



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

“CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DIELECTRICOS
USANDO DIFERENTES TÉCNICAS SDRADAR CON TARJETAS NI
USRP 2932”

Trabajo de titulación

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES

AUTOR: ALEX RAMIRO MASAQUIZA CAIZA

DIRECTOR: ING. PAÚL DAVID MORENO AVILÉS Ph.D.

Riobamba-Ecuador

2020

©2020, Alex Ramiro Masaquiza Caiza

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, Alex Ramiro Masaquiza Caiza, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor 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, 20 de febrero de 2020.



Alex Ramiro Masaquiza Caiza

180489282-4

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: Propuesta Tecnológica, **CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DIELECTRICOS USANDO DIFERENTES TÉCNICAS SDRADAR CON TARJETAS NI USRP 2932**, realizado por el señor: **ALEX RAMIRO MASAQUIZA CAIZA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Pedro Severo Infante Moreira Dr. C. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		22/12/2020
Ing. Paúl David Moreno Avilés PhD. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		22/12/2020
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés PhD. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		22/12/2020

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación es dedicado a Dios, la Virgen Santa Lucía y a Nuestra Señora del Rosario de Agua Santa por haberme dado la salud y fortaleza necesaria durante esta carrera universitaria. A mis padres Rubén y Narcisa, por el sacrificio y esfuerzo realizado para brindarme la oportunidad de alcanzar todos mis objetivos, por ser mi ejemplo a seguir y acompañarme en cada paso de mi vida, y por sembrar en mí principios y valores para ser cada día una mejor persona. A mi hermana Rocio, por estar presente en cada etapa de mi vida y ofrecerme su apoyo incondicional. A mis abuelitos por haberme brindado todo su cariño y sabiduría para lograr este objetivo.

Ramiro

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por bendecirme cada día y permitirme cumplir una meta más junto a mi familia.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a la Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes y a todos los maestros que han compartido sus conocimientos y valores éticos para mi vida profesional. Agradezco de manera especial al Ing. David Moreno, director del trabajo de titulación, por su plena disposición en compartirme sus valiosos conocimientos y guiarme desde un inicio en el desarrollo de esta investigación. De igual manera al Laboratorio de Microondas de la FIE y a la Ing. Ruth Barba por abrirme las puertas para utilizar los equipos y herramientas necesarias para la culminación del trabajo de titulación.

A mis padres, mi hermana, mis abuelitos y mi familia por estar siempre a mi lado. A mis amigos, quienes con su apoyo y amistad desinteresada me han acompañado durante mi carrera universitaria compartiendo momentos inolvidables en todo este tiempo.

Ramiro

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xviii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xxiii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xxv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxix
RESUMEN.....	xxx
SUMMARY.....	xxxi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación del proyecto.....	3
1.3.1. <i>Justificación teórica</i>	3
1.3.2. <i>Justificación aplicativa</i>	4
1.4. Objetivo General.....	5
1.5. Objetivos específicos.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Sistema Radar.....	6
2.1.1. <i>Definición</i>	6
2.1.2. <i>Principio de funcionamiento</i>	6
2.1.3. <i>Arquitectura de un sistema Radar</i>	7
2.1.3.1. <i>Transmisor</i>	7
2.1.3.2. <i>Receptor</i>	8
2.1.3.3. <i>Antenas</i>	8
2.1.4. <i>Clasificación de los sistemas radar</i>	8

2.1.4.1.	<i>Según la banda de operación</i>	8
2.1.4.2.	<i>Según el número de antenas</i>	9
2.1.4.3.	<i>Según la forma de onda</i>	10
2.1.5.	Tipos de señales radar	11
2.1.5.1.	<i>Onda continua (CW)</i>	11
2.1.5.2.	<i>Onda continua modulada en frecuencia (FMCW)</i>	13
2.1.6.	Análisis de un sistema radar FMCW	16
2.1.6.1.	<i>Potencia de transmisión y recepción</i>	16
2.1.6.2.	<i>Ancho de banda</i>	17
2.1.6.3.	<i>Resolución</i>	17
2.1.6.4.	<i>Distancia máxima</i>	18
2.1.6.5.	<i>Señal transmitida</i>	18
2.1.6.6.	<i>Señal recibida</i>	19
2.1.6.7.	<i>Detección de un objetivo</i>	20
2.1.6.8.	<i>Detección de dos objetivos</i>	22
2.2.	Ondas electromagnéticas	24
2.2.1.	Propagación de ondas electromagnéticas	25
2.2.2.	Propiedades electromagnéticas de un medio	27
2.2.2.1.	<i>Conductividad</i>	27
2.2.2.2.	<i>Permitividad eléctrica</i>	27
2.2.2.3.	<i>Permeabilidad magnética</i>	29
2.2.3.	Velocidad de propagación de onda	30
2.2.3.1.	<i>Velocidad de propagación en el espacio libre</i>	30
2.2.3.2.	<i>Velocidad de propagación en un medio diferente al espacio libre</i>	31
2.2.4.	Atenuación	32
2.2.5.	Reflexión y transmisión de ondas electromagnéticas	32
2.3.	Software Defined Radio	35

