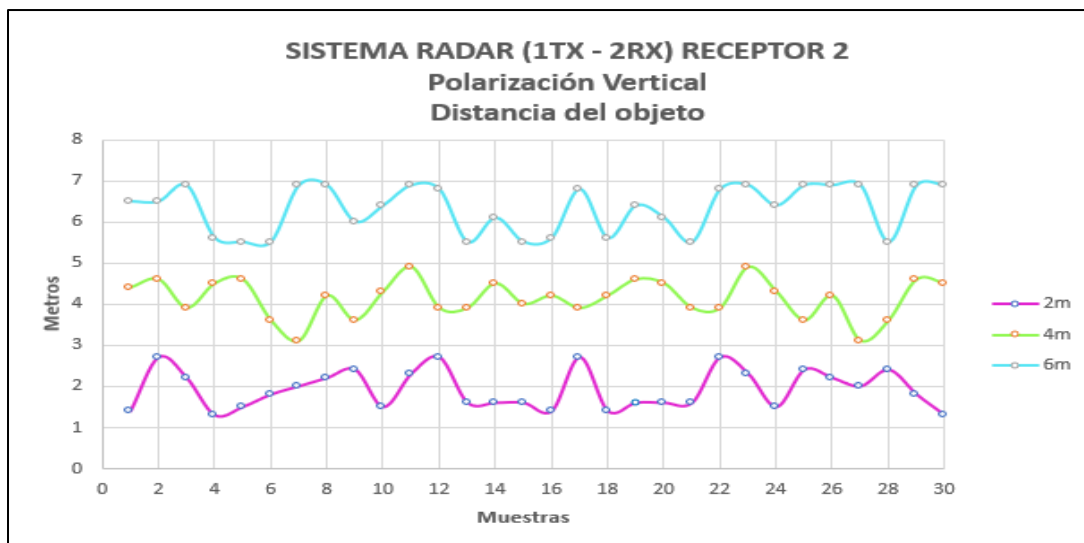
Promedio	1,8	4	6,1	1,9	4,1	6,3
----------	-----	---	-----	-----	-----	-----

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 55-4:** Distancia del objeto escenario 2 RADAR, RX1 con p.v.

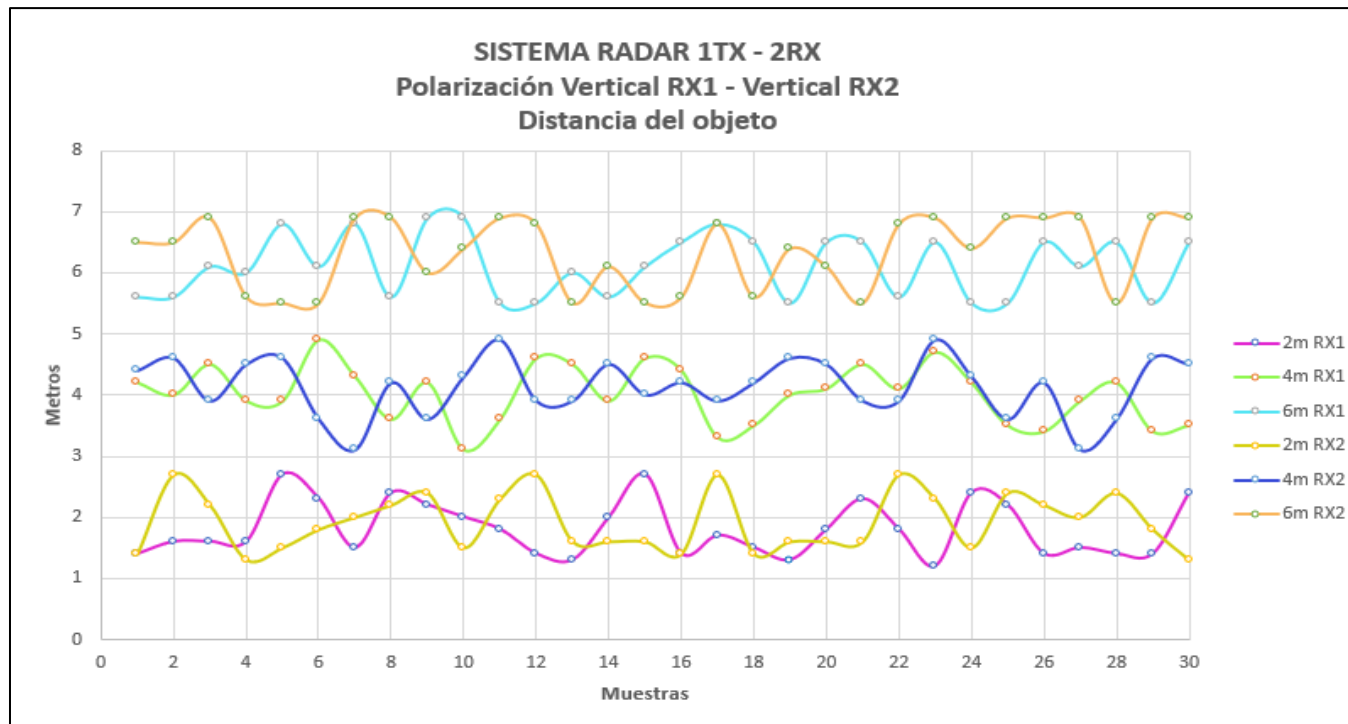
Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 56-4:** Distancia del objeto escenario 2 RADAR, RX2 con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Se observa a través del Gráfico 57-4, que tanto para RX1 como para RX2 las distancias a las que fue detectada la placa de cobre se encuentran dentro del mismo rango, sus variaciones son mínimas, dependiendo de cada distancia a evaluar. Por lo que se evidencia que, al estar polarizadas verticalmente las dos antenas receptoras, las señales reflejadas que llegan son de potencias similares, ya que las ondas al estar polarizadas verticalmente no presentan diferencias significativas en su atenuación.



**Gráfico 57-4:** Distancia del objeto escenario 2 RADAR con polarización vertical.

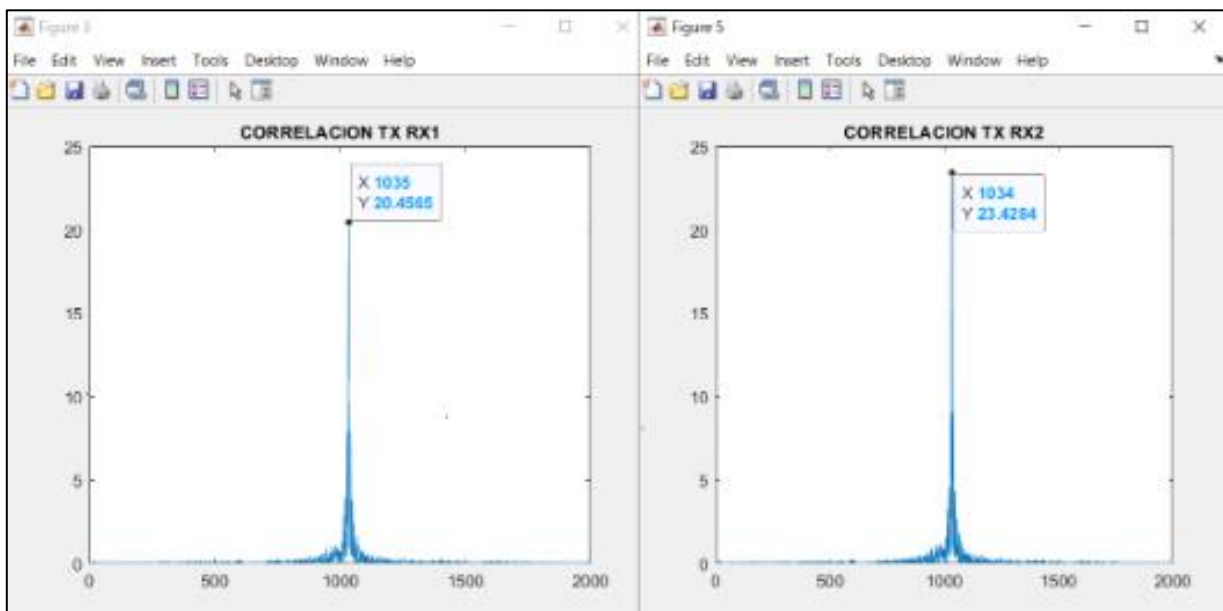
**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.9. Datos escenario 2 RADAR polarización horizontal

##### 4.1.9.1. Comparación de señal TX y RX mediante correlación.

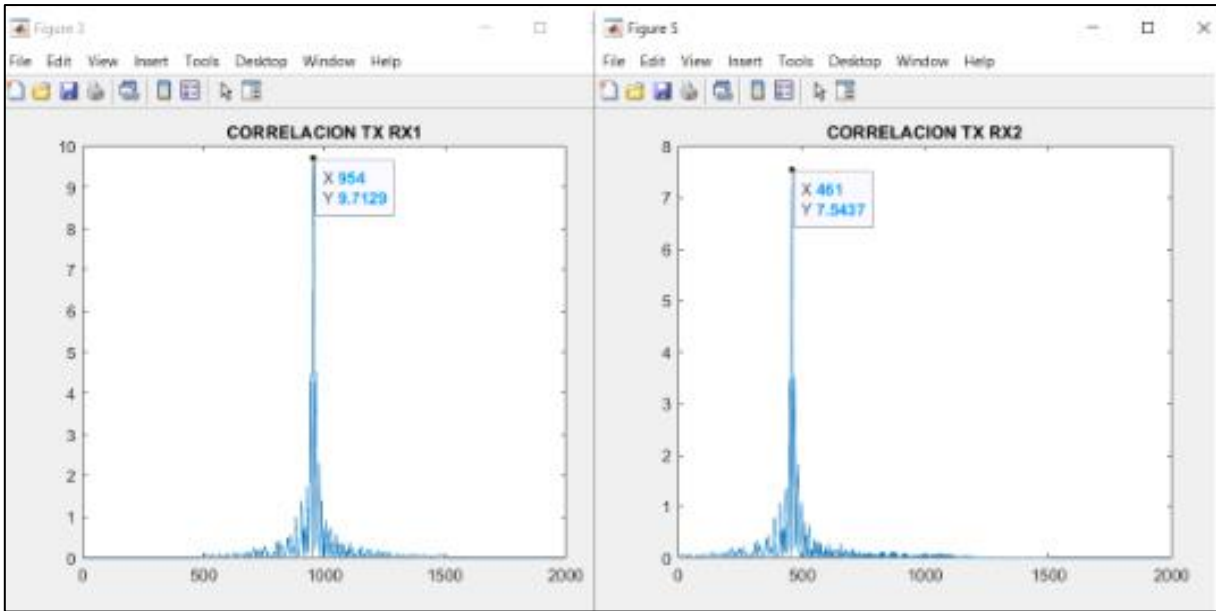
Para comprobar que la información recibida es la misma que se transmitió, se realizó la correlación de señales ya que esta proporciona una medida de la correspondencia o interrelación entre dos señales, además también del retardo que sufre la señal recibida, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa.

Se realizó la correlación para las muestras obtenidas en el escenario 2 Radar mediante las antenas receptoras RX1 polarizada verticalmente y RX2 polarizada horizontalmente, a las 3 distancias a evaluar. Se muestran ejemplos de ellos mediante los Gráficos 58-4 a 60-4. Comprobando de esta manera la similitud entre la señal chirp TX y la señal chirp RX a las diferentes distancias, ya que al obtener un pico alto este indica que las señales transmitidas están presentes en la señal recibida, demostrando así que las señales están correladas.



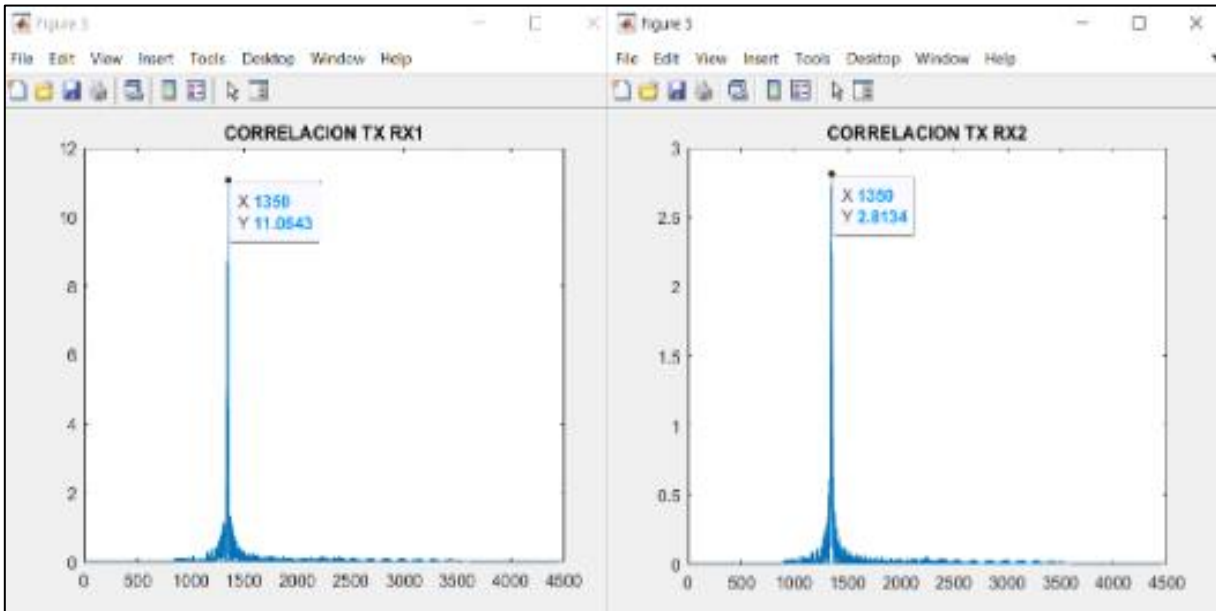
**Gráfico 58-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 a 2 metros, polarización vertical - horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 59-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 a 4 metros, polarización vertical - horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 60-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 a 6 metros, polarización vertical - horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

4.1.9.2. *Tiempos de retardo.*

En la Tabla 37-4 se detallan los tiempos de retardo obtenidos en las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros, receptados por parte de la antena receptora RX1 y RX2 polarizada verticalmente – horizontalmente.

**Tabla 37-4:** Resultado de tiempo de retardo escenario 2 radar polarización v – h.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 2 RXs	TIEMPOS DE RETARDO ( $\mu s$ )					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	3,79	8,48	11,65	4,67	6,44	13,36
Muestra 2	3,41	7,7	11,65	3,9	7,96	11,82
Muestra 3	4,04	7,31	12,28	4,85	8,31	11,82
Muestra 4	5,3	7,96	10,28	4,35	8,31	13,36
Muestra 5	4,55	8,48	10,96	4,35	8,5	11,82
Muestra 6	3,41	8,06	10,96	4,67	7,05	13,62
Muestra 7	4,92	6,15	10,96	4,85	8,5	10,96
Muestra 8	5,05	8,67	10,96	5,76	7,05	10,96
Muestra 9	5,3	7,12	10,96	6,24	8,31	11,82
Muestra 10	3,92	8,5	10,96	4,67	9,19	9,76
Muestra 11	4,55	7,12	10,78	4,35	8,11	10,96

Muestra 12	4,17	8,5	11,20	4,85	8,5	10,96
Muestra 13	4,17	8,67	10,11	4,21	7,96	10,28
Muestra 14	4,55	8,67	11,20	4,21	7,13	13,37
Muestra 15	3,92	8,48	11,20	3,41	7,47	12,59
Muestra 16	4,42	6,54	10,11	3,69	8,11	12,59
Muestra 17	4,17	7,7	11,20	4,85	8,5	10,96
Muestra 18	5,3	6,15	10,40	4,35	8,11	12,59
Muestra 19	5,3	7,12	11,20	3,41	8,84	13,36
Muestra 20	3,92	6,15	11,65	4,2	7,13	12,28
Muestra 21	3,92	6,73	11,20	4,21	7,96	13,62
Muestra 22	4,17	6,54	10,78	4,85	8,5	10,96
Muestra 23	5,05	9,25	10,40	4,67	7,96	10,96
Muestra 24	4,92	9,05	10,96	5,45	7,47	10,96
Muestra 25	4,55	9,05	10,96	4,35	8,31	9,76
Muestra 26	4,04	9,05	12,28	5,76	7,05	10,96
Muestra 27	5,3	6,15	10,40	7,58	8,5	10,96
Muestra 28	4,92	8,48	10,40	6,23	7,05	14,13
Muestra 29	4,42	9,25	10,40	4,35	8,5	11,20
Muestra 30	4,04	9,25	10,40	4,35	8,3	13,36

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



La Tabla 38-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de los retardos para cada distancia a evaluar, e ilustrados en los Gráficos 61-4 y 62-4. La cual presenta los siguientes resultados:

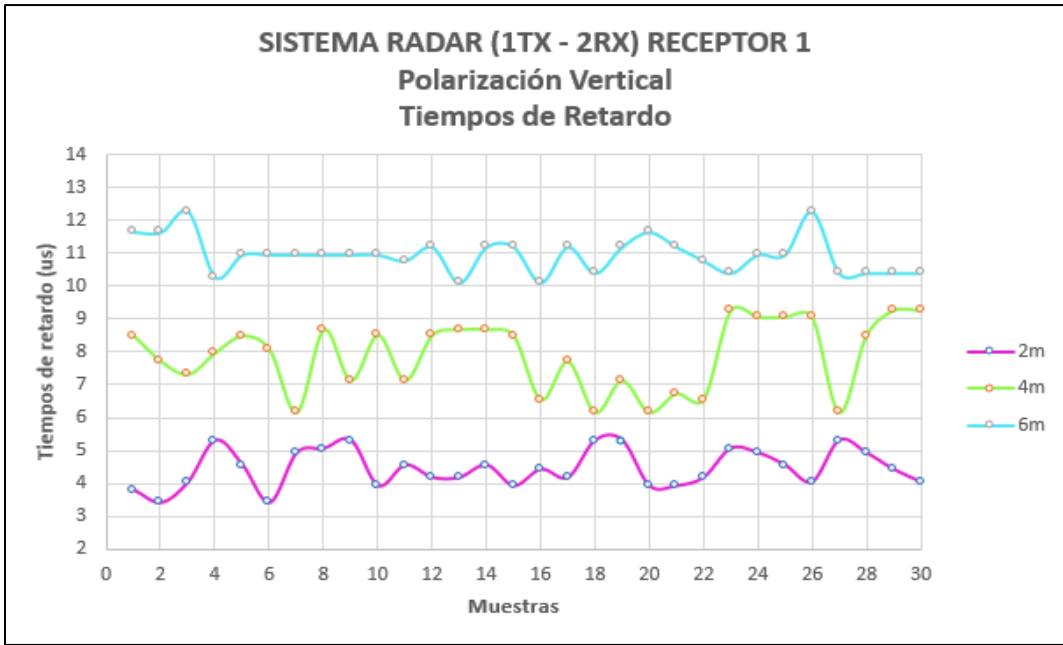
- A 2 metros para RX1 se obtuvo un retardo mínimo de 3,41  $\mu s$  y como máximo de 5,3  $\mu s$ . Sin embargo, para RX2 el retardo mínimo es de 3,41  $\mu s$  y como máximo de 7,58  $\mu s$ .
- A 4 metros para RX1 se obtuvo un retardo mínimo de 6,15  $\mu s$  y como máximo de 9,15  $\mu s$ . Sin embargo, para RX2 el retardo mínimo es de 6,44  $\mu s$  y como máximo de 9,19  $\mu s$ .
- A 6 metros para RX1 se obtuvo un retardo mínimo de 10,11  $\mu s$  y como máximo de 12,28  $\mu s$ . Sin embargo, para RX2 el retardo mínimo es de 9,76  $\mu s$  y como máximo de 14,13  $\mu s$ .

Observando que a medida que aumenta la distancia a la que se encuentra el objeto el retardo aumenta, sin embargo, los resultados obtenidos en el escenario son tiempos de retardo óptimos para un sistema radar. Mediante la Figura 63-4 que comprueba que los tiempos de retardo de RX2 son mayores respecto a RX1, dependiendo de cada distancia a evaluar. Por lo que se comprueba que RX2 al estar polarizada horizontalmente, las señales reflejadas que llegan al receptor se encuentran más atenuadas que las que llegan a RX1, ya que esta esta polarizada verticalmente.

**Tabla 38-4:** Mínimo, máximo y promedio de tiempo de retardo radar polarización v-h.

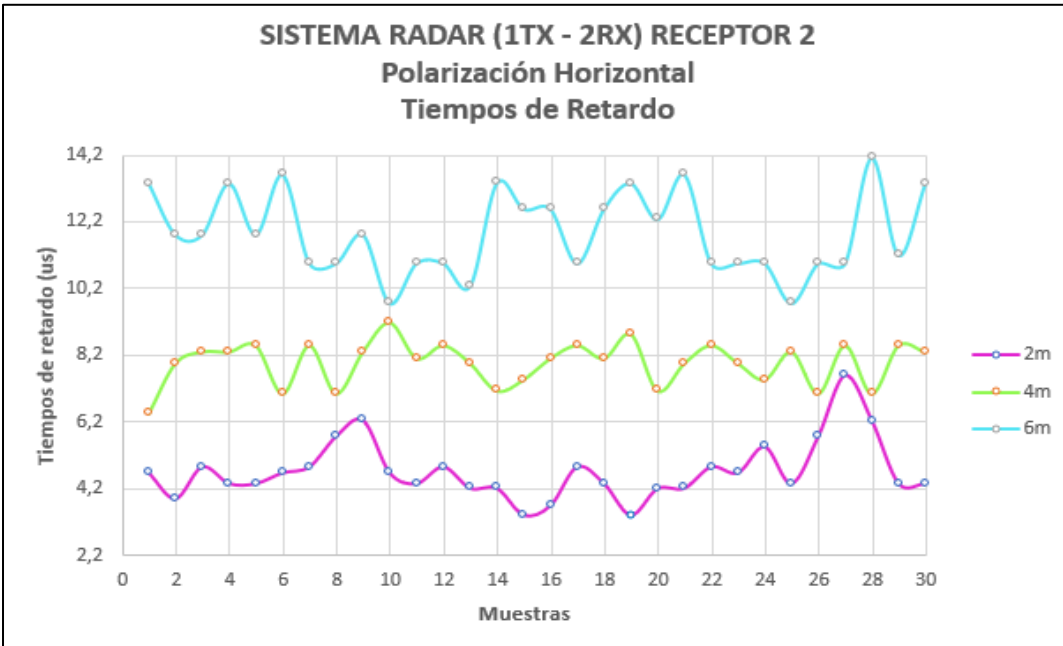
SISTEMA RADAR  1 TX/ 2 RX	TIEMPOS DE RETARDO ( $\mu s$ )					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Valor Mínimo	3,41	6,15	10,11	3,41	6,44	9.76
Valor Máximo	5,3	9,25	12,28	7,58	9,19	14.13
Promedio	4,45	7,8	10,96	4,72	7,97	11,87

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



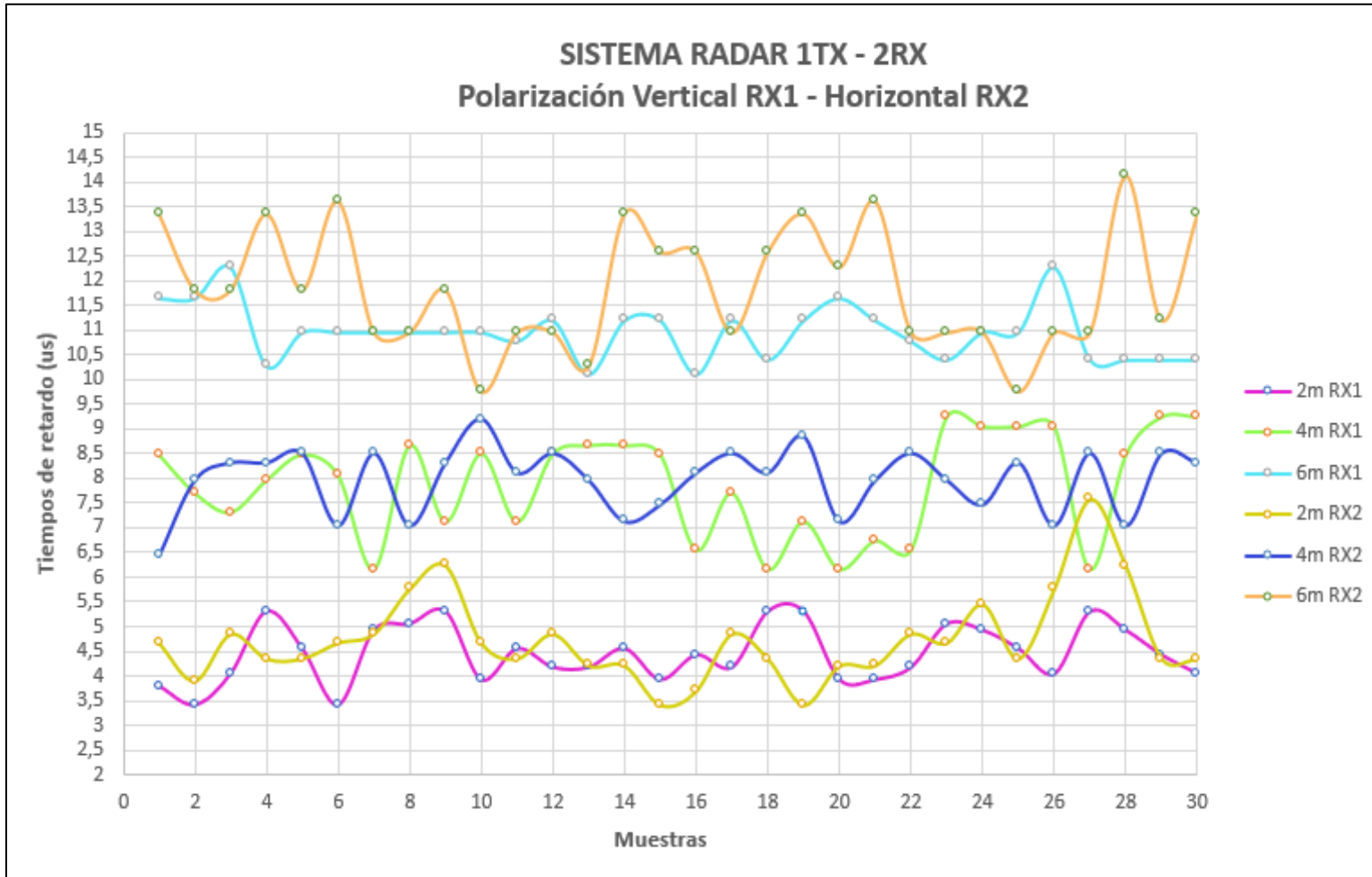
**Gráfico 61-4:** Tiempos de retardo escenario 2 radar, RX1 con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 62-4:** Tiempos de retardo escenario 2 radar, RX2 con p.h.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 63-4:** Tiempos de retardo escenario 2 radar con polarización vertical - horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.1.9.3. Radargrama

En la Tabla 39-4 se detallan las distancias a las que fue detectada la placa de cobre de las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros, obtenidas por las antenas receptoras RX1 y RX2 con polarización vertical – horizontal.

**Tabla 39-4:** Resultado de Radargrama escenario 2 radar polarización v- h.

SISTEMA RADAR 1 TX/ 2 RXs	RADARGRAMA (Metros)					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Muestra 1	1,5	4,4	6,6	2	3,4	6,9
Muestra 2	1,2	4	6,6	1,6	4,3	6,3
Muestra 3	1,7	3,8	6,9	2,1	4,5	6,3
Muestra 4	2,7	4,3	5,7	1,8	4,5	6,9
Muestra 5	2,1	4,6	6,1	1,8	4,6	6,3
Muestra 6	1,2	4,3	6,1	2	3,7	7
Muestra 7	2,4	3,2	6,1	2,1	4,6	6,1
Muestra 8	2,5	4,5	6,1	2,7	3,7	6,1
Muestra 9	2,7	3,7	6,1	3	4,5	6,3
Muestra 10	1,6	4,6	6,1	2	5	5,5
Muestra 11	2,1	3,7	6	1,8	4,4	6,1

Muestra 12	1,8	4,6	6,3	2,1	4,6	6,1
Muestra 13	1,8	4,5	5,6	2,7	4,3	5,7
Muestra 14	2,1	4,5	6,3	1,7	3,8	6,9
Muestra 15	1,6	4,4	6,3	1,2	4	6,6
Muestra 16	2	3,4	5,6	1,5	4,4	6,6
Muestra 17	1,8	4	6,3	2,1	4,6	6,1
Muestra 18	2,7	3,2	5,8	1,8	4,4	6,6
Muestra 19	2,7	3,7	6,3	1,2	4,8	6,9
Muestra 20	1,6	3,2	6,6	1,7	3,8	5,7
Muestra 21	1,6	3,5	6,3	2,7	4,3	7
Muestra 22	1,8	3,4	6	2,1	4,6	6,1
Muestra 23	2,5	4,8	5,8	2	4,3	6,1
Muestra 24	2,4	4,7	6,1	2,5	4	6,1
Muestra 25	2,1	4,7	6,1	1,8	4,5	5,5
Muestra 26	1,7	4,7	6,9	2,7	3,7	6,1
Muestra 27	2,7	4,8	5,8	3,2	4,6	6,1
Muestra 28	2,4	4,8	5,8	3	3,7	7,2
Muestra 29	2	4,8	5,8	1,8	4,6	6,3
Muestra 30	1,7	4,8	5,8	1,8	4,5	6,9

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 40-4 muestra los valores mínimos, máximos y promedios de las distancias a las que se detectó el objeto, e ilustrados en los Gráficos 64-4 y 65-4. La cual presenta los siguientes resultados:

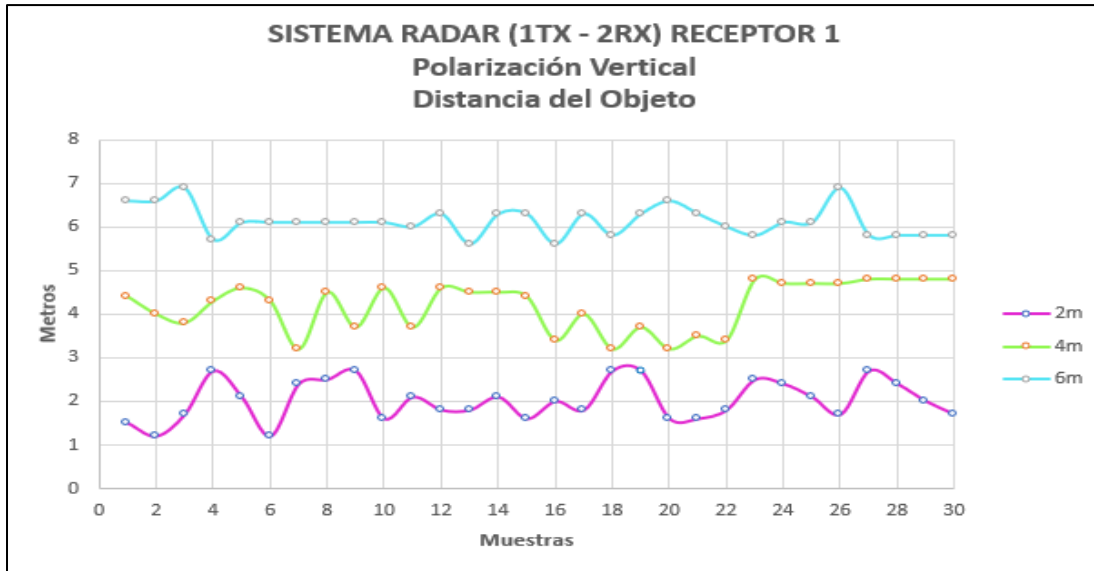
- A 2 metros para RX1 se obtuvo una distancia mínima de 1,2 metros y como distancia máxima de 2,7 metros, dando como promedio una distancia de 2 metros, lo cual es excelente ya que tiene no existe diferencia respecto al valor de real al que se ubicó la placa de cobre. Mientras que para RX2 la distancia mínima es de 1,2 metros y como distancia máxima de 3,2 metros, dando como promedio una distancia de 2,1 metros, lo cual es apropiado ya que tiene existe una diferencia de 0,1 metros respecto al valor de real.
- A 4 metros para RX1 se obtuvo una distancia mínima de 3,2 metros y como distancia máxima de 4,8 metros, dando como promedio una distancia de 4,2 metros, lo cual es apropiado ya que existe una diferencia de 0,2 metros respecto al valor de real al que se ubicó la placa de cobre. Mientras que para RX2 la distancia mínima es de 3,4 metros y como distancia máxima de 5 metros, dando como promedio una distancia de 4,3 metros, lo cual es apropiado ya que tiene existe una diferencia de 0,3 metros respecto al valor de real.
- A 6 metros para RX1 se obtuvo una distancia mínima de 5,6 metros y como distancia máxima de 6,9 metros, dando como promedio una distancia de 6,1 metros, lo cual es apropiado ya que existe diferencia de 0,1 metros respecto al valor de real al que se ubicó la placa de cobre. Mientras que para RX2 la distancia mínima es de 5,5 metros y como distancia máxima de 7,2 metros, dando como promedio una distancia de 6,4 metros, lo cual es aceptable ya que tiene existe una diferencia de 0,4 metros respecto al valor de real.

**Tabla 40-4:** Resultado de Radargrama escenario 2 radar con polarización v - h.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 2 RX	RADARGRAMA (Metros)					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Valor Mínimo	1,2	3,2	5,6	1,2	3,4	5,5
Valor Máximo	2,7	4,8	6,9	3,2	5	7,2

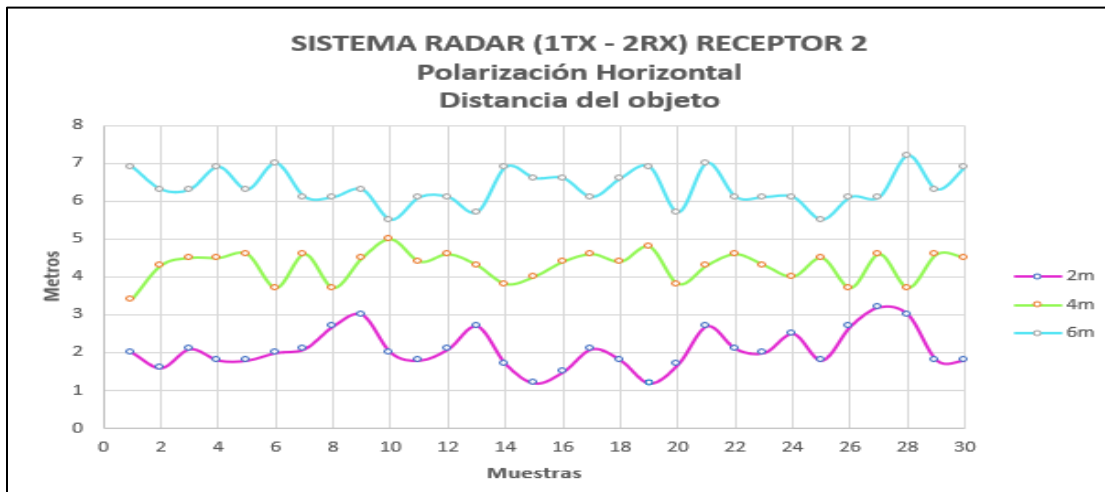
Promedio	2	4,2	6,1	2,1	4,3	6,4
----------	---	-----	-----	-----	-----	-----

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 64-4:** Distancia del objeto escenario 2 radar, RX1 con p.v.

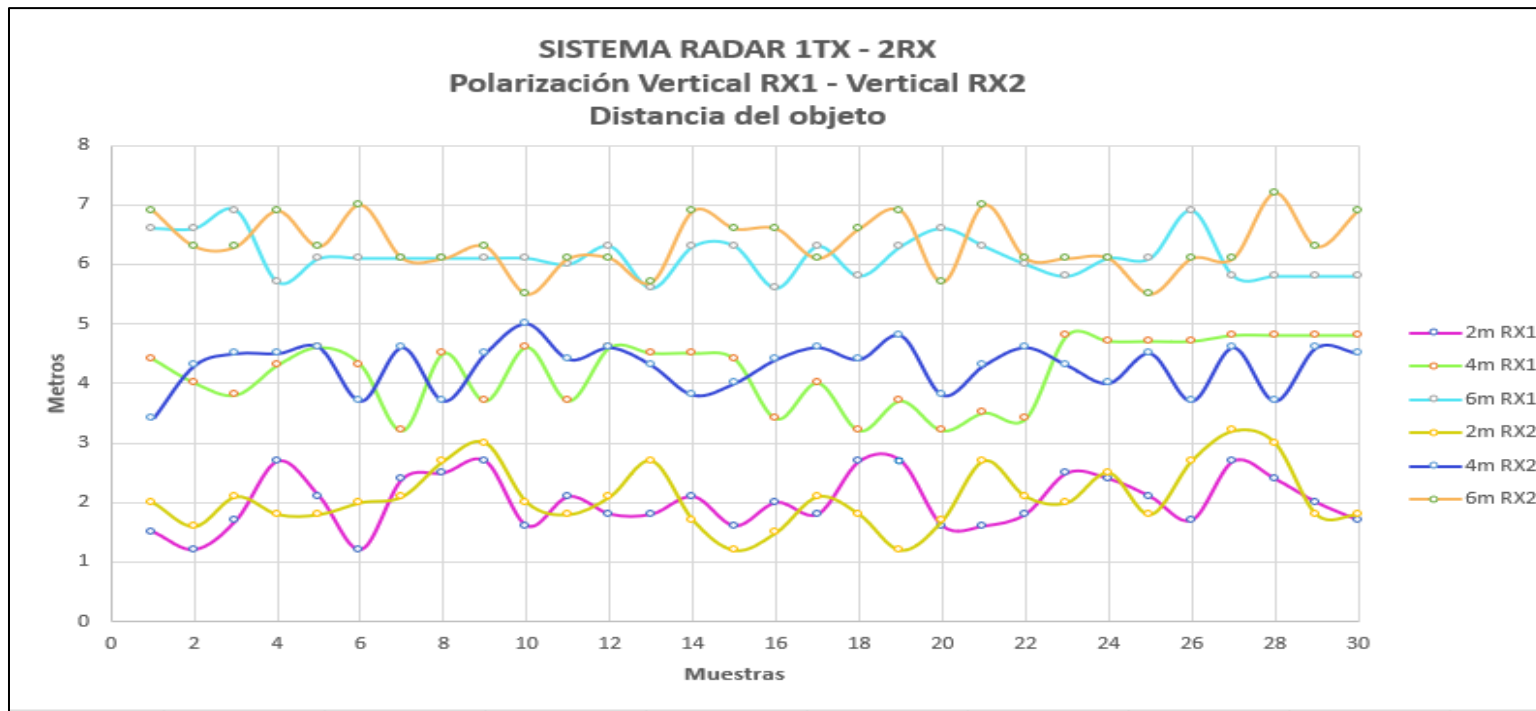
Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 65-4:** Distancia del objeto escenario 2 radar, RX2 con p.h.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Se observa a través del Gráfico 66-4, que tanto para RX1 como para RX2 las distancias a las que fue detectada la placa de cobre tienen pequeñas variaciones una respecto a la otra, dependiendo de cada distancia a evaluar. Por lo que se evidencia que, RX2 al estar polarizadas horizontalmente, las señales reflejadas que llegan tienden a atenuarse más respecto a RX1 por ello tienen un rango más amplio en cuanto a la detección de la placa respecto a su distancia real.



**Gráfico 66-4:** Distancia del objeto escenario 2 radar con polarización vertical - horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



## 4.2. Análisis y Comparación de resultados.

Los resultados finales serán expuestos a continuación, resultado de los diferentes escenarios tanto del sistema MIMO como del sistema Radar, evaluados a 2, 4 y 6m, además también del tipo de polarización de la antena receptora.

### 4.2.1. Resultado Final Escenario SISO

#### 4.2.1.1. Polarización Vertical.

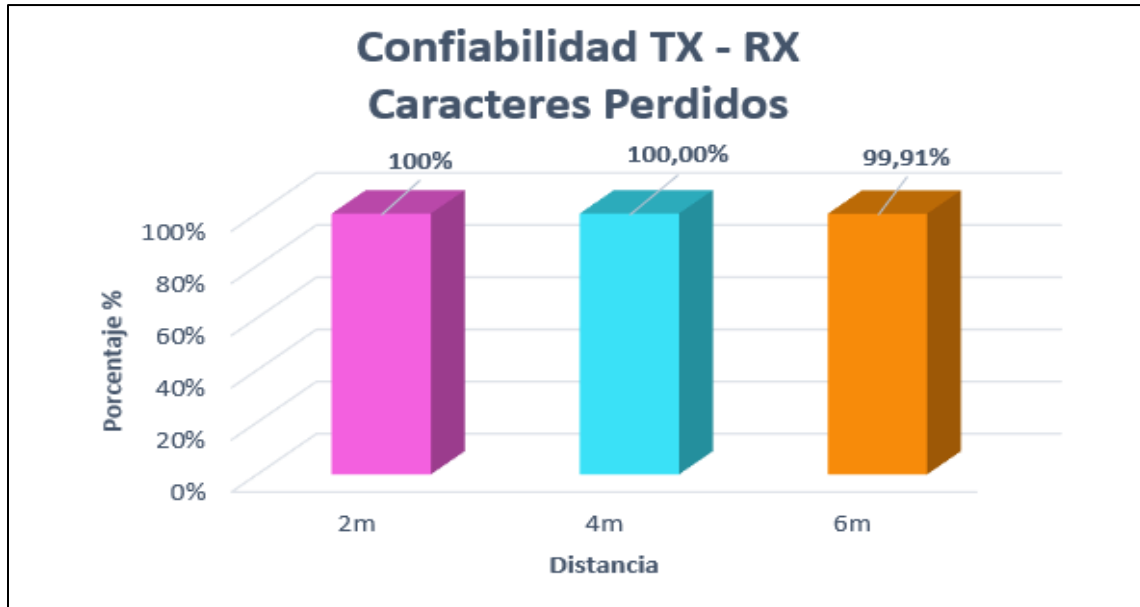
La Tabla 41-4 refleja los resultados finales del porcentaje de confiabilidad de transmisión – recepción del escenario SISO con polarización vertical, producto de la comparación entre el mensaje transmitido respecto al recibido.

Al evaluar los caracteres perdidos durante las 30 pruebas realizadas a distancias de 2, 4 y 6 metros, se obtiene un porcentaje del 100% para la TX – RX a 2 y 4 metros, mientras que a 6 metros se reduce en 0,09%, ver Gráfico 67-4. Por lo que el sistema es bueno, ya que en términos estadísticos se habla de una confiabilidad de transmisión aceptable para porcentajes mayores al 95%, garantizando con los valores obtenidos que la pérdida de información es mínima

**Tabla 41-4:** Confiabilidad TX-RX escenario SISO con polarización vertical.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	CARACTERES PERDIDOS		
	2 metros	4 metros	6 metros
Confiabilidad TX - RX	100%	100%	99,91%

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 67-4:** Confiabilidad TX – RX, escenario SISO con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 42-4 refleja los resultados finales de la máxima desviación estándar obtenida en el escenario SISO con polarización vertical, producto de la comparación entre el diagrama de constelación transmitido respecto al recibido.

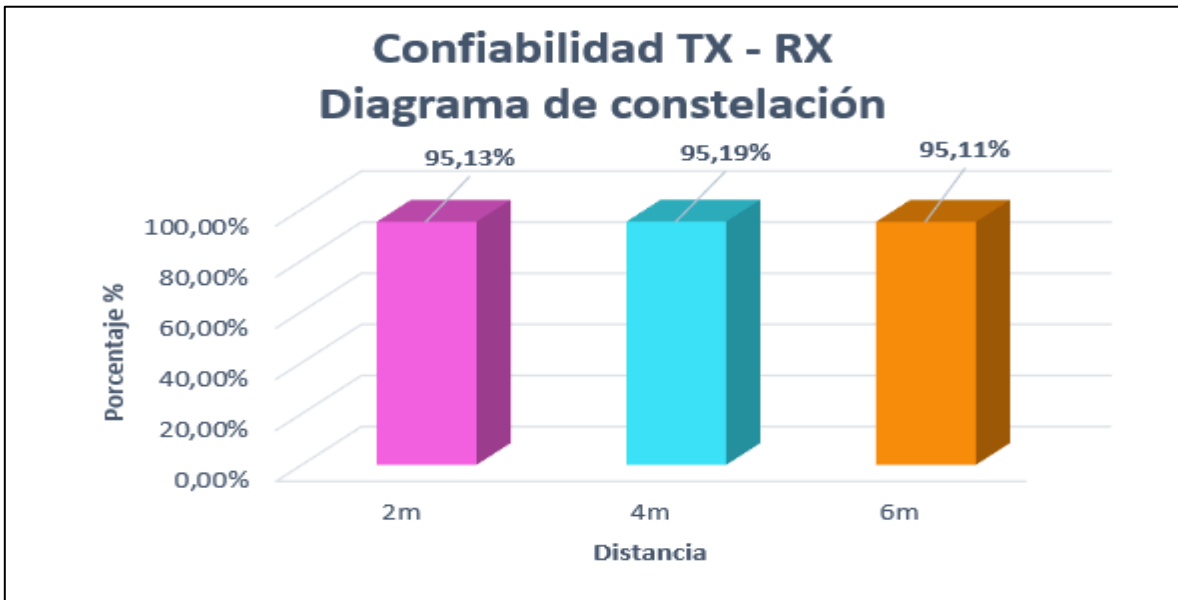
Al procesar los datos de las 30 pruebas, se obtiene una desviación estándar máxima a 2 metros de 0,0487 dando así una confiabilidad TX – RX del 95,13, de 0,0481 con una confiabilidad del 95,19% a 4 metros y de 0,0489 con una confiabilidad del 95,11% a 6 metros, observando que la distancia y la polarización de las antenas no influyen significativamente en los resultados ya que la variación entre ellas es mínima, ver Gráfico 68-4.

Al obtener valores mayores al 95% se garantiza que la transmisión – recepción es buena, además cabe mencionar que para que la TX – RX sea considerada como mala se deberían obtener valores de desviación mayores al 0,707 ya que de ser así el caso los puntos de la constelación podrían irrumpir en sus cuadrantes adyacentes, es por ello al obtener valores de desviación muy bajos se puede decir que hay poca o nula presencia de ruido durante la transmisión.

**Tabla 42-4:** Desviaciones estándar máximas SISO con polarización vertical.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	DESVIACIÓN ESTÁNDAR		
	2 metros	4 metros	6 metros
Desviación estándar máxima	0,0487	0,0481	0,0489
Confiabilidad TX - RX	95,13 %	95,19%	95,11%

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 68-4:** Confiabilidad TX – RX diagrama de constelación, escenario SISO con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 43-4 refleja los resultados finales de las relaciones señal a ruido mínimas y máximas obtenidas en el escenario SISO con polarización vertical, producto de la relación entre la potencia de la señal recibida respecto a la potencia del ruido.

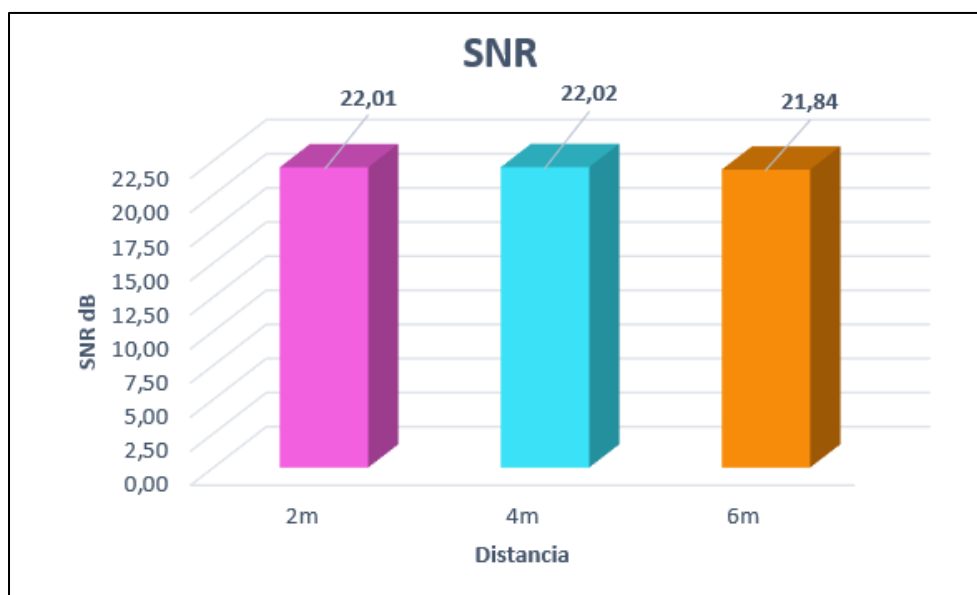
Al procesar los datos de las 30 pruebas, se obtiene un SNR mínimo de 20,08 dB y máximo de 22,01 dB a 2 metros, mínimo de 20,34 dB y máximo de 22,02 dB a 4 metros y SNR mínimo de 20,77 dB y máximo de 21,84 dB a 6 metros. Sin embargo, se puede observar que el SNR a 6 metros se reduce en un 0,18% respecto a las mediciones de 2 y 4 metros, ver Gráfico 69-4.

A pesar de ello se comprobó que existe una buena relación señal a ruido, ya que los valores se encuentran dentro del rango de valores óptimos de SNR,  $> 20dB$ , garantizando así un sistema de transmisión - recepción eficiente.