2.3.1.	<i>Definición</i>	36
2.3.2.	<i>Arquitectura</i>	36
2.3.2.1.	<i>Sección RF</i>	37
2.3.2.2.	<i>Sección IF</i>	37
2.3.2.3.	<i>Sección Banda Base</i>	37
2.3.3.	SDRadar	37
2.4.	Universal Software Radio Peripheral (USRP)	38
2.4.1.	<i>Tarjeta NI USRP 2932</i>	39
2.4.1.1.	<i>Estructura física de la tarjeta NI USRP-2932</i>	39
2.4.1.2.	<i>Esquema funcional de la tarjeta NI USRP-2932</i>	40
2.4.1.3.	<i>Características</i>	41
2.5.	LabVIEW	42
2.5.1.	<i>LabVIEW y otros lenguajes de programación</i>	43
2.6.	MATLAB	43
3.	MARCO METODOLÓGICO	45
3.1.	Introducción	45
3.2.	Metodología de la Investigación	45
3.2.1.	<i>Investigación bibliográfica</i>	45
3.2.2.	<i>Investigación experimental</i>	45
3.3.	Proceso para el desarrollo del trabajo de titulación	46
3.4.	Parámetros del sistema SDRadar	47
3.4.1.	<i>Resolución máxima</i>	47
3.4.2.	<i>Ancho de banda</i>	48
3.5.	Modelamiento matemático para la caracterización de materiales dieléctricos.	48
3.5.1.	<i>Coefficientes de reflexión y transmisión</i>	49
3.5.1.1.	<i>Coefficiente de reflexión</i>	49
3.5.1.2.	<i>Coefficiente de transmisión</i>	50

3.5.2.	<i>Técnicas SDRadar para la caracterización de materiales dieléctricos</i>	52
3.5.2.1.	<i>Técnica SDRadar 1</i>	52
3.5.2.2.	<i>Técnica SDRadar 2</i>	54
3.5.2.3.	<i>Técnica SDRadar 3</i>	57
3.6.	Diseño del sistema SDRadar	60
3.6.1.	<i>Equipos y elementos requeridos por el sistema SDRadar</i>	60
3.6.1.1.	<i>Características del computador</i>	60
3.6.1.2.	<i>Antena de transmisión y recepción</i>	61
3.6.1.3.	<i>Cámara anecoica</i>	61
3.6.2.	<i>Selección de muestras</i>	63
3.6.3.	<i>Transmisor</i>	64
3.6.3.1.	<i>Etapa 1 de transmisión</i>	65
3.6.3.2.	<i>Etapa 2 de transmisión</i>	66
3.6.3.3.	<i>Etapa 3 de transmisión</i>	66
3.6.3.4.	<i>Etapa 4 de transmisión</i>	67
3.6.3.5.	<i>Etapa 5 de transmisión</i>	67
3.6.3.6.	<i>Etapa 6 de transmisión</i>	68
3.6.4.	<i>Receptor</i>	68
3.6.4.1.	<i>Etapa 1 de recepción</i>	69
3.6.4.2.	<i>Etapa 2 de recepción</i>	69
3.6.4.3.	<i>Etapa 3 de recepción</i>	69
3.6.4.4.	<i>Etapa 4 de recepción</i>	70
3.6.4.5.	<i>Etapa 5 de recepción</i>	70
3.6.4.6.	<i>Etapa 6 de recepción</i>	71
3.6.5.	<i>Almacenamiento de las señales</i>	71
3.6.6.	<i>Procesamiento de las señales</i>	73
3.7.	Metodología de las mediciones	74

3.7.1.	<i>Mediciones con la técnica SDRadar 1</i>	75
3.7.1.1.	<i>Señal de calibración para la técnica SDRadar1</i>	76
3.7.1.2.	<i>Caracterización de dieléctricos con la técnica SDRadar1</i>	78
3.7.2.	<i>Mediciones con la técnica SDRadar 2</i>	82
3.7.3.	<i>Mediciones con la técnica SDRadar 3</i>	85
3.7.3.1.	<i>Señal de calibración para la técnica SDRadar 3</i>	86
3.7.3.2.	<i>Caracterización de dieléctricos con la técnica SDRadar 3</i>	86
4.	MARCO DE RESULTADOS	90
4.1.	Introducción	90
4.2.	Resultados de caracterización con la técnica SDRadar 1	90
4.2.1.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 1</i>	90
4.2.1.1.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ</i>	91
4.2.1.2.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ</i>	92
4.2.1.3.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ</i>	93
4.2.2.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 1</i>	95
4.2.2.1.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ</i>	95
4.2.2.2.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ</i>	96
4.2.2.3.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ</i>	98
4.2.3.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 1</i>	99
4.2.3.1.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ</i>	100
4.2.3.2.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ</i>	101
4.2.3.3.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ</i>	103
4.3.	Resultados de caracterización con la técnica SDRadar 2	104
4.3.1.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 2</i>	104
4.3.1.1.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ</i>	105
4.3.1.2.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ</i>	106
4.3.1.3.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ</i>	108

4.3.2.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 2</i>	109
4.3.2.1.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ</i> ...	110
4.3.2.2.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ</i> ...	111
4.3.2.3.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ</i> ...	112
4.3.3.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 2</i>	114
4.3.3.1.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ</i>	114
4.3.3.2.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ</i>	115
4.3.3.3.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ</i>	117
4.4.	Resultados de caracterización con la técnica SDRadar 3	118
4.4.1.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3</i>	118
4.4.1.1.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ</i>	119
4.4.1.2.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ</i>	120
4.4.1.3.	<i>Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ</i>	121
4.4.2.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 3</i>	123
4.4.2.1.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ</i> ...	123
4.4.2.2.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ</i> ...	124
4.4.2.3.	<i>Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ</i> .	126
4.4.3.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 3</i>	127
4.4.3.1.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ</i>	128
4.4.3.2.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ</i>	129
4.4.3.3.	<i>Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ</i>	131
4.5.	Análisis estadístico de los resultados	132
4.5.1.	<i>Metodología Estadística</i>	133
4.5.2.	<i>Distribución Normal</i>	133
4.5.2.1.	<i>Pruebas de normalidad de la técnica SDRadar 1</i>	133
4.5.2.2.	<i>Pruebas de normalidad de la técnica SDRadar 2</i>	135
4.5.2.3.	<i>Pruebas de normalidad de la técnica SDRadar 3</i>	137