**Tabla 43-4:** Valores SNR máximos del escenario SISO con polarización vertical.

SISTEMA MIMO	RELACIÓN SEÑAL A RUIDO		
	2 metros	4 metros	6 metros
1 TX/ 1 RX			
SNR Mínima	20,08 dB	20,34 dB	20,77 dB
SNR Máxima	22,01 dB	22,02 dB	21,84 dB

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 69-4:** SNR Máximo, escenario SISO con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.2.1.2. Polarización Horizontal.

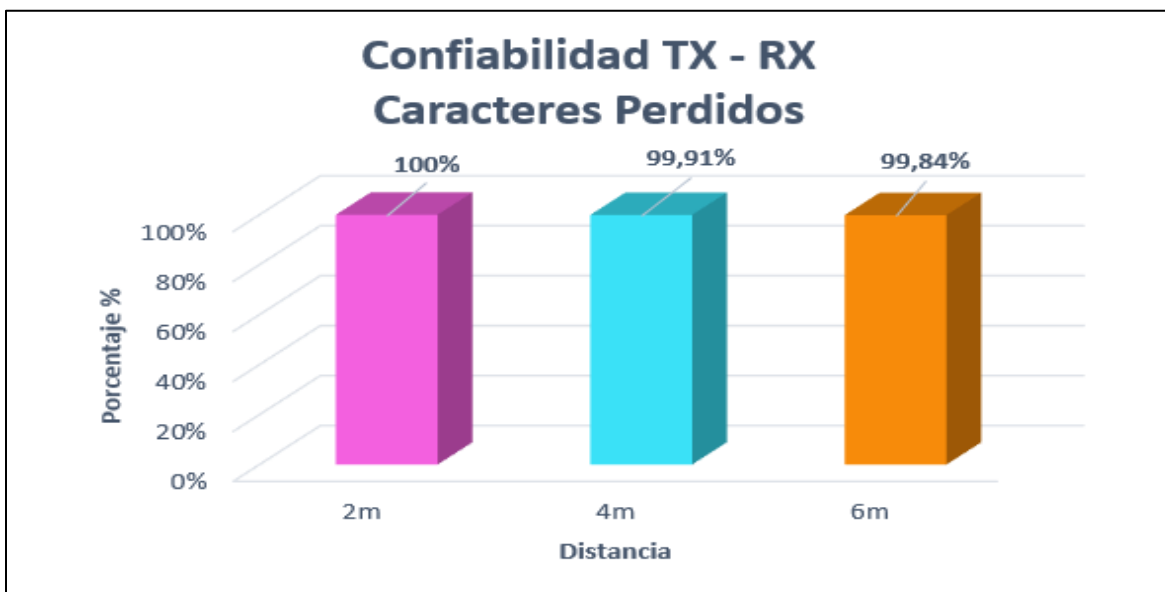
La Tabla 44-4 refleja los resultados finales del porcentaje de confiabilidad de transmisión – recepción del escenario SISO con polarización horizontal, producto de la comparación entre el mensaje transmitido respecto al recibido.

Al evaluar los caracteres perdidos durante las 30 pruebas realizadas a distancias de 2, 4 y 6 metros, se obtiene un porcentaje del 100% para la TX – RX a 2 metros, del 99,91% a 4 metros y del 99,84% a 6 metros, ver Gráfico 70-4. Por lo que el sistema es bueno, ya que en términos estadísticos se habla de una confiabilidad de transmisión aceptable para porcentajes mayores al 95%, garantizando con los valores obtenidos que la pérdida de información es mínima

**Tabla 44-4:** Confiabilidad TX-RX escenario SISO con polarización horizontal.

SISTEMA MIMO	CARACTERES PERDIDOS		
	2 metros	4 metros	6 metros
1 TX/ 1 RX			
Confiabilidad TX - RX	100%	99,91%	99,84%

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 70-4:** Confiabilidad TX – RX caracteres perdidos, escenario SISO con p.h.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 45-4 refleja los resultados finales de la máxima desviación estándar obtenida en el escenario SISO con polarización horizontal, producto de la comparación entre el diagrama de constelación transmitido respecto al recibido.

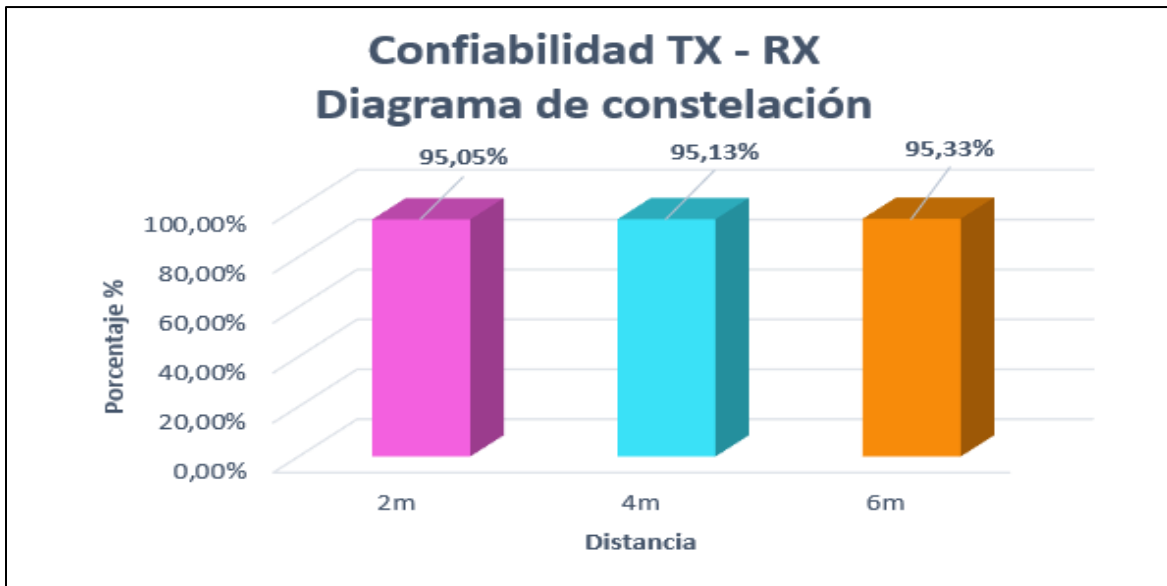
Al procesar los datos de las 30 pruebas, se obtiene una desviación estándar máxima a 2 metros de 0,0495 dando así una confiabilidad TX – RX del 95,05%, a 4 metros de 0,0487 con una confiabilidad del 95,13% y a 6 metros de 0,0470 con una confiabilidad del 95,33%. Al ser valores mayores al 95% se garantiza que la transmisión – recepción es buena. Sin embargo, se observa que a medida que aumenta la distancia se obtuvieron mejores valores de desviación y mayor confiabilidad, ver Gráfico 71-4.

Cabe mencionar que para que la TX – RX sea considerada como mala se deberían obtener valores de desviación mayores al 0,707 ya que de ser así el caso los puntos de la constelación podrían irrumpir en sus cuadrantes adyacentes, es por ello que al obtener valores de desviación muy bajos se puede decir que hay poca o nula presencia de ruido durante la transmisión.

**Tabla 45-4:** Desviaciones estándar máximas SISO con polarización horizontal.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	DESVIACIÓN ESTÁNDAR		
	2 metros	4 metros	6 metros
Desviación estándar máxima	0,0495	0,0487	0,0470
Confiabilidad TX - RX	95,05 %	95,13%	95,33%

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 71-4:** Confiabilidad TX – RX diagrama de constelación, escenario SISO con p.h.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 46-4 refleja los resultados finales de las relaciones señal a ruido mínimas y máximas obtenidas en el escenario SISO con polarización horizontal, producto de la relación entre la potencia de la señal recibida respecto a la potencia del ruido.

Al procesar los datos de las 30 pruebas, se obtiene un SNR mínimo de 20,57 dB y máximo de 21,82dB a 2 metros, mínimo de 19,74 dB y máximo de 21,99 dB a 4 metros y SNR mínimo de 20,29 dB y máximo de 22,16 dB a 6 metros. Con una variación de +0,17dB a medida que la distancia aumenta, ver Gráfico 71-4.

A pesar de que a 4 metros se obtenga un SNR mínimo de 19,74 dB, se encuentra dentro del rango apropiado ya que los valores mínimos recomendados son de 18dB, por lo tanto, si se puede garantizar sistema de transmisión - recepción eficiente.

**Tabla 46-4:** Valores SNR máximos del escenario SISO con polarización horizontal.

SISTEMA MIMO	RELACIÓN SEÑAL A RUIDO		
	2 metros	4 metros	6 metros
1 TX/ 1 RX			

SNR Mínima	20,57 dB	19,74 dB	20,29 dB
SNR Máxima	21,82 dB	21,99 dB	22,16 dB

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 72-4:** SNR Máximos, escenario SISO con polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

Una vez analizados los datos del escenario SISO tanto con polarización vertical como horizontal, se determina que se obtienen mejores resultados cuando las antenas del sistema se encuentran polarizadas verticalmente, ya que al estar polarizada horizontalmente la onda viaja por el medio a  $90^\circ$  produciendo atenuaciones en la señal, lo cual se evidencia mediante los resultados obtenidos en las desviaciones estándar, ya que en el primer caso existe menor cantidad de ruido en los cuadrantes del diagrama de constelación, por ello se obtienen mejores valores de SNR.

#### 4.2.2. Resultado Final Escenario SIMO

##### 4.2.2.1. Con polarización vertical.



La Tabla 47-4 refleja los resultados finales del porcentaje de confiabilidad de transmisión – recepción del escenario SIMO con polarización vertical, producto de la comparación entre el mensaje transmitido respecto al recibido.

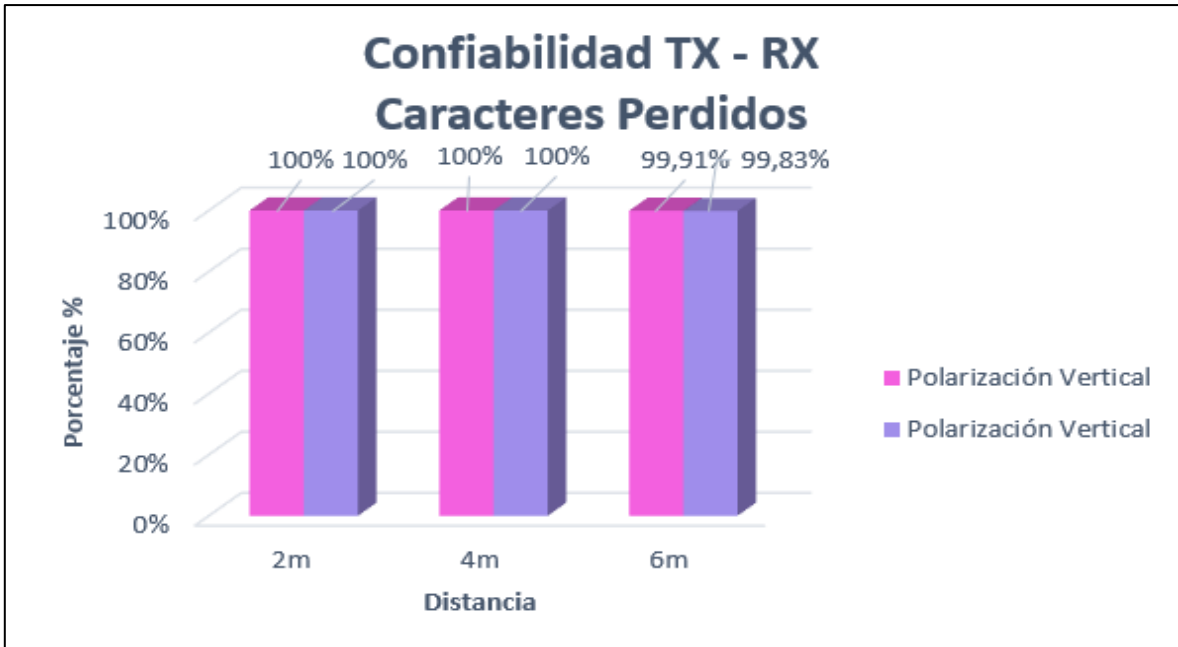
Al evaluar los caracteres perdidos durante las 30 pruebas realizadas con los dos receptores, se obtiene: un porcentaje de confiabilidad transmisión – recepción del 100% a 2 y 4 metros, tanto en RX1 como en RX2. Mientras que a 6 metros se reduce en 0,09% para RX1 y en 0,0,7% para RX2, ver Gráfico 73-4.

Por tanto se observa que donde más se perdió información es en a antena receptora 2 que esta polarizada verticalmente a una distancia de 6 metros. Sin embargo, el sistema puede ser considerado como bueno, ya que en términos estadísticos se habla de una confiabilidad de transmisión aceptable para porcentajes mayores al 95%, garantizando con los valores obtenidos que la pérdida de información es mínima para las dos antenas receptoras.

**Tabla 47-4:** Confiabilidad TX-RX escenario SIMO con polarización vertical

SISTEMA MIMO  1 TX/ 2 RX	CARACTERES PERDIDOS					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 metros	4 metros	6 metros	2 metros	4 metros	6 metros
Confiabilidad TX – RX	100%	100%	99,91%	100%	100%	99,83%

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 73-4:** Confiabilidad TX – RX caracteres perdidos, escenario SIMO con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 48-4 refleja los resultados finales de la máxima desviación estándar obtenida en el escenario SIMO con polarización vertical, producto de la comparación entre el diagrama de constelación transmitido respecto a los recibidos.

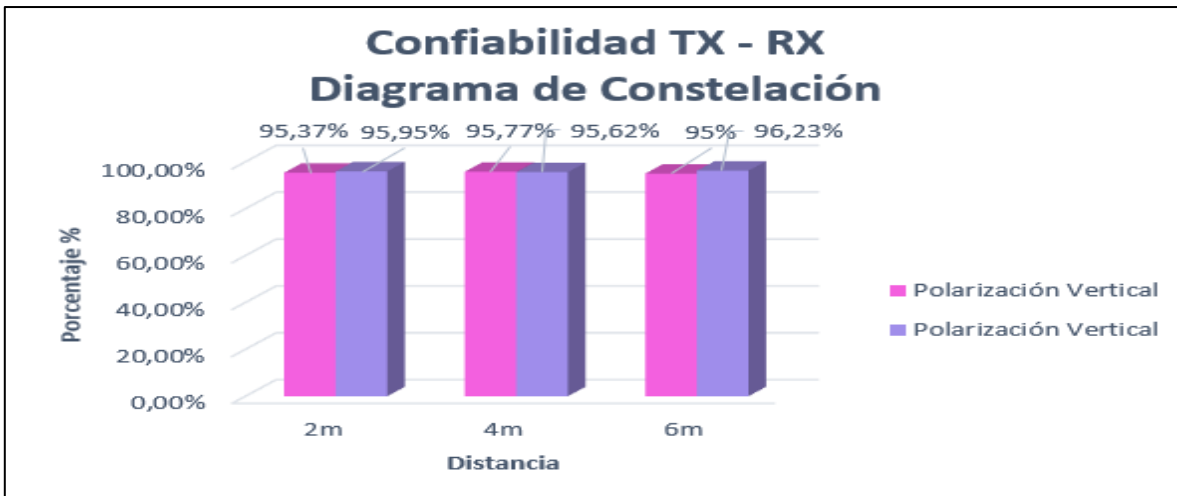
Al procesar los datos de las 30 pruebas, se obtiene una desviación estándar máxima a 2 metros en RX1 de 0,0463 dando así una confiabilidad TX – RX del 95,37% y en RX2 de 0,0356 obteniendo una confiabilidad del 95,95%. A 4 metros en RX1 de 0,0423 con una confiabilidad del 95,77% y en RX2 de 0,0388 obteniendo una confiabilidad del 95,62%. A 6 metros en RX1 de 0,500 con una confiabilidad del 95% y en RX2 de 0,0377 obteniendo una confiabilidad del 96,23%. Al ser valores mayores al 95% se garantiza que la transmisión – recepción es buena, ver Gráfico 74-4.

Además, cabe mencionar que para que la TX – RX sea considerada como mala se deberían obtener valores de desviación mayores al 0,707 ya que de ser así el caso los puntos de la constelación podrían irrumpir en sus cuadrantes adyacentes, es por ello que al obtener valores de desviación muy bajos se puede decir que hay poca o nula presencia de ruido durante la transmisión.

**Tabla 48-4:** Desviaciones estándar máximas SIMO con polarización vertical.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 2 RX	DESVIACIÓN ESTÁNDAR					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 metros	4 metros	6 metros	2 metros	4 metros	6 metros
Desviación estándar máxima	0,0463	0,0423	0,0500	0,0356	0,0388	0,0377
Confiabilidad TX - RX	95,37 %	95,77%	95%	95,95%	95,62%	96,23%

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 74-4:** Confiabilidad TX – RX diagrama de constelación, escenario SIMO con p.v.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 49-4 refleja los resultados finales de las relaciones señal a ruido mínimas y máximas obtenidas en el escenario SIMO con polarización vertical, producto de la relación entre la potencia de la señal recibida respecto a la potencia del ruido. Al procesar los datos de las 30 pruebas se obtiene:

- A 2 metros en RX1 un SNR mínimo de 20,67 dB y máximo de 21,5 dB, para RX2 un mínimo de 26,53 dB y máximo de 31,8 dB. Con un aumento de RX1 a RX2 de aproximadamente 6dB respecto al mínimo y del 10dB respecto al máximo.

- A 4 metros en RX1 un SNR mínimo de 20,29 dB y máximo de 21,34 dB, para RX2 un mínimo de 30,21dB y máximo de 40,46dB. Con un aumento de RX1 a RX2 de aproximadamente 10dB respecto al mínimo y de 20dB respecto al máximo.
- A 6 metros en RX1 un SNR mínimo de 20,36dB y máximo de 21,7dB, para RX2 un SNR mínimo de 26,54dB y máximo de 39,6dB. Con un aumento de RX1 a RX2 de aproximadamente 6dB respecto al mínimo y de 18dB respecto al máximo, ver Gráfico 75-4.

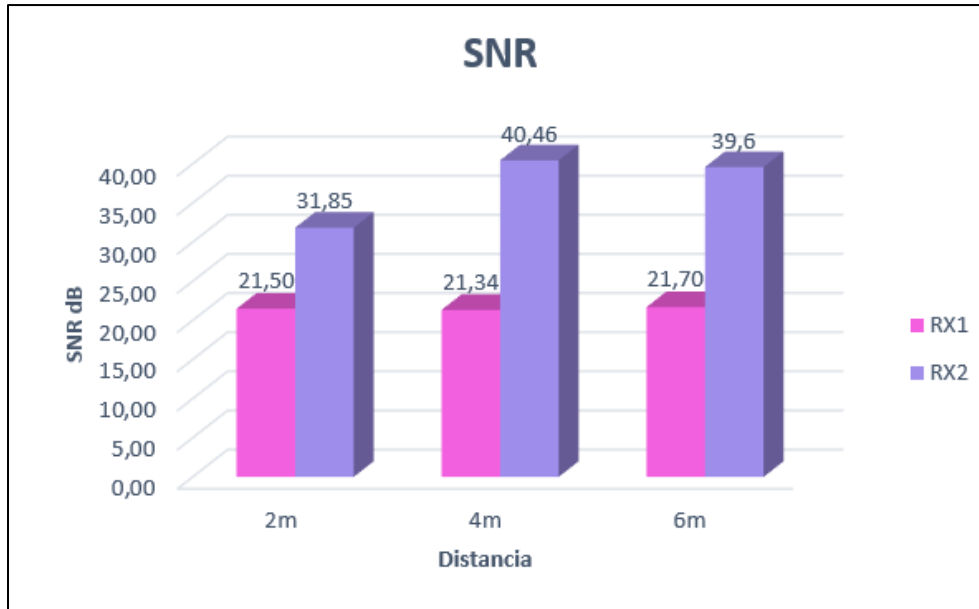
Al comparar ambos receptores se observa los SNR de RX2 aumentan en comparación de RX1, por lo que se puede decir que RX2 tuvo menor presencia de ruido durante su transmisión – recepción.

A pesar de ello se comprobó que existe una buena relación señal a ruido en ambos receptores, ya que los valores se encuentran dentro del rango de valores óptimos de SNR,  $> 20dB$  y muchos de ellos sobrepasan dicho umbral llegando al rango de excelente relación señal/ruido, garantizando así un sistema de transmisión - recepción eficiente.

**Tabla 49-4:** Valores SNR máximos del escenario SIMO con polarización vertical.

SISTEMA MIMO	RELACIÓN SEÑAL A RUIDO					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 metros	4 metros	6 metros	2 metros	4 metros	6 metros
1 TX/ 1 RX						
SNR Mínima	20,67	20,29	20,36	26,53	30,21	26,54
SNR Máxima	21,5	21,34	21,7	31,85	40,46	39,6

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 75-4:** SNR Máximos, escenario SIMO con polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.2.2.2. Con polarización horizontal.

La Tabla 50-4 refleja los resultados finales del porcentaje de confiabilidad de transmisión – recepción del escenario SIMO con polarización horizontal, producto de la comparación entre el mensaje transmitido respecto al recibido.

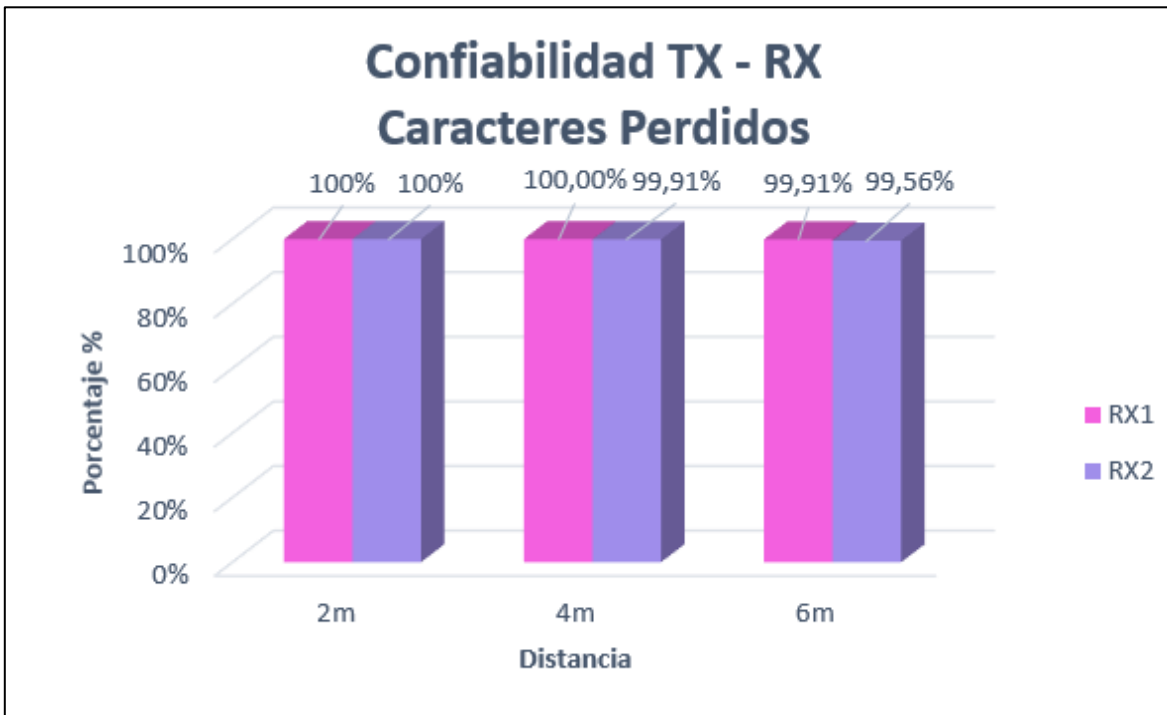
Al evaluar los caracteres perdidos durante las 30 pruebas realizadas se obtiene: a 2 metros un porcentaje de confiabilidad transmisión – recepción del 100%, tanto en RX1 como en RX2. A 4 metros en RX1 se obtiene un porcentaje del 100%, mientras que para RX2 se reduce en un 0,09%. Y a 6 metros para RX1 se reduce en 0,09% y en RX2 en 0,041%, ver Gráfico 76-4.

Por tanto se observa que donde más se perdió información es en la antena receptora 2 que está polarizada horizontalmente a una distancia de 6 metros. Sin embargo, el sistema puede ser considerado como bueno, ya que en términos estadísticos se habla de una confiabilidad de transmisión aceptable para porcentajes mayores al 95%, garantizando con los valores obtenidos que la pérdida de información es mínima para las dos antenas receptoras.

**Tabla 50-4:** Confiabilidad TX-RX escenario SIMO con polarización horizontal.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 2 RX	CARACTERES PERDIDOS					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 metros	4 metros	6 metros	2 metros	4 metros	6 metros
Confiabilidad TX - RX	100%	100%	99,91%	100%	99,91%	99,56%

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 76-4:** Confiabilidad TX – RX caracteres perdidos, escenario SIMO con p.h.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 51-4 refleja los resultados finales de la máxima desviación estándar obtenida en el escenario SIMO con polarización horizontal, producto de la comparación entre el diagrama de constelación transmitido respecto a los recibidos.

Al procesar los datos de las 30 pruebas, se obtiene una desviación estándar máxima a 2 metros en RX1 de 0,0371 dando así una confiabilidad TX – RX del 96.29% y en RX2 de 0,0430 obteniendo una confiabilidad del 95,7%. A 4 metros en RX1 de 0,0418 con una confiabilidad del 95,82% y en RX2 de 0,0484 obteniendo una confiabilidad del 95,16%. A 6 metros en RX1 de 0,543 con una

confiabilidad del 94,57% y en RX2 de 0,0920 obteniendo una confiabilidad del 90,79%, ver Gráfico 77-4.

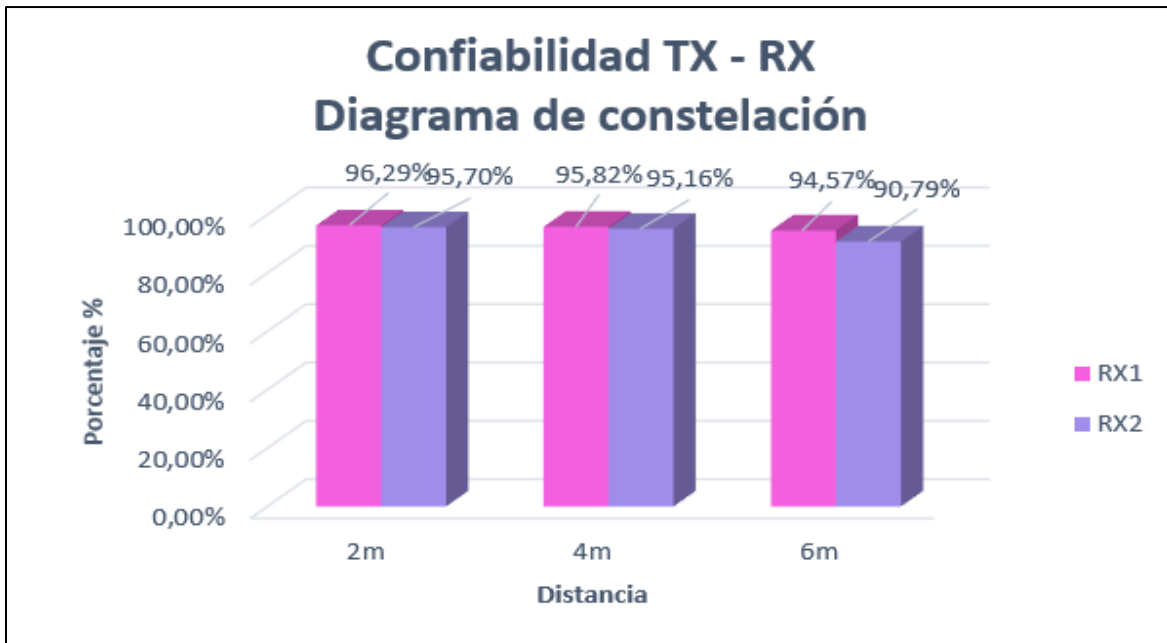
Al comparar ambos receptores se observa que a 2 y 4 metros la confiabilidad se reduce en aproximadamente 0,6%, RX2 respecto a RX1, mientras que a 6 metros se reduce en 3,78%. Por lo que se puede decir que a una distancia de 6 metros la confiabilidad del sistema es media-alta, ya se ve comprometida debido a la polarización de las antenas, teniendo más presencia de ruido durante la transmisión.

Sin embargo, cabe mencionar que para que la TX – RX sea considerada como mala se deberían obtener valores de desviación mayores al 0,707 ya que de ser así el caso los puntos de la constelación podrían irrumpir en sus cuadrantes adyacentes, es por lo que incluso al obtener un valor de 0,0920 de desviación, aún es considerada como baja y despreciable, por lo que se puede decir que hay poca o nula presencia de ruido durante la transmisión y que el sistema es eficiente.

**Tabla 51-4:** Desviaciones estándar máximas SIMO con polarización vertical.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 2 RX	DESVIACIÓN ESTÁNDAR					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 metros	4 metros	6 metros	2 metros	4 metros	6 metros
Desviación estándar máxima	0,0371	0,0418	0,0543	0,0430	0,0484	0,0920
Confiabilidad TX - RX	96,29 %	95,82%	94,57%	95,7%	95,16%	90,79%

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 77-4:** Confiabilidad TX – RX diagrama de constelación, escenario SIMO con p.h.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 52-4 refleja los resultados finales de las relaciones señal a ruido mínimas y máximas obtenidas en el escenario SIMO con polarización vertical - horizontal, producto de la relación entre la potencia de la señal recibida respecto a la potencia del ruido.

Al procesar los datos de las 30 pruebas se obtiene:

- A 2 metros en RX1 un SNR mínimo de 19,38 dB y máximo de 28,98 dB, para RX2 un mínimo de 18,5 dB y máximo de 22,5 dB. Con una reducción de RX2 a RX1 de aproximadamente 0,88dB respecto al mínimo y de 6,48dB respecto al máximo.
- A 4 metros en RX1 un SNR mínimo de 25,2 dB y máximo de 34,14 dB, para RX2 un mínimo de 19,61 dB y máximo de 20,87 dB. Con una reducción de RX2 a RX1 de aproximadamente 5,6 dB respecto al mínimo y de 13,27 dB respecto al máximo.
- A 6 metros en RX1 un SNR mínimo de 25,21 dB y máximo de 31,97 dB, para RX2 un SNR mínimo de 18,5 dB y máximo de 21,9dB. Con una reducción de RX2 a RX1 de aproximadamente 6,7 dB respecto al mínimo y de 10 dB respecto al máximo, ver Gráfico 78-4.



Se observa que los SNR aumentan a medida que la distancia es más grande, sin embargo, a 6 metros en RX2 se reduce, además al comparar ambos receptores los valores de SNR de RX2 se reducen considerablemente en comparación con los valores obtenidos en RX1, por lo que se puede decir que existió mayor presencia de ruido en la antena receptora 2 que estaba polarizada horizontalmente.

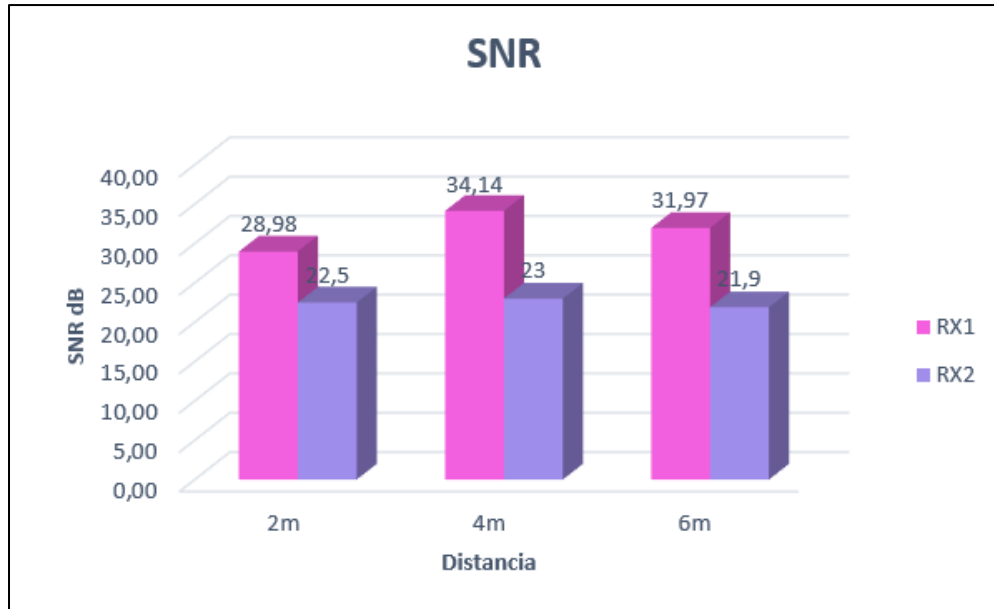
Se comprueba que existe una buena relación señal/ruido en el receptor RX1 ya que sus valores superan el rango de valores óptimos de SNR,  $> 20dB$ , y muchos de ellos sobrepasan dicho umbral llegando al rango de excelente relación señal/ruido, garantizando así un sistema de transmisión - recepción eficiente respecto a RX1.

Sin embargo, a pesar de que el receptor RX2 a comparación con RX1 reduce notablemente sus valores de SNR, también se puede decir que existe una buena relación señal/ruido, incluso cuando sus mínimos están por debajo de 20dB, ya que los valores mínimos recomendados son de 18dB, por lo tanto, si se puede garantizar un sistema de transmisión - recepción eficiente respecto a RX2.

**Tabla 52-4:** Valores SNR máximos del escenario SIMO con polarización horizontal.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	RELACIÓN SEÑAL A RUIDO					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 metros	4 metros	6 metros	2 metros	4 metros	6 metros
SNR Mínima	19,38	25,2	25,21	18,5	19,61	18,5
SNR Máxima	28,98	34,14	31,97	22,5	23	21,9

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 78-4:** SNR Máximos, escenario SIMO con polarización vertical - horizontal.

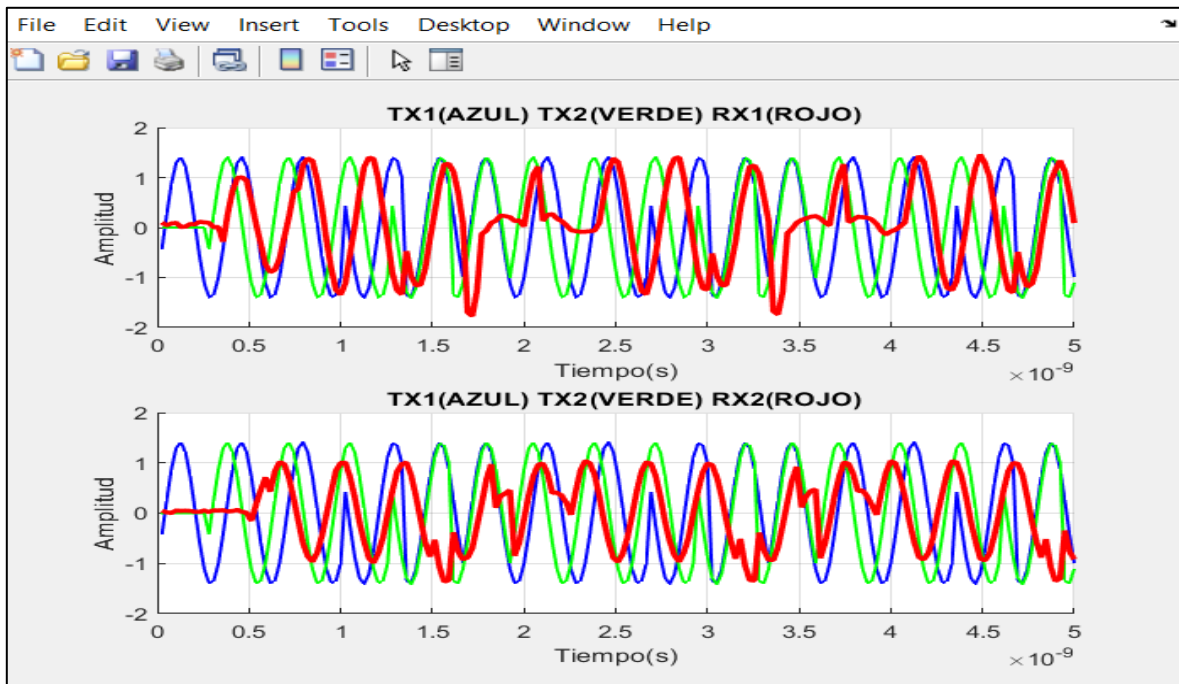
**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

Una vez analizados los datos del escenario 2 mimo tanto con polarización vertical como horizontal, se determina que se obtienen mejores resultados cuando las antenas del sistema se encuentran polarizadas verticalmente, ya que al estar polarizada horizontalmente la onda viaja por el medio a  $90^\circ$  produciendo atenuaciones en la señal, lo cual se evidencia mediante los resultados obtenidos en las desviaciones estándar, ya que en el primer caso existe menor cantidad de ruido en los cuadrantes del diagrama de constelación, por ello se obtienen mejores valores de SNR.

#### **4.2.3. Resultado Final Escenario MIMO 2x2**

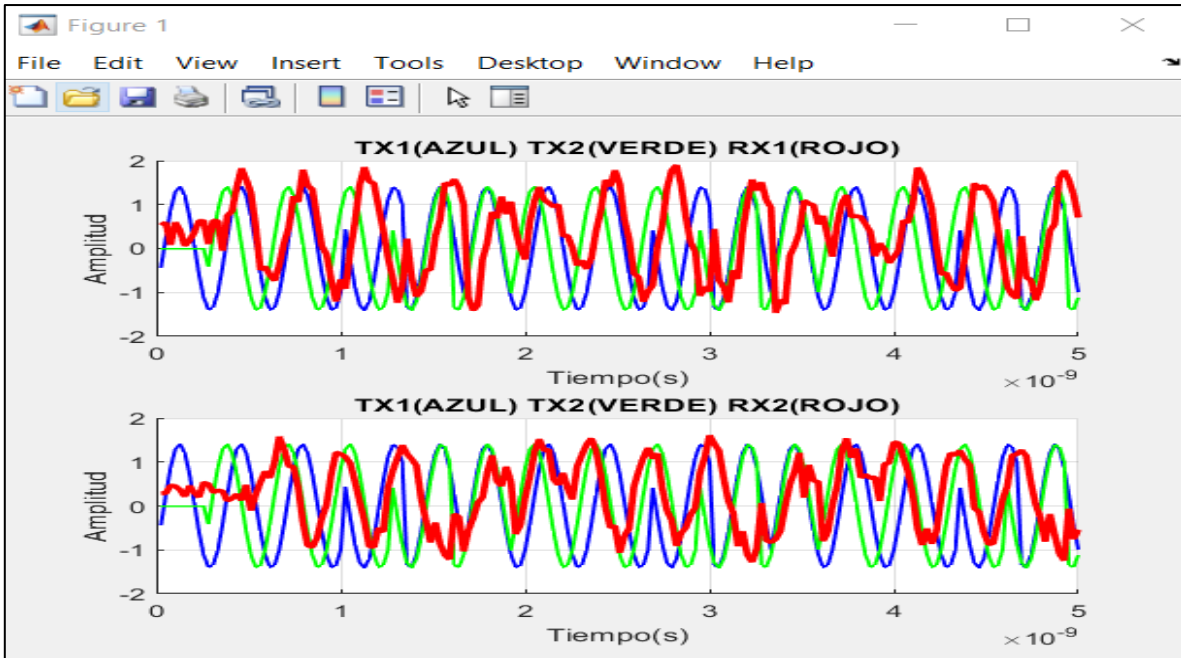
Para comprobar que la información recibida en los receptores RX1 y RX2 es la misma que se transmitió se realizó la correlación de señales, ya que esta proporciona una medida de la correspondencia o interrelación, además también del retardo que sufre la señal recibida, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa.

En las Figuras 1-4 a 3-4 se muestran las señales resultantes recibidas por los receptores RX1 y RX2, las mismas que sufren ciertos desplazamientos debido a los retardos producidos en el medio u ocasionados por el procesamiento en hardware.



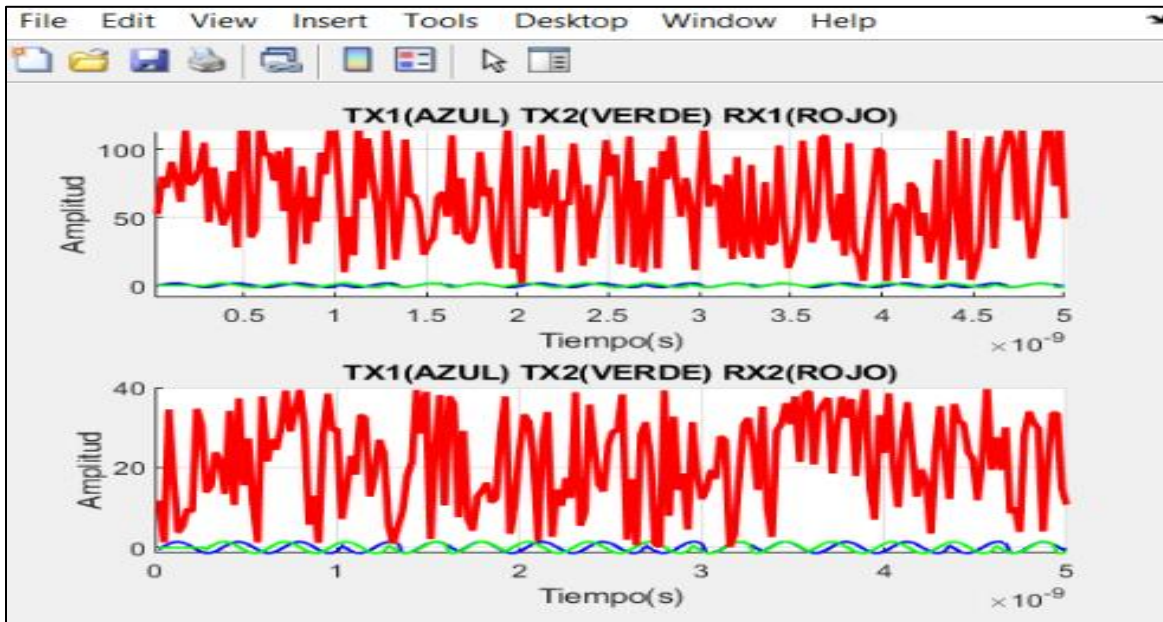
**Figura 1-4:** Señales resultantes recibidas en un ambiente de bajo ruido MIMO 2x2.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 2-4:** Señales resultantes recibidas en un ambiente de ruido medio MIMO 2x2

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

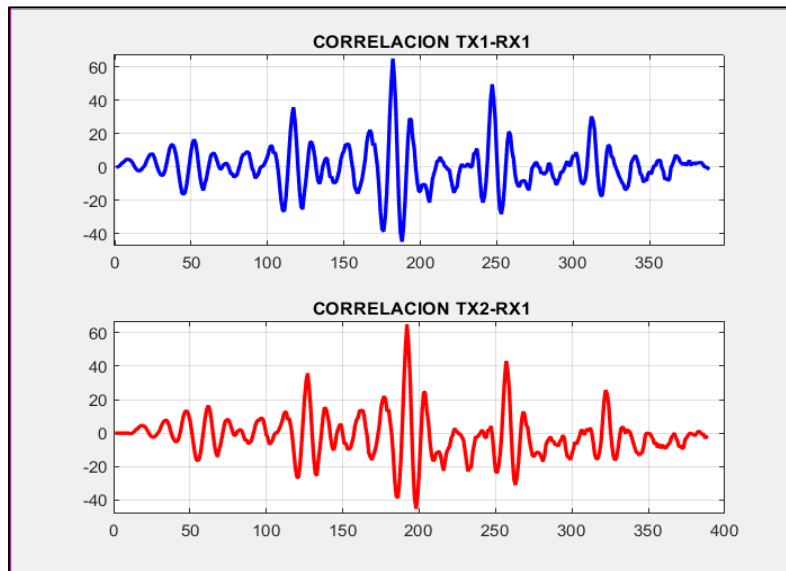


**Figura 3-4:** Señales resultantes recibidas en un ambiente de bajo alto MIMO 2x2.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

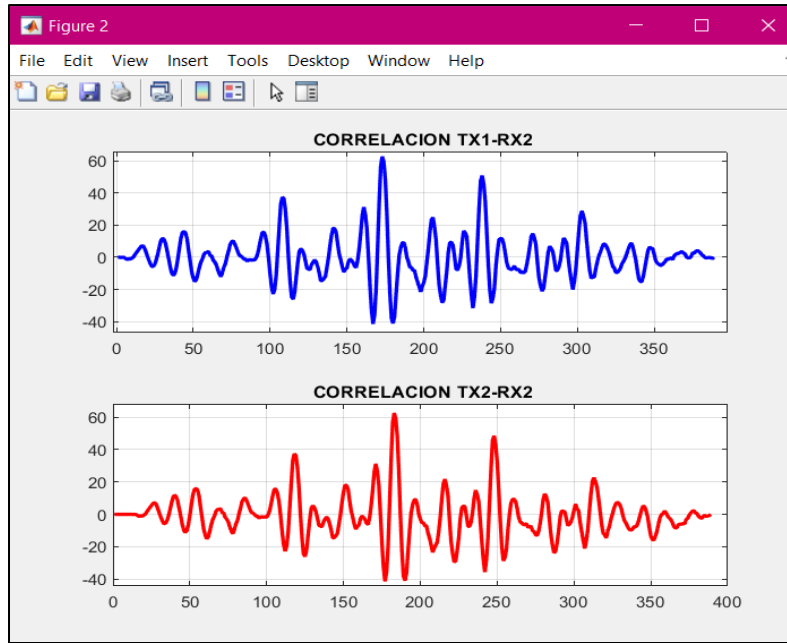
Posteriormente a ello, se realizó la correlación con las señales transmitidas originalmente, obtenidas mediante las 30 pruebas durante la simulación del sistema MIMO 2X2, tanto para ambientes de ruido bajo, medio y alto.

Esto se evidencia mediante las Figuras 4-4 a 9-4, donde se observan varios picos, los cuales indican los puntos en los que las señales se encuentran correladas, teniendo una máxima similitud en el pico más alto, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa. Sin embargo, como se puede observar las señales recibidas en un ambiente con ruido alto tienden a tener mayor atenuación que las señales recibidas en un ambiente de bajo ruido.