4.5.3.	<i>Independencia en la toma de datos</i>	138
4.5.4.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 1</i>	138
4.5.4.1.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 1 para la baquelita</i>	139
4.5.4.2.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 1 para la madera seca</i>	140
4.5.4.3.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 1 del vidrio</i>	141
4.5.5.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 2</i>	143
4.5.5.1.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 2 para la baquelita</i>	143
4.5.5.2.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 2 para la madera seca</i>	144
4.5.5.3.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 2 para el vidrio</i>	146
4.5.6.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 3</i>	147
4.5.6.1.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 3 para la baquelita</i>	147
4.5.6.2.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 3 para la madera seca</i>	149
4.5.6.3.	<i>Prueba estadística con la técnica SDRadar 3 para el vidrio</i>	150
4.5.7.	<i>Discusión de resultados</i>	152
5.	CONCLUSIONES	154
6.	RECOMENDACIONES	155

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Bandas de frecuencia de los sistemas radar	9
Tabla 2-2:	Valores aproximados de la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de algunos materiales dieléctricos.....	29
Tabla 3-2:	Especificaciones del transmisor de la tarjeta NI URSP 2932	41
Tabla 4-2:	Especificaciones del receptor de la tarjeta NI URSP 2932	42
Tabla 1-3:	Características del computador	60
Tabla 2-3:	Características de las antenas Yagi	61
Tabla 3-3:	Medidas de las variables atmosféricas dentro de la cámara anecoica.....	62
Tabla 4-3:	Características de los materiales utilizados.....	63
Tabla 1-4:	Datos de la permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ	91
Tabla 2-4:	Datos de la permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ	92
Tabla 3-4:	Datos de la permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ	93
Tabla 4-4:	Datos de la permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ	95
Tabla 5-4:	Datos de la permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ	97
Tabla 6-4:	Datos de la permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ	98
Tabla 7-4:	Datos de la permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ	100

Tabla 8-4:	Datos de la permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ	102
Tabla 9-4:	Datos de la permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ	103
Tabla 10-4:	Datos de la tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ	105
Tabla 11-4:	Datos de la tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ	107
Tabla 12-4:	Datos de la tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ	108
Tabla 13-4:	Datos de la tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ	110
Tabla 14-4:	Datos de la tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ	111
Tabla 15-4:	Datos de la tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ	112
Tabla 16-4:	Datos de la tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ	114
Tabla 17-4:	Datos de la tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ	116
Tabla 18-4:	Datos de la tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ	117
Tabla 19-4:	Datos de la permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ	119
Tabla 20-4:	Datos de la permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ	120
Tabla 21-4:	Datos de la permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ	121

Tabla 22-4:	Datos de la permitividad relativa de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ	123
Tabla 23-4:	Datos de la permitividad relativa de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ	125
Tabla 24-4:	Datos de la permitividad relativa de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ	126
Tabla 25-4:	Datos de la permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ	128
Tabla 26-4:	Datos de la permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ	130
Tabla 27-4:	Datos de la permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ	131
Tabla 28-4:	Pruebas de normalidad de las lecturas con la técnica SDRadar 1.....	134
Tabla 29-4:	Pruebas de normalidad de las lecturas con la técnica SDRadar 2.....	135
Tabla 30-4:	Pruebas de normalidad de las lecturas con la técnica SDRadar 3.....	137
Tabla 31-4:	Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 en función de los días de medición.	139
Tabla 32-4:	Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 en función de las distancias de medición.	140
Tabla 33-4:	Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 en función de los días de medición.	140
Tabla 34-4:	Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 en función de las distancias de medición.	141
Tabla 35-4:	Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 en función de los días de medición.	142
Tabla 36-4:	Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 en función de las distancias de medición.	142

Tabla 37-4: Prueba ANOVA de las lecturas de tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 en función de los días de medición.	143
Tabla 38-4: Prueba ANOVA para las lecturas de la tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 en función de las distancias de medición.	144
Tabla 39-4: Prueba ANOVA para las lecturas de tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 en función de los días de medición.	145
Tabla 40-4: Prueba ANOVA para las lecturas de la tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 en función de las distancias de medición.	145
Tabla 41-4: Prueba ANOVA para las lecturas de tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 en función de los días de medición.	146
Tabla 42-4: Prueba ANOVA para las lecturas de la tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 en función de las distancias de medición.	147
Tabla 43-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 en función de los días de medición.	148
Tabla 44-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 en función de las distancias de medición.	148
Tabla 45-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 en función de los días de medición.	149
Tabla 46-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 en función de las distancias de medición.	150
Tabla 47-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 en función de los días de medición.	150
Tabla 48-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 en función de las distancias de medición.	151
Tabla 49-4: Resultados de la caracterización de materiales dieléctricos con diferentes técnicas SDRadar.....	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Principio de funcionamiento del sistema radar	7
Figura 2-2:	Componentes de un sistema radar.....	7
Figura 3-2:	Tipos de sistemas radar según el número de antenas. (a) monoestático, (b) biestático, (c) quasi-monoestático, (c) multiestático.	10
Figura 4-2:	Señal continua (CW) en el dominio del tiempo.....	12
Figura 5-2:	Señal continua (CW) en el dominio de la frecuencia.....	12
Figura 6-2:	Operación de un radar de onda continua (CW).....	13
Figura 7-2:	Relación frecuencia vs tiempo de una señal FMCW.	14
Figura 8-2:	Onda continua de frecuencia modulada (FMCW) en el dominio del tiempo.	15
Figura 9-2:	Señal FMCW transmitida en el dominio del tiempo.....	19
Figura 10-2:	Señal FMCW recibida en el dominio del tiempo un retardo de 50 ms.	20
Figura 11-2:	Relación tiempo vs frecuencia de la señal FMCW transmitida $s(t)$ y recibida $r(t)$	21
Figura 12-2:	Multiplicación de la señal transmitida y recibida en el dominio del tiempo cuando existe la presencia de un solo objetivo.....	21
Figura 13-2:	Radargrama con la presencia de un solo objetivo.....	22
Figura 14-2:	Eco radar $r1t$ con 50 ms de retardo generado por la reflexión en un primer objetivo.	23
Figura 15-2:	Eco radar $r2t$ con 90 ms de retardo generado por la reflexión en un segundo objetivo.	24
Figura 16-2:	Radargrama con la presencia de dos objetivos.	24
Figura 17-2:	Esquema de los fenómenos de reflexión, refracción y transmisión de una onda electromagnética.	33
Figura 18-2:	Partes funcionales de un sistema SDR.....	36

Figura 19-2: Bloques principales de una tarjeta USRP.	38
Figura 20-2: Tarjeta NI USRP 2932.	39
Figura 21-2: Vista frontal de la tarjeta NI USRP 2932.....	40
Figura 22-2: Vista trasera de la tarjeta NI USRP 2932.....	40
Figura 23-2: Diagrama de bloques funcional de la tarjeta NI USRP 2932.....	41
Figura 1-3: Onda incidente, reflejada y transmitida en estructuras con parámetros electromagnéticos distintos.	49
Figura 2-3: Escenario para la calibración del coeficiente de reflexión.....	52
Figura 3-3: Reflexión de la señal en la superficie de un de material dieléctrico.	53
Figura 4-3: Reflexión de la señal en la superficie de una estructura de material dieléctrico con un conductor eléctrico de cobre por detrás.	55
Figura 5-3: Escenario para la calibración del coeficiente de transmisión.....	58
Figura 6-3: Escenario para medir la cantidad de energía transmitida cuando la señal radar pasa a través del dieléctrico.	58
Figura 7-3: Propagación de una señal en una estructura compuesta por capas.	59
Figura 8-3: Antenas Yagi utilizadas.	61
Figura 9-3: Cámara anecoica utilizada para las pruebas de caracterización de materiales dieléctricos con técnicas SDRadar.....	62
Figura 10-3: Medición de las variables atmosféricas dentro de la cámara anecoica con los sensores de un teléfono.....	62
Figura 11-3: Vista superior de los materiales utilizados en el sistema SDRadar: (a) conductor eléctrico de cobre, (b) baquelita, (c) madera seca, (d) vidrio.....	63
Figura 12-3: Vista frontal de las muestras de materiales dieléctricos utilizadas (madera, baquelita y vidrio).....	64
Figura 13-3: Bloques básicos de un transmisor en LabVIEW.....	64
Figura 14-3: Estructura secuencial plana en LabVIEW.	65

Figura 15-3: Parámetros de configuración de la señal FMCW.....	65
Figura 16-3: Diagrama para la generación de la señal FMCW en LabVIEW.	66
Figura 17-3: Etapa de inicialización y configuración de los parámetros operativos del transmisor en LabVIEW.....	66
Figura 18-3: Parámetros de configuración del transmisor en LabVIEW.....	67
Figura 19-3: Bloque de sincronización para los canales de transmisión y recepción en LabVIEW.	67
Figura 20-3: Bloque de transmisión y finalización de sesión en LabVIEW.....	68
Figura 21-3: Bloques básicos de un receptor en LabVIEW.	68
Figura 22-3: Etapa de inicialización y configuración de los parámetros operativos del receptor en LabVIEW.....	69
Figura 23-3: Parámetros de configuración del receptor en LabVIEW.	69
Figura 24-3: Etapa para la sincronización de los canales Tx/Rx y preparación del canal de recepción para la adquisición de señales.	70
Figura 25-3: Etapa de recepción de señales de la tarjeta USRP en LabVIEW.....	70
Figura 26-3: Bloques de finalización de sesión de la tarjeta USRP.....	71
Figura 27-3: Bloque para el almacenamiento de las señales en LabVIEW.....	71
Figura 28-3: Panel para la selección del escenario de medición.....	72
Figura 29-3: Bloque para el procesamiento de las señales en un nodo MathScript de LabVIEW.	73
Figura 30-3: Diagrama de flujo para la caracterización de materiales dieléctrico con diferentes técnicas SDRadar.....	74
Figura 31-3: Metodología de las mediciones con la técnica SDRdar 1.....	75
Figura 32-3: Preparación del conductor eléctrico de cobre con un nivelador de burbuja para asegurar una incidencia normal.....	76
Figura 33-3: Escenario para la calibración de la señal con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ	76