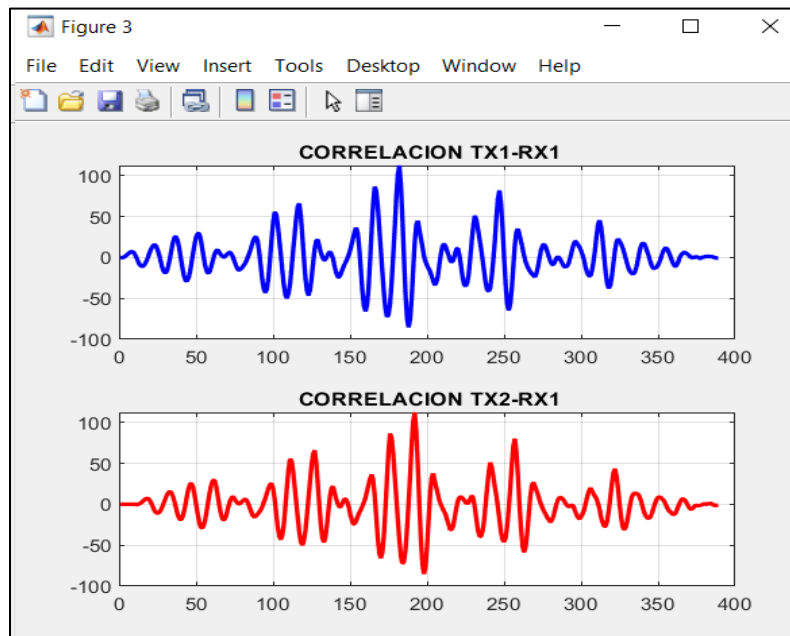
**Figura 4-4:** Correlación RX1 con TX1 y TX2, ruido bajo.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



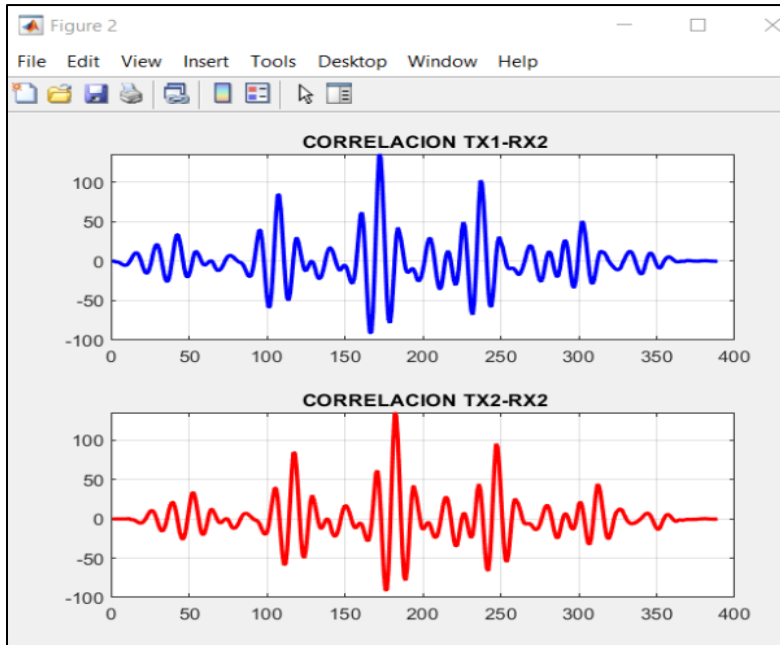
**Figura 5-4:** Correlación RX2 con TX1 y TX2, ruido bajo.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



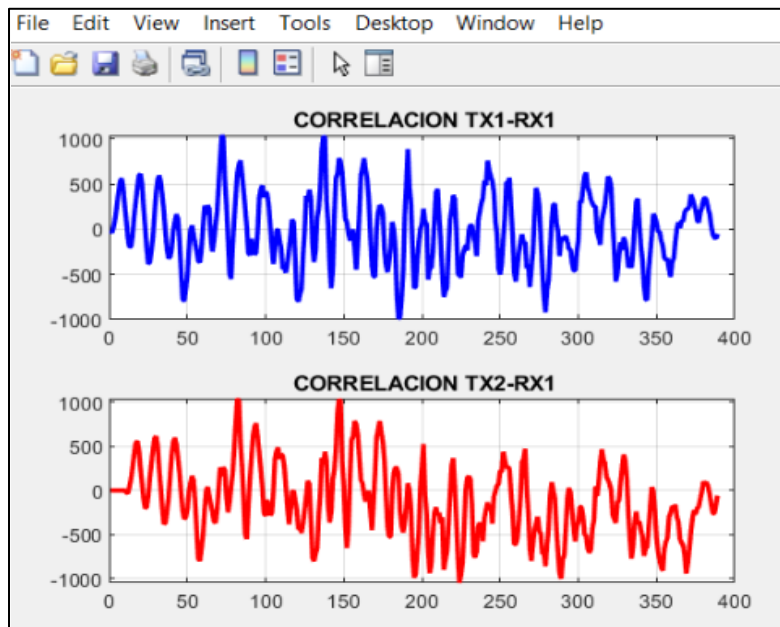
**Figura 6-4:** Correlación RX1 con TX1 y TX2, ruido alto.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



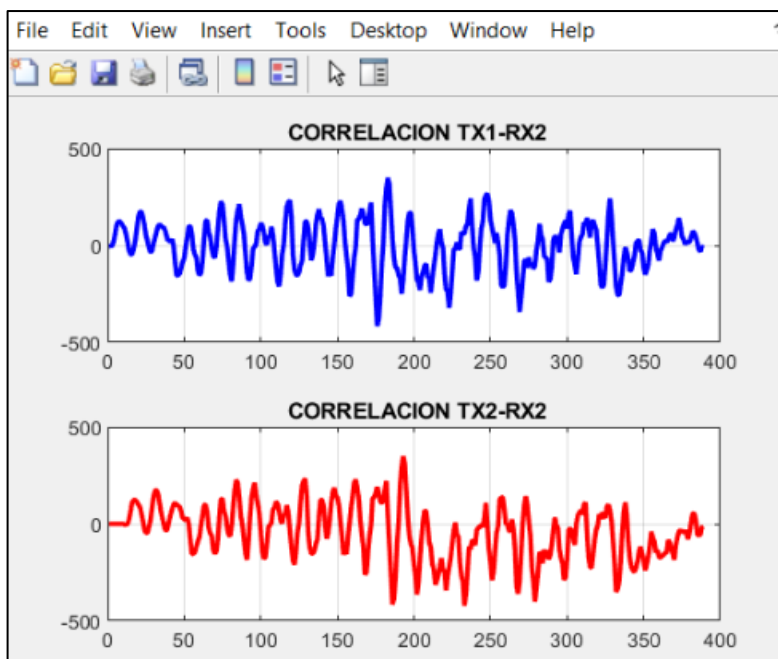
**Figura 7-4:** Correlación RX2 con TX1 y TX2, ruido medio.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 8-4:** Correlación RX2 con TX1 y TX2, ruido alto.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 9-4:** Correlación RX2 con TX1 y TX2, ruido alto.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.2.3.1. Con ruido bajo.

La Tabla 53-4 refleja los resultados finales de las relaciones señal a ruido mínimas y máximas obtenidas en el escenario MIMO 2X2 con ruido bajo, producto de la relación entre la potencia de la señal recibida respecto a la potencia del ruido.

Al procesar los datos de las 30 pruebas, se obtiene para RX1 un SNR mínimo de 32,76 dB y máximo de 52,7 dB, mientras que en RX2 se obtiene un SNR mínimo de 41,11 dB y máximo de 55,8 dB.

Mediante los resultados obtenidos se comprobó que los valores de SNR son excelentes, ya que se superan el rango de valores óptimos de SNR,  $> 20dB$ , comprobando que la potencia de la señal es superior con creces a la potencia del ruido, garantizando así un sistema de transmisión - recepción eficiente.



**Tabla 53-4:** Valores SNR máximos del escenario MIMO 2x2 con ruido bajo.

SISTEMA MIMO  2 TX/ 2 RXs	RELACIÓN SEÑAL/RUIDO (SNR)  dB	
	RECEPTOR 1	RECEPTOR 2
Valor Mínimo	32,76	41,11
Valor Máximo	52,7	55,8

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.2.3.2. Con ruido medio.

La Tabla 54-4 refleja los resultados finales de las relaciones señal a ruido mínimas y máximas obtenidas en el escenario MIMO 2X2 con ruido medio, producto de la relación entre la potencia de la señal recibida respecto a la potencia del ruido.

Al procesar los datos de las 30 pruebas, se obtiene para RX1 un SNR mínimo de 20,26 dB y máximo de 44,58 dB, mientras que en RX2 se obtiene un SNR mínimo de 20,68 dB y máximo de 43,44 dB.

A pesar de que se simuló un ambiente de ruido alto se obtuvieron valores de SNR buenos, ya que se encuentran dentro del rango de valores óptimos de SNR,  $> 20dB$ , comprobando que la potencia de la señal es superior a la potencia del ruido, garantizando así un sistema de transmisión - recepción eficiente.

**Tabla 54-4:** Valores SNR máximos del escenario MIMO 2x2 con ruido medio.

SISTEMA MIMO  2 TX/ 2 RXs	RELACIÓN SEÑAL/RUIDO (SNR)  dB	
	RECEPTOR 1	RECEPTOR 2

Valor Mínimo	20,26	20,68
Valor Máximo	44,58	43,44

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

#### 4.2.3.3. Con ruido alto.

La Tabla 55-4 refleja los resultados finales de las relaciones señal a ruido mínimas y máximas obtenidas en el escenario MIMO 2X2 con ruido alto, producto de la relación entre la potencia de la señal recibida respecto a la potencia del ruido.

Al procesar los datos de las 30 pruebas, se obtiene para RX1 un SNR mínimo de 0,5 dB y máximo de 5.76 dB, mientras que en RX2 se obtiene un SNR mínimo de 0,19 dB y máximo de 4,29 dB.

Se observa que los valores de SNR son malos, ya que se encuentran muy por debajo del rango de valores óptimos de SNR,  $> 20dB$ , comprobando que la potencia de ruido es superior a la potencia de la señal, por tal motivo no se puede garantizar un sistema de transmisión - recepción eficiente y confiable.

**Tabla 55-4:** Valores SNR máximos del escenario MIMO 2x2 con ruido alto.

SISTEMA MIMO  2 TX/ 2 RXs	RELACIÓN SEÑAL/RUIDO (dB)	
	RECEPTOR 1	RECEPTOR 2
Valor Mínimo	0,50	0,19
Valor Máximo	5,76	4,29

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

Una vez obtenidos los resultados del sistema MIMO 2X2, se observa que el sistema es eficiente para ambientes de bajo a medio ruido a comparación de los escenarios anteriores donde se emplea una

configuración SISO y SIMO ya que sus relaciones señal a ruido aumentan abruptamente, pudiendo obtener SNR's de hasta 55 dB o más.

Realizando una comparación del sistema MIMO 2X2 con ruido bajo, medio y alto, se puede observar que se obtienen mejores resultados cuando la transmisión se realiza en ambientes de ruido bajo a medio ya que en esas condiciones los valores de SNR aumentan, brindando de esta manera un sistema más confiable en cuanto a transmisión de información, ver Gráfico 79-4.



**Gráfico 79-4:** SNR Máximos ruido bajo, medio y alto.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

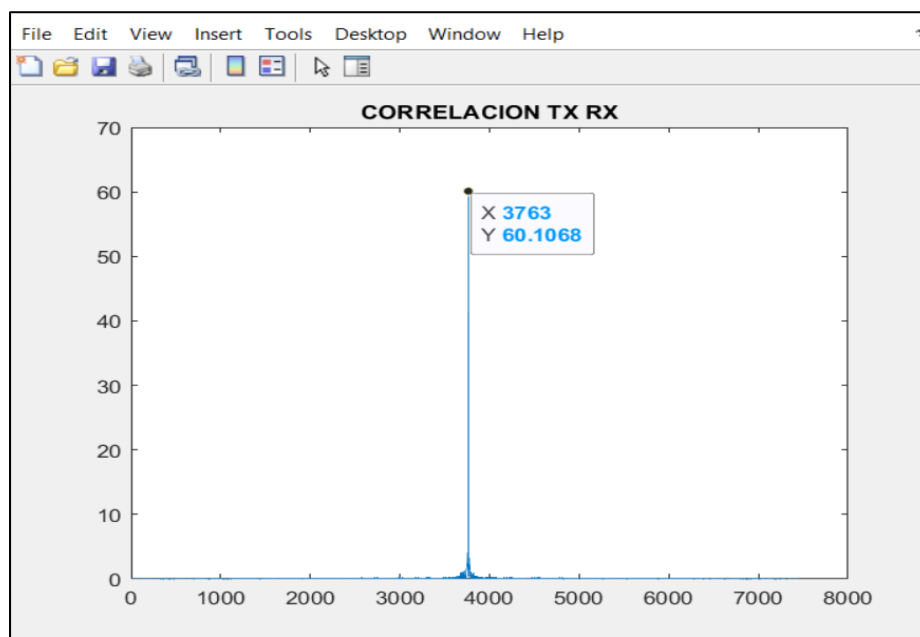
#### **4.2.4. Resultado Final Escenario 1 RADAR**

##### **4.2.4.1. Con polarización vertical.**

Para comprobar que la información recibida es la misma que se transmitió se realizó la correlación de señales, para ver la correspondencia o interrelación entre ellas, además también del retardo que sufre la señal recibida, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa.

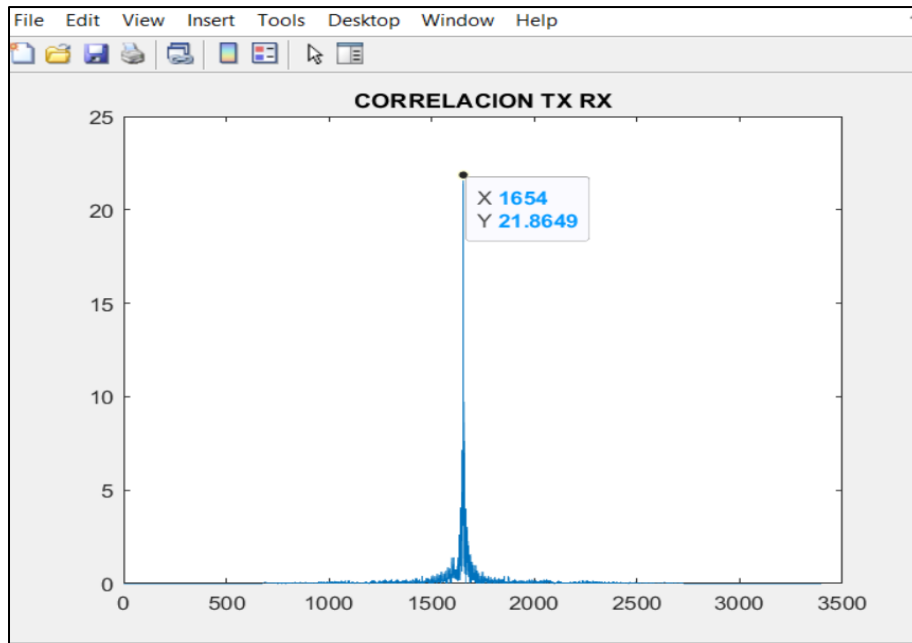
A partir de las 30 pruebas realizadas en el escenario 1 radar con polarización vertical, se realizó la correlación entre la señal chirp recibida respecto a la señal transmitida, esto se evidencia mediante las Figuras 10-4 a 12-4, donde se puede observar un pico alto, el cual indica el punto en el que las señales se encuentran correladas, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa. Sin embargo, se puede observar que a medida que la distancia aumenta el pico se sitúa más lejos del origen, pudiendo obtener mediante la gráfica el retardo que sufrió la señal chirp hasta ser detectada por el receptor.

Al comparar las correlaciones obtenidas a las 3 distancias de análisis, se determina que en todos los casos las señales recibidas concuerdan con la información transmitida, sin embargo, a 4 metros la señal presenta cierto ruido y a 6 metros hay la presencia de un mayor ruido a diferencia de 2 metros donde la señal tiene un ruido mínimo.



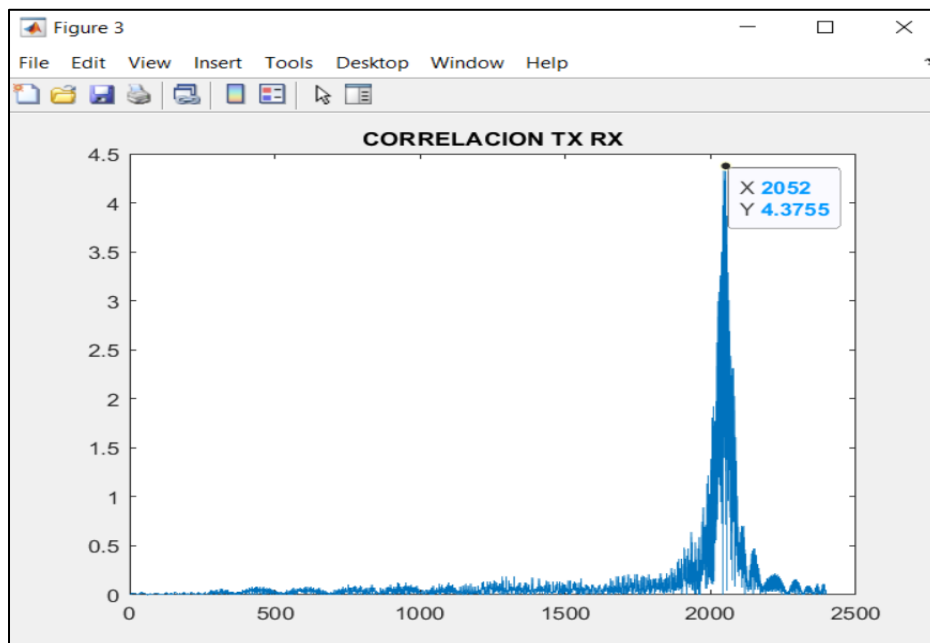
**Figura 10-4:** Correlación TX – RX prueba 27 a 2 metros, polarización vertical.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021



**Figura 11-4:** Correlación TX – RX1 prueba 1 a 4 metros, polarización vertical.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021



**Figura 12-4:** Correlación TX – RX1 prueba 11 a 6 metros, polarización vertical.

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

La Tabla 56-4 refleja los resultados finales de tiempos de retardo máximos y mínimos, obtenidos por la antena receptora RX1 polarizada verticalmente durante las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros.

Observando que a medida que aumenta la distancia a la que se encuentra la placa de cobre, el retardo aumenta, variando de una distancia a otra en 3,25us aproximadamente. lo cuales son tiempos de retardo óptimos en un sistema radar. Al calcular el rango para cada distancia de análisis, se determina que a una distancia de 2 metros se obtienen tiempos de retardo más dispersos, a diferencia de 4 y 6 metros.

**Tabla 56-4:** Resultados finales de tiempos de retardo escenario radar p.v.

SISTEMA MIMO  1 TX/ 1 RX	TIEMPOS DE RETARDO		
	2 metros	4 metros	6 metros
Valor mínimo	3 $\mu s$	6,38 $\mu s$	9,2 $\mu s$
Valor Máximo	5,74 $\mu s$	8,4 $\mu s$	11,92 $\mu s$

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

En la Tabla 57-4 se reflejan los resultados finales de las distancias a las que fue detectada la placa de cobre, obtenidos mediante la antena receptora RX1 polarizada verticalmente.

Al procesar los datos de las 30 pruebas se obtiene:

- A 2 metros se obtuvo, una distancia mínima de 1,2 metros y máxima de 2,7 metros, con un promedio de 1,9 metros. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,1 metros, por lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real.
- A 4 metros se obtuvo, una distancia mínima de 3,3 metros y máxima de 4,7 metros, con un promedio de 4 metros. Comprobando que no existe diferencia entre el valor medido con el valor real al que se ubicó la placa de cobre, lo cual es excelente ya que la gran mayoría de las mediciones se acercó a la distancia real.
- A 6 metros se obtuvo, una distancia mínima de 5,5 metros y máxima de 6,9 metros, con un promedio de 6,2 metros. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la

placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,2 metros, lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real.

Al comparar los valores obtenidas a las 3 distancias, se determina que el sistema radar tuvo mejores resultados a una distancia de 4 metros, ya que las mediciones realizadas se acercan más al valor real.

**Tabla 57-4:** Resultados finales de distancias del objeto escenario 1 radar p.v.

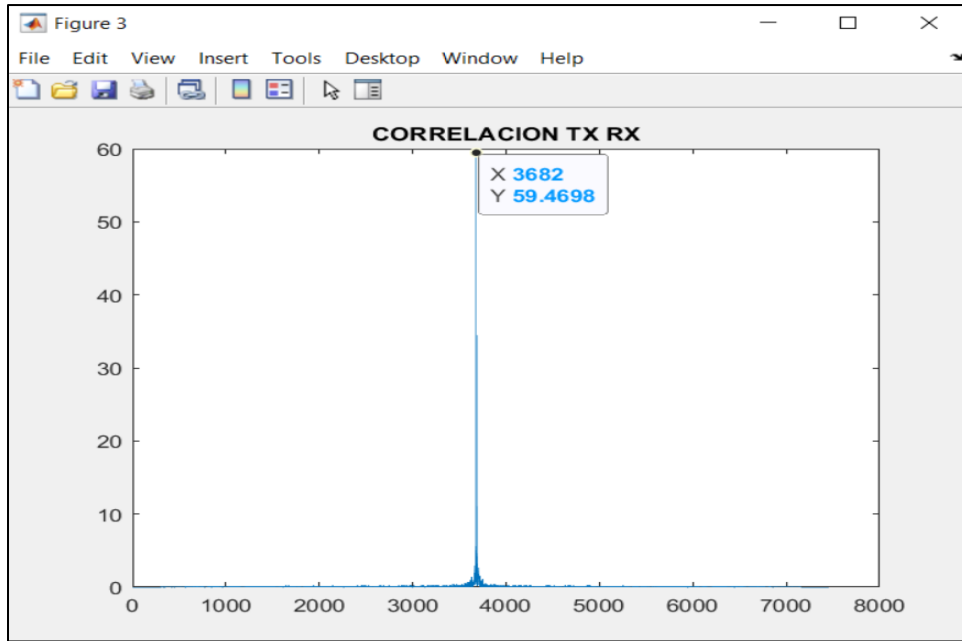
SISTEMA RADAR  1 TX/ 1 RX	RADARGRAMA (Metros)		
	2 metros	4 metros	6 metros
Valor Real			
Valor Mínimo	1,2 m	3,3 m	5,5 m
Valor Máximo	2,7 m	4,7 m	6,9 m
Valor Promedio	1,9 m	4,0 m	6,2 m

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.2.4.2. Con polarización horizontal.

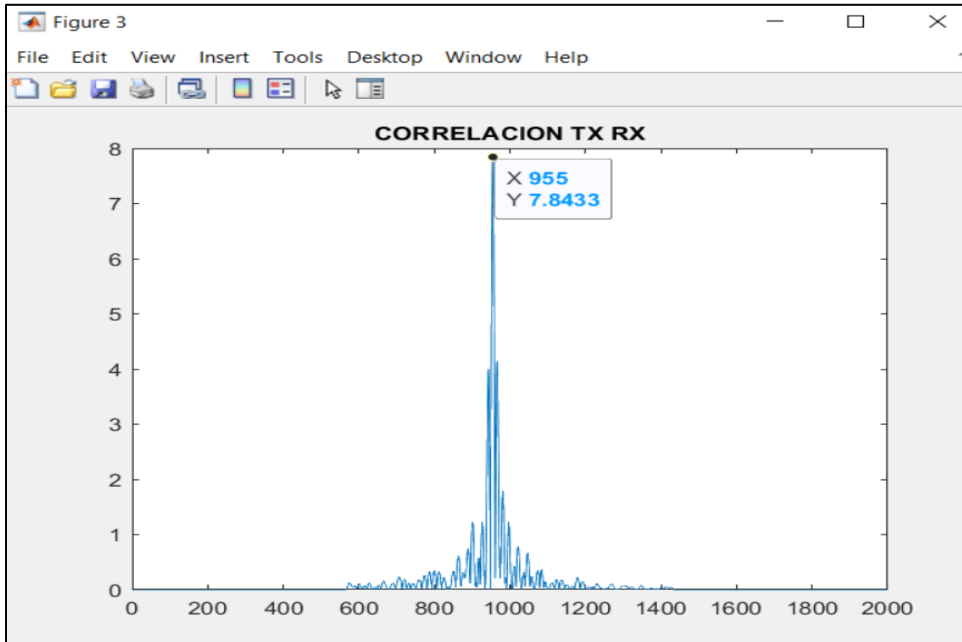
A partir de las 30 pruebas realizadas en el escenario, se realizó la correlación entre la señal chirp recibida respecto a la señal transmitida para ver la correspondencia o interrelación entre ellas, esto se evidencia mediante las Figuras 13-4 a 15-4, donde se puede observar un pico alto, el cual indica el punto en el que las señales se encuentran correladas, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa. Sin embargo, se puede observar que a medida que la distancia aumenta el pico se sitúa más lejos del origen, pudiendo obtener mediante la gráfica el retardo que sufrió la señal chirp hasta ser detectada por el receptor.

Al comparar las correlaciones obtenidas a las 3 distancias de análisis, se determina que en todos los casos las señales recibidas concuerdan con la información transmitida, sin embargo, a 4 y 6 metros se puede observar que la señal llega con mayor ruido a diferencia de 2 metros donde la señal tiene un ruido mínimo.



**Figura 13-4:** Correlación TX – RX prueba 22 a 2 metros, polarización horizontal.

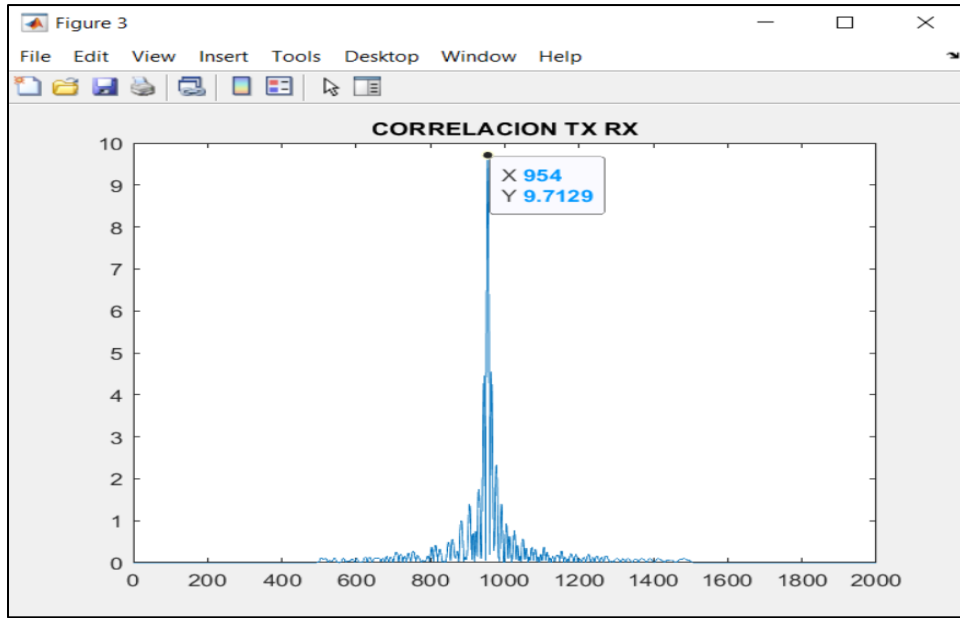
Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 14-4:** Correlación TX – RX prueba 17 a 4 metros, polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021





**Figura 15-4:** Correlación TX – RX prueba 6 a 6 metros, polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 58-4 refleja los resultados finales de tiempos de retardo máximos y mínimos, obtenidos por la antena receptora polarizada horizontalmente durante las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros.

Determinando que a medida que aumenta la distancia a la que se encuentra la placa de cobre, el retardo aumenta, sin embargo, los resultados obtenidos en el escenario son tiempos de retardo óptimos para el sistema radar. Al calcular el rango para cada distancia de análisis, se determina que a una distancia de 6 metros se obtienen tiempos de retardo más dispersos, a diferencia de 2 y 4 metros.

**Tabla 58-4:** Resultados finales de tiempos de retardo escenario 1 radar p.h.

SISTEMA MIMO	TIEMPOS DE RETARDO		
	2 metros	4 metros	6 metros
<b>1 TX/ 1 RX</b>			
Valor Mínimo	3,11 $\mu s$	6,03 $\mu s$	9,39 $\mu s$
Valor Máximo	5,76 $\mu s$	9,53 $\mu s$	13,27 $\mu s$

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

En la Tabla 59-4 se reflejan los resultados finales de las distancias a las que fue detectada la placa de cobre, obtenidos mediante la antena receptora RX1 polarizada verticalmente.

Al procesar los datos de las 30 pruebas se obtiene:

- A 2 metros se obtuvo, una distancia mínima de 1,5 metros y máxima de 2,7 metros, con un promedio de 2 metros. Comprobando que no existe diferencia entre el valor medido con el valor real al que se ubicó la placa de cobre, lo cual es excelente ya que la gran mayoría de las mediciones se acercó a la distancia real.
- A 4 metros se obtuvo, una distancia mínima de 3,2 metros y máxima de 5,4 metros, con un promedio de 4,3 metros. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,3 metros, lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real.
- A 6 metros se obtuvo, una distancia mínima de 5,7 metros y máxima de 6,6 metros, con un promedio de 6,1 metros. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,1 metros, lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real.

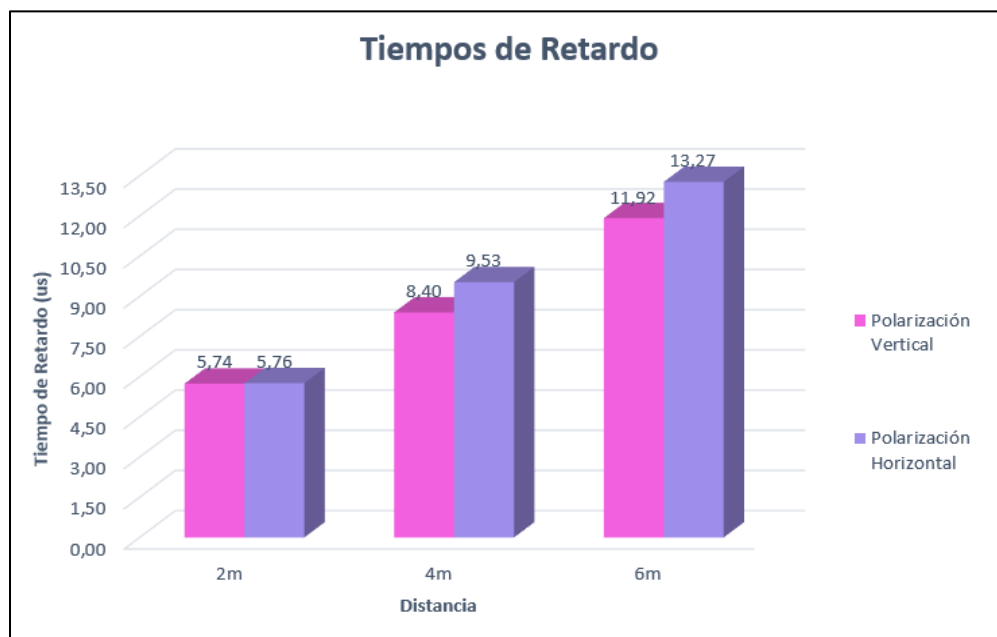
**Tabla 59-4:** Resultados finales de distancias del objeto escenario 1 radar p.h.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 1 RX	DISTANCIA A LA QUE SE DETECTO EL OBJETO		
	2 metros	4 metros	6 metros
Valor Mínimo	1,5 m	3,2 m	5,7 m
Valor Máximo	2,7 m	5,4 m	6,6 m
Promedio	2,0 m	4,3 m	6,1 m

**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

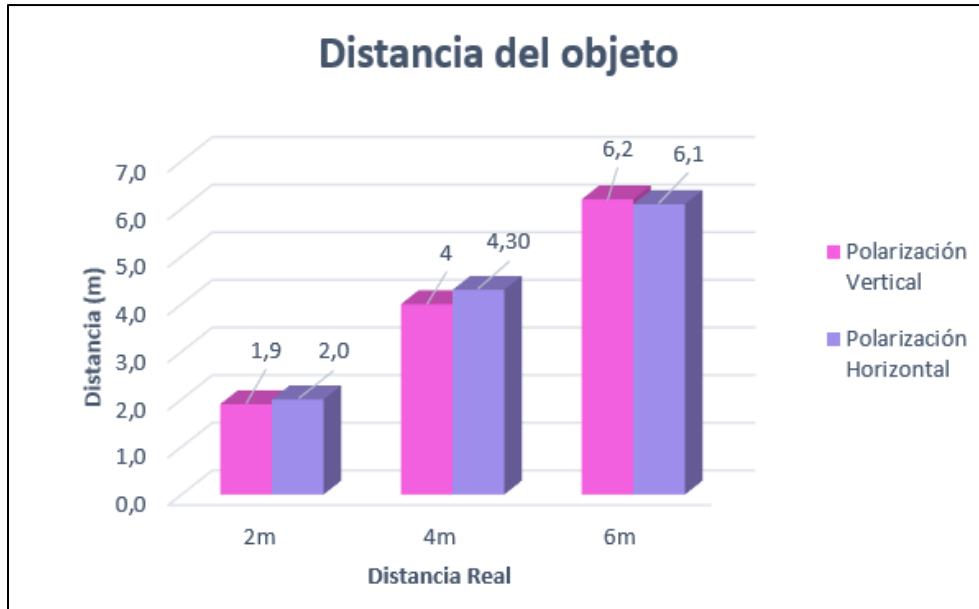
Una vez analizados los datos del escenario 1 radar tanto con polarización vertical como horizontal, se determina que se obtienen mejores resultados cuando las antenas del sistema se encuentran polarizadas verticalmente, ya que la polarización horizontal al propagar la onda a 90° produce

atenuaciones en la señal, lo cual incrementa los tiempos de retardo y las distancias a las que fue detectado el objeto, además también de que mediante los gráficos de correlación se observa que a distancias de 4 y 6 metros con antenas polarizadas horizontalmente el ruido incrementa a comparación de las antenas con polarización vertical, ver Gráfico 80-4 y 81-4.



**Gráfico 80-4:** Tiempos de retardo, Polarización vertical vs. Polarización Horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 81-4:** Distancia del objeto, Polarización vertical vs. Polarización Horizontal.

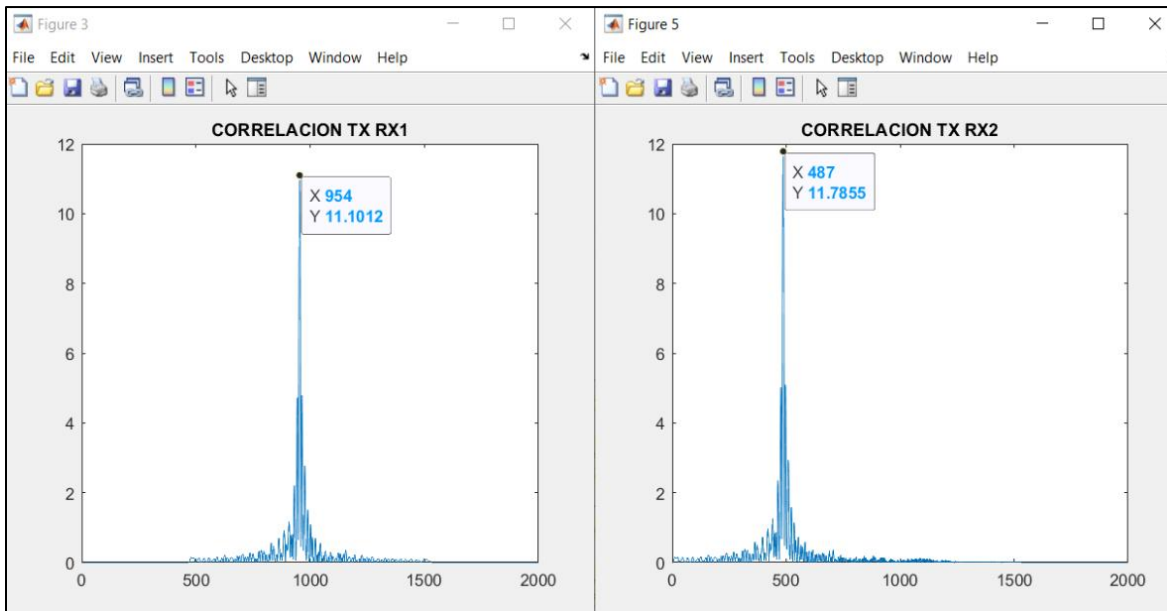
Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.2.5. Resultado Final Escenario 2 RADAR

##### 4.2.5.1. Con polarización vertical.

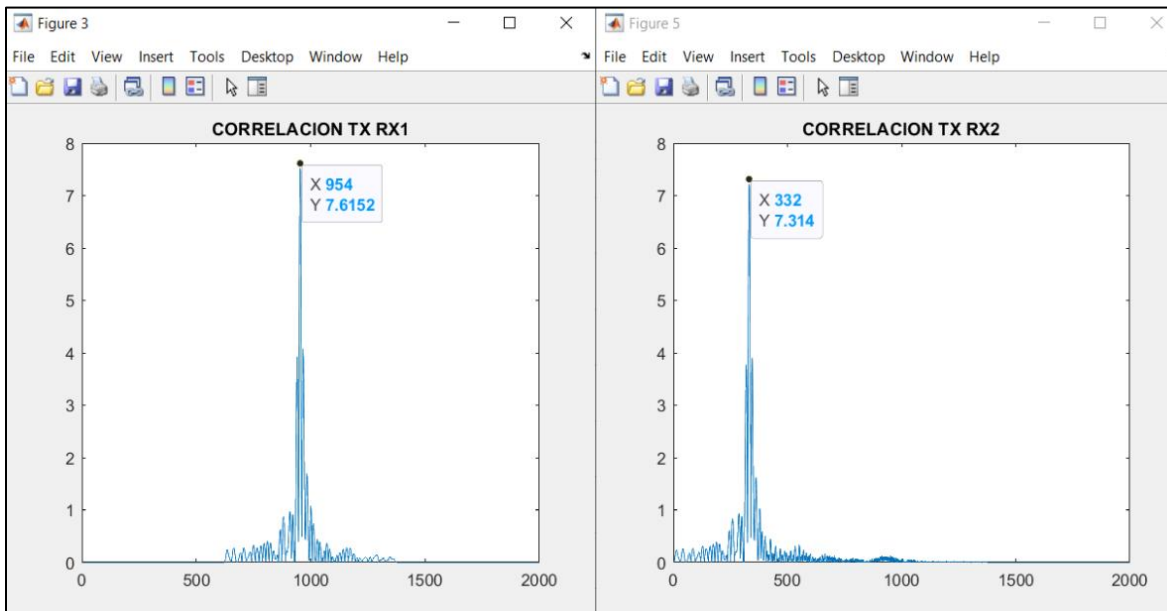
A partir de las 30 pruebas realizadas en el escenario 2 radar con polarización vertical, se realizó la correlación entre la señal chirp recibida respecto a la señal transmitida para ver la correspondencia o interrelación entre ellas, esto se evidencia mediante las Figuras 16-4 a 18-4, donde se puede observar un pico alto, el cual indica el punto en el que las señales se encuentran correladas, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa. Sin embargo, se puede observar que a medida que la distancia aumenta el pico se sitúa más lejos del origen, pudiendo obtener mediante la gráfica el retardo que sufrió la señal chirp hasta ser detectada por el receptor.

Al comparar las correlaciones obtenidas a las 3 distancias de análisis, se determina que en todos los casos las señales recibidas concuerdan con la información transmitida, sin embargo, si existe una mínima presencia ruido a diferencia.



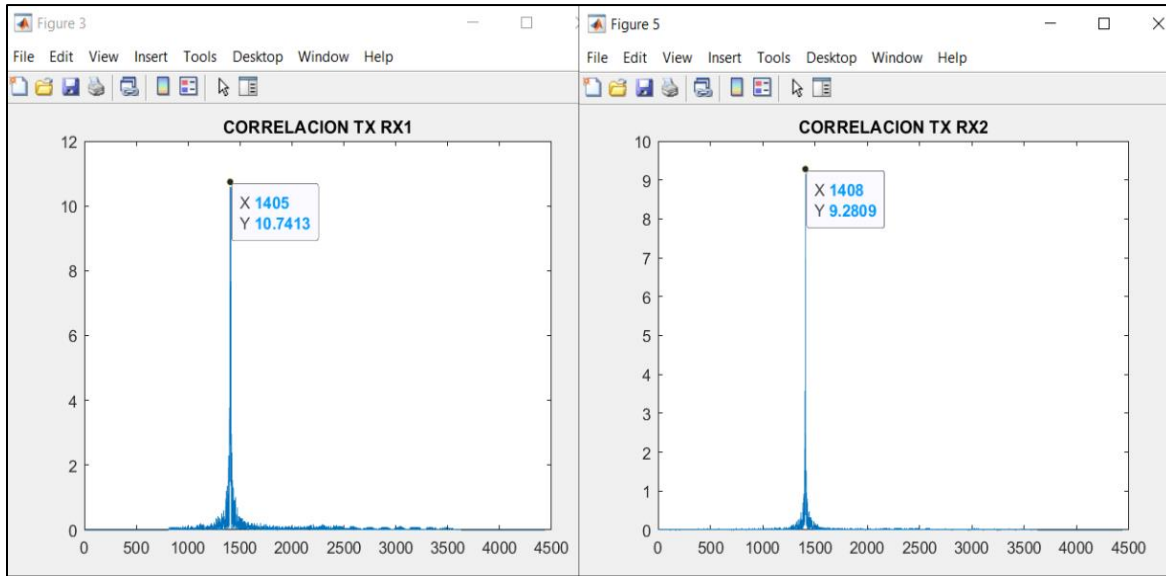
**Figura 16-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 5 a 2 metros, polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 17-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 10 a 4 metros, polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 18-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 28 a 6 metros, polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 60-4 refleja los resultados finales de tiempos de retardo máximos y mínimos, obtenidos por la antena receptora RX1 y RX2 polarizada verticalmente durante las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros.

Observando que a medida que aumenta la distancia a la que se encuentra la placa de cobre, el retardo aumenta, lo cuales son tiempos de retardo óptimos para el sistema radar. Al calcular el rango para cada distancia de análisis, se determina que a una distancia de 4 metros se obtienen tiempos de retardo más dispersos, a diferencia de 2 y 6 metros.

**Tabla 60-4:** Resultados finales de tiempos de retardo escenario 2 radar p.v.

SISTEMA RADAR	TIEMPOS DE RETARDO					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
1 TX/ 2 RX						

Valor Mínimo	3,25 $\mu s$	6,03 $\mu s$	10,45 $\mu s$	3,25 $\mu s$	6,03 $\mu s$	10,45 $\mu s$
Valor Máximo	5,74 $\mu s$	9,03 $\mu s$	12,73 $\mu s$	5,74 $\mu s$	9,03 $\mu s$	13,08 $\mu s$

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

En la Tabla 61-4 se reflejan los resultados finales de las distancias a las que fue detectada la placa de cobre, obtenidos mediante las antenas receptoras RX1 y RX2 polarizadas verticalmente.

Al procesar los datos de las 30 pruebas se obtiene:

- A 2 metros se obtuvo, una distancia mínima de 1,2 metros y máxima de 2,7 metros, con un promedio de 1,8 metros para RX1. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,2 metros, por lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real. Para RX2 se obtuvo, una distancia mínima de 1,3 metros y máxima de 2,7 metros, con un promedio de 1,9 metros para RX1. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,1 metros, por lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real.
- A 4 metros se obtuvo, una distancia mínima de 3,1 metros y máxima de 4,9 metros, con un promedio de 4 metros para RX1. Comprobando que no existe diferencia entre el valor medido con el valor real al que se ubicó la placa de cobre, lo cual es excelente ya que la gran mayoría de las mediciones se acercó a la distancia real. Para RX2 se obtuvo, una distancia mínima de 3,1 metros y máxima de 4,9 metros, con un promedio de 4,1 metros. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,1 metros, por lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real.
- A 6 metros se obtuvo, una distancia mínima de 5,5 metros y máxima de 6,9 metros, con un promedio de 6,1 metros para RX1. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,1 metros, lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real. Para RX2 se obtuvo, una distancia mínima de 5,5 metros y máxima de 6,9 metros, con un promedio de 6,3 metros. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,3 metros, por lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real.

Al comparar los valores obtenidos a las 3 distancias, se determina que el sistema radar tuvo mejores resultados a una distancia de 4 metros en el receptor 1, ya que las mediciones realizadas se acercan más al valor real.

**Tabla 61-4:** Resultados finales de distancias del objeto escenario 2 radar p.v.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 2 RX	RADARGRAMA (Metros)					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
Valor Real	2 metros	4 metros	6 metros	2 metros	4 metros	6 metros
Valor Mínimo	1,2	3,1	5,5	1,3	3,1	5,5
Valor Máximo	2,7	4,9	6,9	2,7	4,9	6,9
Promedio	1,8	4	6,1	1,9	4,1	6,3

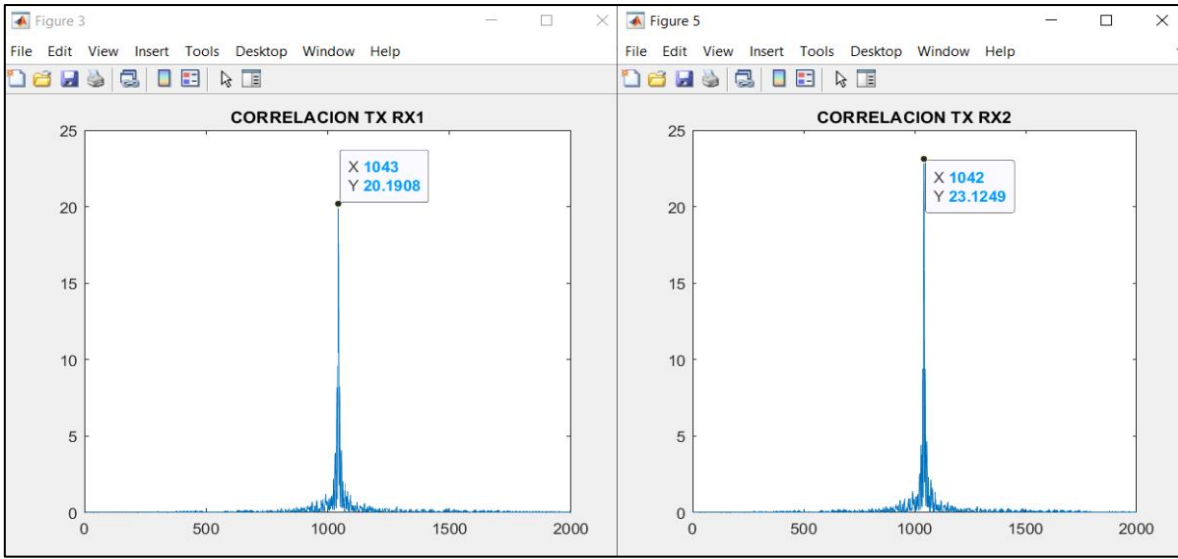
Realizado por: Merino, Daniela; 2021

#### 4.2.5.2. Con polarización horizontal.

A partir de las 30 pruebas realizadas en el escenario 2 radar con polarización vertical, se realizó la correlación entre la señal chirp recibida respecto a la señal transmitida para ver la correspondencia o interrelación entre ellas, esto se evidencia mediante las Figuras 19-4 a 21-4, donde se puede observar un pico alto, el cual indica el punto en el que las señales se encuentran correladas, asegurando de esta manera que la transmisión es exitosa. Sin embargo, se puede observar que a medida que la distancia aumenta el pico se sitúa más lejos del origen, pudiendo obtener mediante la gráfica el retardo que sufrió la señal chirp hasta ser detectada por el receptor.

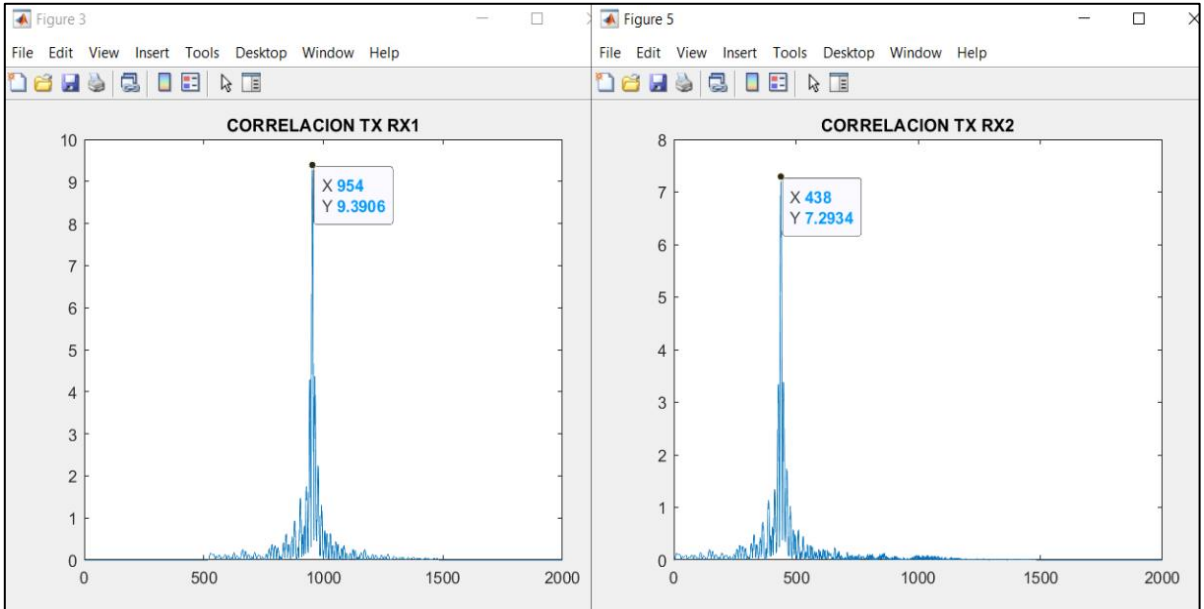
Al comparar las correlaciones obtenidas a las 3 distancias de análisis, se determina que en todos los casos las señales recibidas concuerdan con la información transmitida, sin embargo, si existe una mínima presencia ruido a diferencia.





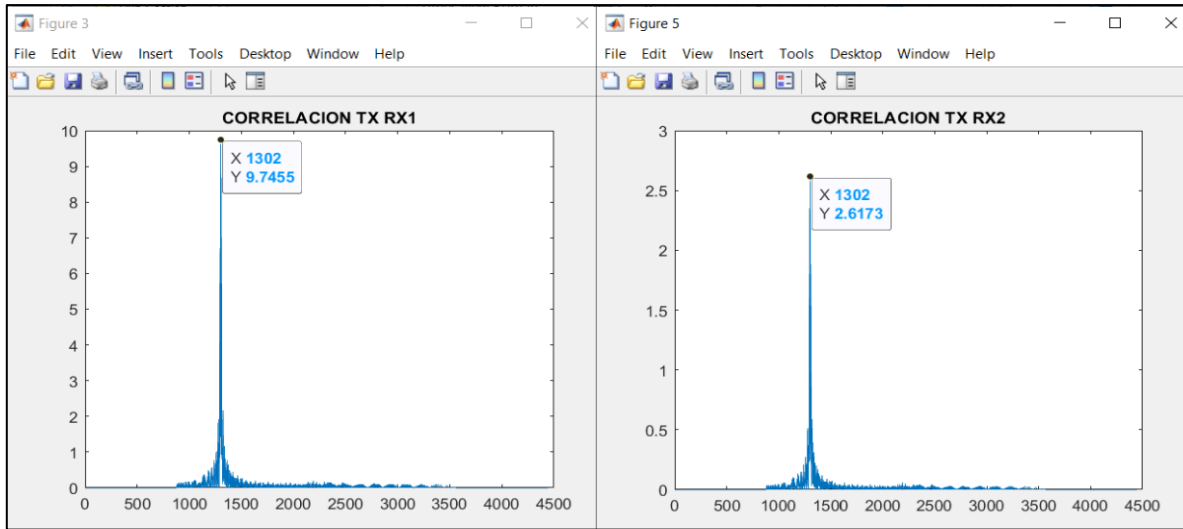
**Figura 19-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 24 a 2 metros, polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 20-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 17 a 4 metros, polarización horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Figura 21-4:** Correlación TX – RX1 y RX2 prueba 8 a 6 metros, polarización vertical.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

La Tabla 62-4 refleja los resultados finales de tiempos de retardo máximos y mínimos, obtenidos por la antena receptora RX1 y RX2 con polarización vertical – horizontal, durante las 30 muestras realizadas a 2, 4 y 6 metros. Observando que a medida que aumenta la distancia a la que se encuentra la placa de cobre, el retardo aumenta, lo cuales son tiempos de retardo óptimos para el sistema radar. Al calcular el rango para cada distancia de análisis, se determina que a una distancia de 6 metros se obtienen tiempos de retardo más dispersos, a diferencia de 2 y 4 metros. Además de que a 2 y 6 metros los retardos de RX1 son menores a los de RX2, sin embargo, a 4 metros ocurre lo contrario.