Figura 34-3: Señal FMCW transmitida en el dominio del tiempo.....	77
Figura 35-3: Señal FMCW transmitida en el dominio de la frecuencia.	77
Figura 36-3: Señal FMCW reciba (señal de calibración) en el dominio del tiempo.....	78
Figura 37-3: Escenario para la caracterizar la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ	78
Figura 38-3: Señal recibida de la baquelita en el dominio del tiempo con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ	79
Figura 39-3: Señal recibida de la baquelita en el dominio de la frecuencia con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ	79
Figura 40-3: Multiplicación de la señal trasmitida y recibida con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ	80
Figura 41-3: Radargrama normalizado con el coeficiente de reflexión resultante obtenido con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ	81
Figura 42-3: Resultados de la caracterización de la baquelita.	81
Figura 43-3: Metodología de mediciones con la técnica SDRadar 2.....	82
Figura 44-3: Escenario para caracterizar un dieléctrico con la técnica SDRadar 2.	82
Figura 45-3: Señal recibida de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ	83
Figura 46-3: Multiplicación de la señal trasmitida con la recibida con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ	83
Figura 47-3: Radargrama normalizado con el coeficiente de reflexión resultante obtenido con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ	84
Figura 48-3: Definición de parámetros para caracterizar la baquelita con la técnica SDRadar 2...	84
Figura 49-3: Resultados de la caracterización de la baquelita.....	85
Figura 50-3: Metodología de las mediciones con la técnica SDRadar 3.	85
Figura 51-3: Escenario para la señal de calibración la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ .	86

Figura 52-3: Señal de calibración en el dominio del tiempo con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ	86
Figura 53-3: Escenario para caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a 6λ	87
Figura 54-3: Señal recibida con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ	87
Figura 55-3: Multiplicación de la señal transmitida y recibida en el escenario SDRadar con una separación de 6λ	88
Figura 56-3: Coeficiente de transmisión obtenido con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ	88
Figura 1-4: Sistema de medición para la baquelita con la técnica SDRadar 1.	90
Figura 2-4: Sistema de medición para la madera seca con la técnica SDRadar 1.	95
Figura 3-4: Sistema de medición para el vidrio con la técnica SDRadar 1.....	100
Figura 4-4: Sistema de medición para la baquelita con la técnica SDRadar 2.	105
Figura 5-4: Sistema de medición para la madera seca con la técnica SDRadar 2.	109
Figura 6-4: Sistema de medición para el vidrio con la técnica SDRadar 2.	114
Figura 7-4: Sistema de medición para la baquelita con la técnica SDRadar 3.	118
Figura 8-4: Sistema de medición para la madera seca con la técnica SDRadar 3.	123
Figura 9-4: Sistema de medición para el vidrio con la técnica SDRadar 3.....	128
Figura 10-4: Software IBM SPSS Statistics.	133

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Etapas del trabajo de titulación.....	46
Gráfico 2-3:	Diagrama secuencial de los pasos para la realización del trabajo de titulación....	47
Gráfico 1-4:	Permitividad de la baquelita con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 3λ	92
Gráfico 2-4:	Permitividad de la baquelita con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 4λ	93
Gráfico 3-4:	Permitividad de la baquelita con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 5λ	94
Gráfico 4-4:	Permitividad de la madera seca con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 3λ ..	96
Gráfico 5-4:	Permitividad de la madera seca con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 4λ ..	98
Gráfico 6-4:	Permitividad de la madera seca con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 5λ ..	99
Gráfico 7-4:	Permitividad del vidrio con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 3λ	101
Gráfico 8-4:	Permitividad del vidrio con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 4λ	103
Gráfico 9-4:	Permitividad del vidrio con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 5λ	104
Gráfico 10-4:	Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 3λ	106
Gráfico 11-4:	Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 4λ	108
Gráfico 12-4:	Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 5λ	109
Gráfico 13-4:	Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 3λ	111
Gráfico 14-4:	Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 4λ	112
Gráfico 15-4:	Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 5λ	113

Gráfico 16-4:	Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 3λ .	115
Gráfico 17-4:	Tangente de pérdidas del vidrio la técnica SDRdar 2 a una distancia de 4λ .	117
Gráfico 18-4:	Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 5λ .	118
Gráfico 19-4:	Permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 6λ .	120
Gráfico 20-4:	Permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 8λ .	121
Gráfico 21-4:	Permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 10λ .	122
Gráfico 22-4:	Permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 6λ .	124
Gráfico 23-4:	Permitividad relativa de la madera seca con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 8λ .	126
Gráfico 24-4:	Permitividad relativa de la madera seca con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 10λ .	127
Gráfico 25-4:	Permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 6λ .	129
Gráfico 26-4:	Permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 8λ .	131
Gráfico 27-4:	Permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 10λ .	132

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-2:	Señal CW en el dominio del tiempo.....	11
Ecuación 2-2:	Señal FMCW en el dominio del tiempo.....	13
Ecuación 3-2:	Función temporal de la relación frecuencia vs tiempo.....	14
Ecuación 4-2:	Rapidez del cambio de frecuencia en señales FMCW.	14
Ecuación 5-2:	Rango de un objetivo.....	15
Ecuación 6-2:	Potencia de recepción.....	16
Ecuación 7-2:	Ancho de banda.....	17
Ecuación 8-2:	Resolución de un sistema radar FMCW.....	17
Ecuación 9-2:	Distancia máxima un sistema radar.....	18
Ecuación 10-2:	Señal FMCW transmitida.....	18
Ecuación 11-2:	Señal FMCW recibida.....	19
Ecuación 12-2:	Rango de un sistema radar FMCW.	20
Ecuación 13-2:	Señal FMCW recibida.....	22
Ecuación 14-2:	Eco reflejado en un primer objetivo.	22
Ecuación 15-2:	Eco reflejado en un segundo objetivo.	23
Ecuación 16-2:	Ley de Gauss para el campo eléctrico.....	25
Ecuación 17-2:	Ley de Gauss para el campo magnético.	25
Ecuación 18-2:	Ley de Faraday.....	25
Ecuación 19-2:	Ley de Ampere-Maxwell.	25
Ecuación 20-2:	Ecuación constitutiva de Maxwell para la permitividad.	26
Ecuación 21-2:	Ecuación constitutiva de Maxwell para la permeabilidad.....	26

Ecuación 22-2:	Ecuación constitutiva de Maxwell para la conductividad.	26
Ecuación 23-2:	Ecuación constitutiva de Maxwell para la permitividad eléctrica.	27
Ecuación 24-2:	Permitividad eléctrica absoluta.	28
Ecuación 25-2:	Permitividad relativa.	28
Ecuación 26-2:	Tangente de pérdidas.	28
Ecuación 27-2:	Relación entre la permitividad eléctrica y la conductividad.	29
Ecuación 28-2:	Ecuación constitutiva de Maxwell para la permeabilidad magnética.	30
Ecuación 29-2:	Permeabilidad magnética.	30
Ecuación 30-2:	Permeabilidad relativa.	30
Ecuación 31-2:	Ecuación de la onda plana en el espacio.	30
Ecuación 32-2:	Constante de propagación.	31
Ecuación 33-2:	Velocidad de propagación de una onda.	31
Ecuación 34-2:	Velocidad de propagación de una onda.	31
Ecuación 35-2:	Velocidad de la luz.	31
Ecuación 36-2:	Velocidad de propagación en materiales dieléctricos.	32
Ecuación 37-2:	Constante de atenuación.	32
Ecuación 38-2:	Ley de Snell.	33
Ecuación 39-2:	Impedancia intrínseca de un campo electromagnético.	34
Ecuación 40-2:	Impedancia intrínseca de un campo electromagnético.	34
Ecuación 41-2:	Coefficiente de reflexión.	35
Ecuación 42-2:	Coefficiente de transmisión.	35
Ecuación 43-2:	Coefficiente de reflexión.	35
Ecuación 44-2:	Coefficiente de transmisión.	35
Ecuación 1-3:	Resolución de un sistema radar FMCW.	47

Ecuación 2-3:	Acho de banda en un sistema radar FMCW.....	48
Ecuación 3-3:	Amplitud de una señal reflejada.....	49
Ecuación 4-3:	Amplitud de una señal reflejada en un PEC.....	50
Ecuación 5-3:	Amplitud de una señal reflejada en un dieléctrico.	50
Ecuación 6-3:	Coefficiente de reflexión en un sistema radar.	50
Ecuación 7-3	Amplitud de una señal transmitida.....	51
Ecuación 8-3:	Amplitud de una señal transmitida en un solo medio de propagación.	51
Ecuación 9-3:	Amplitud de una señal transmitida entre dos medios de propagación.	51
Ecuación 10-3:	Coefficiente de transmisión.....	52
Ecuación 11-3:	Coefficiente de reflexión en el sistema SDRadar propuesto.	53
Ecuación 12-3:	Coefficiente de reflexión con la técnica SDRadar 1.....	54
Ecuación 13-3:	Permitividad relativa con la técnica SDRadar 1.....	54
Ecuación 14-3:	Amplitud de una señal reflejada con la técnica SDRadar 2.	55
Ecuación 15-3:	Relación entre las señales reflejadas y la constante de atenuación.	56
Ecuación 16-3:	Constante de atenuación.....	56
Ecuación 17-3:	Tangente de pérdidas.....	56
Ecuación 18-3:	Constante de atenuación.....	56
Ecuación 19-3:	Constante de atenuación.....	56
Ecuación 20-3:	Expresión para la tangente de pérdidas.	57
Ecuación 21-3:	Expresión para la tangente de pérdidas con la técnica SDRadar 2.....	57
Ecuación 22-3	Parte compleja de la permitividad relativa.	57
Ecuación 23-3:	Coefficiente de transmisión.....	58
Ecuación 24-3:	Coefficiente de transmisión en una estructura por capas.....	59
Ecuación 25-3:	Coefficiente de transmisión en el sistema SDRadar 3.....	60

Ecuación 26-3:	Permitividad relativa para el sistema SDRadar 3.....	60
Ecuación 27-3:	Campo lejano.	74

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Especificaciones técnicas USRP-2932.

ANEXO B: Código de procesamiento de datos.