**Tabla 62-4:** Resultados finales de tiempos de retardo escenario 2 radar p.h.

SISTEMA RADAR  1 TX/ 2 RX	TIEMPOS DE RETARDO					
	RECEPTOR 1			RECEPTOR 2		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Valor Mínimo	3,41 $\mu$ s	6,15 $\mu$ s	10,11 $\mu$ s	3,41 $\mu$ s	6,44 $\mu$ s	9,76 $\mu$ s

Valor Máximo	5,3 $\mu s$	9,25 $\mu s$	12,28 $\mu s$	7,58 $\mu s$	9,19 $\mu s$	14.13 $\mu s$
--------------	-------------	--------------	---------------	--------------	--------------	---------------

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

En la Tabla 63-4 se reflejan los resultados finales de las distancias a las que fue detectada la placa de cobre, obtenidos mediante las antenas receptoras RX1 y RX2 polarizadas verticalmente. Al procesar los datos de las 30 pruebas se obtiene:

- A 2 metros se obtuvo, una distancia mínima de 1,2 metros y máxima de 2,7 metros, con un promedio de 2 metros para RX1. Comprobando que no existe diferencia entre el valor medido con el valor real al que se ubicó la placa de cobre, lo cual es excelente ya que la gran mayoría de las mediciones se acercó a la distancia real. Para RX2 se obtuvo, una distancia mínima de 1,2 metros y máxima de 3,2 metros, con un promedio de 2,1 metros. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,1 metros, por lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real.
- A 4 metros se obtuvo, una distancia mínima de 3,2 metros y máxima de 4,8 metros, con un promedio de 4,2 metros para RX1. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,2 metros, por lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real. Para RX2 se obtuvo, una distancia mínima de 3,4 metros y máxima de 5 metros, con un promedio de 4,3 metros. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,3 metros, por lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real.
- A 6 metros se obtuvo, una distancia mínima de 5,6 metros y máxima de 6,9 metros, con un promedio de 6,1 metros para RX1. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,1 metros, lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real. Para RX2 se obtuvo, una distancia mínima de 5,5 metros y máxima de 7,2 metros, con un promedio de 6,4 metros. Al comparar el valor obtenido con la distancia real a la que se ubicó la placa de cobre, se tiene una diferencia de 0,4 metros, por lo cual es aceptable ya que existe una variación mínima respecto al valor real.

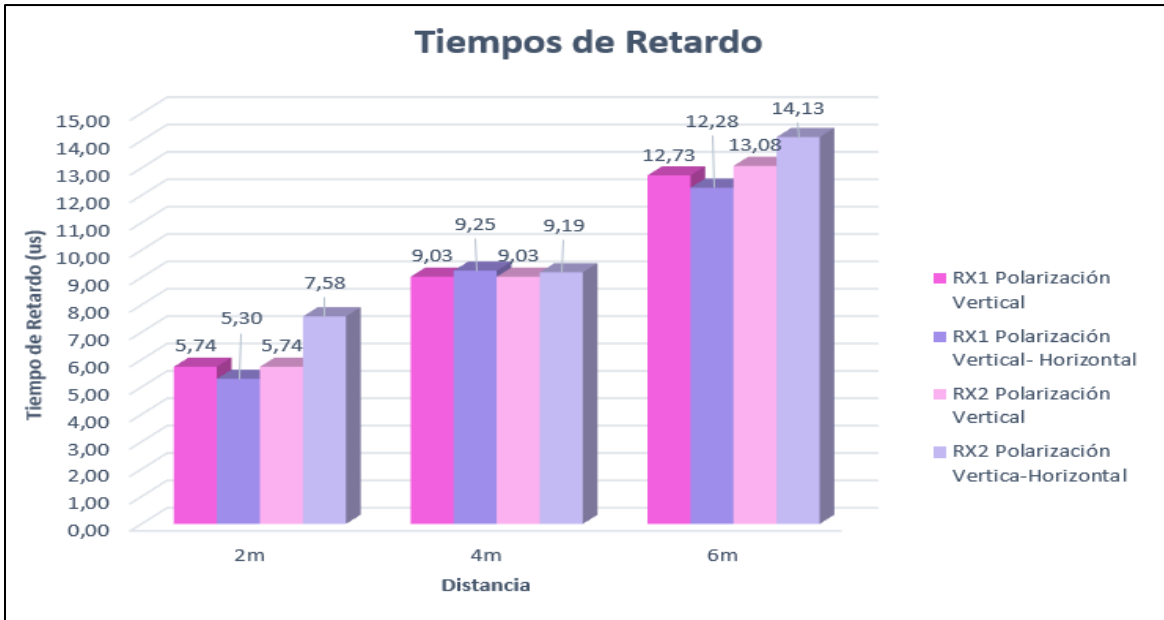
Al comparar los valores obtenidos a las 3 distancias, se determina que el sistema radar tuvo mejores resultados a una distancia de 2 metros en el receptor 1, ya que las mediciones realizadas se acercan más al valor real.

**Tabla 63-4:** Resultados finales de distancias del objeto escenario 2 radar p.h.

<b>SISTEMA RADAR  1 TX/ 2 RX</b>	<b>RADARGRAMA (Metros)</b>					
	<b>RECEPTOR 1</b>			<b>RECEPTOR 2</b>		
Valor Real	<b>2 metros</b>	<b>4 metros</b>	<b>6 metros</b>	<b>2 metros</b>	<b>4 metros</b>	<b>6 metros</b>
Valor Mínimo	1,2 m	3,2 m	5,6 m	1,2 m	3,4 m	5,5 m
Valor Máximo	2,7 m	4,8 m	6,9 m	3,2 m	5 m	7,2 m
Promedio	2 m	4,2 m	6,1 m	2,1 m	4,3 m	6,4 m

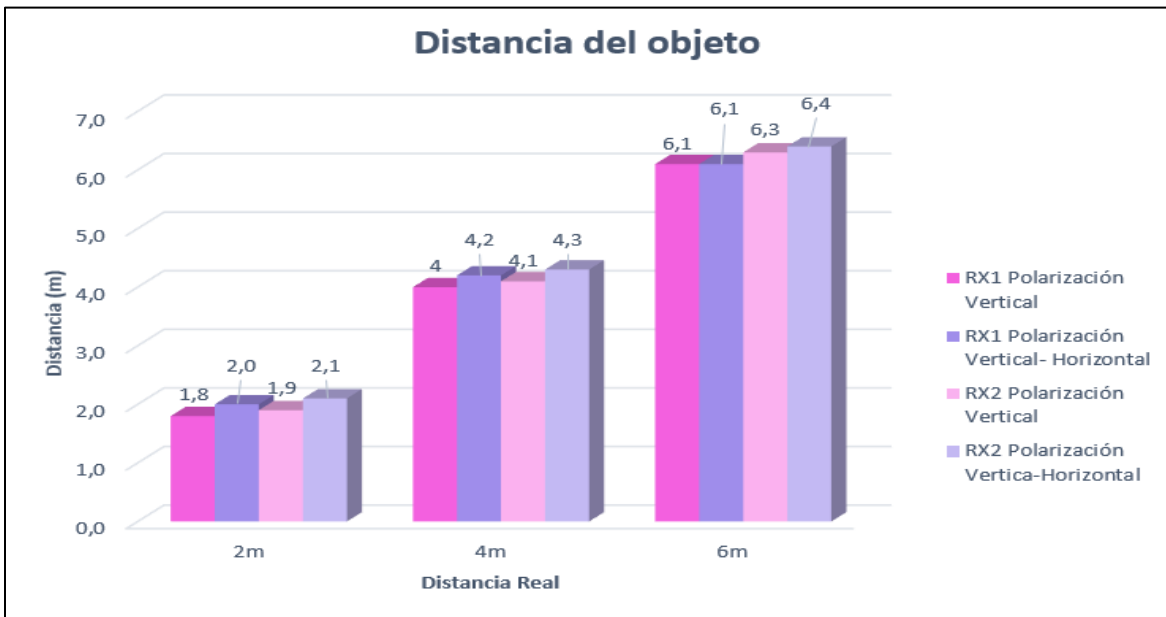
**Realizado por:** Merino, Daniela; 2021

Una vez analizados los datos del escenario 2 radar tanto con polarización vertical como horizontal, se determina que se obtienen mejores resultados cuando las antenas del sistema se encuentran polarizadas verticalmente, ya que la polarización horizontal al propagar la onda a 90° produce atenuaciones en la señal, lo cual incrementa los tiempos de retardo y las distancias a las que fue detectado el objeto, además también de que mediante los gráficos de correlación se observa que a distancias de 4 y 6 metros con antenas polarizadas horizontalmente el ruido incrementa a comparación de las antenas con polarización vertical, ver Gráfico 82-4 y 83-4.



**Gráfico 82-4:** Tiempos de retardo, Polarización vertical vs. Polarización Horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021



**Gráfico 83-4:** Distancia del objeto, Polarización vertical vs. Polarización Horizontal.

Realizado por: Merino, Daniela; 2021

## CONCLUSIONES

- Gracias a la investigación teórica realizada para el desarrollo del presente trabajo de titulación, se logró identificar los requerimientos y características necesarios para el desarrollo del sistema de radiación, tanto para la tecnología mimo, lo cual permitió el desarrollo de un programa para la transmisión – recepción de mensaje de texto mediante modulación QPSK, así como para la tecnología radar, mediante la transmisión - recepción de señales chirp. Los sistemas trabajaron a una frecuencia de 3GHZ, con un ancho de banda de 40MHZ, rango máximo permitido por la tarjeta USRP 2932.
- Mediante el diseño, simulación e implementación de una antena rectangular ranurada, con un ancho de banda de 2,6 a 3,2 GHz, fue posible replicar un grupo de 4 antenas a ser utilizadas en el sistema de radiación, de las cuales 2 fueron utilizadas en transmisión y 2 en la recepción, de esta manera y mediante el diagrama de radiación se pudo comprobar que las mismas irradian perfectamente hacia los receptores, evitando así la pérdida de información.
- Gracias a la versatilidad y facilidad de programación que brindan los diferentes softwares utilizados (LabView, Matlab), fue posible la implementación de un sistema de radiación con SDR mediante tarjetas USRP 2932, las mismas que son accesibles a estudiantes, universidades y centros de investigación. La tecnología SDR brinda grandes beneficios en la obtención y procesamiento de los datos, ya que permite unificar el sistema en una única plataforma, reduciendo costos de implementación y fallos en el mismo, facilitando así la reconfiguración de parámetros y equipos.
- A través de la generación del multi-haz en los diferentes escenarios, se logró evidenciar que los sistemas que se encuentran polarizados verticalmente tanto en transmisión como recepción tienen mejores resultados debido a que las señales sufren menor atenuación, lo cual se evidencia mediante los resultados obtenidos como: tiempos de retardo menores, mejores SNR, menor pérdida de información y mayor precisión en la detección de objetos.
- Mediante el análisis de la información adquirida de los diferentes escenarios SISO, SIMO y MIMO, se concluyó que la tecnología MIMO ofrece grandes mejoras en comparación con los

sistemas tradicionales (1 transmisor a 1 receptor) ya que incrementa la relación señal /ruido, llegando a alcanzar niveles de 55dB en comparación de SISO y SIMO donde el nivel máximo alcanzado fue de 35dB. Esto mejora se pudo comprobar también mediante el diagrama de constelación, ya que los valores obtenidos reflejaban una mínima cantidad de ruido en la recepción. Otro de los beneficios del sistema es brindar mayor confiabilidad en transmisión recepción, evitando así la pérdida de información, comprobando que la capacidad del canal aumenta notablemente respecto al aumento del número de antenas.

- Mediante el análisis de la simulación MIMO 2X2, se logró evidenciar que la presencia de ruido provoca pérdida de información y reducción del nivel de relación señal/ruido. Por lo tanto, queda comprobado que el ambiente óptimo para el envío y recepción de información se da cuando existe menor cantidad de ruido, ya que de esta manera la señal recibida no se atenúa notablemente.
- Gracias al análisis de correlación de las señales transmitidas y recibidas por el Radar, se logró observar que, con polarización vertical, la señal recibida tenía menor cantidad de ruido, ya que se obtenía picos altos en las gráficas, lo cual indica una alta correlación de las señales, a diferencia de la polarización horizontal que presentaba cierto ruido a los costados del pico, además de que su amplitud se reducía notablemente. Comprobando de esta manera que existe mayor confiabilidad con la polarización vertical.
- Finalmente, al analizar la información adquirida en los 2 escenarios Radar, se observó que en ambos casos existen mejores resultados cuando se utiliza una polarización vertical, obteniéndose menores tiempos de retardo y mayor precisión en cuanto a la detección de la posición a la que estuvo ubicada la placa de cobre.

## RECOMENDACIONES

- Al utilizar tarjetas USRP se recomienda el uso de computadores con alta capacidad de procesamiento, ya que al trabajar con sistemas de altas frecuencias se limita la velocidad de muestreo, pudiendo generar inconvenientes en cuanto a la explotación de las capacidades de la tarjeta. Se recomienda además definir correctamente los parámetros de configuración de las tarjetas tales como: frecuencia de operación, ancho de banda, ganancia, velocidad de muestreo, caso contrario la señal sufriría variaciones en su transmisión, provocando así un error en la recepción.
- Se recomienda un mayor estudio e investigación de programación en los diferentes softwares utilizados en el presente trabajo de titulación, ya que al tener un conocimiento limitado se presentan ciertas dificultades al momento de su desarrollo e implementación.
- Como se evidencia mediante los resultados obtenidos y las conclusiones dadas, se recomienda utilizar sistemas con antenas polarizadas verticalmente, ya que estas minimizan el ruido y optimizan la fidelidad de la recepción.
- Luego de obtener los resultados de la relación señal/ruido, se recomienda la utilización de la desviación estándar en sistemas MIMO, ya que está permite comprobar la cantidad de ruido existente en las señales recibidas.
- Durante futuros proyectos, se recomienda implementar sistemas MIMO a mayores distancias y con mayor número de antenas, ya que de esta manera se logrará comprobar que bajo estas condiciones la capacidad de recepción del sistema se optimizará.
- Dependiendo el caso se recomienda utilizar un rango de frecuencias de 0 a 40MHz para las aplicaciones SDRadar mediante LabView, el procesamiento de la información a altas frecuencias puede comprometer el ancho de banda que brinda la tarjeta USRP 2932.



- Se recomienda la utilización de la técnica estadística de correlación para la comprobación de la similitud entre señales transmitidas y recibidas. Esta técnica permite construir modelos explicativos y predictivos más complejos, en especial en aplicaciones Radar, ya que permite obtener mediante su gráfica el retardo que sufre la señal al chocar con un objeto.

## BIBLIOGRAFIA

**ANDREOTTI, Jorge.** *Consultos de Telecomunicaciones y Electricidad (CTE). ¿Qué es el BER?* [En línea]. 2015 [Consulta: 12 de 09 de 2020] Disponible en: [https://ingenieroandreotti.blogspot.com/2015/08/que-es-el-ber-bit-error-rate\\_21.html](https://ingenieroandreotti.blogspot.com/2015/08/que-es-el-ber-bit-error-rate_21.html)

**ANGULO ORQUERA, Hugo. & PAREDES Manolo.** *Diseño y desarrollo de un radio definido por software, para el ejército ecuatoriano, mediante la utilización de una tarjeta USRP y la herramienta simulink de matlab.* [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJERCITO. Sangolquí. 2011. [Consulta: 2020-09-12]. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4526/1/T-ESPE-032707.pdf>

**Ansoft Corporation.** *Ansoft Designer.* [En línea] Ansoft Corporation. 2003. [Consulta: 2020-02-12] Disponible en: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewi\\_\\_fe-wc7uAhWRQTABHfEUA7gQFjABegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FBaraa\\_Al-Azzawi%2Fpost%2FHow\\_to\\_simulate\\_a\\_FSS\\_unit\\_cell\\_in\\_ADS\\_software%2F](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewi__fe-wc7uAhWRQTABHfEUA7gQFjABegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FBaraa_Al-Azzawi%2Fpost%2FHow_to_simulate_a_FSS_unit_cell_in_ADS_software%2F).

**ARCE, Adriana.** *Arquitectura de un Sistema de Monitoreo Radioeléctrico usando Software Defined Radio.* [En línea] (Artículo) Universidad Icesi. 2012. pp. 83-93 [Consulta: 2020-02-15] Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/296962531.pdf>

**BARZOLA, Jaime. & GUAILACELA, Frnaklin.** *Simulación de Sistemas MIMO Multi-usuario vía procesamiento de señales: Diagonalización de bloques.* [En línea] (Tesis Pregrado) Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil - Ecuador. 2010. pp. 9-11 [Consulta: 2020-02-15] Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/13710/D-43082.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**BENÍTEZ, Julio. & Hueso, José.** *Introducción a Matlab.* [En línea] Universidad Politécnica de Valencia. 2007. pp. 4-7 [Consulta: 2020-02-13] Disponible en: <http://personales.upv.es/jbenitez/data/matlab.pdf>.

**BERZAL, Christian.** *APLICACIÓN PRÁCTICA TRANSCEPTOR BGT24MTR11: RADAR DOPPLER.* [En línea] (Tesis Pregrado) Universidad Politécnica de Madrid. 2015. [Consulta : 2020-02-10] Disponible en: [http://oa.upm.es/38139/1/TESIS\\_MASTER\\_CHRISTIAN\\_BERZAL\\_RUIZ.pdf](http://oa.upm.es/38139/1/TESIS_MASTER_CHRISTIAN_BERZAL_RUIZ.pdf).

**BOBI, Cristina. & PLATAS, Javier.** *Medidas de calidad de señales DVB-T.* [En línea] Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación. 2015. pp. 21-25 [Consulta: 2020-09-12] Disponible en: [http://oa.upm.es/38458/1/PFG\\_CRISTINA\\_GRACIA\\_BOBI\\_JAVIER\\_PLATAS\\_SENTIS.pdf](http://oa.upm.es/38458/1/PFG_CRISTINA_GRACIA_BOBI_JAVIER_PLATAS_SENTIS.pdf)

**BRAVO, Martín; TRUJILLO, Daniela & BARRERA, Andrés.** *Simulación y evaluación de arreglo de antenas MIMO para sistemas de comunicaciones inalámbricos mediante el uso del paradigma de tensores.* [En línea] (Artículo) Revista Ingeniería y Región. 2014. pp. 9-19 [Consulta: 2020-09-13] Disponible en: <https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/726/1391>

**BRISEÑO, Adriana. & GÓMEZ, Gerzón.** *POLARIZADOR BASADO EN SUPERFICIE REFLECTIVA PARA LA BANDA U.* [En línea] (Tesis Pregrado) UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO. 2016. [Consulta: 2020-02-15] Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10335/archivo.pdf?sequence=1>.

**CARDENAS, Freddy. & OTAÑÉZ, Jairo.** *Simulación e Implementación de un sistema de codificación espacio temporal para mimo usando D-BLAST.* [En línea] Universidad Politecnica Salesiana Sede Cuenca. 2019. pp. 4-5 [Consulta: 2020-09-12] Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18304/1/UPS-CT008671.pdf>

**CASADO, Cristina.** *Manual básico de MATLAB.* [En línea] Servicios Informáticos U.C.M. s.f. pp. 4 [Consulta: 2020-02-13] Disponible en: <http://webs.ucm.es/centros/cont/descargas/documento11541.pdf>

**CASTILLO, Iván.** *Caracterización Experimental del Canal Radio a 2.4Ghz para Sistemas MIMO en Entornos Interiores.* [En línea] Universidad Politécnica de Cartagena. 2006. pp. 24-25 [Consulta: 2020-09-13] Disponible en: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/248/pfc2086.pdf?sequence=1>.

**CHARVART, Gregory.** *Small and Short Range Radar Systems.* USA : CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.

**CORRALES, Erwin. & GOMEZ, Wagner.** *Tecnología MIMO*. [En línea] (Tesis Pregrado) Universidad Tecnológica de Bolívar. 2007. pp. 52-57 [Consulta: 2020-09-13] Disponible en: <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0040427.pdf>

**DE LA CRUZ, Alexis. & Moreira, Ronald.** *"Diseño e implementación de un prototipo de transmisión de mensajes de alerta en FM sobre cinco grupos de tres frecuencias portadoras para su uso en vehículos de emergencia utilizando USRP y GNU Radio"*. [En línea] (Tesis Pregrado) Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil. 2018. pp. 23-27 [Consulta: 2020-02-11] Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15475/1/UPS-GT002096.pdf>

**Diomedes, Martín; Trujillo, Daniela. & Barrera, Andrés.** *Simulación y evaluación de arreglo de antenas MIMO para sistemas de comunicaciones inalámbricos mediante el uso del paradigma de tensores*. 2015. No. 12, Brasilia : Revista Ingeniería y Región 2014 (12): 9-19 , 2015, Vol. 12.

**DOMÍNGUEZ, Iván. & MURILLO, Juan.** *Laboratorio de Comunicaciones Digitales de Radio Definida por Software*. [En línea] (Tesis Pregrado) Universidad de Sevilla (Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones). 2011. pp. 17-20 [Consulta: 2020-02-11] Disponible en: <https://personal.us.es/murillo/docente/Libros/LibroSDRV7USv8.pdf>

**DRAKE, José María.** *Ruidos e Interferencias: Técnicas de reducción*. [En línea] (Tesis Pregrado) Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. 2005. pp. 7-8 [Consulta: 2020-02-12] Disponible en: [https://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion\\_5\\_IT/IEC\\_4.pdf](https://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_IT/IEC_4.pdf)

**ELECTRONICSNOTES.** *MU-MIMO Multi-User MIMO*. [En línea] 2020. [Consulta: 2020-09-15] Disponible: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/multiuser-mu-mimo.php>

**ENGINEERING & TECHNOLOGY FCC.** *Authorization and Use of Software Defined Radios*. [En línea] (Artículo) Federal Communications Commission. 2001. pp. 2-3 [Consulta: 2020-02-11] Disponible en: <https://www.fcc.gov/document/authorization-and-use-software-defined-radios>

**ESPINOZA, Patricio.** *E DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL BARRIDO, ANÁLISIS SUPERFICIAL Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ÁRIDOS Y HÚMEDOS SIN VEGETACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍA SDRADAR*. [En línea] (Tesis Pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2020. pp. 14-17 [Consulta: 2020-02-12] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13935/1/98T00274.pdf>

**ETTUS RESEARCH.** *About USRP Bandwidths and Sampling Rates - Ettus Knowledge Base.* [En línea] Ettus Research. 2016. pp. 1-2 [Consulta: 2020-02-12] Disponible en: [https://www.upc.edu/sct/documents equipament/d\\_174\\_id-459.pdf](https://www.upc.edu/sct/documents equipament/d_174_id-459.pdf)

**FERNÁNDEZ, Oscar.** *Caracterización Experimental y Modelado de Canal MIMO para aplicaciones WLAN y WMAN.* [En línea] (Tesis Pregrado) Universidad de Cantabria. 2007. pp. 15-26 [Consulta: 2020-09-12] Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1345/2de7.OFFcap2.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

**FONTAL, Bernardo.** *El espectro electromagnético y sus aplicaciones.* [En línea] Universidad de los Andes. 2005. pp. 16-17 [Consulta: 2020-01-18] Disponible en: [http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16746/espectro\\_electromagnetico.pdf;jsessionid=19B36AF902D4A7DAA9CCEE7E9AE75EC9?sequence=1](http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16746/espectro_electromagnetico.pdf;jsessionid=19B36AF902D4A7DAA9CCEE7E9AE75EC9?sequence=1)

**FRENZEL, Louis.** *Sistemas Electronicos de Comunicaciones.* [En línea] (Libro) México : Alfaomega, 2003. [Consulta: 2020-01-18] Disponible en: [https://www.academia.edu/6516500/92468269\\_Sistemas\\_Electronicos\\_de\\_Comunicaciones\\_Frenze1](https://www.academia.edu/6516500/92468269_Sistemas_Electronicos_de_Comunicaciones_Frenze1)

**GALLARGO, Sergio.** *Elementos de Sistemas de Telecomunicaciones.* Madrid : Paraninfo, 2015.

**GALVIS, Alexander; CEBALLOS, Christian. & SANCTIS, Lukas.** *SDR: La alternativa para la evolución inalámbrica a nivel físico.* [En línea] (Artículo) Semillero de Tecnologías Inalámbricas (STI)–GIDATI. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. 2007. [Consulta: 2020-01-18] Disponible en: <http://roboticslab.uc3m.es/publications/Articulo1.pdf>

**GARCIA, Carlos.** *Radio Definido por Software usando MATLAB.* [En línea] (Tesis Pregrado) Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (Facultad de Ingeniería Eléctrica). 2011. pp. 6-7 [Consulta: 2020-02-11] Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/4729/Carlos%20Manuel%20Garc%C3%ADa%20Algora.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**GARRIDO, Sergio.** *ESTUDIO DE SISTEMA MIMO MULTIUSUARIO CON COORDINACIÓN LIMITADA ENTRE ESTACIONES BASE.* [En línea] (Tesis Pregrado) Universidad Carlos III de Madrid. 2013. pp. 11-12 [Consulta: 2020-09-15] Disponible en:

**GONZÁLEZ, Santiago, & Fernández, Auriolos.** *Análisis de Sistemas MIMO para comunicaciones inalámbricas de 4 generación.* [En línea] (Tesis Pregrado) Universidad de Extremadura. 2014. pp. 52 [Consulta: 2020-08-12] Disponible en: [http://dehesa.unex.es/bitstream/10662/2861/1/TDUEX\\_2015\\_Gonzalez-Auriolos\\_Fernandez.pdf](http://dehesa.unex.es/bitstream/10662/2861/1/TDUEX_2015_Gonzalez-Auriolos_Fernandez.pdf)

**GRUPO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES.** UPM: Portal 5G. *Antenas MIMO.* [En línea] (Artículo) Universidad Politécnica de Madrid. 2016. [Consulta: 2020-09-15] Disponible en: <http://www.grc.ssr.upm.es/Portal%205G/subsitio/index.html>

**HERAS, Miguel.** *ESTUDIO DE PARÁMETROS TÉCNICOS PARA RADIO COMUNITARIA EN FM CON COBERTURA EN PEDRO CARBO E ISIDRO AYORA EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS.* [En línea] (Tesis Pregrado) Universidad Católica de Guayaquil 2016. pp. 40-41 [Consulta: 2020-02-15] Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/6611/1/T-UCSG-PRE-TEC-ITEL-169.pdf>

**HURTADO, Yilena.** *Implementación del protocolo 802.11p basado en SDR para los sistemas ITS.* [En línea] (Tesis Postgrado) UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. 2017. pp. 33-35 [Consulta: 2020-02-11] Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/13941/tesis.pdf?sequence=1>

**ISHIMARU, Akira.** *Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering: from fundamentals to applications.* Edtion ed.: John Wiley & Sons, 2017. ISBN 1118098811.

**IT Department.** *Ansoft Designer.* [En línea] IT department organigram & information. 2020. [Consulta: 2020-02-12] Disponible en: <https://information-technology.web.cern.ch/services/software/ansoft-designer>

**LIGOWAVE. s.f.** LigoWave. *APC: Señal a ruido (SNR).* [En línea] s.f. [Consulta: 2020-10-15] Disponible en: <https://www.ligowave.com/wiki/es/faq/apc-senal-ruido-snr/>

**LÓPEZ, Iván.** *Introducción al Radar.* [En línea] (Artículo) Universidad de Granada. 2011. [Consulta: 2020-02-10] Disponible en: <http://www.ugr.es/~iloes/proyectos/telematica/RADAR.pdf>

**LÓPEZ, José.** *Sistemas Radar.* [En línea] Universitat Oberta de Catalunya. 2014. [Consulta: 2020-02-10] Disponible en: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/77345>

**LORENTE, Jose.** *“Desarrollo de sistema multiantena en plataformas SDR mediante LabVIEW.* [En línea] Universidad Carlos III de Madrid. 2019. pp. 14-17 [Consulta: 2020-01-16] Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/30025>

**LUNA, Francisco.** *Los polinomios predictores en la codificación de los polinomios predictores en la codificación den.* [En línea] Escuela Politécnica Nacional: Facultad de Ingeniería Eléctrica Especialización de Electrónica y Telecomunicaciones. 1994. [Consulta: 2020-10-15] Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5196/1/T117.pdf>

**MAHA, Ben. & KOSAI, Raof.** *Multi User MIMO Communication: Basic Aspects, Benefits and Challenges.* [En línea] (Artículo) ResearchGate. 2012. [Consulta: 2020-09-15] Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/recent-trends-in-multi-user-mimo-communications/multi-user-mimo-communication-basic-aspects-benefits-and-challenges>

**MAHAFZA, Bassem.** *RADAR SYSTEMS ANALYSIS AND DESIGN USING MATLAB.* Huntsville, Alabama, USA : CRC Press Taylor & Francis Group, 2013.

**MASTERHACKS.** *Manual Básico de programación en LabView.* [En línea] Renovablesconsaburum. 2015. pp. 4-5 [Consulta: 2020-02-12] Disponible en: <https://renovablesconsaburum.files.wordpress.com/2015/09/manual-bc3a1sico-de-programacic3b3n-en-labview-por-masterhacks.pdf>

**MERCHÁN, Christian.** *Diseño e implementación de un sistema radar utilizando sistema SDR a través de tecnología USRP para aplicaciones topográficas.* [En línea] (Tesis Pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2016. p. 7-23. [Consulta: 2020-09-18] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6417/1/98T00121.pdf>

**MONTENEGRO, Gareth; RODRÍGUEZ, Victor. & CASTILLO, Francisco.** *Radio definido por software, futuro de las comunicaciones inalámbricas.* [En línea] (Artículo) Universidad Autónoma de Zacatecas (Facultad de Ciencias). 2019. pp. 1-1 [Consulta: 2020-02-11] Disponible en:

**MOORE, Holly.** *MATLAB para ingenieros.* [En línea] Departamento de Electrónica y Automática (DEA). 2007. pp. 1 [Consulta: 2020-02-12] Disponible en: <http://dea.unsj.edu.ar/control2/matlab%20para%20ingenieros.pdf>

**NATIONAL INSTRUMENTS.** *USRP 2932.* [En línea] National Instruments. 2020. [Consulta: 2020-02-13] Disponible en: <https://www.ni.com/es-cr/support/model.usrp-2932.html>

**NATIONAL INSTRUMENTS.** *Specifications USRP-2932.* [En línea] National Instruments. 2017. [Consulta: 2020-02-13] Disponible en: <https://www.ni.com/pdf/manuals/375988d.pdf>

**NATIONAL INSTRUMENTS.** *Labview: User Manual.* [En línea] National Instruments. 2003. [Consulta: 2020-02-13] Disponible en: <http://personal.biada.org/~jhorrrillo/labview%20inicio.pdf>

**OROZCO, Lucía.** *Comparativa entre el uso de técnicas MIMO y SISO en sistemas interiores de televisión digital terrestre con estándar ISDB-TB, en un ambiente simulado.* [En línea] (Tesis Postgrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2018. pp. 20-24 [Consulta: 2020-02-13] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8915/1/20T01069.PDF>

**PERRINO, Gian.** *Análisis del impacto del uso de técnicas de múltiples antenas en una red móvil con la herramienta de simulación atoll.* [En línea] Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona de la Universidad Politécnica de Catalunya. 2013. pp. 23-27 [Consulta: 2020-02-15] Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18251/PFC\\_-\\_Gian\\_Piero\\_Perrino.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18251/PFC_-_Gian_Piero_Perrino.pdf)

**PUCKER, Lee.** *SDR Architecture.* [En línea] (Artículo) Wireless Innovation Forum. 2010. pp. 1 [Consulta: 2020-02-12] Disponible en: [https://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/tut-SDR\\_Architectures.pdf](https://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/tut-SDR_Architectures.pdf)

**RADIOCOMUNICACIONES,** *Manual: Información sobre propagación de las ondas radioeléctricas para el diseño de enlaces terrestres punto a punto.* Ginebra : ITU, 2008.

**RAMIREZ, Antonio.** "Análisis del rendimiento de un sistema de transmisión y recepción inalámbrico de video cifrado de única portadora". [En línea] ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL: Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. 2016. pp. 15-16 [Consulta: 2020-01-16] Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/37257?show=full>

**RENTERÍA, Julio. & CADAVID, Andrés.** *Radio cognitiva—Estado del arte.* [En línea] (Artículo) *Sistemas & Telemática*, 2011, 31-53.pp. [Consulta: 2020-01-16] Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4115/411534383003.pdf>

**RODRÍGUEZ, Brayán.** *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP DE RANGO DE OPERACIÓN DE SUPER ALTAS FRECUENCIA (3.5 ghz a 6 ghz) PARA LA EVALUACIÓN DE LA TASA DE ABSORCIÓN ESPECÍFICA EN TEJIDOS HUMANOS.* [En línea] (Tesis Pregrado) Universidad Católica de Colombia: Facultad de Ingeniería. 2019. [Consulta: 2020-10-03] Disponible



en:

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23934/1/T.Grado%20Brayan%20Estevens%20Barrera.pdf>

**SCHEER, James. & HOLM, William.** *Introduction and Radar Overview*. [En línea] IET Digital Library. 2010. pp. 5-7 [Consulta: 2020-02-10] Disponible en: [https://m.eet.com/media/1111904/817\\_radar1.pdf](https://m.eet.com/media/1111904/817_radar1.pdf)

**SERRANO, María Eugenia.** *Aplicación de algoritmo de optimización de resolución para la detección de objetivos en movimiento con tecnología sdradar*. [En línea] Universidad Superior Politécnica de Chimborazo. 2019. pp. 33-34 [Consulta: 2020-03-15] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/11017/1/98T00240.pdf>

**TABASSAM, A. A., F. A. ALI, S. KALSAIT AND M. U. SULEMAN.** Building software-defined radios in MATLAB Simulink-a step towards cognitive radios. In *2011 UKSim 13th International Conference on Modelling and Simulation*. IEEE, 2011, p. 492-497.

*Tecnología MIMO*. [En línea] Universidad de Sevilla. 2016. [Consulta: 2020-09-13]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11579/fichero/g.+Cap%C3%ADtulo+3+-+Tecnolog%C3%ADa+MIMO.pdf+>.

**TOMASI, Wayne.** *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Phoenix, Arizona : Pearson Educación, 2003.

**UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT).** *Polarización de emisiones de radiodifusión con modulación de frecuencia en la banda 8 (Ondas Métricas)*. [En línea] (Artículo) Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). 1990. [Consulta: 2020-03-16] Disponible en:

**UNIVERSIDAD DE SEVILLA.** *Tecnología MIMO*. [En línea] pp. 79-95 [Consulta: 2020-09-13] Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11579/fichero/g.+Cap%C3%ADtulo+3+-+Tecnolog%C3%ADa+MIMO.pdf+>

**VALDEZ, Alberto; MIRANDA, CarloS; SCHLESINGER, Paola; CHIOZZA, Juan. & MIRANDA, Carlos.** *Antenas en sistemas inalámbricos de comunicaciones digitales. Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*. [En línea] (Revista) Revistas.unne. 2016, pp. 22-34 [Consulta: 2020-09-13] Disponible en: <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/eitt/article/view/277>

**VEGA, Andy.** *Radio Definida por Software*. [En línea] CIEYT. 2020. [Consulta: 2020-06-10] Disponible en: <https://telecomunicaciones.edu.ec/repositorio/articulos-blog/redes/radio-definido-por-software>

**VELASCO, César.** *Implementación de un sistema de recepción de imágenes meteorológicas utilizando tecnología de Radio Definido por Software (RDS)*. [En línea] (Tesis Pregrado) Escuela Politécnica Nacional. Quito - Ecuador. 2016. [Consulta: 2020-02-20] Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16941>

**VERA, Francisco. & MORA, Andrea.** *Diseño de un prototipo de pruebas de un radar monoestático utilizando radio definida por software*. [En línea] Universidad Politécnica Salesiana. 2017. pp. 23-28 [Consulta: 2020-03-17] Disponible en:

**WENDELL, Hill.** *Electromagnetic Radiation*. [En línea] Institute for Physical Science & Technology. 2009. pp. 8- 10 [Consulta: 2020-03-14] Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.617.2074&rep=rep1&type=pdf>

**YÁNEZ, Paulina.** *Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radio comunicación*. [En línea] (Tesis Pregrado) Escuela Politécnica Nacional. 2009. pp. 24-25 [Consulta: 2020-09-13] Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1455/1/CD-2729.pdf>

**ZÚÑIGA, Alma.** *Estudio de un sistema de cifrado de comunicación inalámbrica usando USRP*. [En línea] Universidad Nacional Autónoma de México. 2018. pp. 21-23 [Consulta: 2020-09-12] Disponible: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/15536/Tesis.pdf?sequence=1>

**4NetNetworking.** *ANTENA DOBLE POLARIDAD, ASI DEBES ESCOGER*. [En línea] 4NetNetworking. 2019. [Consulta: 2020-03-15] Disponible en: <http://www.4netonline.com/ws/doble-polaridad-asi-es-la-antena-que-debes-escoger/>

## ANEXOS

### ANEXO A: ANTENAS A 3GHZ



### ANEXO B: TARJETA USRP 2932



**ANEXO C: CABLE SMA – SMA**



**ANEXO D: CABLE GIGABIT ETHERNET**





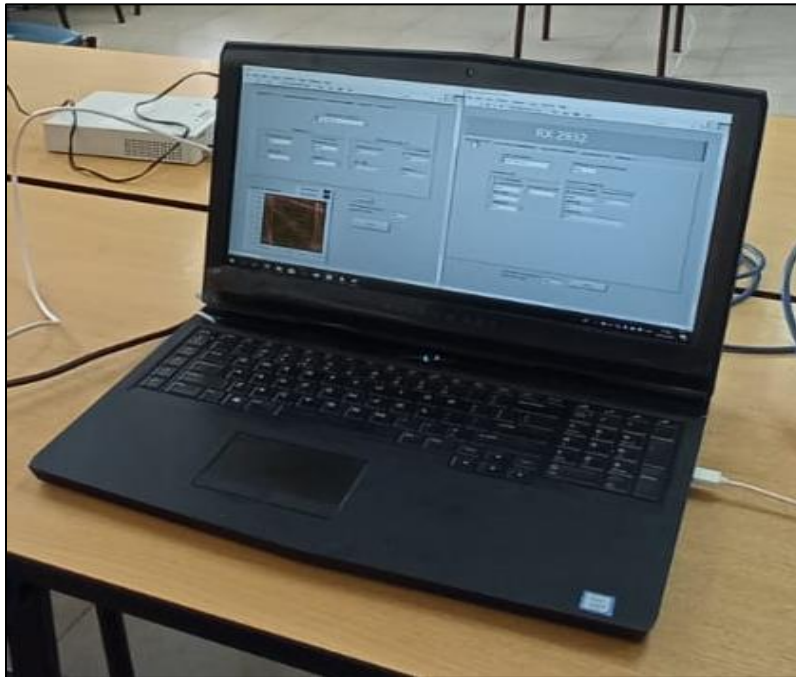
**ANEXO E: CABLE CONSTRUIDO SMA – SMA**



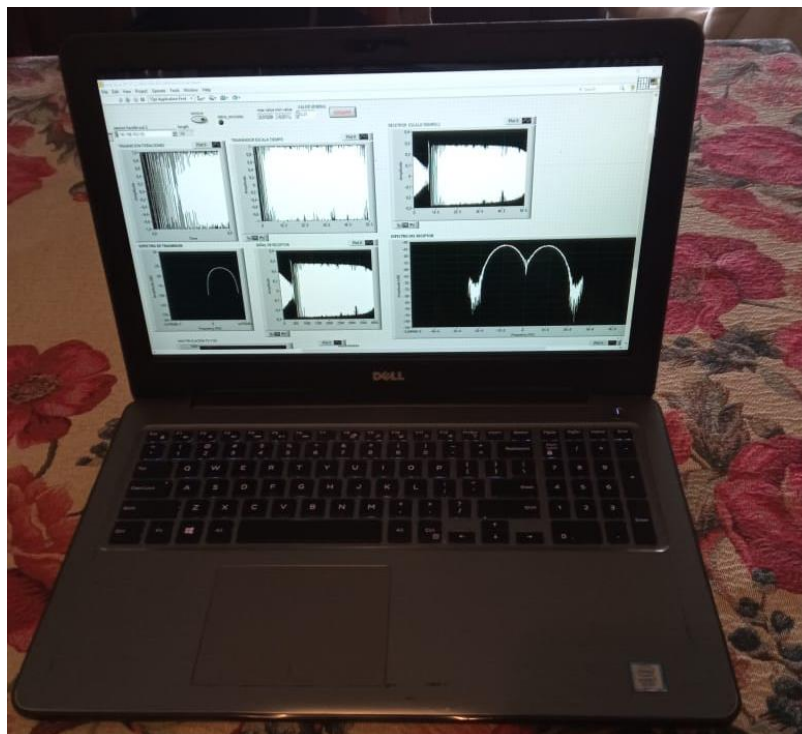
**ANEXO F: CARGADOR USRP 2932**



**ANEXO G: PC ALIENWARE**



**ANEXO H: PC DELL**



## ANEXO I: CODIGO DE PROCESAMIENTO PROGRAMA SISO

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PROGRAM A MIMO ESCENARIO 1%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear;
clc;

esc=1;

%%% INGRESE LA DISTANCIA 2, 4 o 6 metros %%%

distancia=2;

%%% INGRESE LA POLARIZACIÓN DE LAS ANTENAS%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%1= Polarización vertical
%2= Polarización horizontal

polarizacion=1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% VARIABLES DE CONTROL %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%INGRESE EL NÚMERO DE PRUEBA A EVALUAR%%%%%%%%%

if esc==1
    escenario='ESC1 (1TX-1RX) \';
elseif esc==2
    escenario='ESC2 (1TX-2RX) \';
end

prueba='p1';

numero=prueba(1);
iteracion='';
for k = 1:length(prueba)
    if numero~=prueba(k)
        iteracion=strcat(iteracion,prueba(k));

        end
    end

if distancia==2
```

```

        distancia='mensaje mimo_2m';
elseif distancia==4
    distancia='mensaje mimo_4m';

elseif distancia==6

    distancia='mensaje mimo_6m';

end

if polarizacion==1

    pol='_1\';
elseif polarizacion==2
    pol='_2\';

end

%%%%%%%%%CABECERA DE DATOS%%%%%%%%%

cabecera='C:\Users\Dell\Desktop\generacion_datos\PRUEBAS FINALES\PRUEBAS MIMO\';

enlace1=strcat(distancia,pol);
enlace1=strcat(enlace1,prueba);

constelacion_rx='\constelacion_rx.xlsx';
constelacion_tx='\constelacion_tx.xlsx';
s_receptor='\receptor.xlsx';
s_nr='\snr.xlsx';
mensaje='\mensaje.txt';

enlace_constelacion_rx=strcat(cabecera,escenario,enlace1,constelacion_rx);
enlace_receptor=strcat(cabecera,escenario,enlace1,s_receptor);
enlace_mensaje=strcat(cabecera,escenario,enlace1,mensaje);
enlace_snr=strcat(cabecera,escenario,enlace1,s_nr);

rx_constelacion= xlsread(enlace_constelacion_rx); %%%CONSTELACIÓN RX

```



```

tx_constelacion=xlsread('C:\Users\Dell\Desktop\generacion_datos\PRUEBAS
FINALES\PRUEBAS MIMO\ESC1(1TX-1RX)\mensaje_mimo_2m_2\p1\constelacion_tx.xlsx');
%%CONSTELACIÓN TX
receptor_datos=xlsread(enlace_receptor); %%SEÑAL RECIBIDA

rx_constelacion_datos=rx_constelacion(:,1);
tx_constelacion_datos=tx_constelacion(:,1);

mensaje_txt=textread(enlace_mensaje, '%s', 'whitespace',''); %%MENSAJE TX
enlace_base1='C:\Users\Dell\Desktop\generacion_datos\PRUEBAS FINALES\PRUEBAS
MIMO\ESC1(1TX-1RX)\mensaje_mimo_2m_1\p1\mensaje_base.txt';
mensaje_base=textread(enlace_base1, '%s', 'whitespace', '');

snr_1=xlsread(enlace_snr); %SNR (RELACIÓN SEÑAL/RUIDO)

%%COMPARACIÓN DEL MENSAJE%%
caracteres_base=string(mensaje_base);
caracteres_mensaje=string(mensaje_txt);
char_base = char(caracteres_base);
char_mensaje = char(caracteres_mensaje);

if length(char_base)>length(char_mensaje)
longitud_caracter= length(char_mensaje);
else
longitud_caracter= length(char_base);
end
sum=0;

for i=1 :longitud_caracter
tf = strcmp(char_base(i),char_mensaje(i));
if tf==0
sum=sum+1;
end
end

%%DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN%%

k=1;

```

```

k1=1;

for i=1:length(rx_constelacion_datos)
    if rx_constelacion_datos(i)>0
        terminos_positivos(k)= rx_constelacion_datos(i);
        k=k+1;
    elseif rx_constelacion_datos(i)<0
        terminos_negativos(k1)= rx_constelacion_datos(i);
        k1=k1+1;
    end
end

if length(terminos_negativos)>=length(terminos_positivos)
    longitud_datos=length(terminos_positivos);
else
    longitud_datos=length(terminos_negativos);
end

longitud_datos_1=(longitud_datos/2);
ordenamiento_negativo = sort(terminos_negativos);
ordenamiento_positivo = sort(terminos_positivos);

j1=1;
j2=1;

for i=1:longitud_datos
    if mod(i,2)==0
        if terminos_negativos(i)>-0.8 && terminos_negativos(i)<-0.60
            seccion_x_n(j1)=terminos_negativos(i) ;

            j1=j1+1;
        end
    else
        if terminos_negativos(i)>-0.8 && terminos_negativos(i)<-0.60
            seccion_y_n(j2)= terminos_negativos(i) ;
            j2=j2+1;
        end
    end
end

if length(seccion_x_n)>=length(seccion_y_n)

```

```

    longitud_datos_n=length(secion_y_n);
else
    longitud_datos_n=length(secion_x_n);
end

secion_x_n=secion_x_n(1: longitud_datos_n);
secion_y_n=secion_y_n(1: longitud_datos_n);

j1=1;
j2=1;

for i=1:longitud_datos
    if mod(i,2)==0
        if terminos_positivos(i)>0.6 && terminos_positivos(i)<0.80
            secion_x_p(j1)=terminos_positivos(i) ;
            j1=j1+1;
        end
    else
        if terminos_positivos(i)>0.6 && terminos_positivos(i)<0.80
            secion_y_p(j2)= terminos_positivos(i) ;
            j2=j2+1;
        end
    end
end

if length(secion_x_p)>=length(secion_y_p)
    longitud_datos_p=length(secion_y_p);
else
    longitud_datos_p=length(secion_x_p);
end

secion_x_p=secion_x_p(1: longitud_datos_p);
secion_y_p=secion_y_p(1: longitud_datos_p);

longitud_datos_n_1=length(secion_y_n);
longitud_datos_p_1=length(secion_y_p);

if longitud_datos_p_1>=longitud_datos_n_1
    longitud_datos_t=longitud_datos_n_1;
else

```



```
desviacion_1 = std(ditancia_p1);
desviacion_2 = std(ditancia_p2);
desviacion_3 = std(ditancia_p3);
desviacion_4 = std(ditancia_p4);
```

```
disp('DESVIACION ESTANDAR 1')
disp(desviacion_1)
disp('DESVIACION ESTANDAR 2')
disp(desviacion_2)
disp('DESVIACION ESTANDAR 3')
disp(desviacion_3)
disp('DESVIACION ESTANDAR 4')
disp(desviacion_4)
disp('CARACTERES PERDIDOS')
disp(sum)
```