ANEXO C: Manual de caracterización de materiales dieléctricos usando diferentes técnicas SDRadar con tarjetas NI USRP-2932.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de titulación fue caracterizar materiales dieléctricos usando diferentes técnicas de radar definido por software (SDRadar) con tarjetas NI USRP 2932. Mediante la investigación bibliográfica se pudo determinar las características y principio de funcionamiento de un sistema radar, así como los requerimientos y limitaciones del periférico universal de software de radio (USRP). La caracterización se llevó a cabo mediante tres técnicas SDRadar diferentes, las cuales se basaron en los principios de reflexión y transmisión de señales de onda continua modulada en frecuencia (FMCW). A través del software LabVIEW se desarrollaron los bloques de transmisión, recepción y procesamiento de las señales FMCW, y junto a la tarjeta USRP-2932 se implementó el sistema SDRadar dentro de la cámara anecoica de la Facultad de Informática y Electrónica con el fin de evitar posibles interferencias electromagnéticas. Se realizaron diferentes pruebas con cada una de las técnicas SDRadar con el fin de validar y comparar los resultados obtenidos en cada una de ellas. Con la primera técnica SDRadar se estimó la parte real de la permitividad relativa de varios dieléctricos, con la segunda técnica SDRadar se calculó la tangente de pérdidas. Finalmente, con la tercera técnica SDRadar se calculó nuevamente la parte real de la permitividad relativa de los dieléctricos en estudio. Posteriormente se realizó un análisis estadístico de todos los datos obtenidos para validar los resultados de permitividad relativa y la tangente de pérdidas de la baquelita, la madera seca y el vidrio. Los resultados fueron favorables y las propiedades electromagnéticas de los dieléctricos estudiados se encontraban dentro de los valores que se exponen en diferentes fuentes bibliográficas, asegurando de esta forma la validez de cada técnica SDRadar. Se recomienda utilizar un ordenador con altas capacidades de procesamiento para garantizar el correcto desempeño del sistema.

PALABRAS CLAVE: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DIELECTRICOS>, <PERIFÉRICO UNIVERSAL DE SOFTWARE DE RADIO (USRP)>, <RADAR DEFINIDO POR SOFTWARE (SDRADAR)>, <PERMITIVIDAD RELATIVA>, <TANGENTE DE PÉRDIDAS>.



Firmado electrónicamente por:
**ELIZABETH
FERNANDA AREVALO
MEDINA**



0501-DBRAI-UPT-2020

SUMMARY

The current research was aimed to characterize dielectric materials using different software-defined radar (SDRadar) techniques with NI USRP-2932 cards. Through bibliographic research, it was possible to determine the characteristics and operating principle of a radar system, as well as the requirements and limitations of the universal software radio peripheral (USRP). The characterization was carried out using three different SDRadar techniques based on the principles of reflection and transmission of frequency modulated continuous wave (FMCW) signals. Through the LabVIEW software, the transmission, reception, and processing blocks of the FMCW signals were developed, together with the USRP-2932 card; the SDRadar system was implemented inside the anechoic chamber of the Computer Science and Electronics Faculty in order to avoid possible electromagnetic interference. Different tests were carried out with each of the SDRadar techniques to validate and compare the results obtained in each one of them. With the first SDRadar technique, the real part of the relative permittivity of various dielectrics was estimated, and with the second SDRadar technique, the loss tangent was calculated. Finally, with the third SDRadar technique, the real part of the dielectrics' relative permittivity under study was calculated again. Subsequently, a statistical analysis of all the data obtained was carried out to validate the results of relative permittivity and the tangent of losses of bakelite, dry wood, and glass. The obtained results were favorable, and the electromagnetic properties of the dielectrics studied were within the values shown in different bibliographic sources, thus ensuring the validity of each SDRadar technique. It is recommended to use a computer with high processing capacities to guarantee the system's correct performance.

KEYWORDS: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <DIELECTRIC MATERIALS CHARACTERIZATION>, <UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL (USRP)>, <SOFTWARE DEFINED RADAR (SDRADAR)>, <RELATIVE PERMITTIVITY>, <LOSS TANGENT>.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una amplia variedad de técnicas para la caracterización de materiales, algunas de ellas ofreciendo mejores prestaciones que otras. Cada método de caracterización dependerá de algunos factores como el tipo de material a estudiar, la banda de frecuencias de interés y las características de los equipos e instrumentos disponibles.

Por otro lado, en los últimos años, las investigaciones de la tecnología SDRadar han permitido desarrollar diferentes prototipos adaptables para un sinnúmero de aplicaciones en distintas áreas, y gracias a la información que arrojan algunos de estos sistemas es posible, entre otras cosas, determinar ciertas características físicas de algunos materiales.

Por tales razones, el trabajo de titulación se presenta como una forma alternativa para la caracterización de materiales dieléctricos mediante un sistema de radar definido por software (SDRadar), con la utilización de tarjetas USRP (Periférico Universal de Software de Radio). El diseño del sistema radar parte de la recreación de diferentes entornos y técnicas radar para establecer un modelo matemático teórico que permita establecer el valor de algunas propiedades electromagnéticas de los materiales dieléctricos. Con estas consideraciones y teniendo en cuenta algunas limitantes de las tarjetas USRP utilizadas, como el ancho de banda y potencia de transmisión, se busca determinar la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de materiales dieléctricos a partir del análisis y procesamiento de señales cuando estas se reflejan en la superficie de un material dieléctrico o cuando atraviesan dicho material.

Para el desarrollo del trabajo se utilizó el software LabVIEW, en donde se programan los bloques de transmisión, recepción, sincronización de canales y guardado de las señales FMCW (Onda Continua de Frecuencia Modulada). También se trabajó con MathScript, en donde se desarrolla el algoritmo que permite el procesamiento de las señales con el modelo matemático previamente establecido para medir la permitividad relativa y tangente de pérdidas. Se espera que el presente trabajo ayude al desarrollo de investigaciones futuras y sea un aporte tecnológico para la caracterización de materiales dieléctricos con propiedades electromagnéticas en estudio o desconocidas.