```
%%%%%%%%GRÁFICA DE SEÑAL RECIBIDA%%%%%%%%
```

```
figure(2)
hold on
title('SEÑAL RECIBIDA')
plot(receptor_datos)
```

```
%%%%%%%%MÓDULO DEL RUIDO RECIBIDO%%%%%%%%
```

```
modulo_ant_1_ruido = norm(snr_1(:,4));
```

```
disp('modulo_ant_1_ruido')
disp(modulo_ant_1_ruido)
```

```
valor_max_ruido=max(snr_1(:,4));
```

```
disp('Valor maximo del ruido')
disp(valor_max_ruido)
```

```
figure(3)
hold on
title('Ruido')
plot(snr_1(:,4))
```

```
%%%%%%%% CALCULO SNR %%%%%%%%%
```



```

prueba='p30';

numero=prueba(1);
iteracion='';
for k = 1:length(prueba)
    if numero~=prueba(k)
        iteracion=strcat(iteracion,prueba(k));
    end
end

iteracion2=str2num(iteracion);
iteracion2=abs(iteracion2-17);

if iteracion2==0
    iteracion2=9;
end

iteracion2=num2str(iteracion2);
prueba2=strcat('p',iteracion2);

if distancia==2
    ditancia1='sistema_mimo_2m_3antena';
elseif distancia==4
    ditancia1='sistema_mimo_4m_3antena';
elseif distancia==6
    ditancia1='sistema_mimo_6m_3antena';
end

if distancia==2

    ditancia='mensaje_mimo_2m';
elseif distancia==4
    ditancia='mensaje_mimo_4m';
elseif distancia==6
    ditancia='mensaje_mimo_6m';
end

if polarizacion==1

```

```

    pol='_1\';
elseif polarizacion==2
    pol='_2\';
end

%%%%%%CABECERA DE DATOS%%%%%%

cabecera='C:\Users\Dell\Desktop\generacion_datos\PRUEBAS FINALES\PRUEBAS MIMO\';
poll='_1\';
enlace1=strcat(ditancia,poll);
enlace1=strcat(enlace1,prueba);

enlace2=strcat(ditancia1,poll);
enlace2=strcat(enlace2,prueba2);

constelacion_rx='\constelacion_rx.xlsx';
constelacion_tx='\constelacion_tx.xlsx';
s_receptor='\receptor.xlsx';
s_nr='\snr.xlsx';
mensaje='\mensaje.txt';

enlace_constelacion_rx=strcat(cabecera,escenario,enlace1,constelacion_rx);
enlace_receptor=strcat(cabecera,escenario,enlace1,s_receptor);
enlace_snr=strcat(cabecera,escenario,enlace1,s_nr);

enlace_constelacion_rx_2=strcat(cabecera,escenario,enlace2,constelacion_rx);
enlace_receptor_2=strcat(cabecera,escenario,enlace2,s_receptor);
enlace_snr_2=strcat(cabecera,escenario,enlace2,s_nr);

enlace_mensaje=strcat(cabecera,escenario,enlace1,mensaje);
enlace_mensaje_2=strcat(cabecera,escenario,enlace2,mensaje);

rx_constelacion= xlsread(enlace_constelacion_rx); %%%%CONSTELACIÓN RX
tx_constelacion=xlsread('C:\Users\Dell\Desktop\generacion_datos\PRUEBAS
FINALES\PRUEBAS MIMO\ESC1(1TX-1RX)\mensaje_mimo_2m_2\p1\constelacion_tx.xlsx');
receptor_datos=xlsread(enlace_receptor); %%%%SEÑAL RECIBIDA

rx_constelacion_datos=rx_constelacion(:,1);
tx_constelacion_datos=tx_constelacion(:,1);

```



```
mensaje_txt=textread(enlace_mensaje, '%s', 'whitespace', ' '); %%%MENSAJE TX
mensaje_txt_2=textread(enlace_mensaje_2, '%s', 'whitespace', ' ');
```

```
enlace_base1='C:\Users\Dell\Desktop\generacion_datos\PRUEBAS FINALES\PRUEBAS
MIMO\ESC1(1TX-1RX)\mensaje_mimo_2m_1\p1\mensaje_base.txt';
mensaje_base=textread(enlace_base1, '%s', 'whitespace', ' ');
```

```
snr_1=xlsread(enlace_snr); %%%SBR (RELACIÓN SEÑAL/RUIDO
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
caracteres_base=string(mensaje_base);
caracteres_mensaje=string(mensaje_txt);
caracteres_mensaje_2=string(mensaje_txt_2);
```

```
rx_constelacion_2= xlsread(enlace_constelacion_rx_2);
receptor_datos_2=xlsread(enlace_receptor_2);
snr_2=xlsread(enlace_snr_2);
mensaje_txt_2=textread(enlace_mensaje_2, '%s', 'whitespace', ' ');
```

```
char_base = char(caracteres_base);
char_mensaje = char(mensaje_txt_2);
```

```
if length(char_base)>length(char_mensaje)
longitud_caracter= length(char_mensaje);
else
longitud_caracter= length(char_base);
end
```

```
sum=0;
```

```
for i=1 :longitud_caracter-7
    tf = strcmp(char_base(i),char_mensaje(i));
```

```
    if tf==0
        sum=sum+1;
    end
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
k=1;
```

```
k1=1;
```

```
for i=1:length(rx_constelacion_datos)
```

```
    if rx_constelacion_datos(i)>0
```

```
        terminos_positivos(k)= rx_constelacion_datos(i);
```

```
        k=k+1;
```

```
    elseif rx_constelacion_datos(i)<0
```

```
        terminos_negativos(k1)= rx_constelacion_datos(i);
```

```
        k1=k1+1;
```

```
    end
```

```
end
```

```
if length(terminos_negativos)>=length(terminos_positivos)
```

```
    longitud_datos=length(terminos_positivos);
```

```
else
```

```
    longitud_datos=length(terminos_negativos);
```

```
end
```

```
longitud_datos_1=(longitud_datos/2);
```

```
ordenamiento_negativo = sort(terminos_negativos);
```

```
ordenamiento_positivo = sort(terminos_positivos);
```

```
j1=1;
```

```
j2=1;
```

```
for i=1:longitud_datos
```

```
    if mod(i,2)==0
```

```
        if terminos_negativos(i)>-0.8 && terminos_negativos(i)<-0.60
```

```
            seccion_x_n(j1)=terminos_negativos(i) ;
```

```
            j1=j1+1;
```

```
        end
```

```
    else
```

```
        if terminos_negativos(i)>-0.8 && terminos_negativos(i)<-0.60
```

```
            seccion_y_n(j2)= terminos_negativos(i) ;
```

```
            j2=j2+1;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```

if length(secion_x_n)>=length(secion_y_n)
    longitud_datos_n=length(secion_y_n);
else
    longitud_datos_n=length(secion_x_n);
end

secion_x_n=secion_x_n(1: longitud_datos_n);
secion_y_n=secion_y_n(1: longitud_datos_n);

j1=1;
j2=1;

for i=1:longitud_datos
    if mod(i,2)==0
        if terminos_positivos(i)>0.6 && terminos_positivos(i)<0.80
            secion_x_p(j1)=terminos_positivos(i) ;
            j1=j1+1;
        end
    else
        if terminos_positivos(i)>0.6 && terminos_positivos(i)<0.80
            secion_y_p(j2)= terminos_positivos(i) ;
            j2=j2+1;
        end
    end
end

if length(secion_x_p)>=length(secion_y_p)
    longitud_datos_p=length(secion_y_p);
else
    longitud_datos_p=length(secion_x_p);
end

secion_x_p=secion_x_p(1: longitud_datos_p);
secion_y_p=secion_y_p(1: longitud_datos_p);

longitud_datos_n_1=length(secion_y_n);
longitud_datos_p_1=length(secion_y_p);

if longitud_datos_p_1>=longitud_datos_n_1
    longitud_datos_t=longitud_datos_n_1;
else

```

```

    longitud_datos_t=longitud_datos_p_1;
end

seccion_x_p=seccion_x_p(1: longitud_datos_t);
seccion_y_p=seccion_y_p(1: longitud_datos_t);
seccion_x_n=seccion_x_n(1: longitud_datos_t);
seccion_y_n=seccion_y_n(1: longitud_datos_t);

%%%%%%%%%GRAFICA DE CONSTELACIÓN RX1%%%%%%%%%

figure(1)
hold on
title('ANTENA RX1')
plot(seccion_x_p,seccion_y_p,'r*')
scatter(seccion_x_p,seccion_y_n,'b*')
scatter(seccion_x_n,seccion_y_p,'y*')
scatter(seccion_x_n,seccion_y_n,'g*')

axis([-1.8 1.8 -1.8 1.8])
hold off

ordenamiento=sort(terminos_positivos);

%%%%%%%%%CÁLCULO DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR%%%%%%%%%

media_x_p=mean(seccion_x_p);
media_y_p=mean(seccion_y_p);
media_x_n=mean(seccion_x_n);
media_y_n=mean(seccion_y_n);

for i=1:longitud_datos_t
    ditancia_p1(i)=sqrt(((seccion_x_p(i)-media_x_p))^2+((seccion_y_p(i)-
media_y_p))^2);
    ditancia_p2(i)=sqrt(((seccion_x_n(i)-media_x_n))^2+((seccion_y_p(i)-
media_y_p))^2);
    ditancia_p4(i)=sqrt(((seccion_x_p(i)-media_x_p))^2+((seccion_y_n(i)-
media_y_n))^2);
    ditancia_p3(i)=sqrt(((seccion_x_n(i)-media_x_n))^2+((seccion_y_n(i)-
media_y_n))^2);
end

desviacion_1 = std(ditancia_p1);

```

```

desviacion_2 = std(ditancia_p2);
desviacion_3 = std(ditancia_p3);
desviacion_4 = std(ditancia_p4);

disp('DESVIACION ESTANDAR 1')
disp(desviacion_1)
disp('DESVIACION ESTANDAR 2')
disp(desviacion_2)
disp('DESVIACION ESTANDAR 3')
disp(desviacion_3)
disp('DESVIACION ESTANDAR 4')
disp(desviacion_4)
disp('CARACTERES PERDIDOS')
disp(sum)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

disp('          ')
disp('ANTENA RX2')
disp('          ')

char_mensaje = char(caracteres_mensaje_2);

if length(char_base)>length(char_mensaje)
    longitud_caracter= length(char_mensaje);
else
    longitud_caracter= length(char_base);
end

sum1=0;

for i=1 :longitud_caracter-7
    tf = strcmp(char_base(i),char_mensaje(i));
    if tf==0
        sum1=sum1+1;
    end
end

k=1;

```

```

k1=1;

rx_constelacion_datos=rx_constelacion_2;
receptor_datos=receptor_datos_2;

for i=1:length(rx_constelacion_datos)
    if rx_constelacion_datos(i)>0
        terminos_positivos(k)= rx_constelacion_datos(i);
        k=k+1;
    elseif rx_constelacion_datos(i)<0
        terminos_negativos(k1)= rx_constelacion_datos(i);
        k1=k1+1;
    end
end

if length(terminos_negativos)>=length(terminos_positivos)
    longitud_datos=length(terminos_positivos);
else
    longitud_datos=length(terminos_negativos);
end

longitud_datos_1=(longitud_datos/2);
ordenamiento_negativo = sort(terminos_negativos);
ordenamiento_positivo = sort(terminos_positivos);

j1=1;
j2=1;

for i=1:longitud_datos
    if mod(i,2)==0
        if terminos_negativos(i)>-0.8 && terminos_negativos(i)<-0.60
            seccion_x_n(j1)=terminos_negativos(i) ;
            j1=j1+1;
        end
    else
        if terminos_negativos(i)>-0.8 && terminos_negativos(i)<-0.60
            seccion_y_n(j2)= terminos_negativos(i) ;
            j2=j2+1;
        end
    end
end
end

```

```

if length(secion_x_n)>=length(secion_y_n)
    longitud_datos_n=length(secion_y_n);
else
    longitud_datos_n=length(secion_x_n);
end

secion_x_n=secion_x_n(1: longitud_datos_n);
secion_y_n=secion_y_n(1: longitud_datos_n);

j1=1;
j2=1;

for i=1:longitud_datos
    if mod(i,2)==0
        if terminos_positivos(i)>0.6 && terminos_positivos(i)<0.80
            secion_x_p(j1)=terminos_positivos(i) ;
            j1=j1+1;
        end
    else
        if terminos_positivos(i)>0.6 && terminos_positivos(i)<0.80
            secion_y_p(j2)= terminos_positivos(i) ;
            j2=j2+1;
        end
    end
end

if length(secion_x_p)>=length(secion_y_p)
    longitud_datos_p=length(secion_y_p);
else
    longitud_datos_p=length(secion_x_p);
end

secion_x_p=secion_x_p(1: longitud_datos_p);
secion_y_p=secion_y_p(1: longitud_datos_p);

longitud_datos_n_1=length(secion_y_n);
longitud_datos_p_1=length(secion_y_p);

if longitud_datos_p_1>=longitud_datos_n_1
    longitud_datos_t=longitud_datos_n_1;
else

```

```

longitud_datos_t=longitud_datos_p_1;
end

seccion_x_p=seccion_x_p(1: longitud_datos_t);
seccion_y_p=seccion_y_p(1: longitud_datos_t);
seccion_x_n=seccion_x_n(1: longitud_datos_t);
seccion_y_n=seccion_y_n(1: longitud_datos_t);

%%%%%%%%%GRAFICA DE CONSTELACIÓN RX2%%%%%%%%%

figure(2)
hold on
title('ANTENA RX2')
plot(seccion_x_p,seccion_y_p,'r*')
scatter(seccion_x_p,seccion_y_n,'b*')
scatter(seccion_x_n,seccion_y_p,'y*')
scatter(seccion_x_n,seccion_y_n,'g*')

axis([-1.8 1.8 -1.8 1.8])
hold off

ordenamiento=sort(terminos_positivos);

%%%%%%%%%CALCULO DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR RX2%%%%%%%%%
media_x_p=mean(seccion_x_p);
media_y_p=mean(seccion_y_p);
media_x_n=mean(seccion_x_n);
media_y_n=mean(seccion_y_n);

for i=1:longitud_datos_t
    ditancia_p1(i)=sqrt(((seccion_x_p(i)-media_x_p))^2+((seccion_y_p(i)-
media_y_p))^2);
    ditancia_p2(i)=sqrt(((seccion_x_n(i)-media_x_n))^2+((seccion_y_p(i)-
media_y_p))^2);
    ditancia_p4(i)=sqrt(((seccion_x_p(i)-media_x_p))^2+((seccion_y_n(i)-
media_y_n))^2);
    ditancia_p3(i)=sqrt(((seccion_x_n(i)-media_x_n))^2+((seccion_y_n(i)-
media_y_n))^2);
end

desviacion_1 = std(ditancia_p1);
desviacion_2 = std(ditancia_p2);

```



```
desviacion_3 = std(ditancia_p3);
desviacion_4 = std(ditancia_p4);
```

```
disp('DESVIACION ESTANDAR 1')
disp(desviacion_1)
disp('DESVIACION ESTANDAR 2')
disp(desviacion_2)
disp('DESVIACION ESTANDAR 3')
disp(desviacion_3)
disp('DESVIACION ESTANDAR 4')
disp(desviacion_4)
disp('CARACTERES PERDIDOS')
disp(sum)
```

```
modulo_ant_1_ruido = norm(snr_1(:,4));
modulo_ant_2_ruido = norm(snr_2(:,4));
disp('modulo_ant_1_ruido')
disp(modulo_ant_1_ruido)
disp('modulo_ant_2_ruido')
disp(modulo_ant_2_ruido)
```

```
valor_max_ruido1=max(snr_1(:,4));
```

```
disp('Valor maximo del ruido RX1')
disp(valor_max_ruido1)
```

```
figure(3)
hold on
title('Ruido RX1')
plot(snr_1(:,4))
```

```
valor_max_ruido2=max(snr_2(:,4));
```

```
disp('Valor maximo del ruido RX2')
disp(valor_max_ruido2)
```

```

figure(4)
hold on
title('Ruido RX2')
plot(snr_2(:,4))

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% SNR %%%%%%%%%5

SNRsenal1=snr_1(:,2);
SNRruido1=snr_1(:,4);
SNRsenal_mod1=norm(SNRsenal1);
SNRruido_mod1=norm(SNRruido1);
SNR1=SNRsenal_mod1./SNRruido_mod1;
snr1=10*log10(SNR1);

disp('SNR 1')
disp(snr1)

```

```

SNRsenal2=snr_2(:,2);
SNRruido2=snr_2(:,4);
SNRsenal_mod2=norm(SNRsenal2);
SNRruido_mod2=norm(SNRruido2);
SNR2=SNRsenal_mod2./SNRruido_mod2;
snr2=10*log10(SNR2);

disp('SNR 2')
disp(snr2)

```

## ANEXO K: CODIGO DE PROCESAMIENTO PROGRAMA MIMO 2X2

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%SIMULACIÓN MIMO 2TX - 2RX%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5

clc;
clear all;
close all;
data=[0 1 0 1 0 1 1 0 0 0]; % informacion

%NUMERO DE BITS=1024;

%axis([ 0 11 0 1.5]);
data_NZR=2*data-1; % Data Represented at NZR form for QPSK modulation

```

```

s_p_data=reshape(data_NZR,2,length(data)/2); % S/P conversion of data

f=3E9; %Frecuencia
T=1/f; %Periodo de la señal
Ts=T/13;
Fs=1/Ts;
t=Ts:Ts:T; %TIEMPO DE DURACIÓN DE LA MODULACIÓN

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

y=[];
y_in=[];
y_qd=[];

for(i=1:length(data)/2)
    y1=s_p_data(1,i)*cos(2*pi*f*t); %%%COMPONENTES DE FASE
    y2=s_p_data(2,i)*sin(2*pi*f*t); %%%COMPONENTES DE CUADRATURA
    y_in=[y_in y1]; %%%VECTOR DE LA SEÑAL EN FASE
    y_qd=[y_qd y2]; %%%VECTOR DE LA SEÑAL EN CUADRATURA
    y=[y y1+y2]; %VECTOR DE SEÑAL MODULADA
end

Tx_sig=y; %%%SEÑAL TRANSMITIDA
tt=Ts:Ts:((T*length(data))/2)*3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% TX1 Y TX2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

TX1=[Tx_sig Tx_sig Tx_sig];
TX2=[zeros(1,10) Tx_sig Tx_sig Tx_sig(1,1:length(Tx_sig)-10)]; %atenuación
producida por hardware, recorre 10 iteraciones
%Es decir TX2 se transmite micro segundos despues de TX1

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% RECEPTOR 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

d1=0.2; %TX1 A RX1
d2=0.3; %TX2 A RX1

lambda=3e8/f;
k=2*pi/lambda; %NÚMERO DE ONDA
kz1=round(k*d1);

```

```

kz2=round(k*d2);

k1=0.8; %A MENOR distancia MAYOR POTENCIA d1=2 por ello k1=0.80
k2=0.2; %A mas distancia menOS POTENCIA d1=3 por ello k1=0.25

RV1=k1*[zeros(1,kz1),TX1(1:(length(TX1)-
kz1))]+k2*[zeros(1,kz2),TX2(1:(length(TX1)-kz2))]; %SEÑAL RECIBIDA DE TX1 Y
TX2 A RX1
%SIN RUIDO

noise1=rand(1,length(RV1))/rand/30%RUIDO RANDOMICO

RV1=RV1+noise1; %SEÑALES RECIBIDAS EN RX1

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CORRELACION RX1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

CORRELACION_RTX1=xcorr(TX1,RV1);
CORRELACION_RTX2=xcorr(TX2,RV1);

figure(3)
subplot(2,1,1);

plot(CORRELACION_RTX1,'b','linewidth',2), grid on;
title('CORRELACION TX1-RX1');
subplot(2,1,2);
plot(CORRELACION_RTX2,'r','linewidth',2), grid on;
title('CORRELACION TX2-RX1');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% RECEPTOR 2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

d1=0.3;
d2=0.2;

lambda=3e8/f;
t1=d1/3e8;
k=2*pi/lambda; %NÚMERO DE ONDA
kz1=round(k*d1);
kz2=round(k*d2);

k1=0.3;

```

```

k2=0.5;

RV2=k1*[zeros(1,kz1),TX1(1:(length(TX1)-
kz1))]+k2*[zeros(1,kz2),TX2(1:(length(TX1)-kz2))]; %%%%% SEÑAL RECIBIDA DE TX1 -
RX1

noise2=rand(1,length(RV2))/rand/30; %ruido bajo /15 y ruido alto /2

RV2=RV2+noise2; %%%%%SEÑALES RECIBIDAS EN RX2

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CORRELACION RX2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

CORRELACION_RTX1_2=xcorr(TX1,RV2);
CORRELACION_RTX2_2=xcorr(TX2,RV2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ETAPA DE FILTRACION %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

fft_RX1=fft(RV1);
fft_RX2=fft(RV2);

[b,a] = cheby1(10,20,6e9/Fs*2,'high'); %orden del filtro, factor de ondulación
filtro_RX1 = filter(b,a,RV1);

Y = fft(RV1); %es la fft, el codigo de abajo es para condicionar los datos de
amplitud
L=length(RV1); %longitud de rx1
P2 = abs(Y/L); %valor de relacion, que permite calcular los valor de la fft /
para la longitud de datos
P1 = P2(1:L/2+1); %para que coja solo componentes +
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1); % que vaya de 2 hasta el final de los datos -1

f1 = Fs*(0:(L/2))/L; %rango de frecuencias
valor_max_xT1=max(TX1);
valor_max_ruido=max(filtro_RX1);
relacion=valor_max_xT1/valor_max_ruido;
snr_1=20*log(relacion);

```

```

Y1 = fft(RV2);
L2=length(RV2);
P22 = abs(Y1/L2);
P3 = P22(1:L2/2+1);
P22(2:end-1) = 2*P22(2:end-1);
f2 = Fs*(0:(L2/2))/L2;

%%% implemnetacion de filtro
filtro_RX2 = filter(b,a,RV2);

%%%%%%%%%% SNR %%%%%%%%%%%
valor_max_xT2=max(TX2);
valor_max_ruido_2=max(filtro_RX2);
relacion_2=valor_max_xT2/valor_max_ruido_2;
snr_2=20*log(relacion_2);
% snr_22=20*log(relacion_2)/1.42;

disp('snr1')
disp(snr_1)

disp('snr2')
disp(snr_2)

%%%%%%%%%% RUIDO %%%%%%%%%%%
modulo_ant_1_ruido = norm(noise1);
modulo_ant_2_ruido = norm(noise2);
disp('modulo_ant_1_ruido')
disp(modulo_ant_1_ruido)
disp('modulo_ant_2_ruido')
disp(modulo_ant_2_ruido)

%%%%%%%%%% FIGURAS %%%%%%%%%%%

figure(1)
subplot(2,1,1);

hold on
plot(tt,TX1,'b','linewidth',1), grid on;
plot(tt,TX2,'g','linewidth',1), grid on;

```

```

title(' TX1(AZUL) TX2(VERDE) RX1(ROJO) ');
xlabel('Tiempo(s) ');
ylabel('Amplitud');
plot(tt,RV1,'r','linewidth',2.2), grid on;
hold off
subplot(2,1,2);

subplot(2,1,2);

hold on
plot(tt,TX1,'b','linewidth',1), grid on;
plot(tt,TX2,'g','linewidth',1), grid on;
title(' TX1(AZUL) TX2(VERDE) RX2(ROJO) ');
xlabel('Tiempo(s) ');
ylabel('Amplitud');
plot(tt,RV2,'r','linewidth',2.2), grid on;
hold off
subplot(2,1,2);

figure(2)
subplot(2,1,1);

plot(CORRELACION_RTX1_2,'b','linewidth',2), grid on;
title(' CORRELACION TX1-RX2');
subplot(2,1,2);
plot(CORRELACION_RTX2_2,'r','linewidth',2), grid on;
title(' CORRELACION TX2-RX2');

figure(4)
subplot(2,2,1);

plot(f1,P1)
title('ESPECTRO RX1')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|P1(f)|')

subplot(2,2,2);

plot(f2,P3)
title('ESPECTRO RX2')
xlabel('Frecuencia (Hz)')

```

```

ylabel(' |P2(f)| ')

subplot(2,2,3);

plot(tt,RV1)
hold on
plot(tt,filtro_RX1,'r')
title('RUIDO RX1 rojo, SEÑAL azul')
xlabel('Segundos')
ylabel('Amplitud')

subplot(2,2,4);

plot(tt,RV2)
hold on
plot(tt,filtro_RX2,'r')
title('RUIDO RX2 rojo, SEÑAL azul')
xlabel('Segundos')
ylabel('Amplitud')

```

## ANEXO L: CODIGO DE PROCESAMIENTO RADAR

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PROGRAMA RADAR%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear;
clc;

%%% INGRESE EL ESCENARIO  %%%
%1= ESCENARIO 1 (1TX - 1RX)
%2= ESCENARIO 2 (1TX - 2RX)

esc=1;

%%% INGRESE LA DISTANCIA A EVALUAR 2, 4 o 6 metros  %%%

distancia=2;

%%% INGRESE LA POLARIZACION DE LAS ANTENAS  %%%
%1= Polarización Vertical
%1= Polarización Horizontal

```



```
polarizacion=1;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% VARIABLES DE CONTROL %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%% INGRESE que prueba necesita %%%
```

```
if esc==1
    escenario='ESC1 (1TX-1RX)\';
elseif esc==2
    escenario='ESC2 (1TX-2RX)\';
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% VARIABLES DE CONTROL %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% INGRESE que prueba a analizar ANTENA 1
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
prueba='m9';
```

```
numero=prueba(1);
```

```
iteracion='';
```

```
for k = 1:length(prueba)
    if numero~=prueba(k)
        iteracion=strcat(iteracion,prueba(k));
```

```
end
```

```
end
```

```
iteracion_s=str2num(iteracion);
```

```
iteracion_2=abs(17-iteracion_s);
```

```
if iteracion_2==0
```

```
    iteracion_2=5;
```

```
end
```

```
iteracion_2=num2str(iteracion_2);
```

```
prueba_2=strcat('m',iteracion_2);
```

```
if distancia==2
```

```
    ditancia='p_2m';
```

```
elseif distancia==4
```

```
    ditancia='p_4m';
```

```
elseif distancia==6
```

```
    ditancia='p_6m';
```

```

end

if polarizacion==1

    pol='_1\';
elseif polarizacion==2
    pol='_2\';

end

cabecera='C:\Users\Dell\Desktop\generacion_datos\PRUEBAS FINALES\PRUEBAS RADAR\';

enlace1=strcat(ditancia,pol);
enlace1=strcat(enlace1,prueba);
c_receptor='\r_';
c_multiplicacion='\mul_';
c_espectro_receptor='\e_r_';
c_espectro_transmisor='\t_';
c_radiograma='\rd_';

extension='.xlsx';

%C:\Users\Gabriel\Documents\generacion_datos\PRUEBAS FINALES\PRUEBAS RADAR\ESC1
(1TX-1RX)\p_2m_1\m1

enlace_transmisor='C:\Users\Dell\Desktop\generacion_datos\PRUEBAS FINALES\PRUEBAS
RADAR\ESC1 (1TX-1RX)\p_2m_1\m1\t.xlsx';
enlace_espectro_transmisor='C:\Users\Dell\Desktop\generacion_datos\PRUEBAS
FINALES\PRUEBAS RADAR\ESC1 (1TX-1RX)\p_2m_1\m1\e_t.xlsx';
enlace_receptor=strcat(cabecera,escenario,enlace1,c_receptor,iteracion,extension)
;
enlace_espectro_receptor=strcat(cabecera,escenario,enlace1,c_espectro_receptor,it
eracion,extension);
enlace_radiograma=strcat(cabecera,escenario,enlace1,c_radiograma,iteracion,extensi
on);
enlace_multiplicar=strcat(cabecera,escenario,enlace1,c_multiplicacion,iteracion,e
xtension);

```

```

transmisor= xlsread(enlace_transmisor);
espectro_trasnsmisor=xlsread(enlace_espectro_transmisor);
receptor = xlsread(enlace_receptor);
espectro_receptor = xlsread(enlace_espectro_receptor);
radiograma = xlsread(enlace_radigrama);
multiplicacion=xlsread(enlace_multiplicar);

datos_amplitud_receptor=receptor(:,2);
escala_tiempo=receptor(:,1);
radiograma_tiempo=radiograma(:,1);
radiograma_amplitud=radiograma(:,2)/100;

%%%%%%%%%% ANTENA 2 %%%%%%%%%%%

if esc==2
if distancia==2

    ditancial='p_2m';
elseif distancia==4
    ditancial='p_4m';

elseif distancia==6

    ditancial='p_6m';

end

if polarizacion==1

    pol1='_1_2\';
elseif polarizacion==2
    pol1='_2_2\';

end

enlace2=strcat(ditancial,pol1);
enlace2=strcat(enlace2,prueba_2);
c_receptor='\r_';
c_multiplicacion='\mul_';
c_espectro_receptor='\e_r_';
c_espectro_transmisor='\t';

```

```

c_radiagrama='\rd_';
extension='.xlsx';

enlace_receptor_2=strcat(cabezera,escenario,enlace2,c_receptor,iteracion_2,extension);
enlace_espectro_receptor_2=strcat(cabezera,escenario,enlace2,c_espectro_receptor,iteracion_2,extension);
enlace_radiograma_2=strcat(cabezera,escenario,enlace2,c_radiagrama,iteracion_2,extension);
enlace_multiplicar_2=strcat(cabezera,escenario,enlace2,c_multiplicacion,iteracion_2,extension);

receptor_ant_2= xlsread(enlace_receptor_2);

espectro_receptor_ant_2 = xlsread(enlace_espectro_receptor_2);
radiograma_ant_2 = xlsread(enlace_radiograma_2);
multiplicacion_2=xlsread(enlace_multiplicar_2);

datos_amplitud_receptor_ant_2=receptor_ant_2(:,2);
datos_amplitud_receptor_2=datos_amplitud_receptor_ant_2;
escala_tiempo_2=receptor_ant_2(:,1);
radiograma_tiempo_2=radiograma_ant_2(:,1);
radiograma_amplitud_2=radiograma_ant_2(:,2)/100;

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 2M %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if distancia==2 && polarizacion==1 && esc==1

tiempo_espectro_trasnmisior=espectro_trasnmisior(:,1);
amplitud_espectro_trasnmisior=espectro_trasnmisior(:,2);
tiempo_espectro_receptor=espectro_receptor(:,1)*10;
amplitud_espectro_receptor=espectro_receptor(:,2);

```

```

factor_compensacion_espectro=max(amplitud_espectro_receptor)/max(amplitud_espectro_trasmisor);
amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor/factor_compensacion_espectro;
variable_maxima=max(datos_amplitud_receptor);
coeficiente= variable_maxima/0.6061;

amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor_1(1:length(amplitud_espectro_trasmisor));
amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor_1;

coeficiente_correlacion_espectro =
corr2(amplitud_espectro_trasmisor,amplitud_espectro_receptor_1);

for i=1:2000
datos_analizar(i)=datos_amplitud_receptor(i);

end
control=0;
cont=1;

for i=2:2000

if datos_analizar(i-1)>0 && datos_analizar(i)<0
    p_cambio_signo(cont)=i;
    cont=cont+1;
end
end
fase=1;
tiempo_fase=4.312800000000000e-06;
for i=2:length(p_cambio_signo)
resta_intervalo=abs(p_cambio_signo(i-1)-p_cambio_signo(i));
if resta_intervalo>50
    fase= p_cambio_signo(i-1);
end
end

for i=1:length(datos_amplitud_receptor)
    if i<=fase
        recetor_fase(i)=0;
    else

```

```

        recetor_fase(i)=datos_amplitud_receptor(i);
    end
end
recetor_fase=recetor_fase/coeficiente;
datos_amplitud_receptor_2=datos_amplitud_receptor/coeficiente;
if fase>100
tiempo_fase=escala_tiempo(fase);
end
k=1;
transmisor_amplitud=transmisor(:,1);
tiempo_transmisor=transmisor(:,1);

for i=1:length(transmisor_amplitud)
    if i<=fase
        transmisor_fase(i)=0;
    else
        transmisor_fase(i)=transmisor_amplitud(k);
        k=k+1;
    end
end

disp('TIEMPO DE RETARDO 2M ESCENARIO 1')
disp(tiempo_fase)
if length(transmisor_amplitud)>= length(recetor_fase)
    longitud_1=length(recetor_fase);
else
    longitud_1= length(transmisor_amplitud);
end
recetor_fase_1=recetor_fase(1:longitud_1);
transmisor_fase=transmisor_fase(1:longitud_1);

factor_compesacion=1/max(recetor_fase_1);
recetor_fase_1=recetor_fase*factor_compesacion;
recetor_fase_1=recetor_fase_1(1:longitud_1);
perdida=abs(recetor_fase_1-transmisor_fase);
recetor_fase=recetor_fase*-1;
coeficiente_correlacion = corr2(transmisor_fase,recetor_fase_1);
transmisor_fase=transmisor_fase(1:700);
recetor_fase_1=recetor_fase_1(1:700);
correlacion_tx_rx=xcorr(transmisor_fase,recetor_fase_1);
correlacion_tx_rx=(abs(correlacion_tx_rx))/10;

```

```

figure(3)
% on

plot(correlacion_tx_rx)
title('CORRELACION TX RX1')
% off

%%% Correlacion funciones %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 1 : SEÑAL TRANSMICION-RECEPTOR')
disp(coeficiente_correlacion)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 1 : ESPECTRO TRANSMICION-RECEPTOR')
disp(coeficiente_correlacion_espectro)

figure(1);

subplot(2,3,1)
valor_maximo=max(transmisor_amplitud);
coeficiente_t=1/valor_maximo;
transmisor_amplitud_t=transmisor_amplitud*coeficiente_t;
nt=1.2500000000000000e-08*(length(transmisor_amplitud_t)-1);
Ts=1.2500000000000000e-08;
tt=0:Ts:nt;
plot(tt,transmisor_amplitud_t,'b')
title('Transmisor')
subplot(2,3,2)

plot(escala_tiempo,datos_amplitud_receptor_2)
title('Receptor')
subplot(2,3,3)

plot(escala_tiempo,recetor_fase)
title('Receptor Fase')
subplot(2,3,4)

plot(radigrama_tiempo,radigrama_amplitud)
title('Radiograma')
subplot(2,3,5)

```

```

plot(tiempo_espectro_trasnmisor,amplitud_espectro_trasnmisor,'b')
title('Espectro transmisor')
subplot(2,3,6)
plot(tiempo_espectro_receptor,amplitud_espectro_receptor)
title('Espectro Receptor')

suptitle('GRAFICA 2M PRIMER ESCENARIO ANTENA RECTA')
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 2M %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if distancia==2 && polarizacion==2 && esc==1

tiempo_espectro_trasnmisor=espectro_trasnmisor(:,1);
amplitud_espectro_trasnmisor=espectro_trasnmisor(:,2);
tiempo_espectro_receptor=espectro_receptor(:,1)*10;
amplitud_espectro_receptor=espectro_receptor(:,2);

factor_compensacion_espectro=max(amplitud_espectro_receptor)/max(amplitud_espectro_trasnmisor);
amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor/factor_compensacion_espectro;
variable_maxima=max(datos_amplitud_receptor);
coeficiente= variable_maxima/0.5061;

amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor_1(1:length(amplitud_espectro_trasnmisor));
amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor_1;

coeficiente_correlacion_espectro =
corr2(amplitud_espectro_trasnmisor,amplitud_espectro_receptor_1);

for i=1:2000
datos_analizar(i)=datos_amplitud_receptor(i);

end

control=0;
cont=1;

```



```

for i=2:2000

if datos_analizar(i-1)>0 && datos_analizar(i)<0
    p_cambio_signo(cont)=i;
    cont=cont+1;
end
end
fase=1;
tiempo_fase=4.312800000000000e-06;
for i=2:length(p_cambio_signo)
resta_intervalo=abs(p_cambio_signo(i-1)-p_cambio_signo(i));
if resta_intervalo>50
    fase= p_cambio_signo(i-1);
end
end

for i=1:length(datos_amplitud_receptor)
    if i<=fase
        recetor_fase(i)=0;
    else
        recetor_fase(i)=datos_amplitud_receptor(i);
    end
end
recetor_fase=recetor_fase/coeficiente;
datos_amplitud_receptor_2=datos_amplitud_receptor/coeficiente;
if fase>100
tiempo_fase=escala_tiempo(fase);
end
k=1;
recetor_fase_t=recetor_fase(fase:length( recetor_fase));
%figure(4)
%plot(recetor_fase_t)
%xlswrite('t1.xlsx', recetor_fase_t')
transmisor_amplitud=transmisor(:,1);
tiempo_transmisor=transmisor(:,1);

for i=1:length(transmisor_amplitud)
    if i<=fase
        transmisor_fase(i)=0;
    else
        transmisor_fase(i)=transmisor_amplitud(k);
    end
end

```

```

        k=k+1;
    end
end

disp('TIEMPO DE RETARDO 2M ESCENARIO 1')
disp(tiempo_fase)

if length(transmisor_amplitud)>= length(recetor_fase)
    longitud_1=length(recetor_fase);
else
    longitud_1= length(transmisor_amplitud);
end
recetor_fase_1=recetor_fase(1:longitud_1);
transmisor_fase=transmisor_fase(1:longitud_1);

factor_compesacion=1/max(recetor_fase_1);
recetor_fase_1=recetor_fase*factor_compesacion;
recetor_fase_1=recetor_fase_1(1:longitud_1);
perdida=abs(recetor_fase_1-transmisor_fase);
recetor_fase=recetor_fase*-1;
coeficiente_correlacion = corr2(transmisor_fase,recetor_fase_1);
transmisor_fase=transmisor_fase(1:length(transmisor_fase));
recetor_fase_1=recetor_fase_1(1:length(recetor_fase_1));
correlacion_tx_rx=xcorr(transmisor_fase,recetor_fase_1);
correlacion_tx_rx=(abs(correlacion_tx_rx))/10;
figure(3)
% on

plot(correlacion_tx_rx)
title('CORRELACION TX RX1')
% off

%%% Correlacion funciones %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 1 : SEÑAL TRANSMICION-RECEPTOR')
disp(coeficiente_correlacion)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 1 : ESPECTRO TRANSMICION-RECEPTOR')
disp(coeficiente_correlacion_espectro)

```

```

figure(1);

subplot(2,3,1)
valor_maximo=max(transmisor_amplitud);
coeficiente_t=1/valor_maximo;
transmisor_amplitud_t=transmisor_amplitud*coeficiente_t;
nt=1.2500000000000000e-08*(length(transmisor_amplitud_t)-1);
Ts=1.2500000000000000e-08;
tt=0:Ts:nt;
plot(tt,transmisor_amplitud_t,'b')
title('Transmisor')
subplot(2,3,2)

plot(escala_tiempo,datos_amplitud_receptor_2)
title('Receptor')
subplot(2,3,3)

plot(escala_tiempo,recetor_fase)
title('Receptor Fase')
subplot(2,3,4)

plot(radigrama_tiempo,radigrama_amplitud)
title('Radiograma')
subplot(2,3,5)

plot(tiempo_espectro_trasnmisor,amplitud_espectro_trasnmisor,'b')
title('Espectro transmisor')
subplot(2,3,6)
plot(tiempo_espectro_receptor,amplitud_espectro_receptor)
title('Espectro Receptor')

suptitle('GRAFICA 2M PRIMER ESCENARIO ANTENA RECTA')
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 2M %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if distancia==2 && polarizacion==1 && esc==2

```

```

tiempo_espectro_trasnmisor=espectro_trasnmisor(:,1);
amplitud_espectro_trasnmisor=espectro_trasnmisor(:,2);
tiempo_espectro_receptor=espectro_receptor(:,1)*10;
amplitud_espectro_receptor=espectro_receptor(:,2);

factor_compensacion_espectro=max(amplitud_espectro_receptor)/max(amplitud_espectro_trasnmisor);
amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor/factor_compensacion_espectro;
variable_maxima=max(datos_amplitud_receptor);
coeficiente= variable_maxima/0.6061;
coeficiente_2= variable_maxima/0.451;

amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor_1(1:length(amplitud_espectro_trasnmisor));
amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor_1;

coeficiente_correlacion_espectro =
corr2(amplitud_espectro_trasnmisor,amplitud_espectro_receptor_1);

for i=1:2000
datos_analizar(i)=datos_amplitud_receptor(i);

end
control=0;
cont=1;

for i=2:2000

if datos_analizar(i-1)>0 && datos_analizar(i)<0
p_cambio_signo(cont)=i;
cont=cont+1;
end
end
fase=1;
tiempo_fase=4.312800000000000e-06;

for i=2:length(p_cambio_signo)
resta_intervalo=abs(p_cambio_signo(i-1)-p_cambio_signo(i));

```

```

if resta_intervalo>50
    fase= p_cambio_signo(i-1);
end
end

for i=1:length(datos_amplitud_receptor)
    if i<=fase
        recetor_fase(i)=0;
    else
        recetor_fase(i)=datos_amplitud_receptor(i);
    end
end
recetor_fase=recetor_fase/coeficiente;
datos_amplitud_receptor_2=datos_amplitud_receptor/coeficiente;
if fase>100
    tiempo_fase=escala_tiempo(fase);
end
k=1;
transmisor_amplitud=transmisor(:,1);
tiempo_transmisor=transmisor(:,1);

for i=1:length(transmisor_amplitud)
    if i<=fase
        transmisor_fase(i)=0;
    else
        transmisor_fase(i)=transmisor_amplitud(k);
        k=k+1;
    end
end
end

```

%%%%%%%%%% ANTENA 2 %%%%%%%%%%

```

tiempo_espectro_trasnmisor=espectro_trasnmisor(:,1);
amplitud_espectro_trasnmisor=espectro_trasnmisor(:,2);
tiempo_espectro_receptor_2=espectro_receptor_ant_2(:,1)*10;
amplitud_espectro_receptor_2=espectro_receptor_ant_2(:,2);

```

```

factor_compensacion_espectro_2=max(amplitud_espectro_receptor_2)/max(amplitud_espectro_transmisor);
amplitud_espectro_receptor_12=amplitud_espectro_receptor_2/factor_compensacion_espectro_2;
variable_maxima_2=max(datos_amplitud_receptor_ant_2);
coeficiente_2= variable_maxima_2/0.60;

amplitud_espectro_receptor_12=amplitud_espectro_receptor_12(1:length(amplitud_espectro_transmisor));
amplitud_espectro_receptor_12=amplitud_espectro_receptor_12;

coeficiente_correlacion_espectro_2 =
corr2(amplitud_espectro_transmisor,amplitud_espectro_receptor_12);

for i=1:2000
datos_analizar_2(i)=datos_amplitud_receptor_ant_2(i);
end

control=0;
cont_2=1;

for i=2:2000

if datos_analizar_2(i-1)>0 && datos_analizar_2(i)<0
    p_cambio_signo_2(cont_2)=i;
    cont_2=cont_2+1;
end
end
fase_2=1;
tiempo_fase_2=4.212800000000000e-06;

for i=2:length(p_cambio_signo_2)
resta_intervalo_2=abs(p_cambio_signo_2(i-1)-p_cambio_signo_2(i));
if resta_intervalo_2>50
    fase_2= p_cambio_signo_2(i-1);
end
end

for i=1:length(datos_amplitud_receptor_ant_2)

```

```

    if i<=fase_2
        recetor_fase_2(i)=0;
    else
        recetor_fase_2(i)=datos_amplitud_receptor_ant_2(i);
    end
end
k=1;
transmisor_amplitud=transmisor(:,1);
%tiempo_transmisor=transmisor(:,1);

recetor_fase_2=recetor_fase_2/coeficiente_2;
datos_amplitud_receptor_ant_2=datos_amplitud_receptor_ant_2/coeficiente_2;
if fase_2>100
    tiempo_fase_2=escala_tiempo_2(fase_2);
end

disp('TIEMPO DE RETARDO 2M ESCENARIO 2 ANTENA 1')
disp(tiempo_fase)

if length(transmisor_amplitud)>= length(recetor_fase)
    longitud_1=length(recetor_fase);
else
    longitud_1= length(transmisor_amplitud);
end
recetor_fase_1=recetor_fase(1:longitud_1);
transmisor_fase=transmisor_fase(1:longitud_1);

factor_compesacion=1/max(recetor_fase_1);
recetor_fase_1=recetor_fase*factor_compesacion;
recetor_fase_1=recetor_fase_1(1:longitud_1);
perdida=abs(recetor_fase_1-transmisor_fase);
recetor_fase=recetor_fase*-1;
coeficiente_correlacion = corr2(transmisor_fase,recetor_fase_1);
transmisor_fase=transmisor_fase(1:1000);
recetor_fase_1=recetor_fase_1(1:1000);
correlacion_tx_rx=xcorr(transmisor_fase,recetor_fase_1);
correlacion_tx_rx=(abs(correlacion_tx_rx))/10;
figure(3)
% on

```

```

plot(correlacion_tx_rx)
title('CORRELACION TX RX1')

% off
%%% Correlacion funciones %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 2 : SEÑAL TRANSMICION-RECEPTOR ANTENA 1')
disp(coeficiente_correlacion)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 2 : ESPECTRO TRANSMICION-RECEPTOR ANTENA 1')
disp(coeficiente_correlacion_espectro)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
transmisor_amplitud=transmisor(:,1);
disp('TIEMPO DE RETARDO 2M ESCENARIO 2 ANTENA 2')
disp(tiempo_fase_2)

if length(transmisor_amplitud)>= length(recetor_fase_2)
    longitud_1=length(recetor_fase_2);
else
    longitud_1= length(transmisor_amplitud);
end
recetor_fase_2=recetor_fase_2(1:longitud_1);
transmisor_amplitud=transmisor_amplitud(1:longitud_1);

factor_compesacion=1/max(recetor_fase_2);
recetor_fase_2=recetor_fase_2*factor_compesacion;

perdida=abs(recetor_fase_2-transmisor_amplitud);

recetor_fase_2=recetor_fase_2*-1;
length(transmisor_amplitud)
length(recetor_fase_2)
%coeficiente_correlacion = corr2(transmisor_amplitud,recetor_fase_2);
transmisor_amplitud=transmisor_amplitud(1:1000);

```



```

recetor_fase_2=recetor_fase_2(1:1000);
correlacion_tx_rx=xcorr(transmisor_amplitud,recetor_fase_2);
correlacion_tx_rx=(abs(correlacion_tx_rx))/10;

figure(5)
% on

plot(correlacion_tx_rx)
title('CORRELACION TX RX2')
% off
%% Correlacion funciones %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 2 : SEÑAL TRANSMICION-RECEPTOR ANTENA 2')
%disp(coeficiente_correlacion_2)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 2 : ESPECTRO TRANSMICION-RECEPTOR ANTENA 2')
disp(coeficiente_correlacion_espectro_2)

figure(2)
valor_maximo=max(transmisor_amplitud);
coeficiente_t=1/valor_maximo;
transmisor_amplitud_t=transmisor_amplitud*coeficiente_t;
nt=1.2500000000000000e-08*(length(transmisor_amplitud_t)-1);
Ts=1.2500000000000000e-08;
tt=0:Ts:nt;
subplot(3,3,1)
plot(tt,transmisor_amplitud,'b')
title('Transmisor')
subplot(3,3,2)

plot(escala_tiempo,datos_amplitud_receptor_2)
title('Receptor')
subplot(3,3,3)

plot(escala_tiempo,recetor_fase)
title('Receptor Fase')

```

```

subplot(3,3,4)

plot(radigrama_tiempo,radigrama_amplitud)
title('Radiograma')
subplot(3,3,5)

plot(tiempo_espectro_trasnmisor,amplitud_espectro_trasnmisor,'b')
title('Espectro transmisor')
subplot(3,3,6)
plot(tiempo_espectro_receptor,amplitud_espectro_receptor)
title('Espectro Receptor')

subplot(3,3,7)
plot(recetor_fase)
title('Receptor antena 2')

subplot(3,3,8)
plot(tiempo_espectro_receptor_2,amplitud_espectro_receptor_2)
title('Espectro Receptor antena 2')

subplot(3,3,9)
plot(radigrama_tiempo_2,radigrama_amplitud_2)
title('Espectro Receptor antena 2')

suptitle('GRAFICA 2M PRIMER ESCENARIO ')
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 2M %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

if distancia==2 && polarizacion==2 && esc==2

```

```

tiempo_espectro_trasnmisor=espectro_trasnmisor(:,1);
amplitud_espectro_trasnmisor=espectro_trasnmisor(:,2);
tiempo_espectro_receptor=espectro_receptor(:,1)*10;
amplitud_espectro_receptor=espectro_receptor(:,2);

factor_compensacion_espectro=max(amplitud_espectro_receptor)/max(amplitud_espectro_trasnmisor);
amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor/factor_compensacion_espectro;
variable_maxima=max(datos_amplitud_receptor);
coeficiente= variable_maxima/0.6061;
coeficiente_2= variable_maxima/0.411;

amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor_1(1:length(amplitud_espectro_trasnmisor));
amplitud_espectro_receptor_1=amplitud_espectro_receptor_1;

coeficiente_correlacion_espectro =
corr2(amplitud_espectro_trasnmisor,amplitud_espectro_receptor_1);

for i=1:2000
datos_analizar(i)=datos_amplitud_receptor(i);

end
control=0;
cont=1;

for i=2:2000

if datos_analizar(i-1)>0 && datos_analizar(i)<0
    p_cambio_signo(cont)=i;
    cont=cont+1;
end
end
fase=1;
tiempo_fase=4.312800000000000e-06;

```

```

for i=2:length(p_cambio_signo)
resta_intervalo=abs(p_cambio_signo(i-1)-p_cambio_signo(i));
if resta_intervalo>50
    fase= p_cambio_signo(i-1);
end
end

for i=1:length(datos_amplitud_receptor)
    if i<=fase
        recetor_fase(i)=0;
    else
        recetor_fase(i)=datos_amplitud_receptor(i);
    end
end
recetor_fase=recetor_fase/coeficiente;
datos_amplitud_receptor_2=datos_amplitud_receptor_2/coeficiente;
if fase>100
tiempo_fase=escala_tiempo(fase);
end
k=1;
transmisor_amplitud=transmisor(:,1);
tiempo_transmisor=transmisor(:,1);

for i=1:length(transmisor_amplitud)
    if i<=fase
        transmisor_fase(i)=0;
    else
        transmisor_fase(i)=transmisor_amplitud(k);
        k=k+1;
    end
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ANTENA 2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

tiempo_espectro_trasnmisor=espectro_trasnmisor(:,1);
amplitud_espectro_trasnmisor=espectro_trasnmisor(:,2);
tiempo_espectro_receptor_2=espectro_receptor_ant_2(:,1)*10;

```

```

amplitud_espectro_receptor_2=espectro_receptor_ant_2(:,2);

factor_compensacion_espectro_2=max(amplitud_espectro_receptor_2)/max(amplitud_espectro_trasmisor);
amplitud_espectro_receptor_12=amplitud_espectro_receptor_2/factor_compensacion_espectro_2;
variable_maxima_2=max(datos_amplitud_receptor_ant_2);
coeficiente_2= variable_maxima_2/0.53;

amplitud_espectro_receptor_12=amplitud_espectro_receptor_12(1:length(amplitud_espectro_trasmisor));
amplitud_espectro_receptor_12=amplitud_espectro_receptor_12;

coeficiente_correlacion_espectro_2 =
corr2(amplitud_espectro_trasmisor,amplitud_espectro_receptor_12);

for i=1:2000
datos_analizar_2(i)=datos_amplitud_receptor_ant_2(i);
end

control=0;
cont_2=1;

for i=2:2000

if datos_analizar_2(i-1)>0 && datos_analizar_2(i)<0
    p_cambio_signo_2(cont_2)=i;
    cont_2=cont_2+1;
end
end
fase_2=1;
tiempo_fase_2=4.212800000000000e-06;

for i=2:length(p_cambio_signo_2)
resta_intervalo_2=abs(p_cambio_signo_2(i-1)-p_cambio_signo_2(i));
if resta_intervalo_2>50
    fase_2= p_cambio_signo_2(i-1);
end

```

```

end

for i=1:length(datos_amplitud_receptor_ant_2)
    if i<=fase_2
        recetor_fase_2(i)=0;
    else
        recetor_fase_2(i)=datos_amplitud_receptor_ant_2(i);
    end
end

k=1;
transmisor_amplitud=transmisor(:,1);
tiempo_transmisor=transmisor(:,1);

recetor_fase_2=recetor_fase_2/coeficiente_2;
datos_amplitud_receptor_ant_2=datos_amplitud_receptor_ant_2/coeficiente_2;
if fase_2>100
    tiempo_fase_2=escala_tiempo_2(fase_2);
end

disp('TIEMPO DE RETARDO 2M ESCENARIO 2 ANTENA 1')
disp(tiempo_fase)
if length(transmisor_amplitud)>= length(recetor_fase)
    longitud_1=length(recetor_fase);
else
    longitud_1= length(transmisor_amplitud);
end
recetor_fase_1=recetor_fase(1:longitud_1);
transmisor_fase=transmisor_fase(1:longitud_1);

factor_compesacion=1/max(recetor_fase_1);
recetor_fase_1=recetor_fase*factor_compesacion;
recetor_fase_1=recetor_fase_1(1:longitud_1);
perdida=abs(recetor_fase_1-transmisor_fase);
recetor_fase=recetor_fase*-1;
coeficiente_correlacion = corr2(transmisor_fase,recetor_fase_1);
transmisor_fase=transmisor_fase(1:1000);
recetor_fase_1=recetor_fase_1(1:1000);
correlacion_tx_rx=xcorr(transmisor_fase,recetor_fase_1);
correlacion_tx_rx=(abs(correlacion_tx_rx))/10;

```

```

figure(3)
% on

plot(correlacion_tx_rx)
title('CORRELACION TX RX1')

% off
%% Correlacion funciones %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 2 : SEÑAL TRANSMICION-RECEPTOR ANTENA 1')
disp(coeficiente_correlacion)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 2 : ESPECTRO TRANSMICION-RECEPTOR ANTENA 1')
disp(coeficiente_correlacion_espectro)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
transmisor_amplitud=transmisor(:,1);
disp('TIEMPO DE RETARDO 2M ESCENARIO 2 ANTENA 2')
disp(tiempo_fase_2)
if length(transmisor_amplitud)>= length(recetor_fase_2)
    longitud_1=length(recetor_fase_2);
else
    longitud_1= length(transmisor_amplitud);
end
recetor_fase_2=recetor_fase_2(1:longitud_1);
transmisor_amplitud=transmisor_amplitud(1:longitud_1);

factor_compesacion=1/max(recetor_fase_2);
recetor_fase_2=recetor_fase_2*factor_compesacion;

perdida=abs(recetor_fase_2-transmisor_amplitud);

recetor_fase_2=recetor_fase_2*-1;
length(transmisor_amplitud)
length(recetor_fase_2)
%coeficiente_correlacion = corr2(transmisor_amplitud,recetor_fase_2);

```

```

transmisor_amplitud=transmisor_amplitud(1:1000);
recetor_fase_2=recetor_fase_2(1:1000);
correlacion_tx_rx=xcorr(transmisor_amplitud,recetor_fase_2);
correlacion_tx_rx=(abs(correlacion_tx_rx))/10;

figure(5)
% on

plot(correlacion_tx_rx)
title('CORRELACION TX RX2')
% off
%% Correlacion funciones %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 2 : SEÑAL TRANSMICION-RECEPTOR ANTENA 2')
%disp(coeficiente_correlacion_2)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('CORRELACION 2M ESCENARIO 2 : ESPECTRO TRANSMICION-RECEPTOR ANTENA 2')
disp(coeficiente_correlacion_espectro_2)

figure(2)
valor_maximo=max(transmisor_amplitud);
coeficiente_t=1/valor_maximo;
transmisor_amplitud_t=transmisor_amplitud*coeficiente_t;
nt=1.2500000000000000e-08*(length(transmisor_amplitud_t)-1);
Ts=1.2500000000000000e-08;
tt=0:Ts:nt;
subplot(3,3,1)
plot(tt,transmisor_amplitud,'b')
title('Transmisor')
subplot(3,3,2)

plot(datos_amplitud_receptor_2)
title('Receptor')
subplot(3,3,3)

plot(escala_tiempo,recetor_fase)
title('Receptor Fase')

```



```
subplot(3,3,4)

plot(radigrama_tiempo,radigrama_amplitud)
title('Radiograma')
subplot(3,3,5)

plot(tiempo_espectro_trasnmisor,amplitud_espectro_trasnmisor,'b')
title('Espectro transmisor')
subplot(3,3,6)
plot(tiempo_espectro_receptor,amplitud_espectro_receptor)
title('Espectro Receptor')

subplot(3,3,7)
plot(recetor_fase)
title('Receptor antena 2')

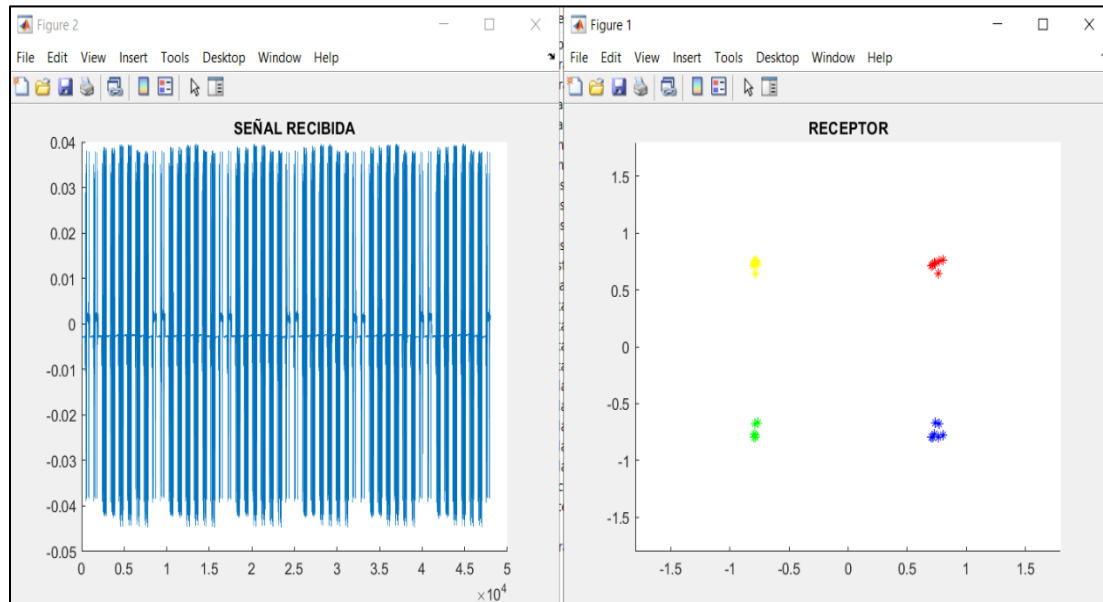
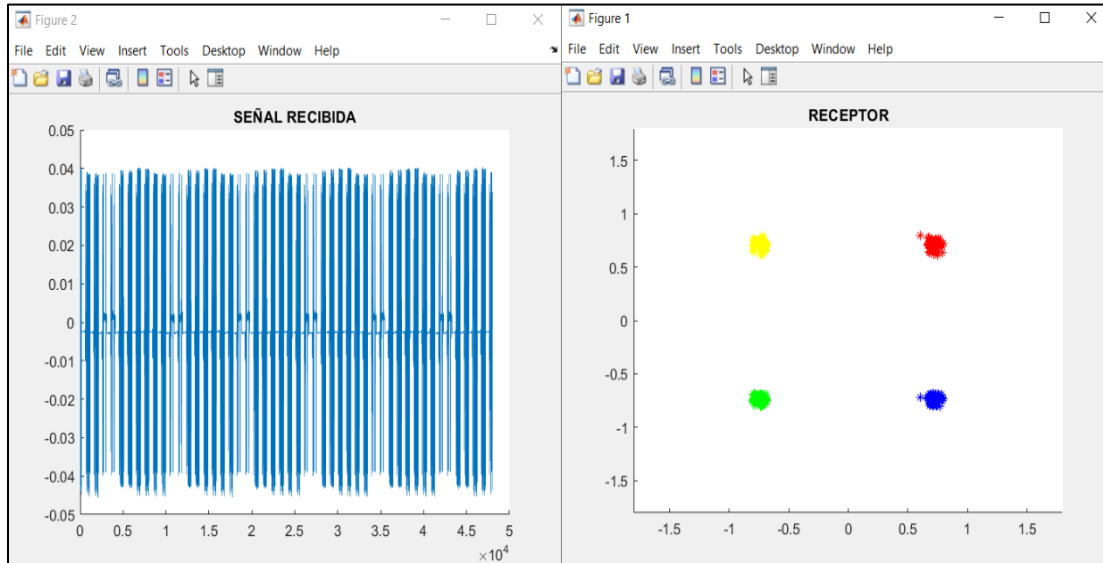
subplot(3,3,8)
plot(tiempo_espectro_receptor_2,amplitud_espectro_receptor_2)
title('Espectro Receptor antena 2')

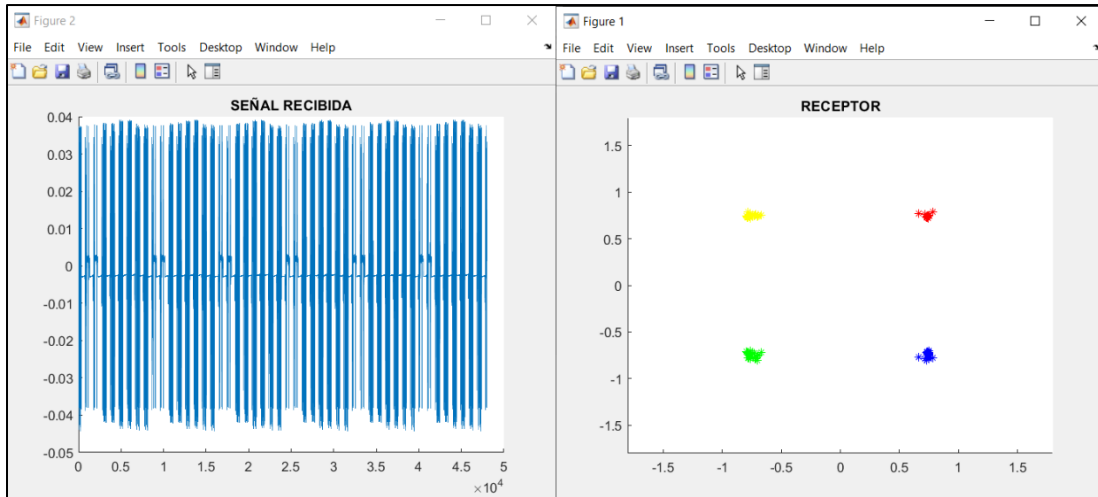
subplot(3,3,9)
plot(radigrama_tiempo_2,radigrama_amplitud_2)
title('Espectro Receptor antena 2')
subtitle('GRAFICA 2M SEGUNDO ESCENARIO ')

end
```

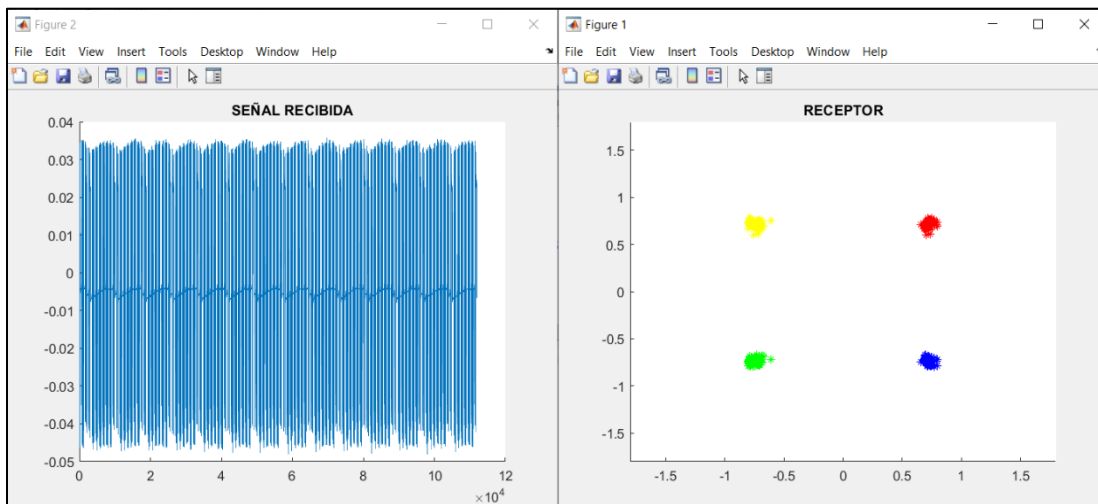
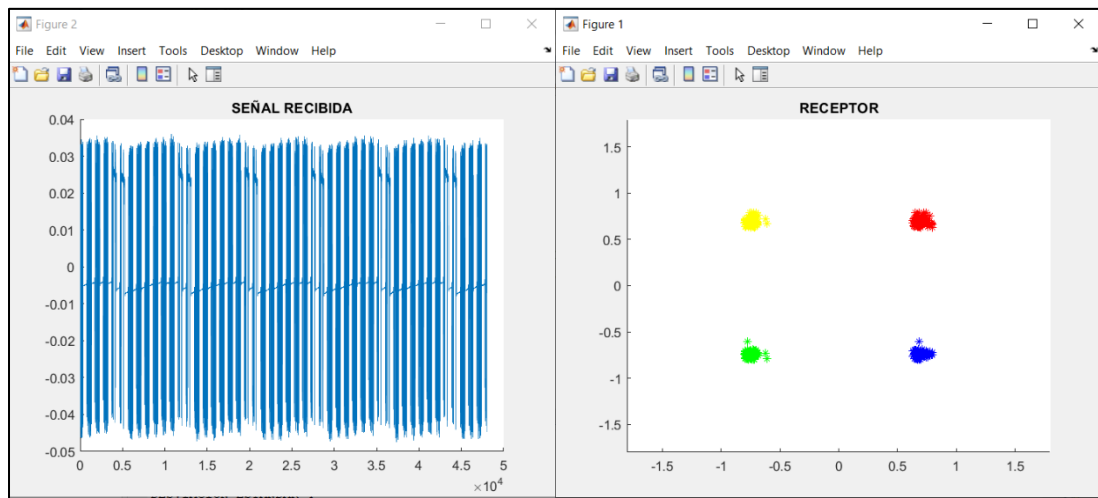
## ANEXO M: PRUEBAS ESCENARIO 1 SISO POLARIZACION VERTICAL

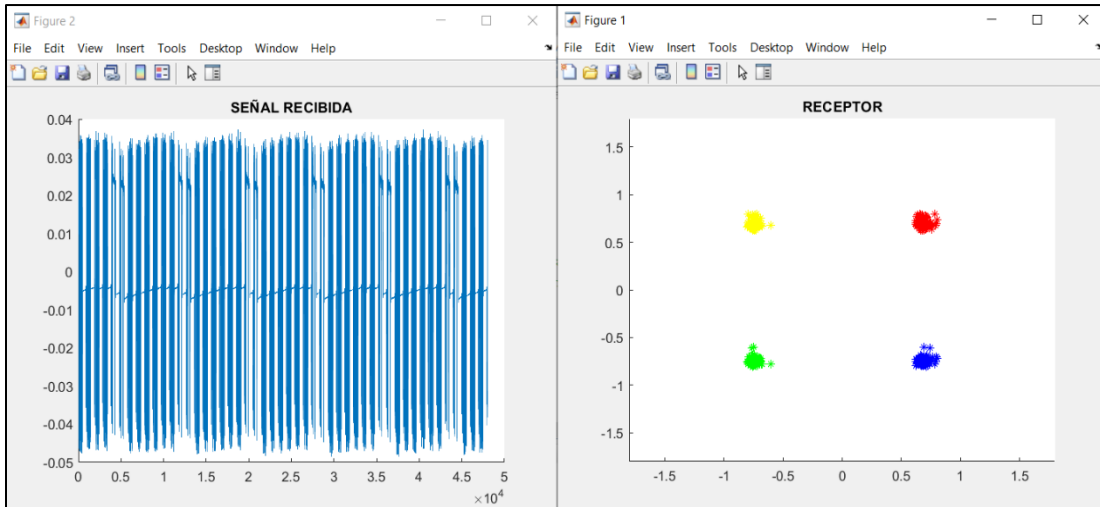
- 2 METROS



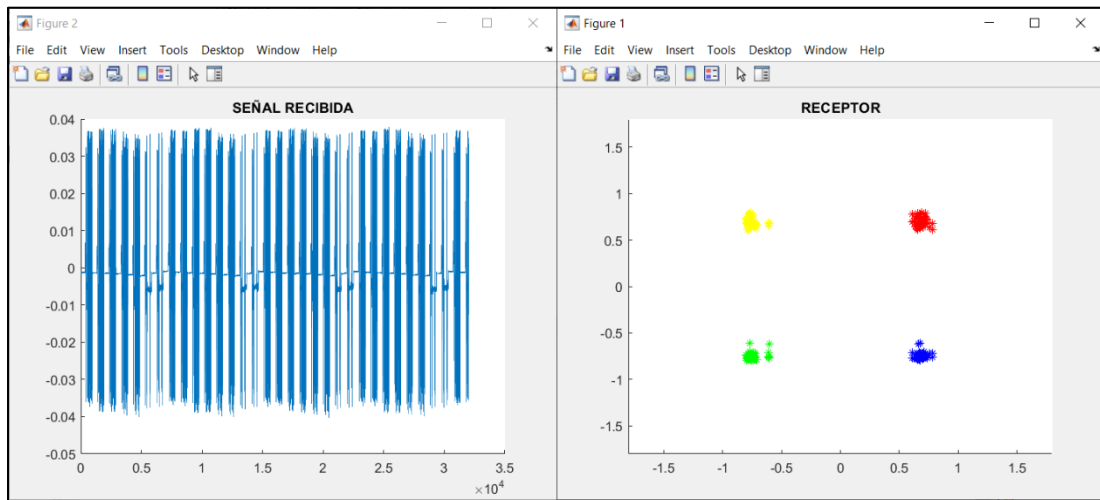
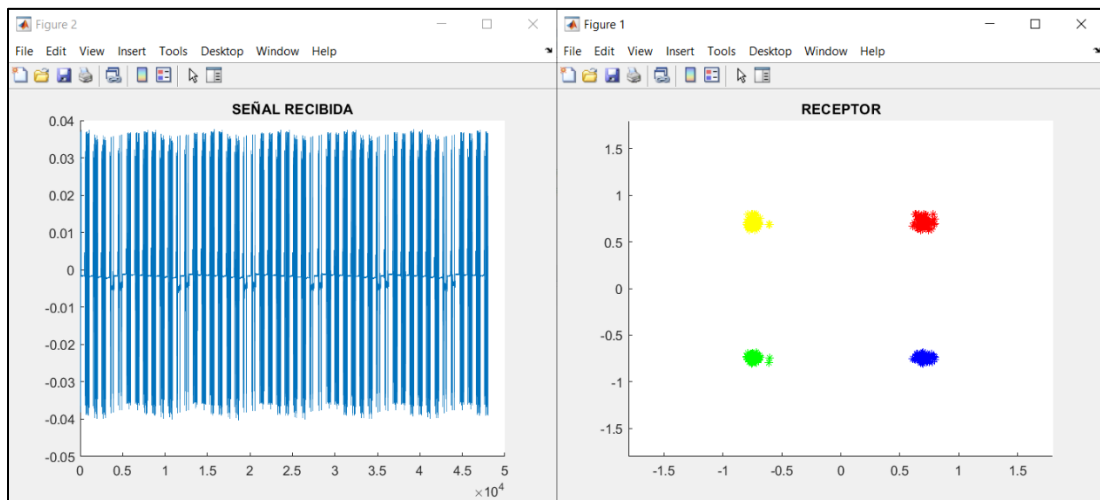


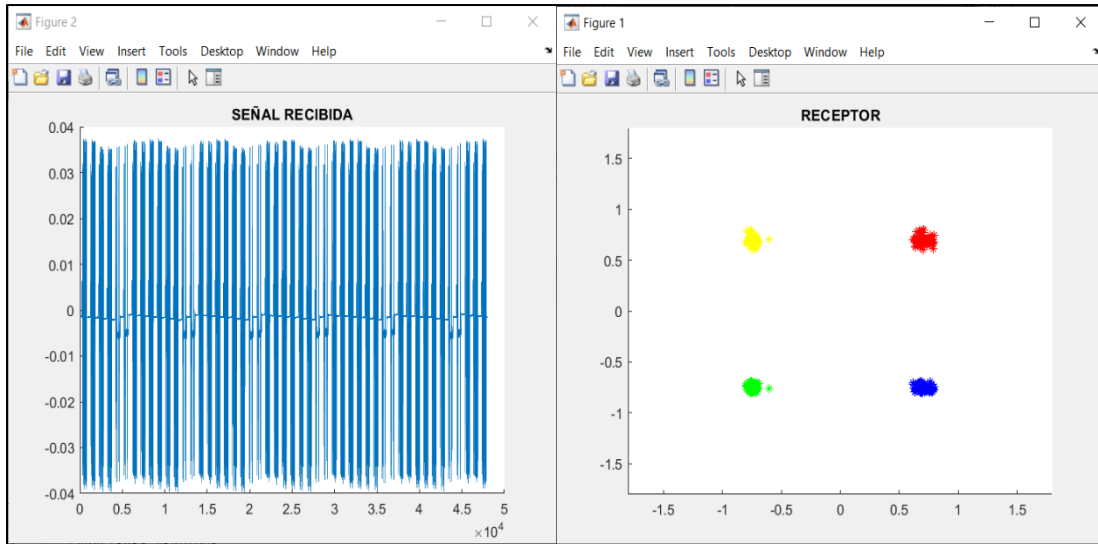
- 4 METROS





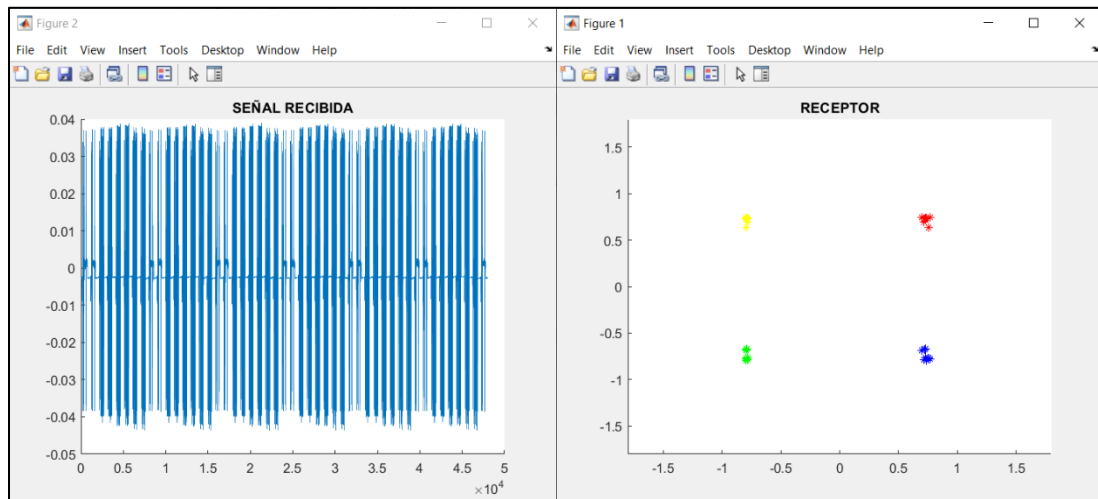
- 6 METROS

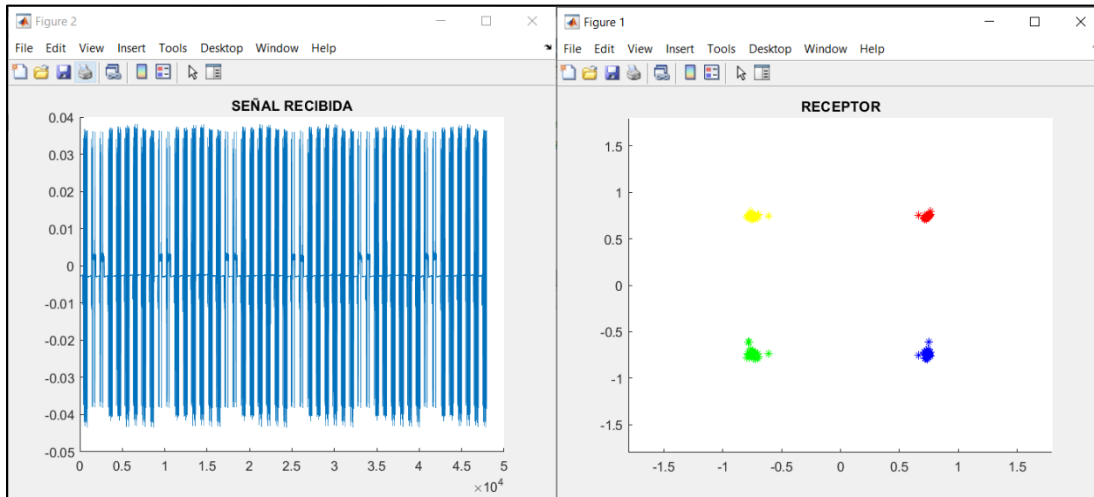
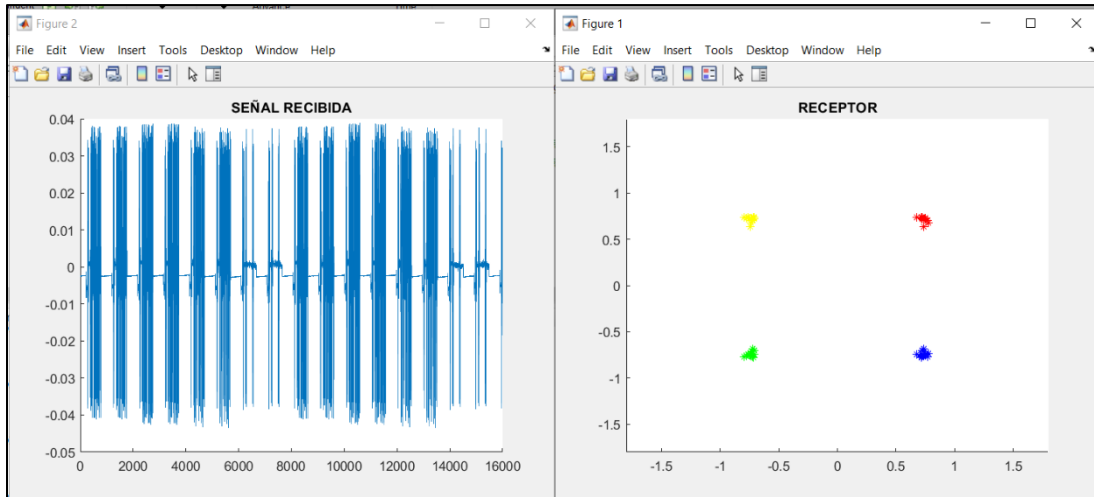




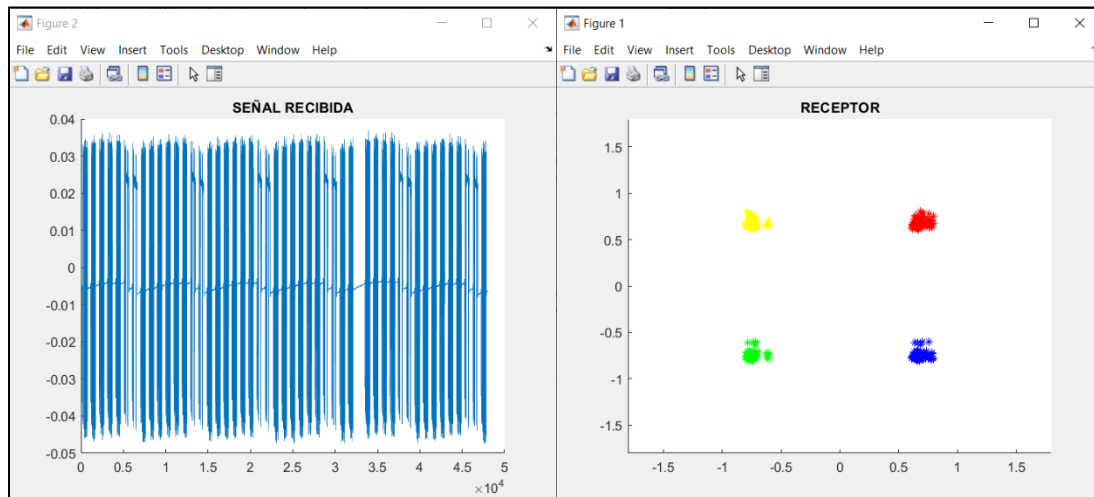
## ANEXO N: PRUEBAS ESCENARIO 1 SISO POLARIZACION HORIZONTAL

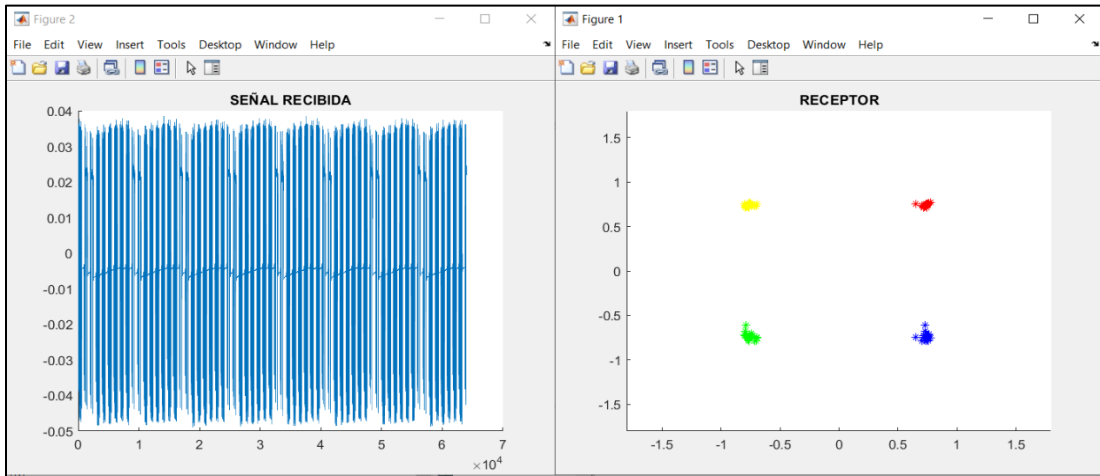
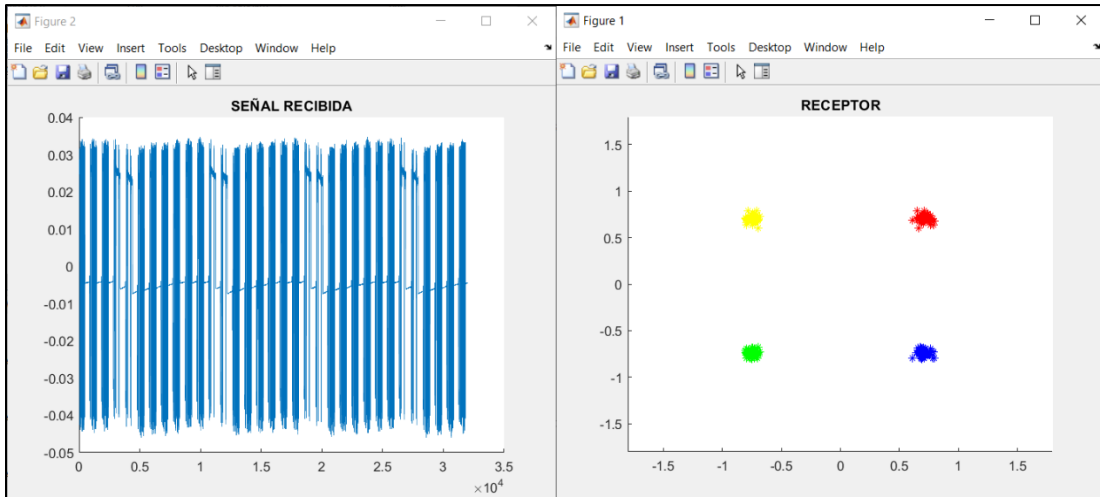
- 2 METROS



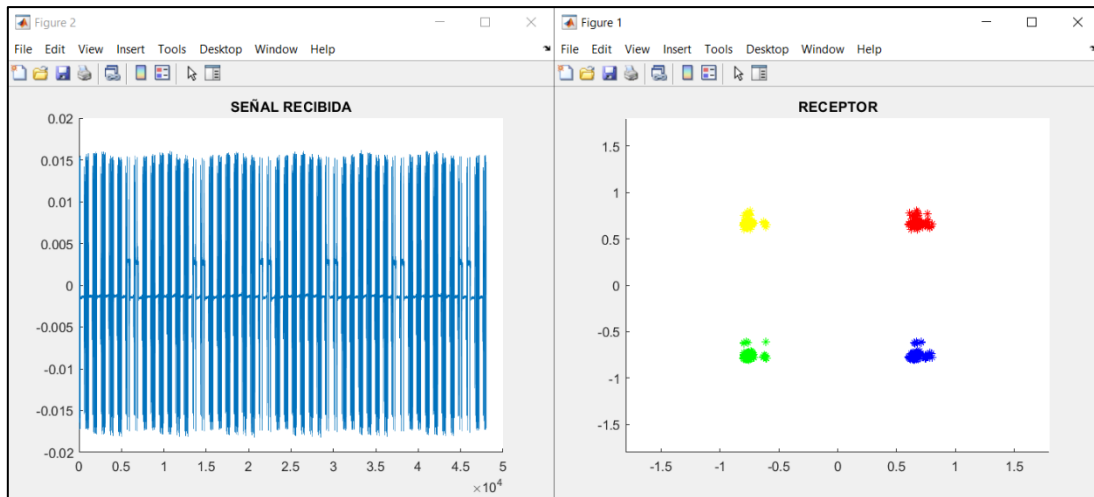


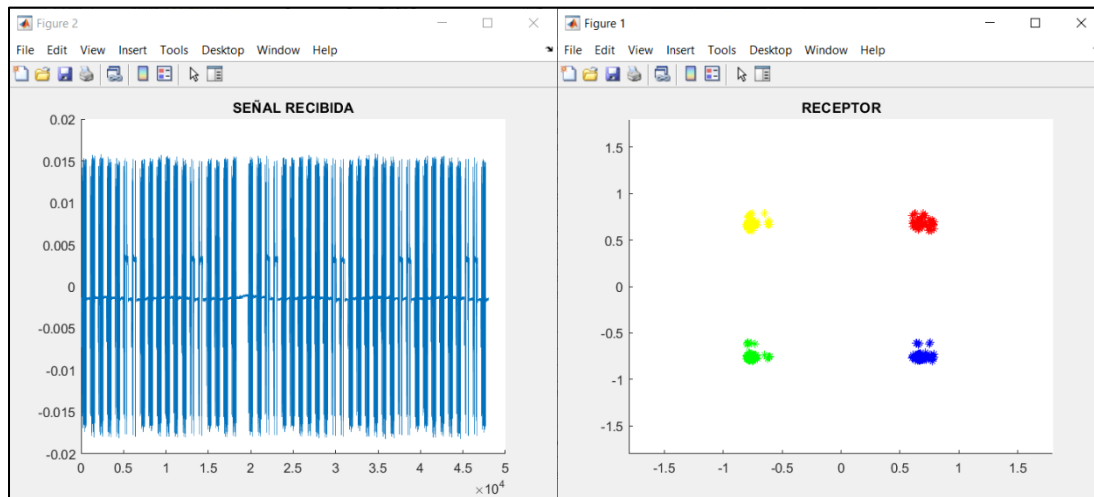
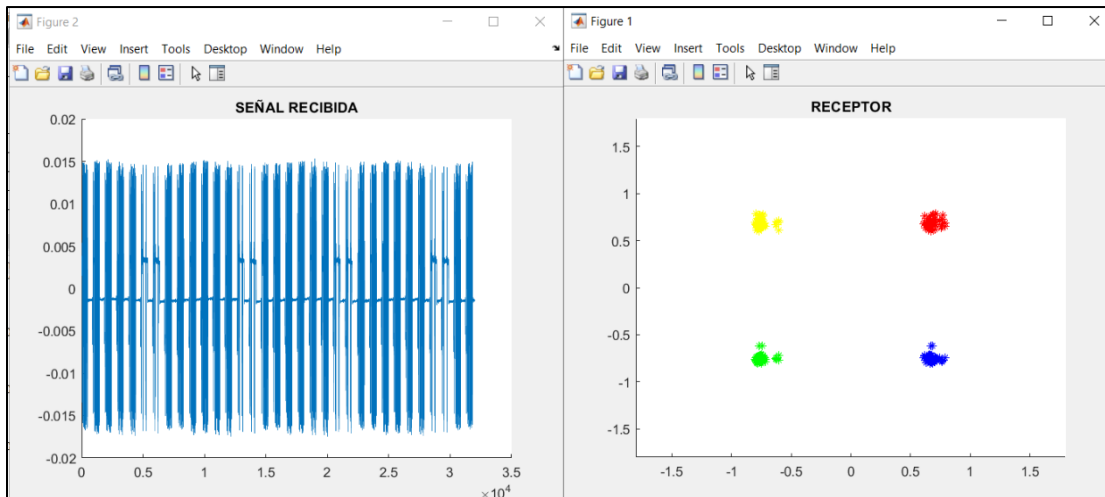
- 4 METROS





- 6 METROS

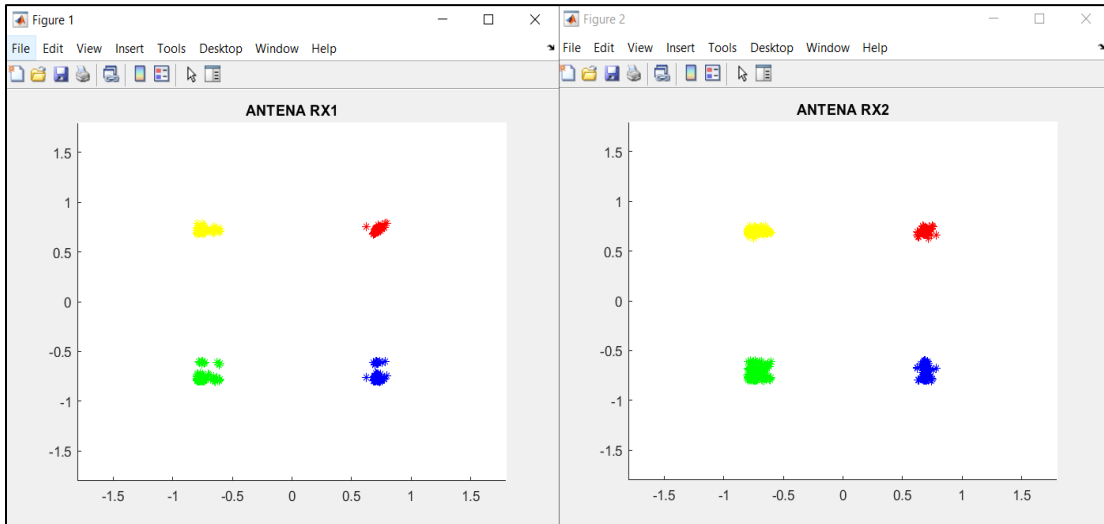
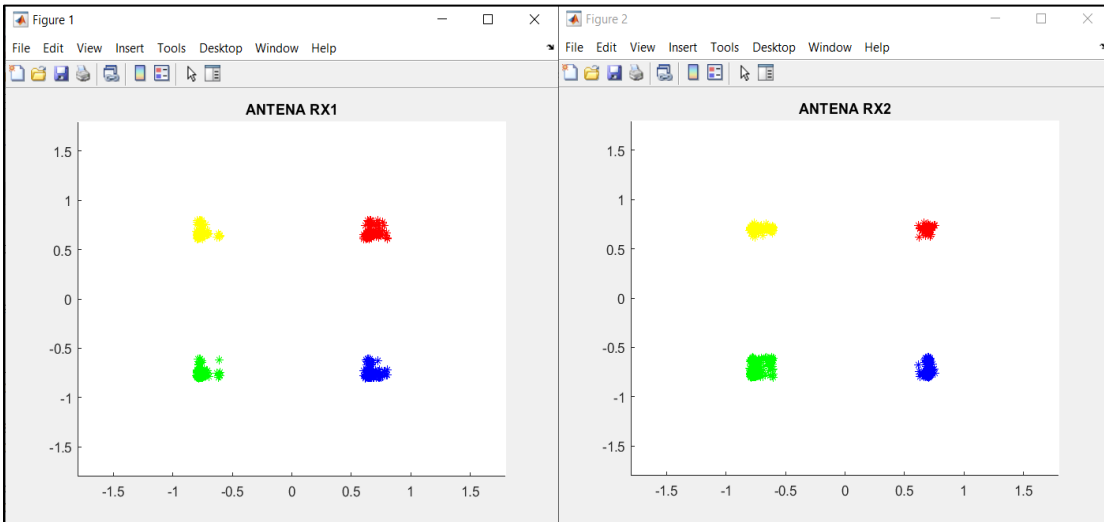
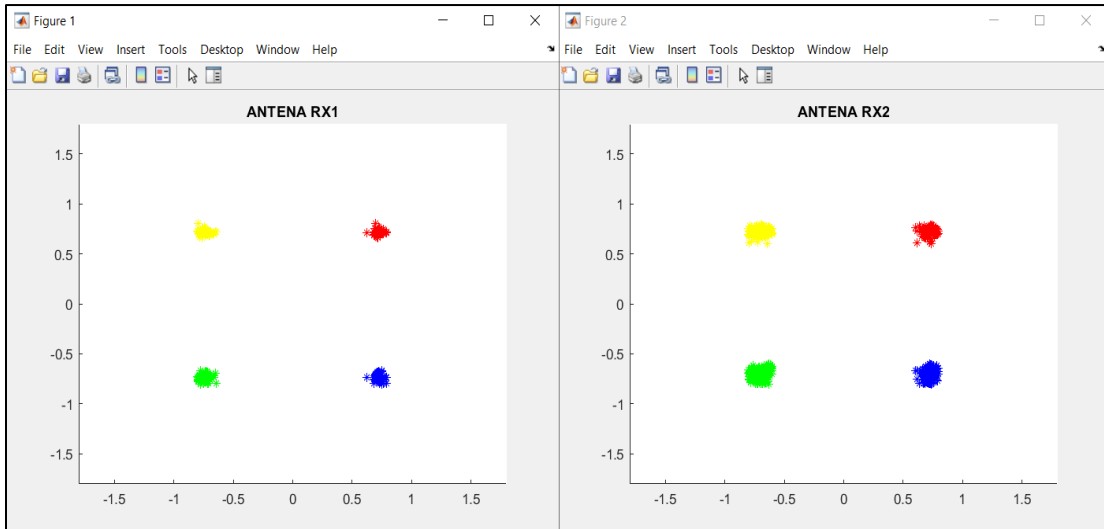




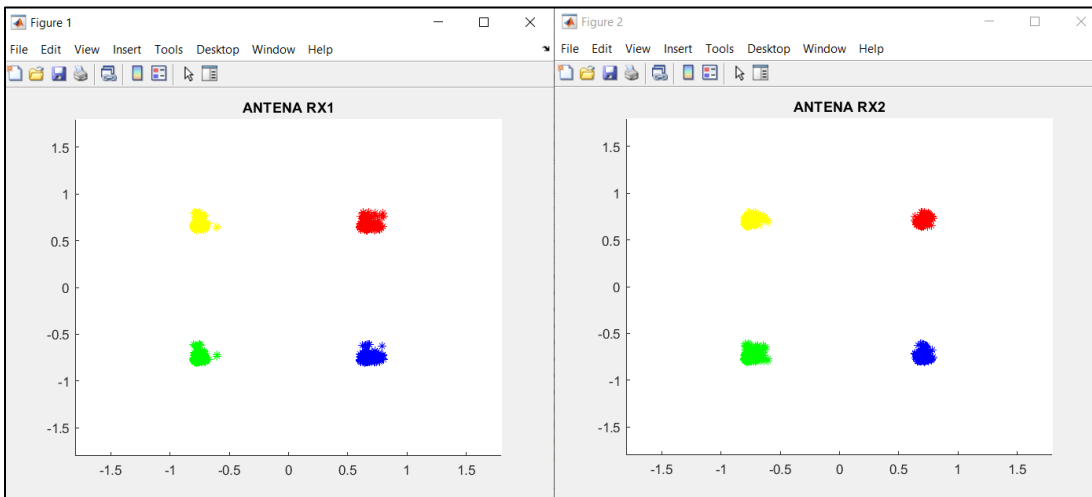
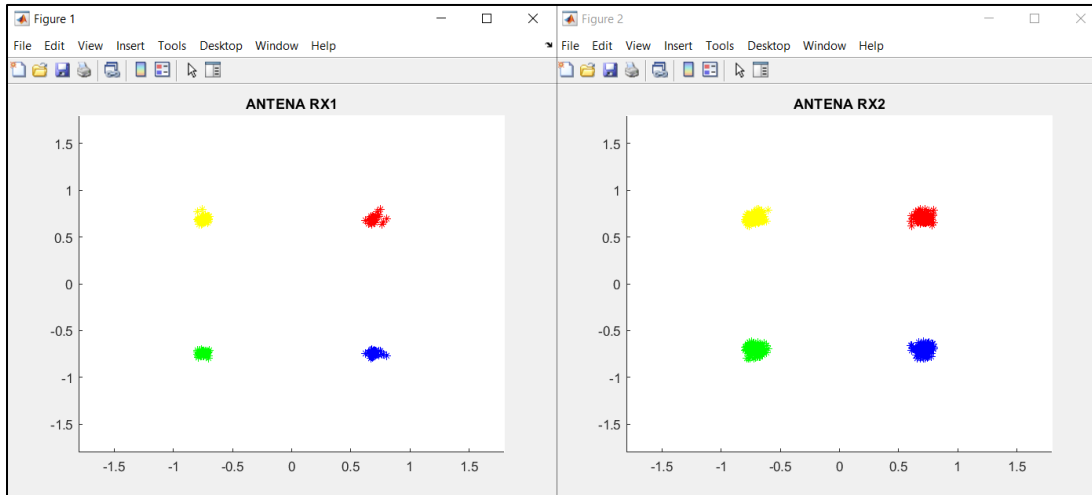
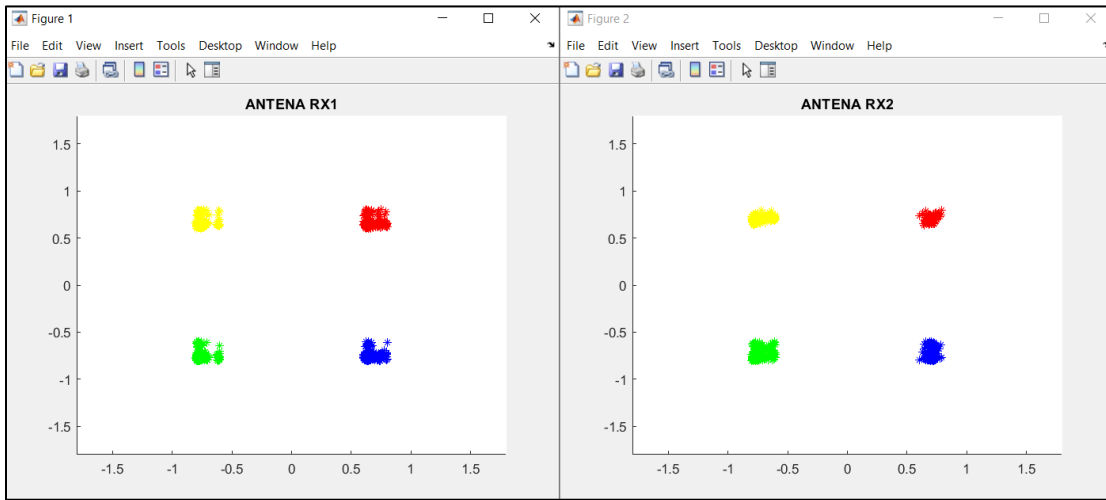
**ANEXO O: PRUEBAS ESCENARIO 2 SIMO POLARIZACION VERTICAL**

- 2 METROS

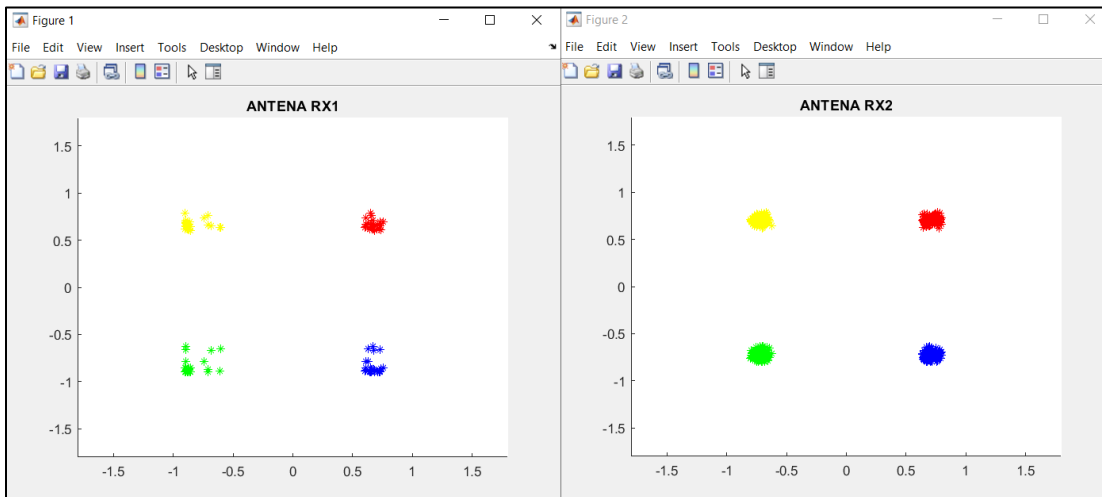
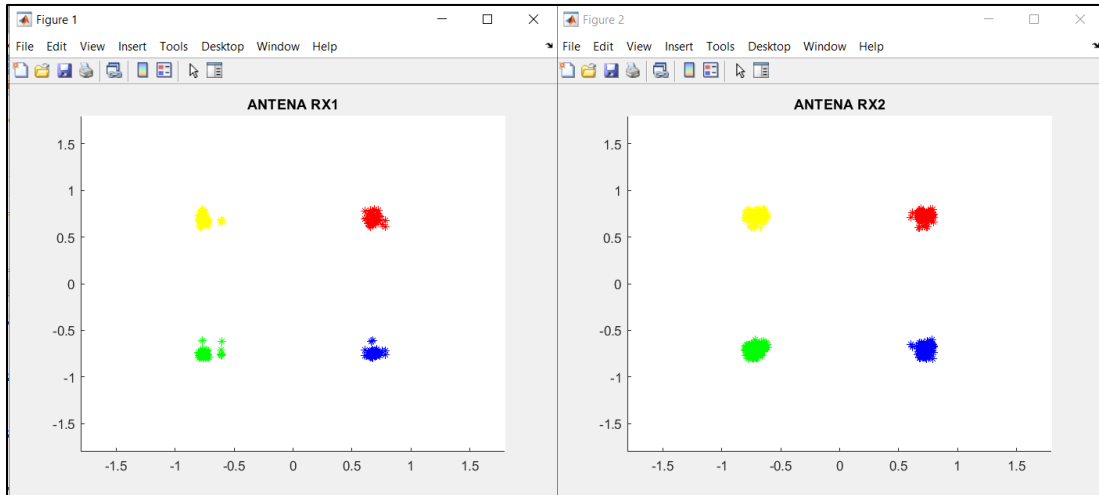
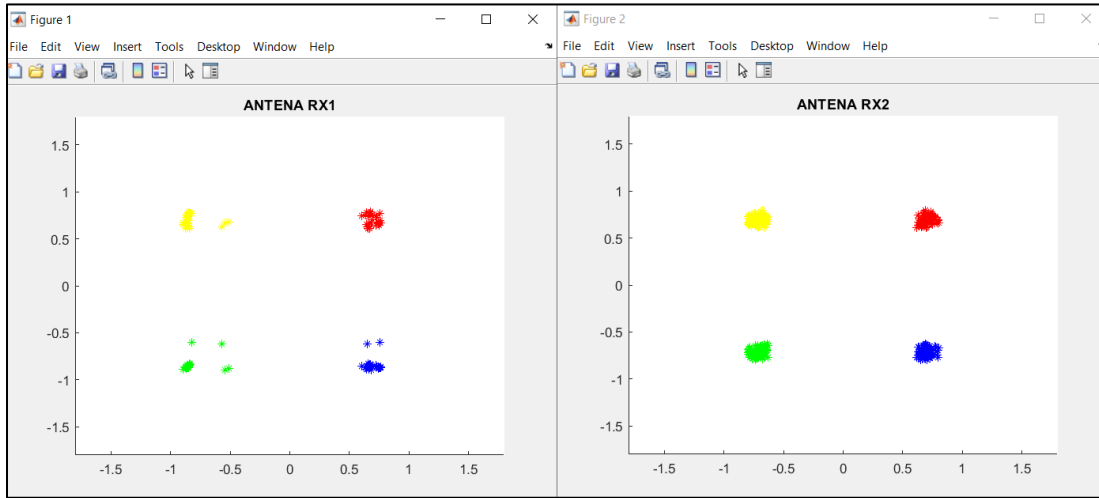




- 4 METROS

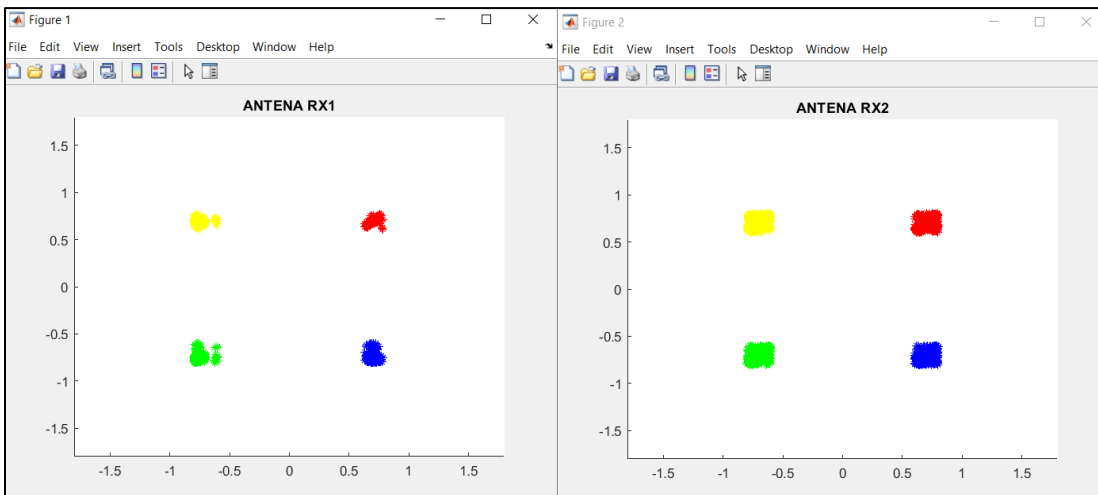
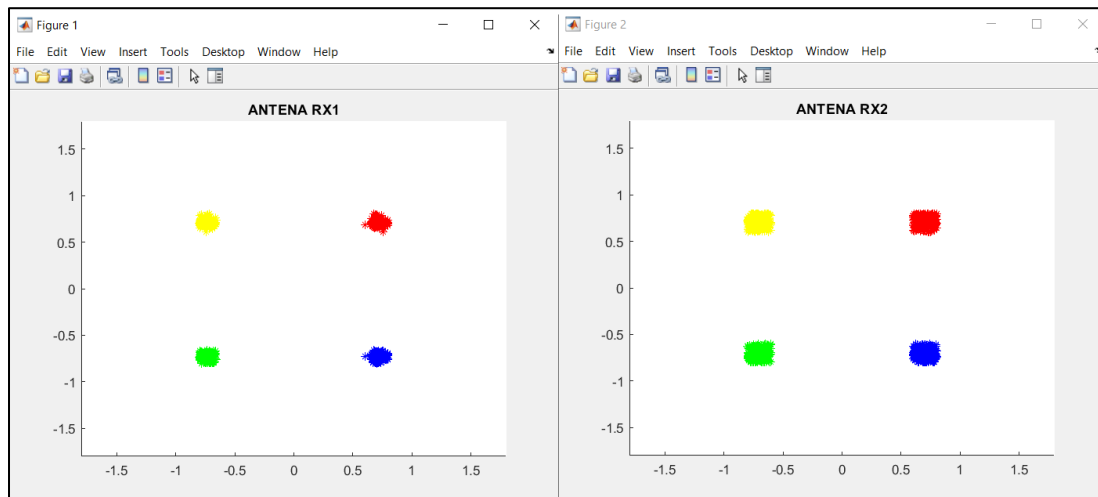
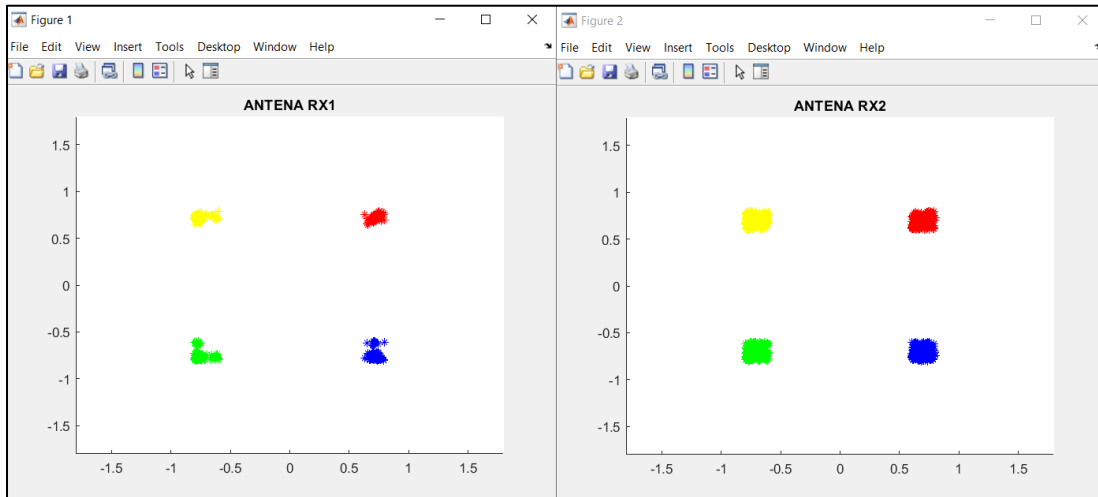


- 6 METROS

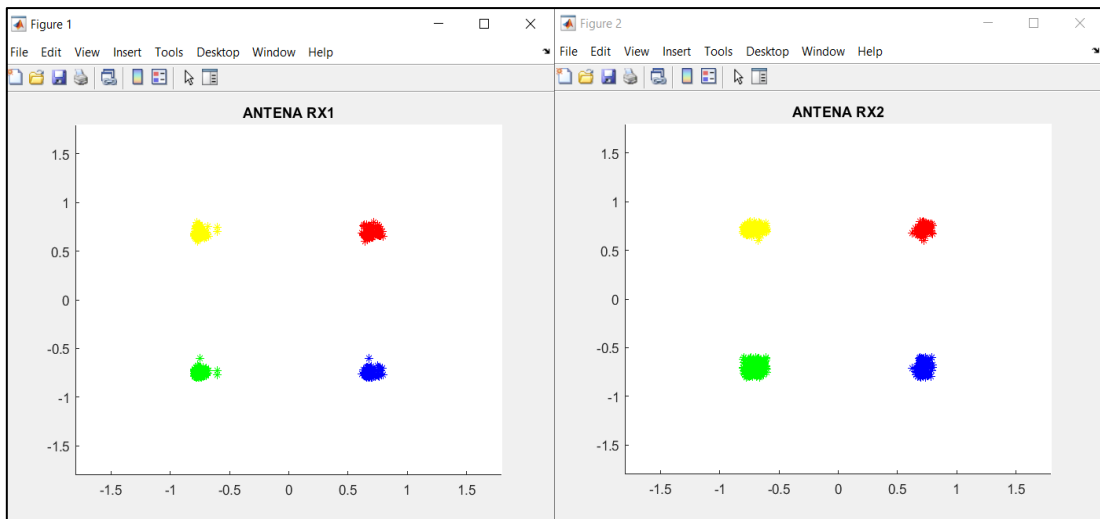
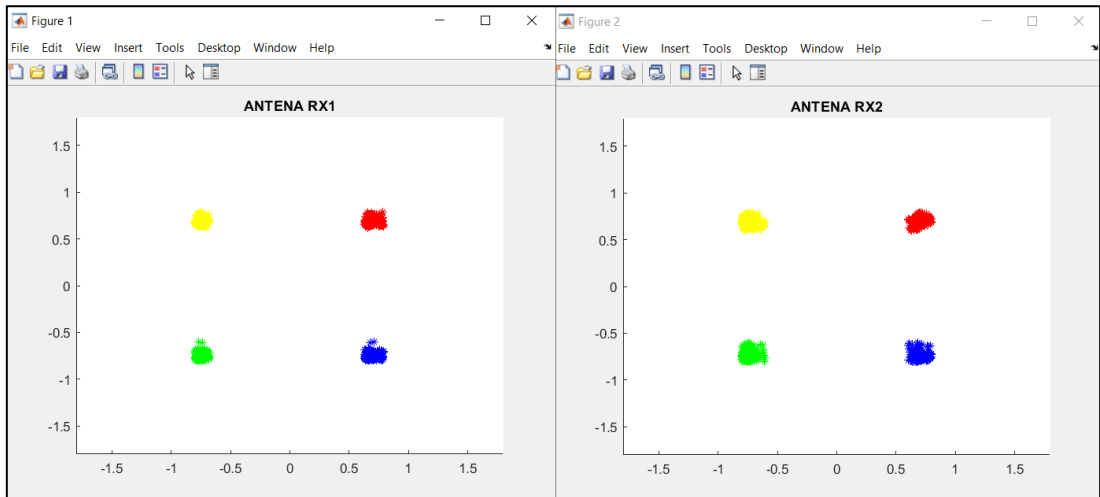
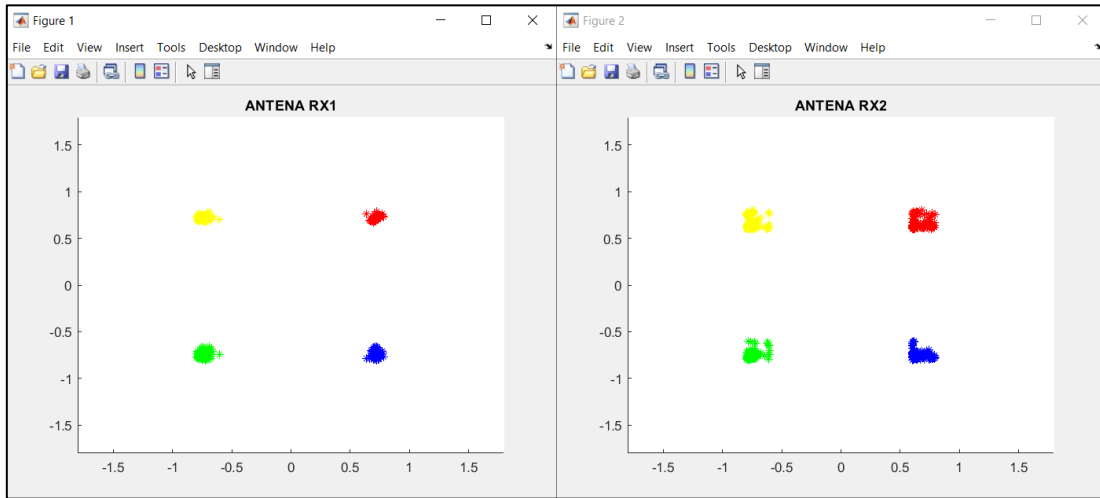


## ANEXO P: PRUEBAS ESCENARIO 2 SIMO POLARIZACION HORIZONTAL

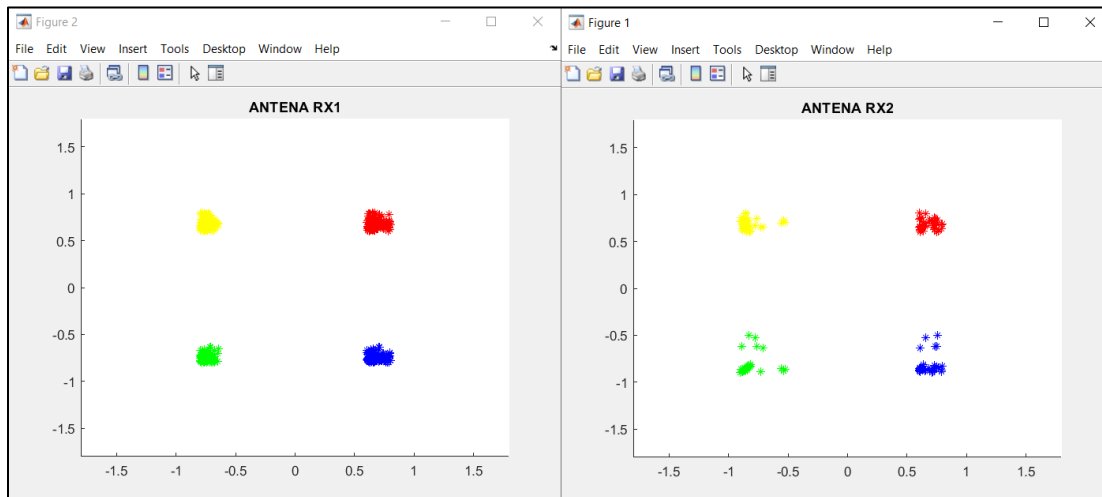
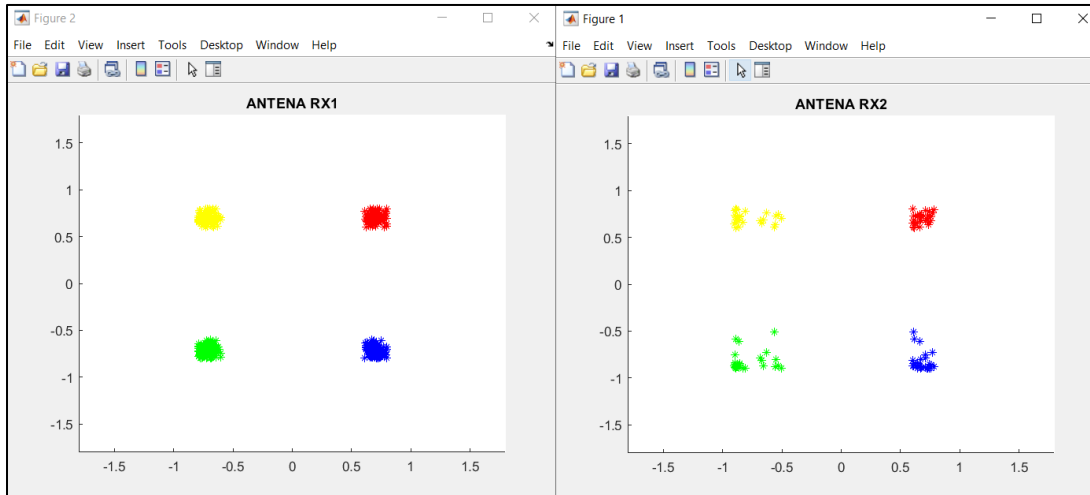
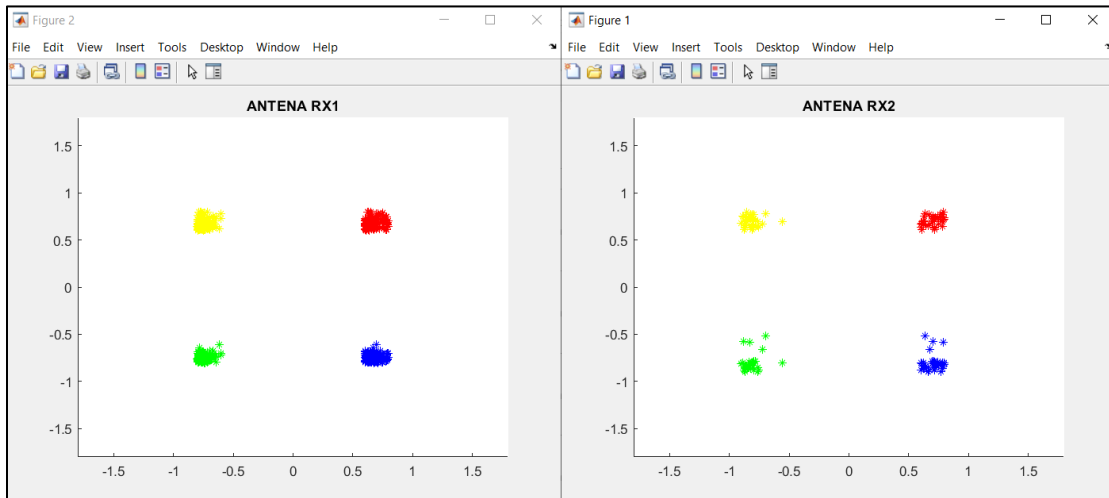
- 2 METROS



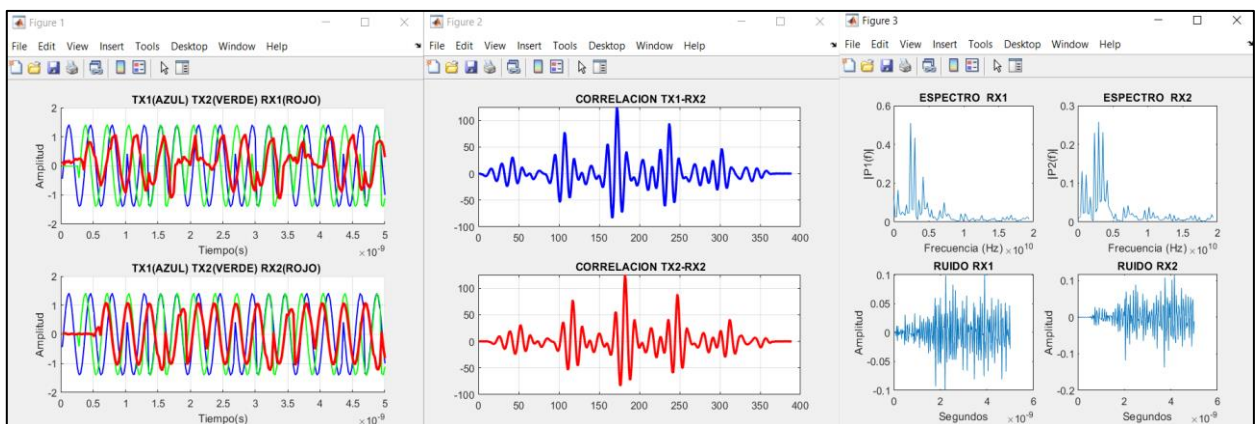
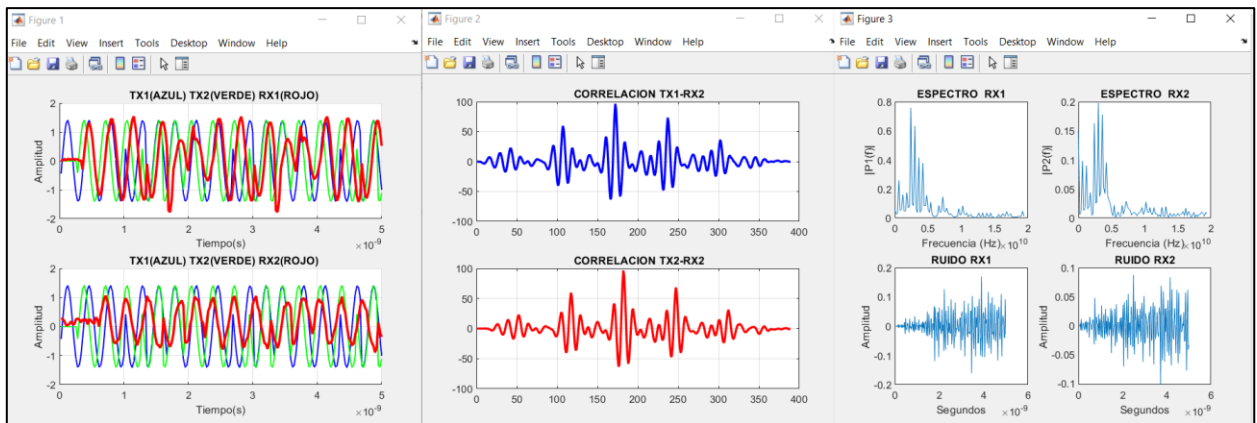
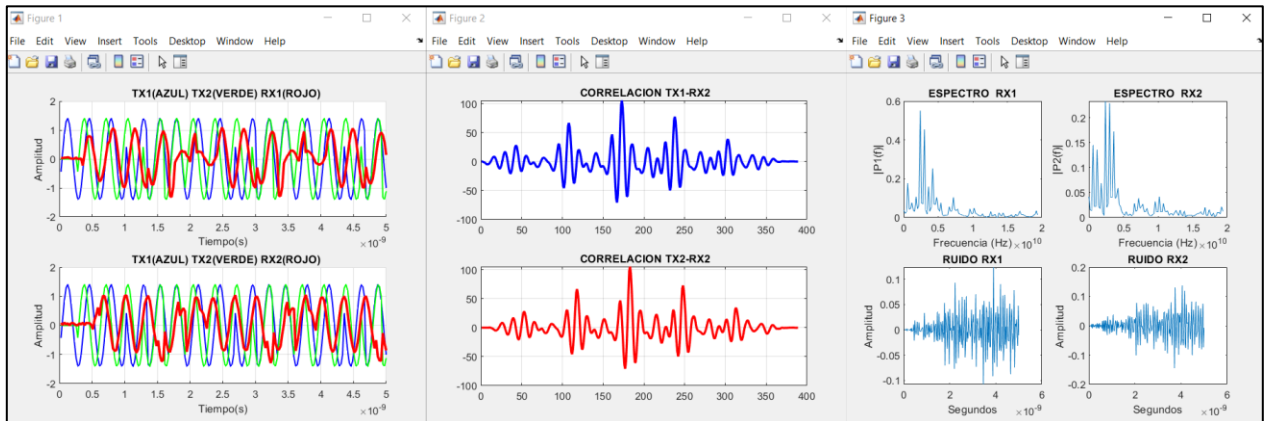
- 4 METROS



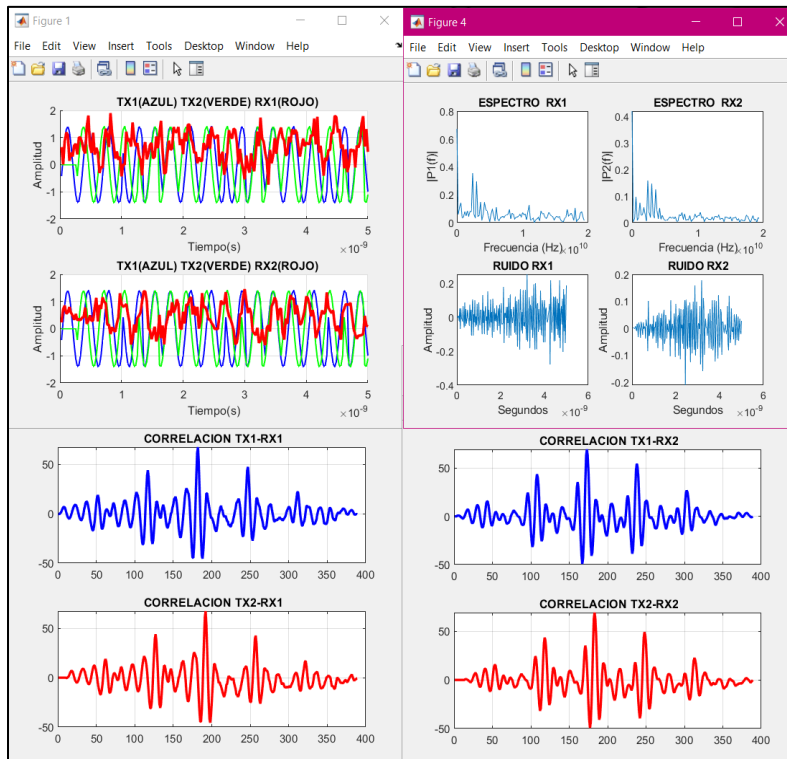
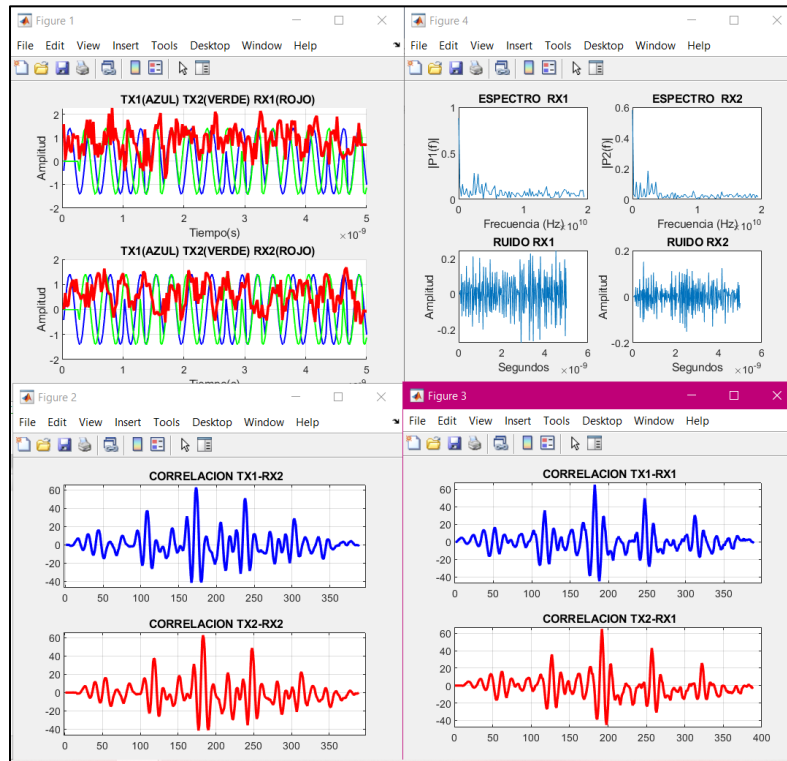
- 6 METROS



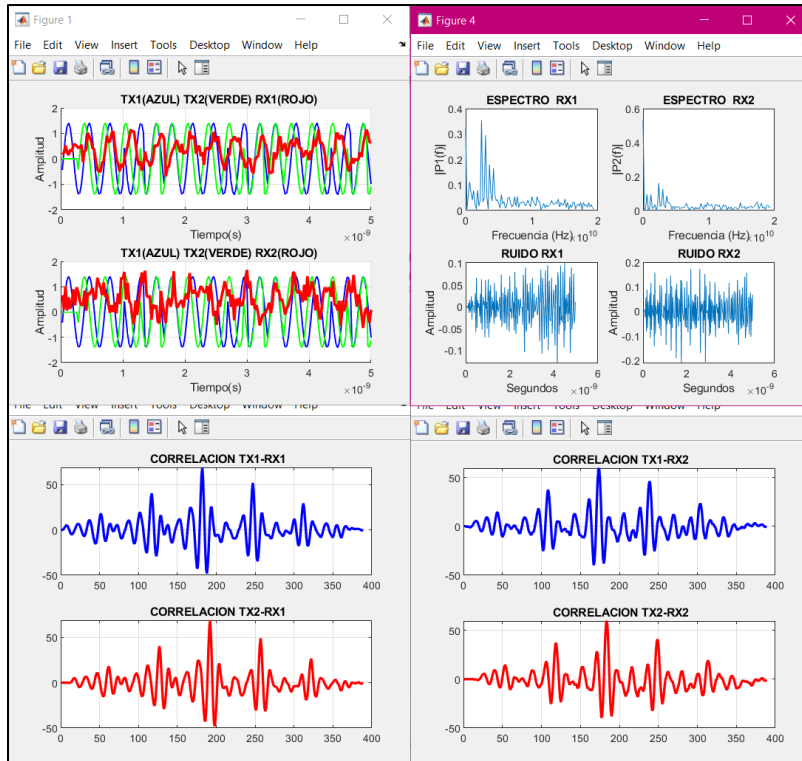
# ANEXO Q: PRUEBAS ESCENARIO MIMO 2X2 RUIDO BAJO



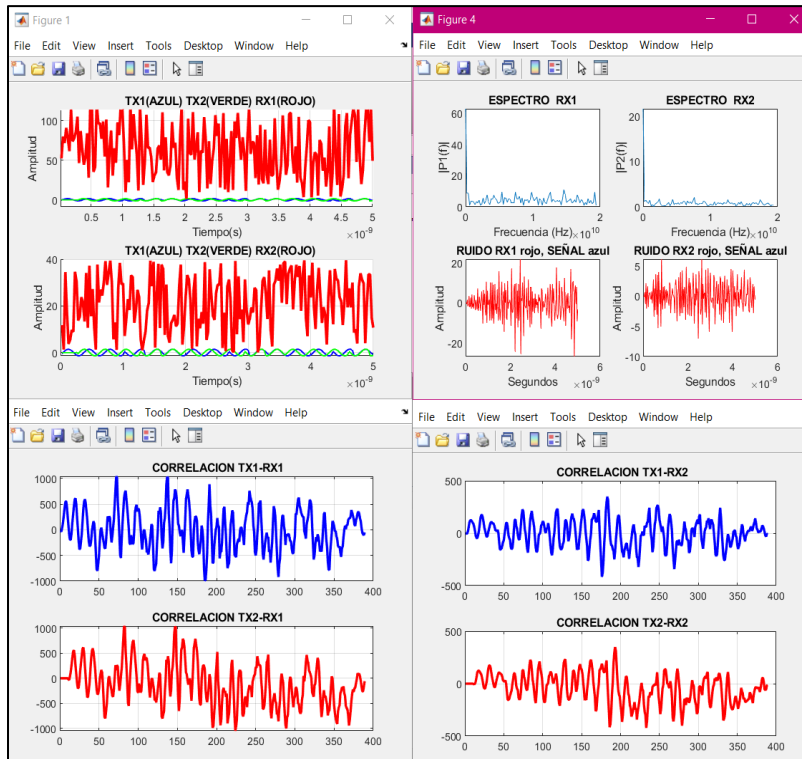
## ANEXO R: PRUEBAS ESCENARIO MIMO 2X2 RUIDO MEDIO

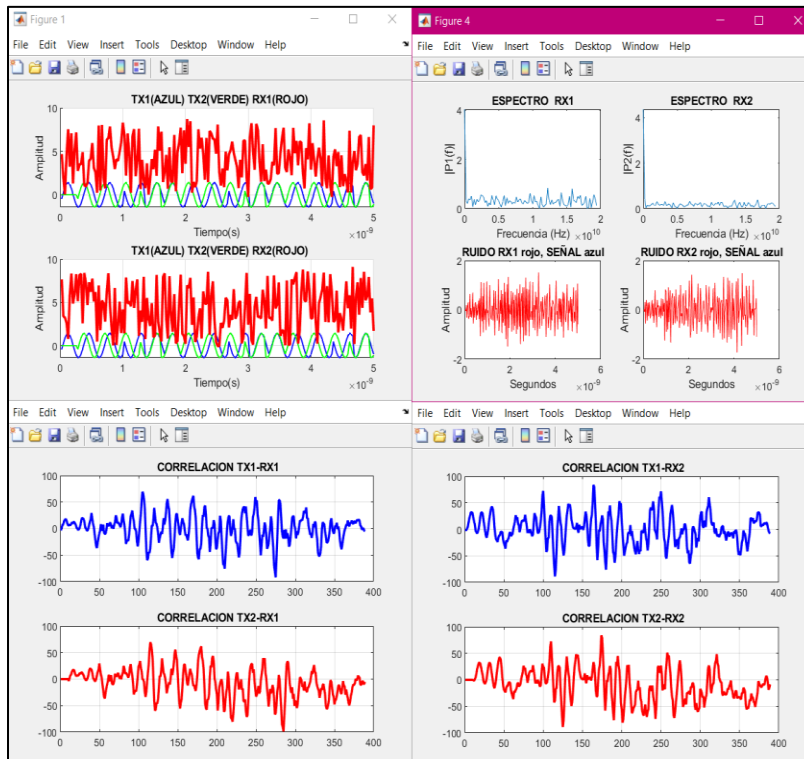
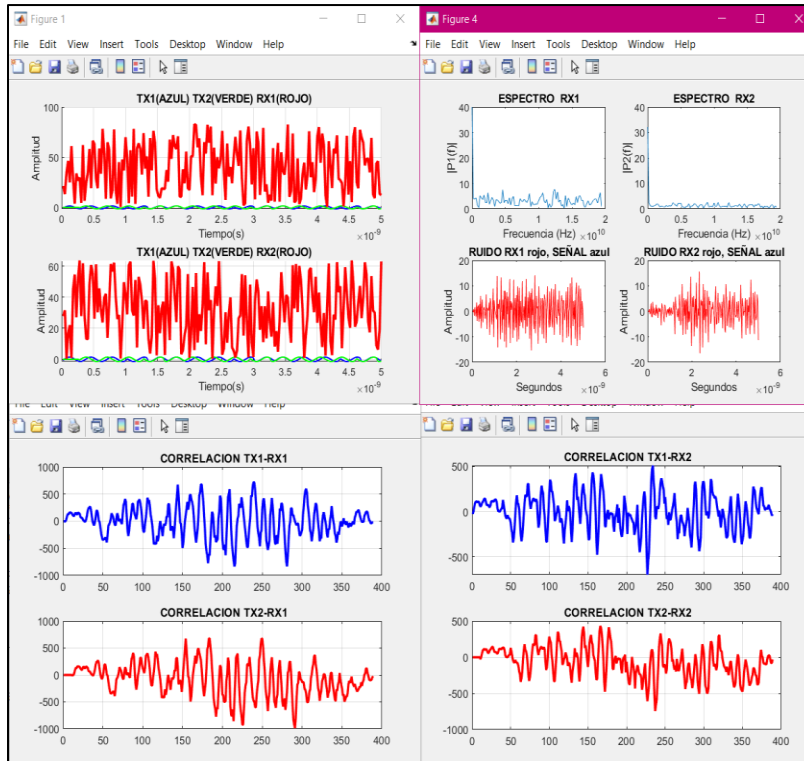






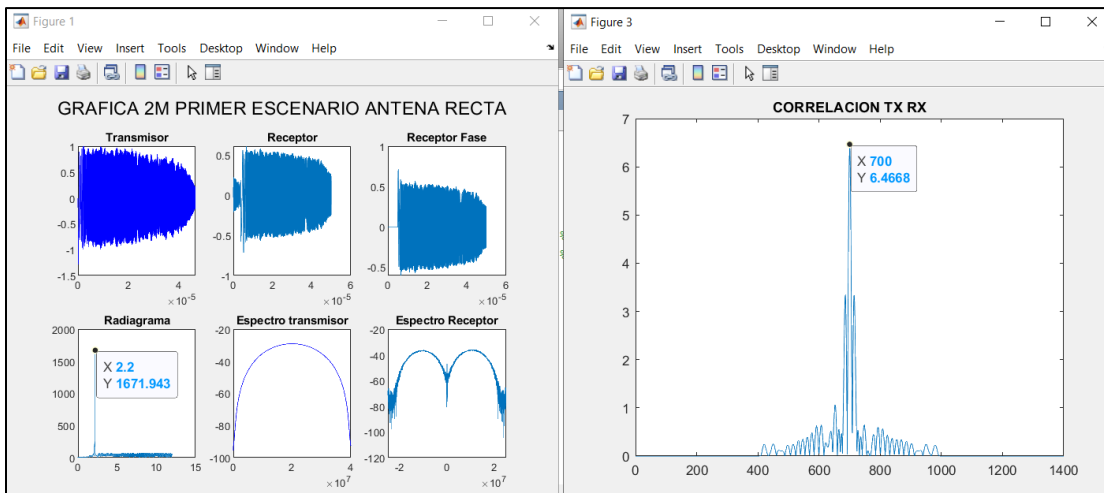
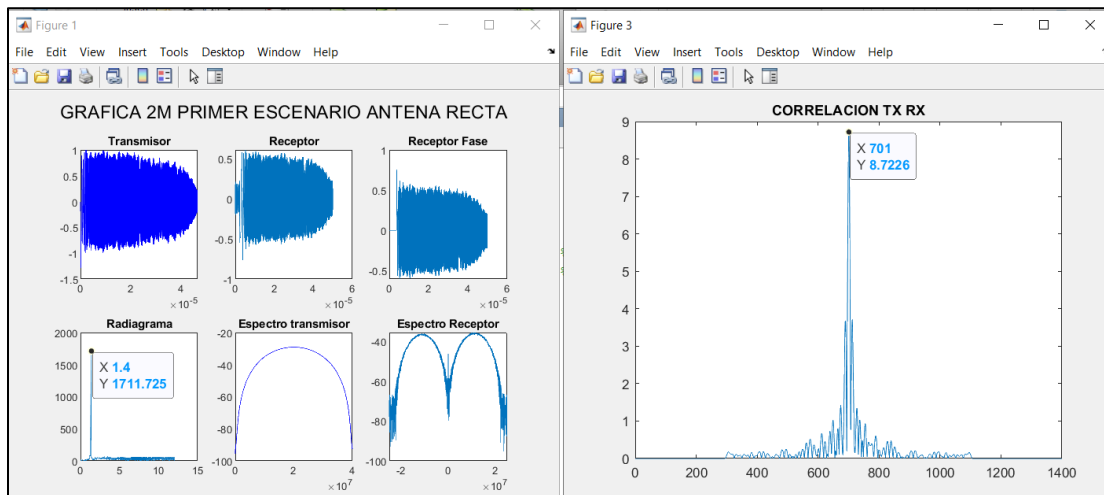
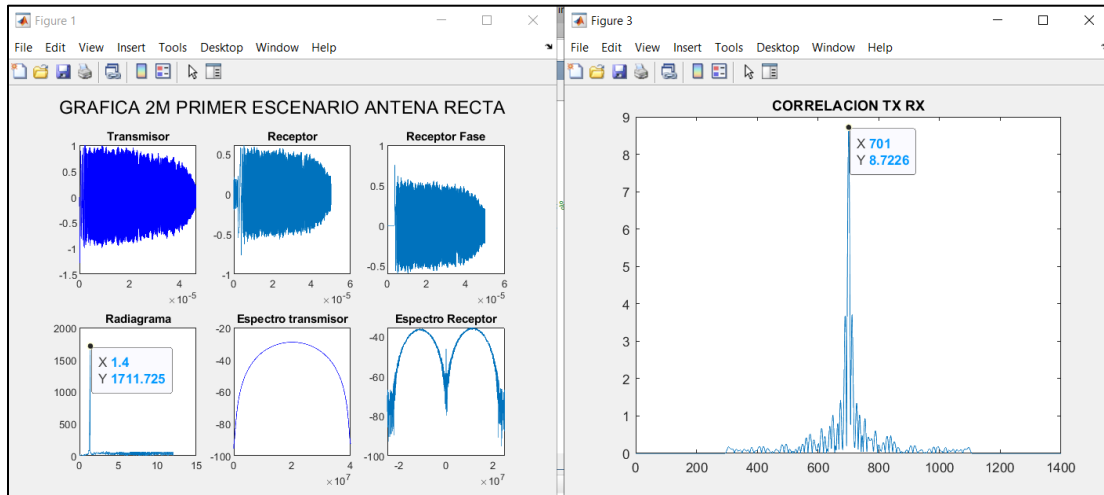
## ANEXO S: PRUEBAS ESCENARIO MIMO 2X2 RUIDO ALTO



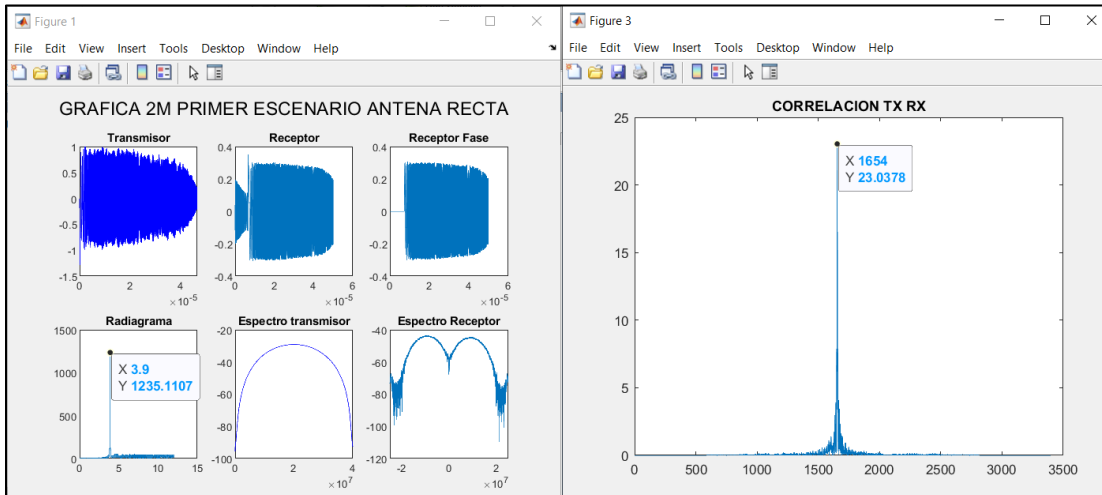
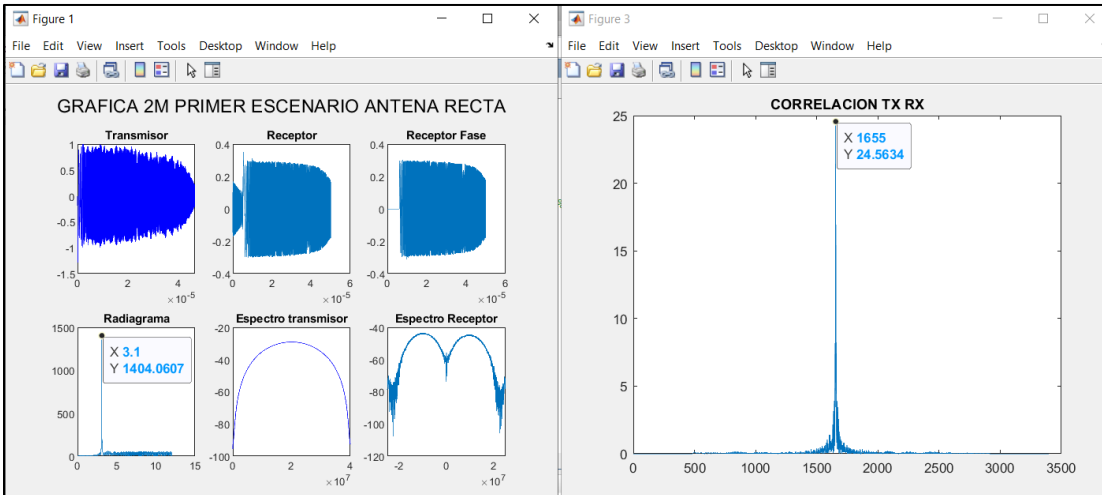
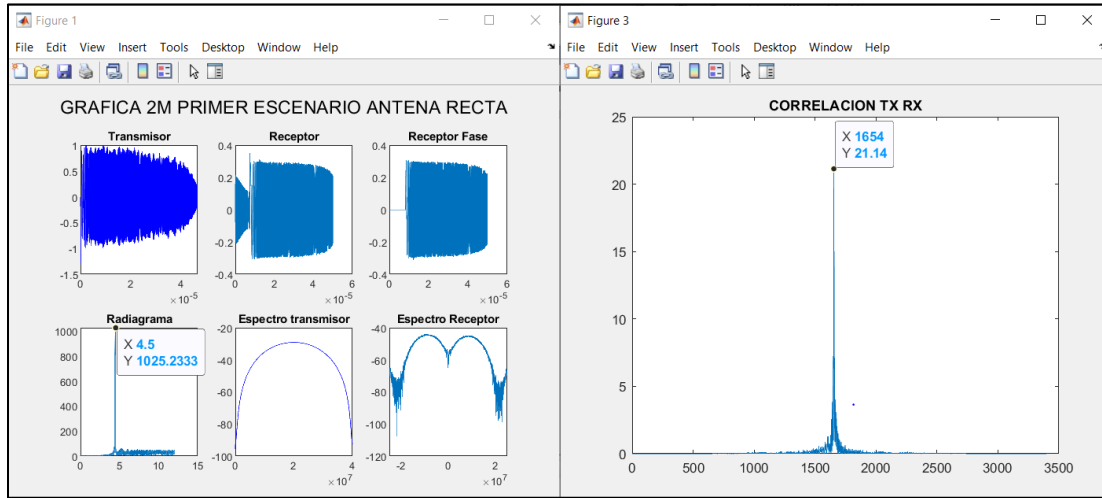


# ANEXO T: PRUEBAS ESCENARIO 1 RADAR POLARIZACION VERTICAL

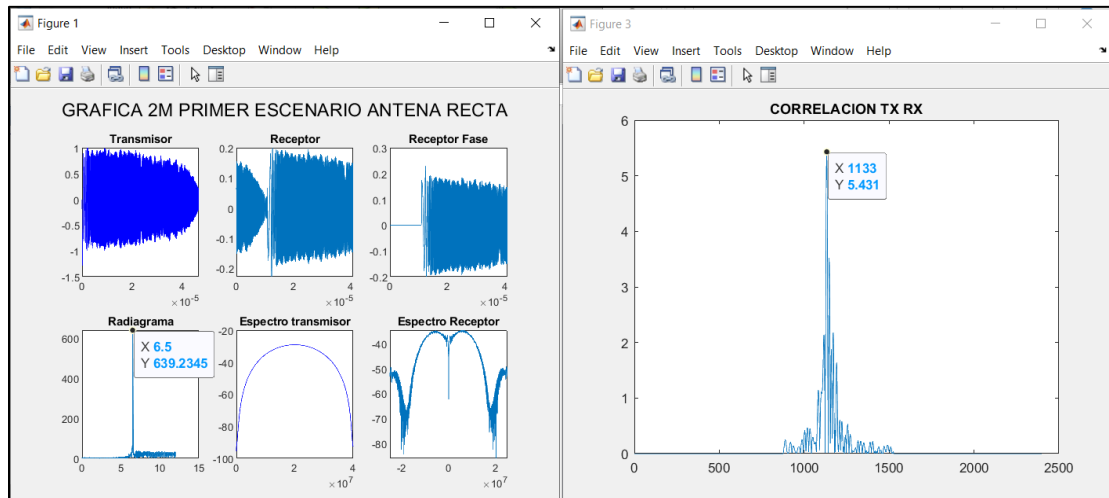
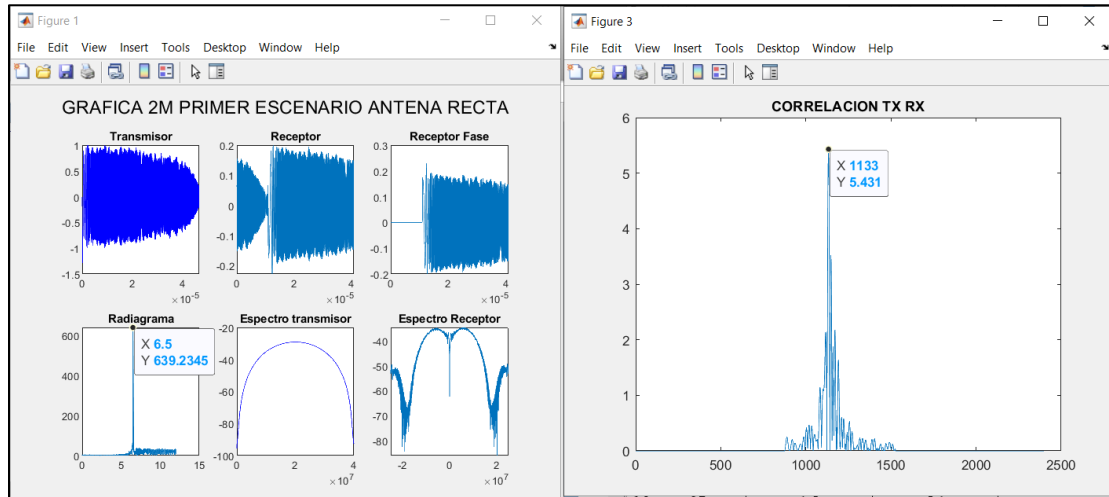
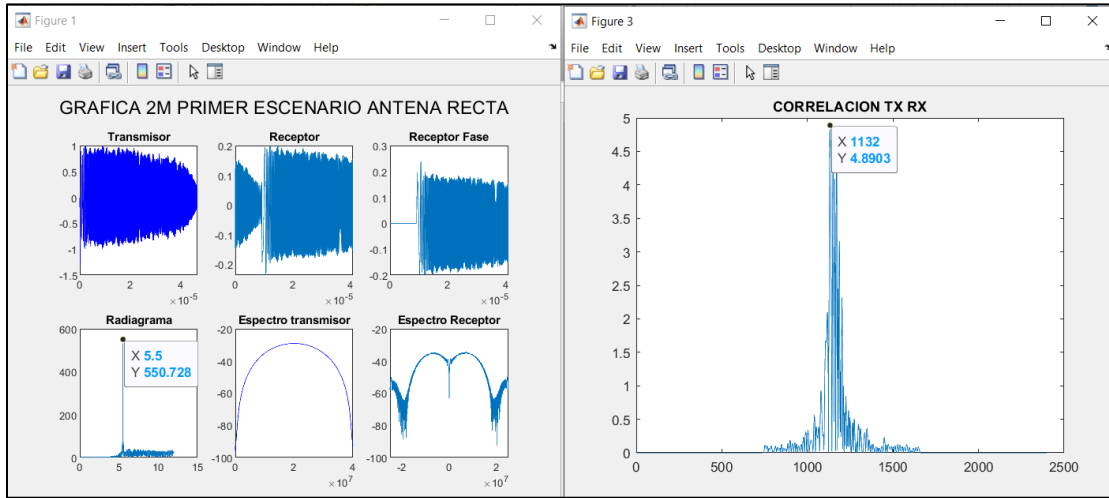
- 2 METROS



- 4 METROS

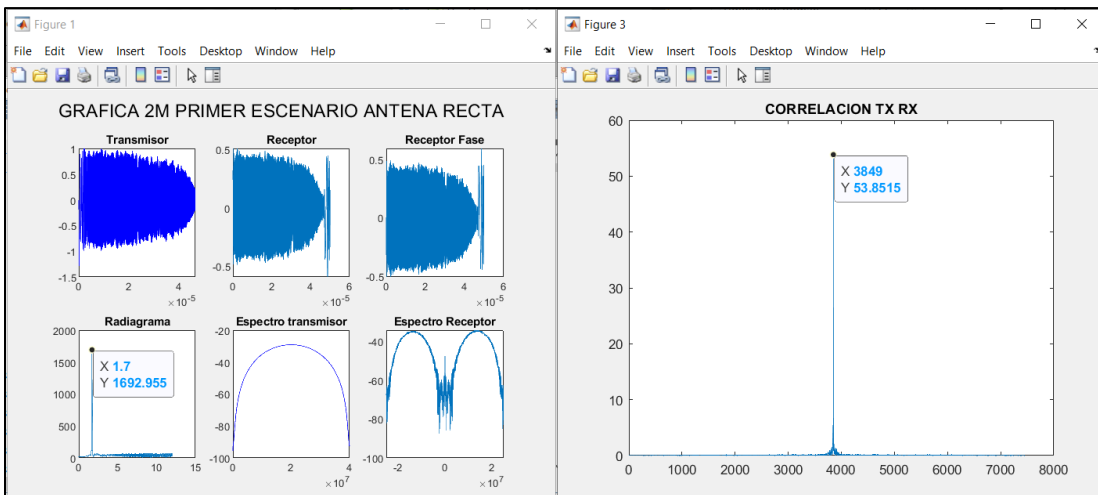
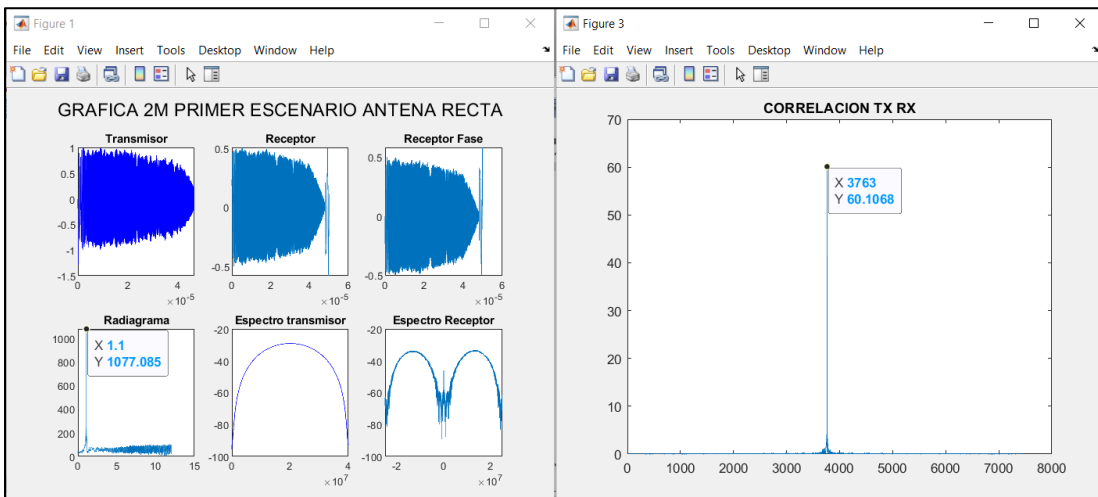
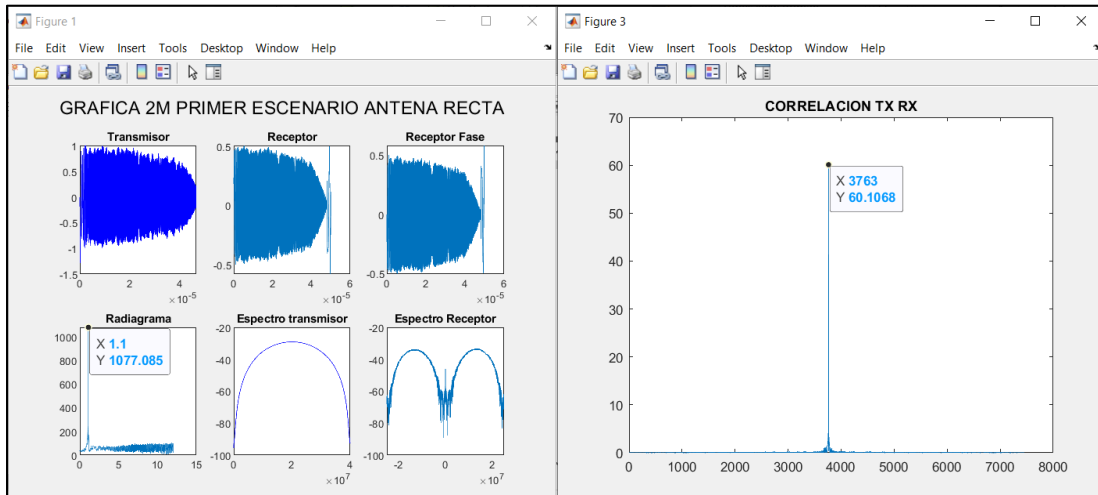


- 6 METROS

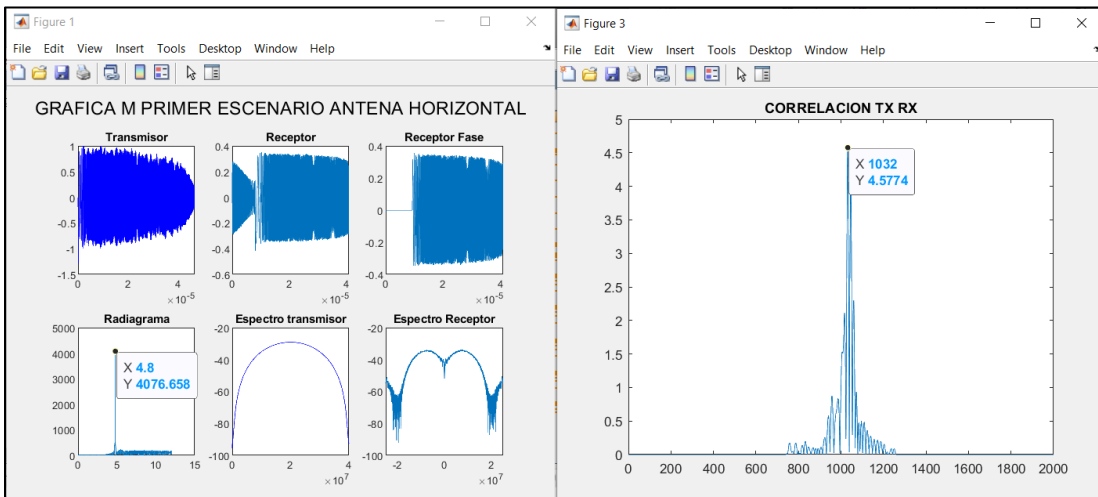
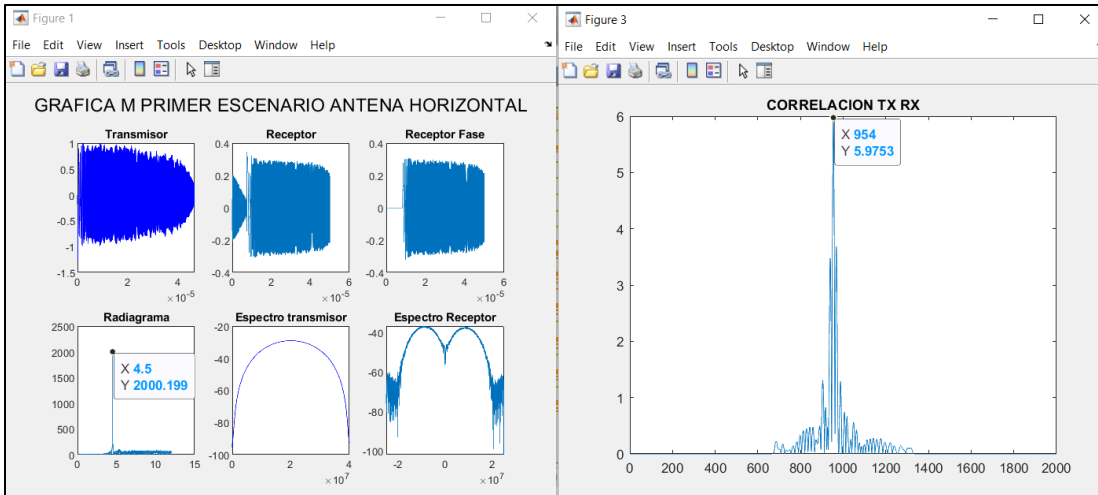
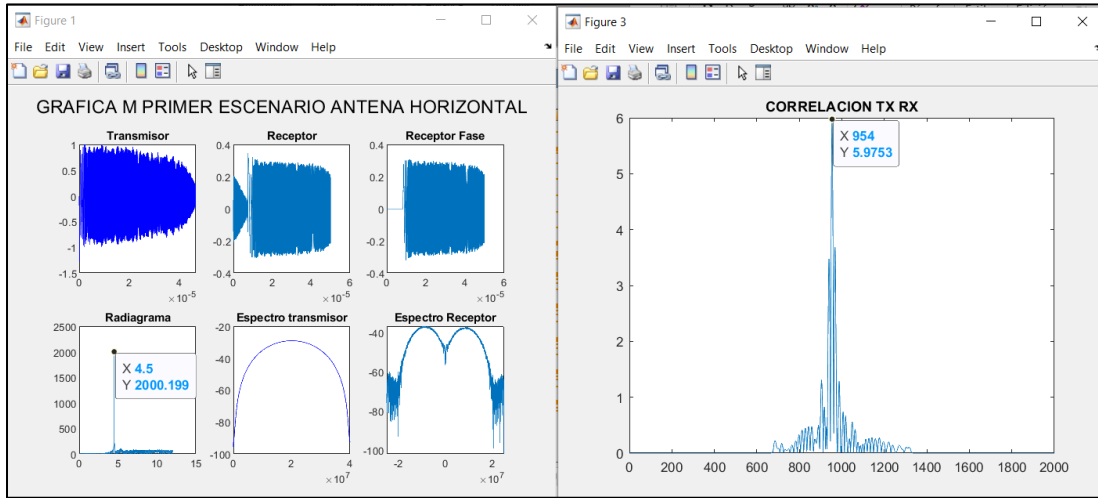


# ANEXO U: PRUEBAS ESCENARIO 1 RADAR POLARIZACION HORIZONTAL

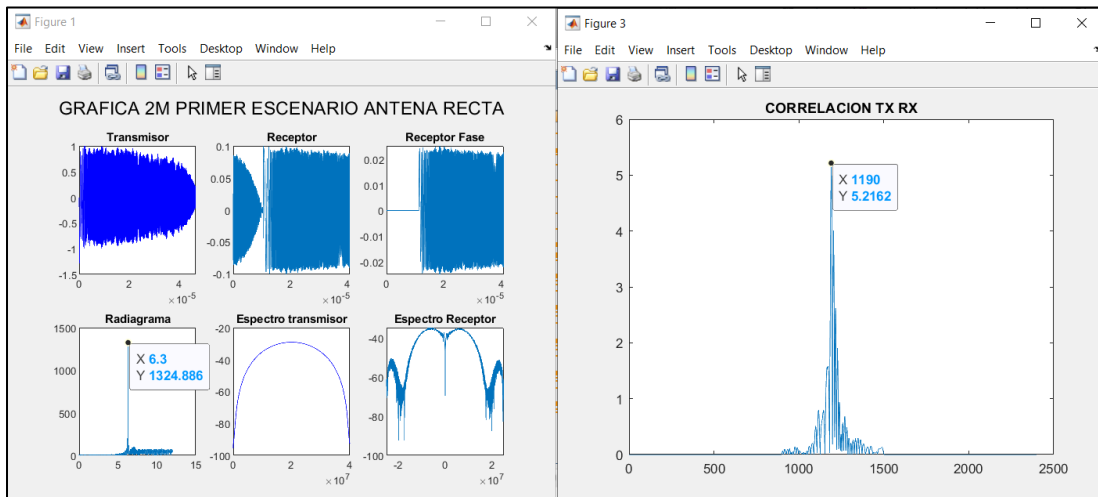
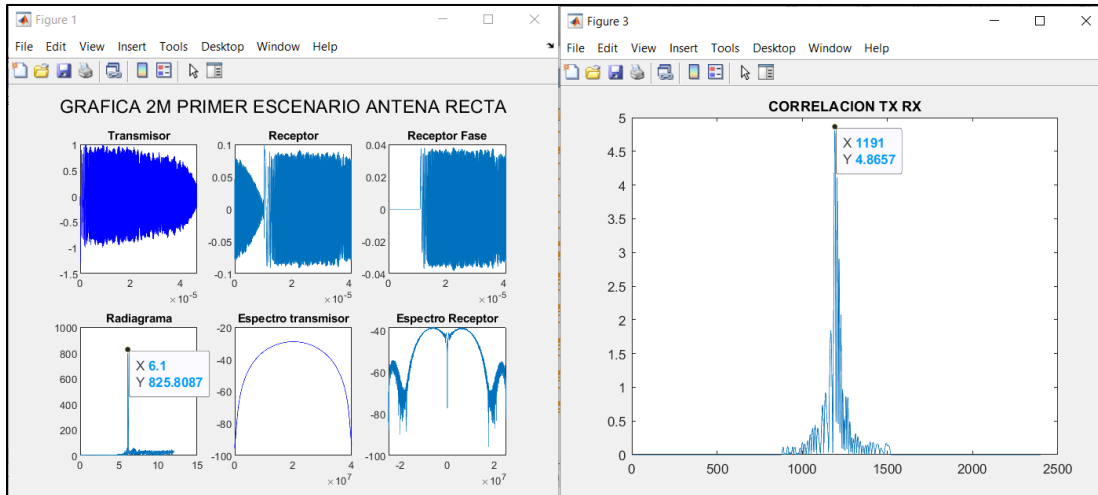
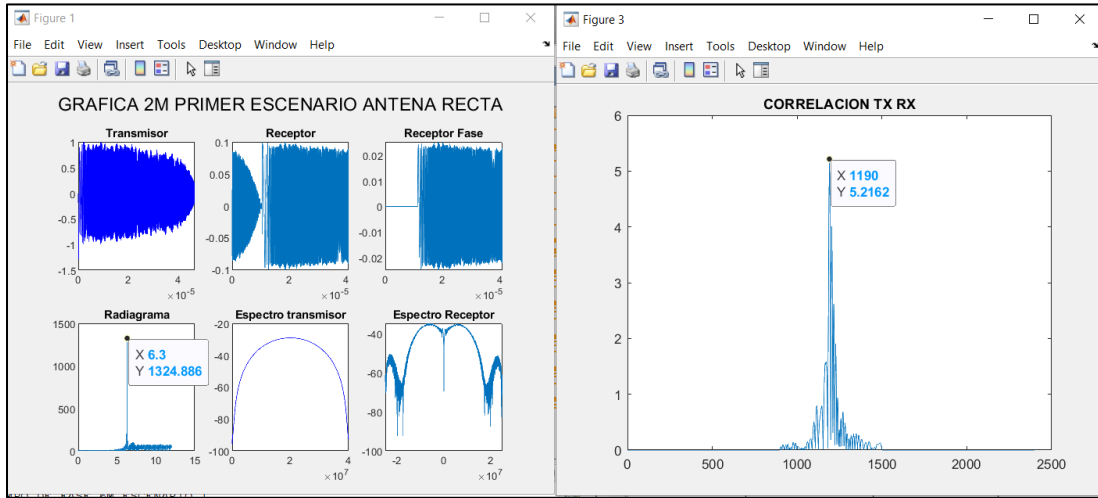
- 2 METROS



- 4 METROS



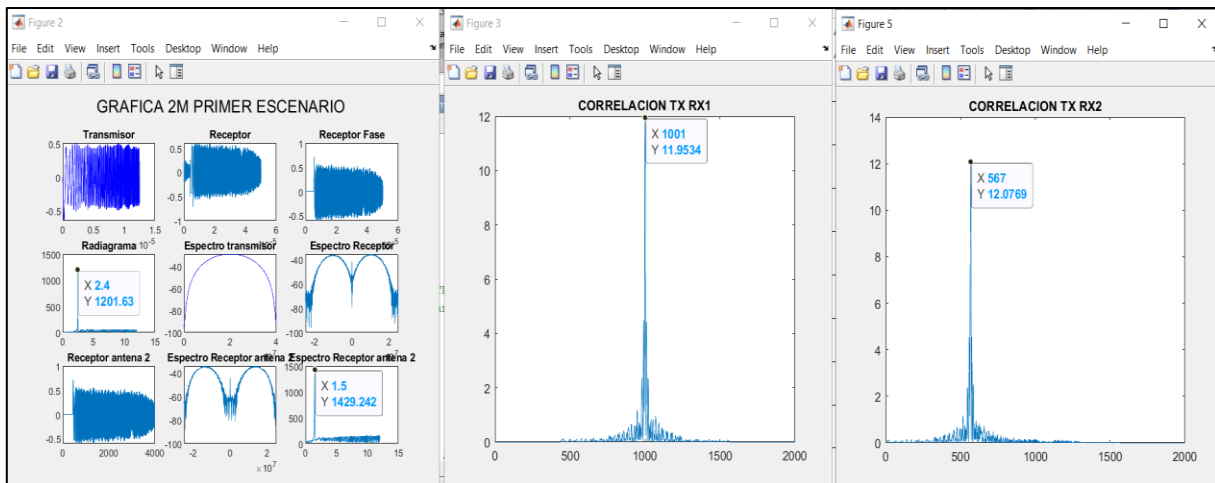
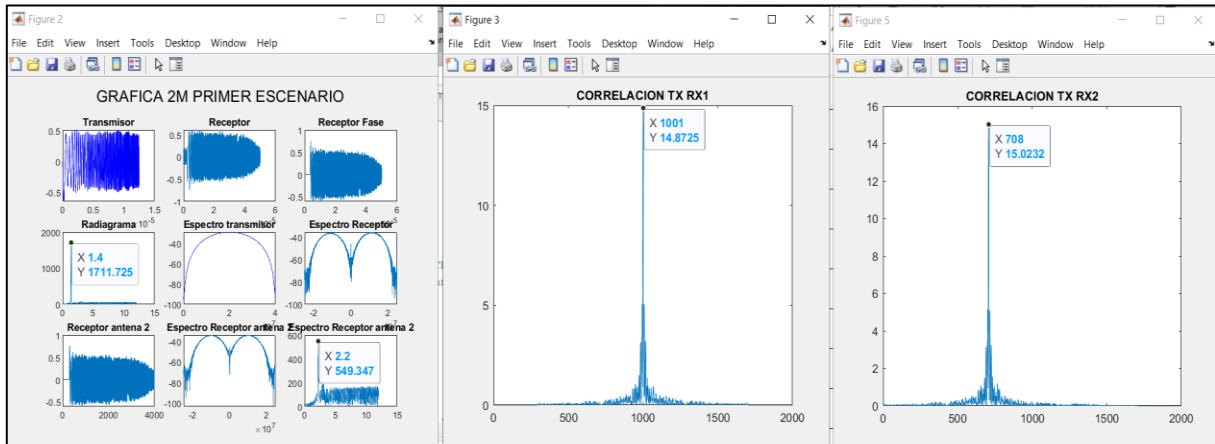
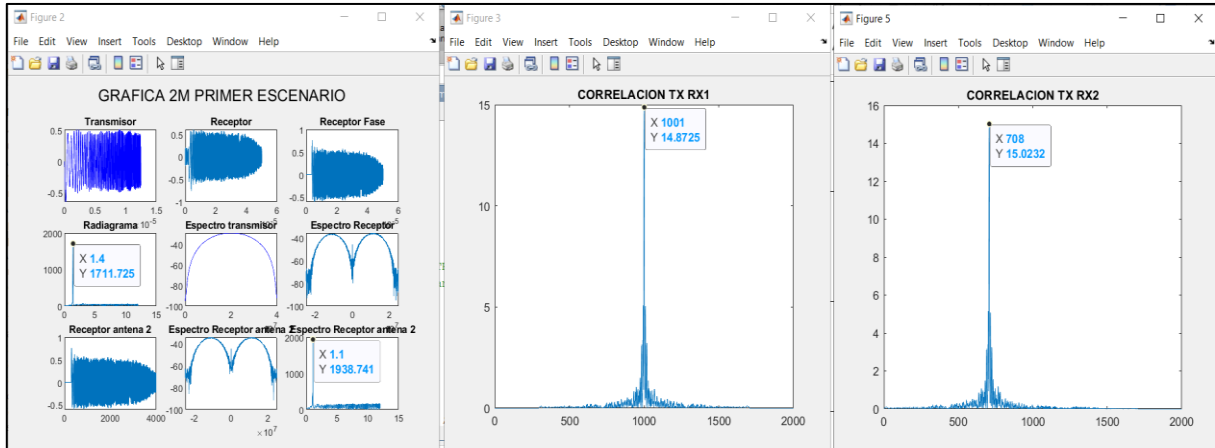
- 6 METROS



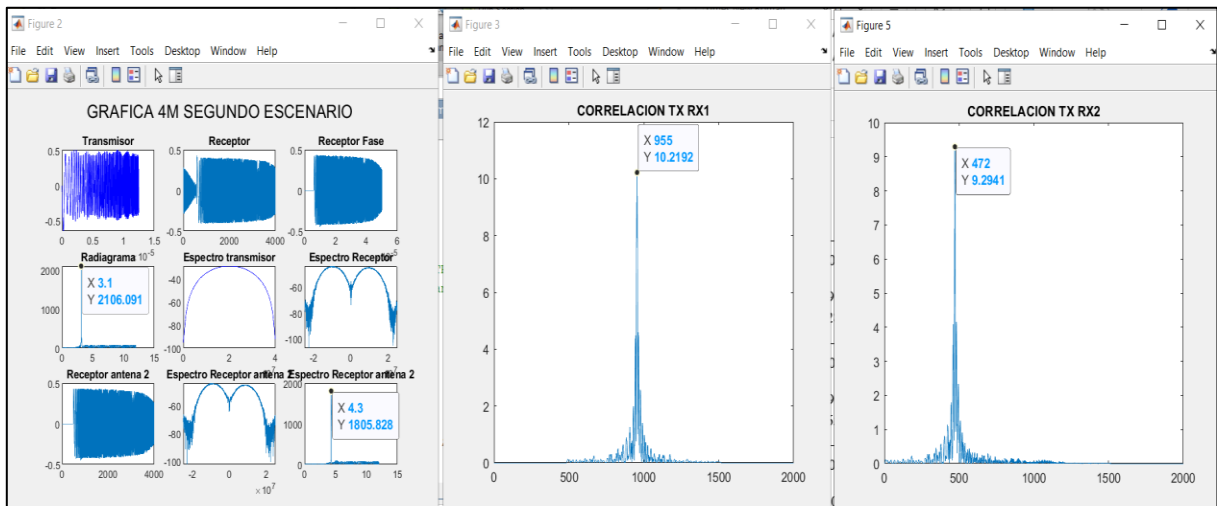
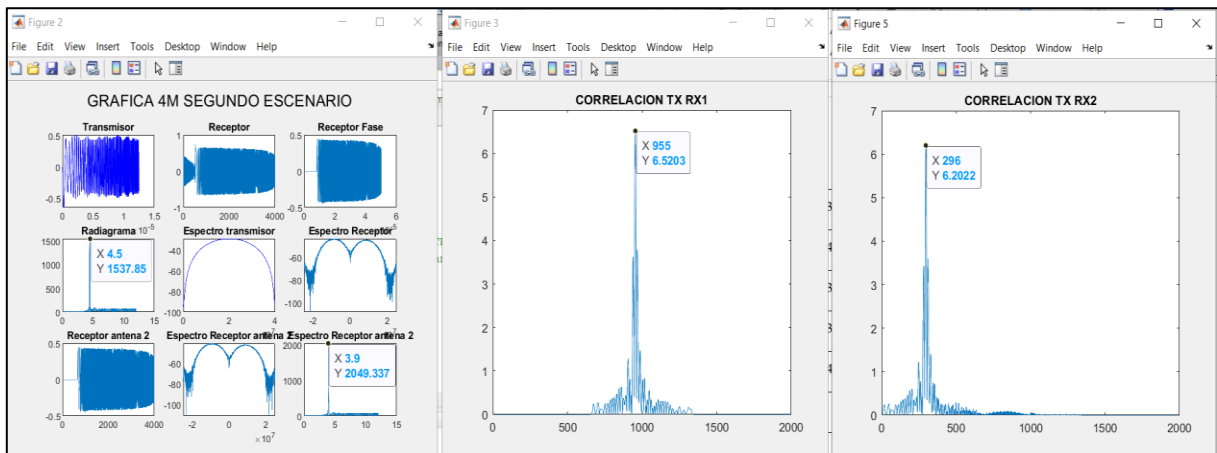
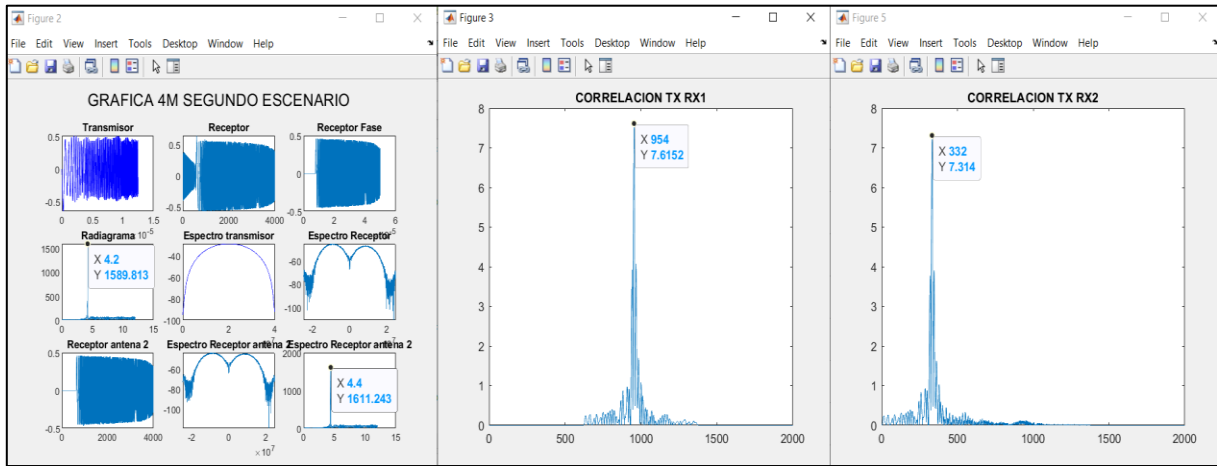


## ANEXO V: PRUEBAS ESCENARIO 2 RADAR POLARIZACION VERTICAL

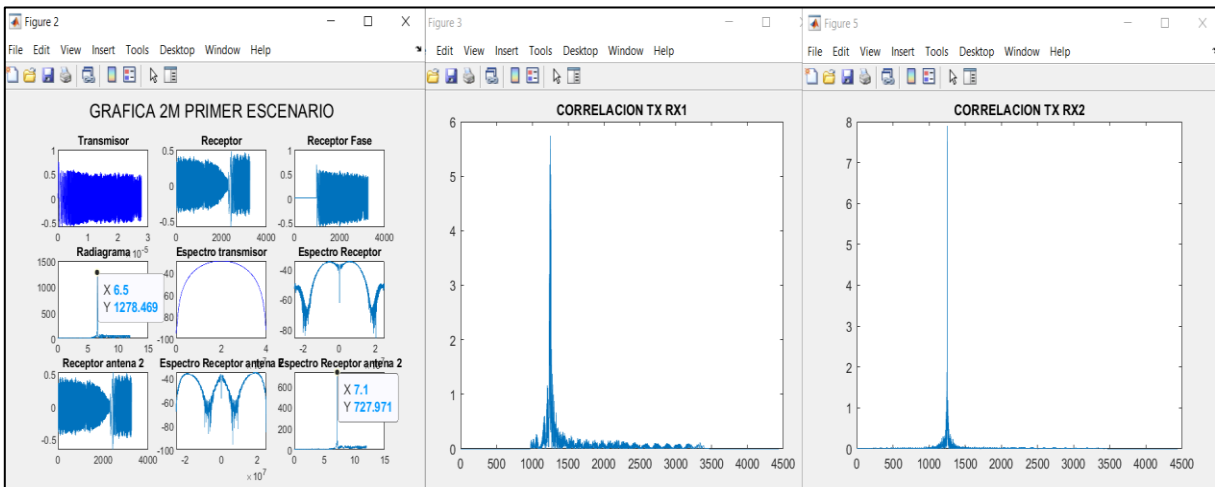
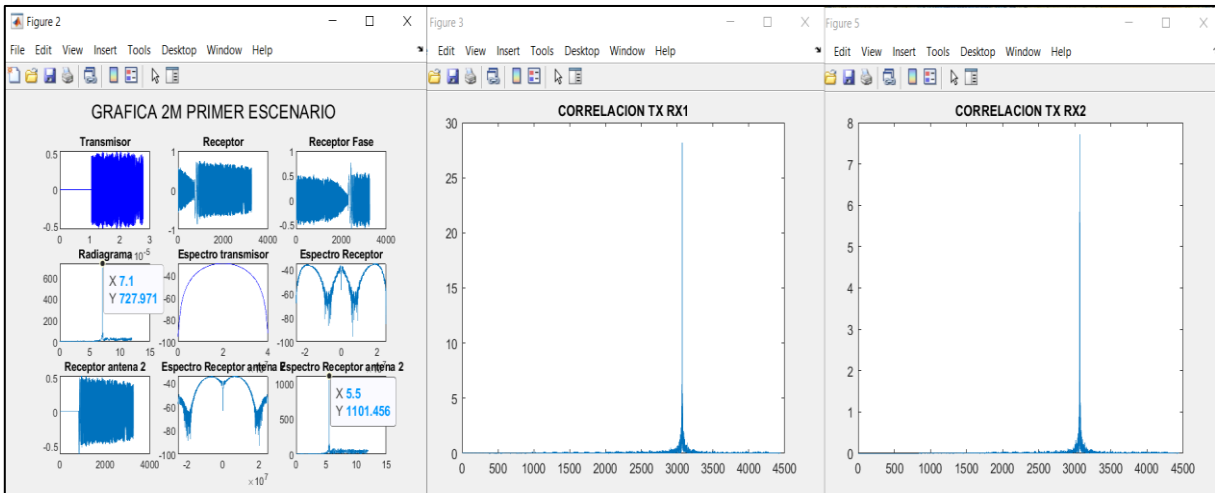
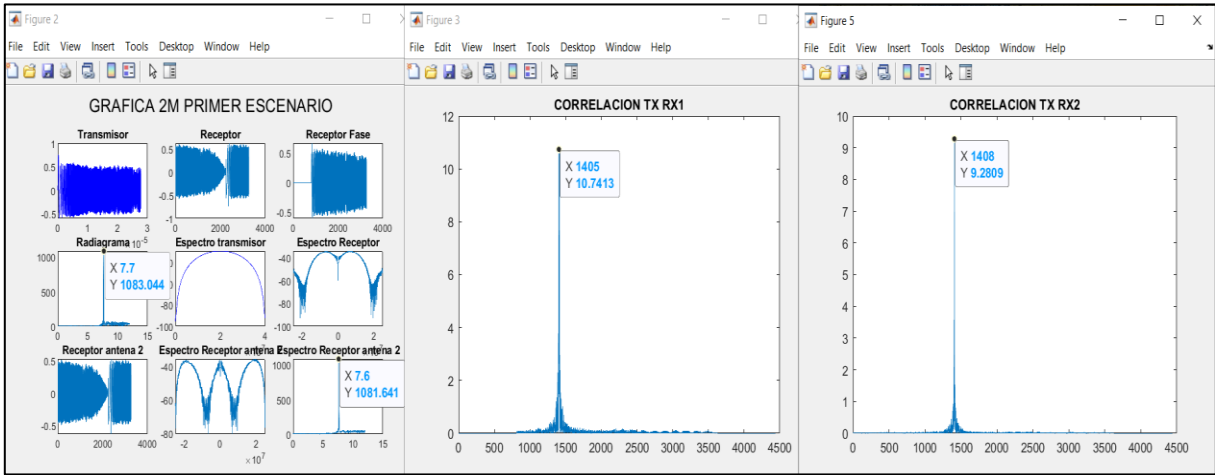
- 2 METROS



- 4 METROS

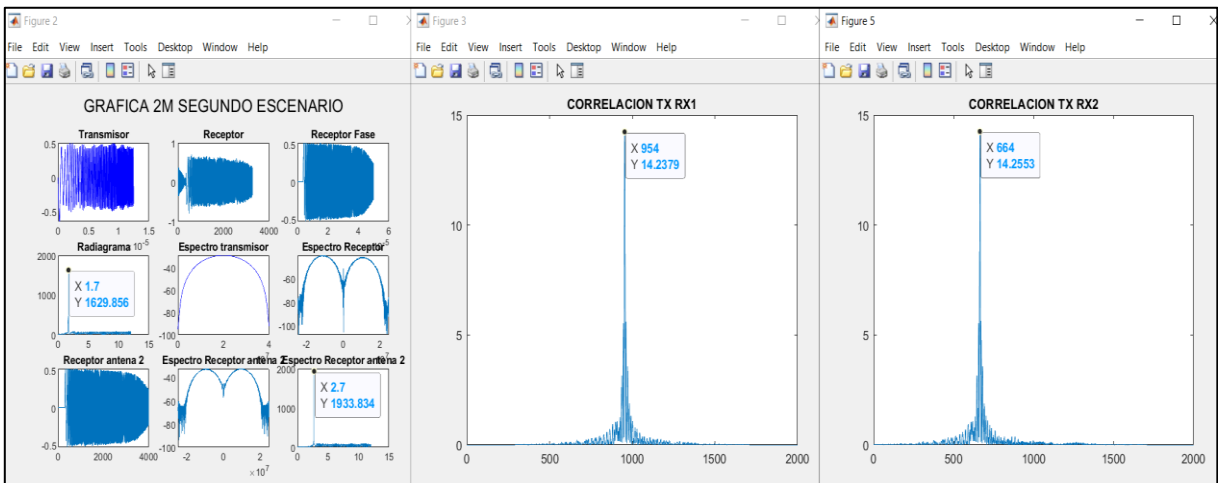
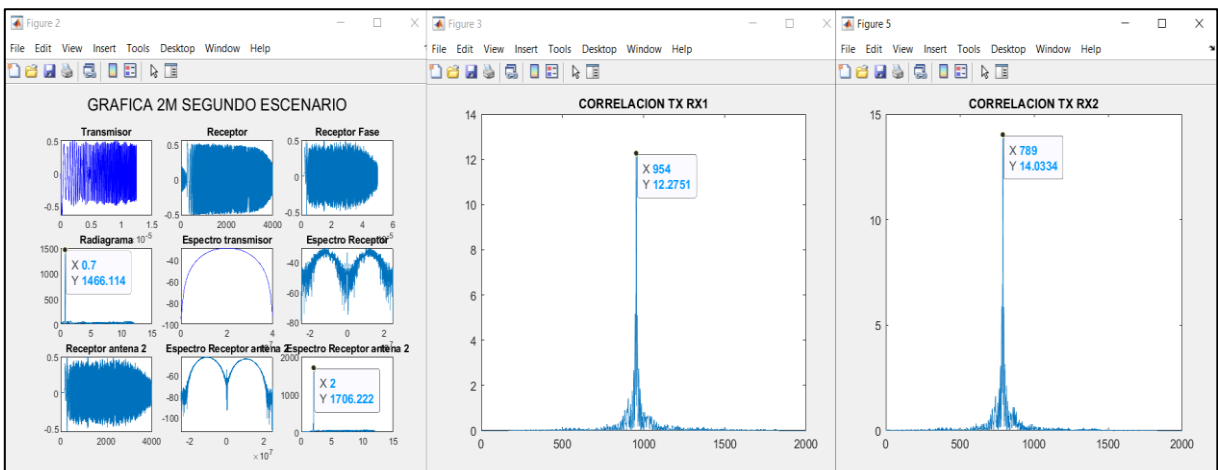
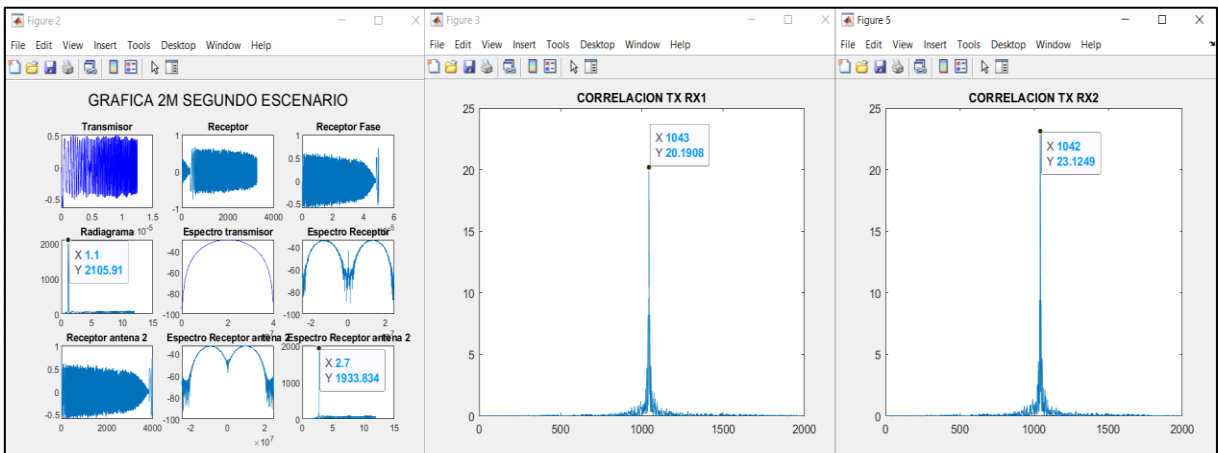


- 6 METROS

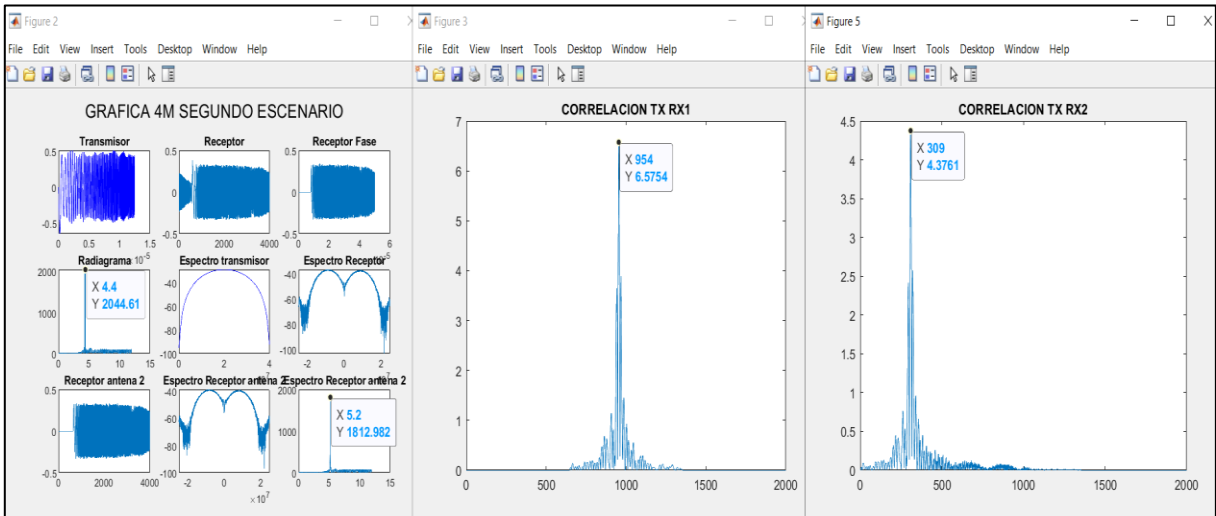
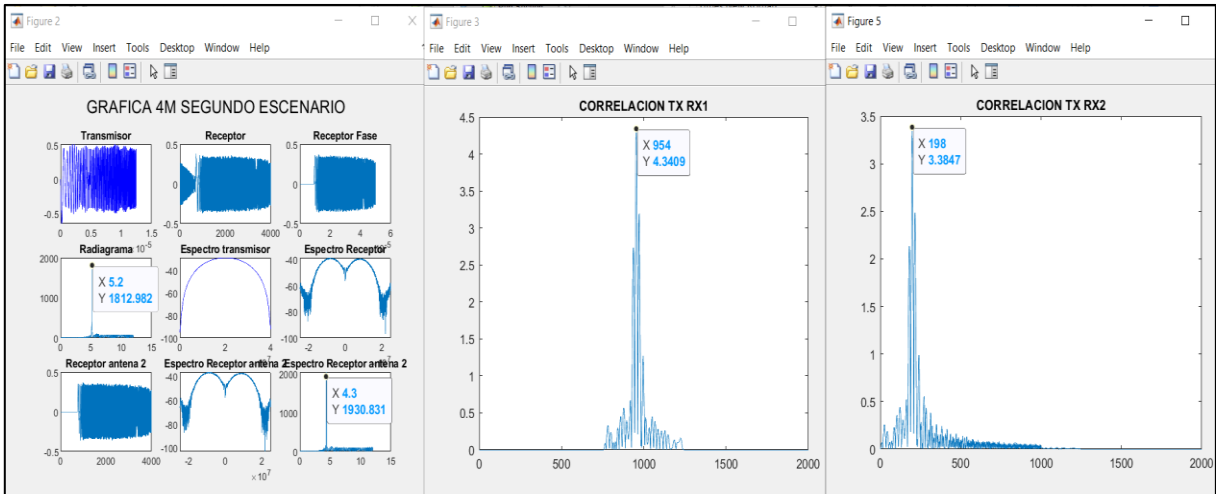
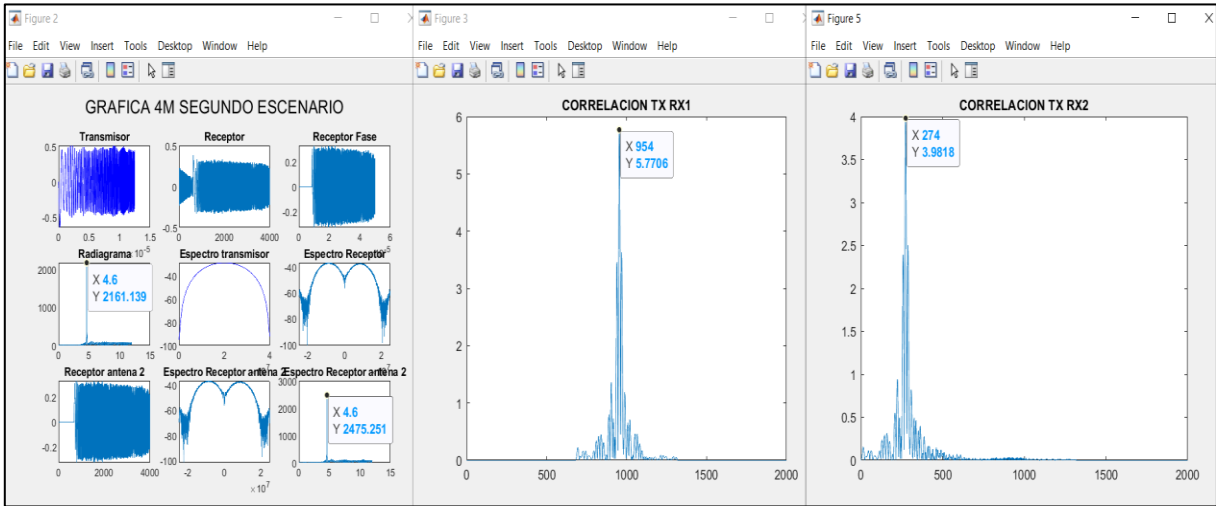


# ANEXO W: PRUEBAS ESCENARIO 2 RADAR POLARIZACION HORIZONTAL

- 2 METROS



- 4 METROS



- 6 METROS