1.1. Antecedentes

En el año de 1864, James Maxwell formula la teoría clásica del electromagnetismo y establece las ecuaciones que determinan el comportamiento de las ondas electromagnéticas en el espacio libre. A partir de estas ecuaciones, en el año de 1886, Heinrich Hertz demuestra que los materiales poseen ciertas propiedades físicas que hacen posible la reflexión de las ondas de radio en su superficie, sentando así las bases teóricas para los sistemas radar. Para comprobar este fenómeno, Hertz generó una onda de radio que fue transmitida a través de un “loop de alambre”, la onda atravesaría un material cualquiera y en el otro extremo se mediría la cantidad de energía recibida con otro “loop”. De esta forma, además de demostrar el fenómeno mencionado, se había realizado la primera transmisión de ondas electromagnéticas (Sanfuentes, 2000, pp. 1-2).

Con estos antecedentes, en 1895, Guglielmo Marconi, logró realizar la primera transmisión de telegrafía a través de un medio no guiado. A partir de esto, y con las bases establecidas por estos investigadores se comienzan a desarrollar por separado la radiocomunicación a larga distancia y el radar para la detección de objetivos en el espacio.

Por otro lado, la caracterización de las propiedades físicas de diferentes sustancias y materiales se inicia a principios de la década de 1950 a través de un método de resistencia eléctrica, con el cual se podía medir el grado de humedad de una semilla seca. Con este antecedente, al transcurso de los años y gracias a los avances propios de la época se han aplicado una gran cantidad de nuevos métodos y técnicas para caracterizar materiales desconocidos. Con el avance en cuanto a la tecnología de microondas se ha hecho posible estimar las propiedades dieléctricas con distintos métodos, por ejemplo, métodos basados en resonancia con cavidades y guías de onda, caracterización por transmisión y reflexión en líneas microstrip, técnicas en el espacio libre, entre otras (Hernández, 2014, pp.12-13).

Generalmente estos métodos permiten caracterizar la permitividad, permeabilidad y en algunos casos la impedancia característica o de superficie de cierto tipo de materiales. Además, en los últimos años los materiales dieléctricos han sido utilizados en una variedad de aplicaciones, entre ellas están el desarrollo de antenas, guías de onda, circuitos y dispositivos para servicios militares, satelitales y comunicaciones de microondas.

Por tal motivo, es necesario tener la mayor cantidad de información sobre los materiales dieléctricos usados para incorporarlos de la manera más adecuada en el diseño y la fabricación de distintos prototipos, de tal manera que se garantice el correcto funcionamiento y confiabilidad de los mismos. Cada material tiene propiedades dieléctricas distintas, las cuales definen sus características eléctricas particulares cuando se someten a campos electromagnéticos (Chen et al., 2004, p.10).

En la actualidad los sistemas radar, que fueron orientados generalmente para aplicaciones militares en el siglo XX, se utilizan en diferentes campos como la meteorología, geología, agricultura, cartografía, hidrología, oceanografía, entre otros. La implementación de este tipo de sistemas conlleva a un costo elevado en las etapas de implementación y operación. Por tanto, en los últimos años se ha venido desarrollando el concepto de SDRadar, un sistema de radar definido por software, donde los bloques de modulación, demodulación, filtrado y procesamiento de la señal se realiza mediante software, reduciendo notablemente los costos de implementación y operación.

1.2. Planteamiento del problema

Los materiales dieléctricos tienen un papel importante en varias aplicaciones como: la construcción de guías de onda, filtros y osciladores para sistemas de comunicaciones por microondas, diseño de antenas para comunicaciones terrestres y satelitales, líneas de transmisión, y fabricación de componentes electrónicos como condensadores, inductores, entre otros. En la construcción de condensadores, el valor de la permitividad del dieléctrico que se coloca entre las dos placas conductoras está directamente relacionado con la capacidad de carga dispositivo. En antenas tipo parche, la permitividad del dieléctrico afecta directamente a la longitud efectiva de la antena, y si la longitud efectiva no es la adecuada, la frecuencia de resonancia de la antena habrá cambiado. Por tanto, es importante conocer algunas de las propiedades dieléctricas de estos materiales. Esta caracterización o medición de las propiedades electromagnéticas se puede realizar en laboratorios especializados con resultados muy fiables, pero esto representa un acceso limitado debido a los costos elevados.

Tal motivo impulsó el estudio de la caracterización de materiales dieléctricos, obtener resultados confiables y desarrollar una solución de bajo costo con técnicas SDRadar para determinar la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de algunos materiales dieléctricos dependiendo de su disponibilidad en el mercado.

1.3. Justificación del proyecto

1.3.1. *Justificación teórica*

Desde el desarrollo de la electrónica y las telecomunicaciones, los materiales dieléctricos han tenido un importante papel dentro de un sinnúmero de aplicaciones. Por tanto, el conocimiento de las propiedades electromagnéticas de los materiales como la permitividad es necesario para proporcionar información que permita utilizar adecuadamente cada material en los procesos de diseño y fabricación de distintos prototipos.

Cuando se utilizan dieléctricos existentes en el mercado, generalmente estos vienen caracterizados con un método o técnica específica que brinda información sobre el material. Pero, si se desea usar dieléctricos que nos son comerciales, existe la necesidad de caracterizarlos empleando alguna técnica de medición que permita estimar las propiedades dieléctricas del material con un valor de precisión adecuado para su fin.

Por tanto, el presente trabajo de titulación plantea caracterizar materiales dieléctricos usando diferentes técnicas SDRadar basándose en los principios de reflexión y transmisión de las ondas electromagnéticas cuando estas inciden sobre sustratos dieléctricos. Para caracterizar la permitividad relativa y la tangente de pérdidas, se definen diferentes técnicas radar con el fin de establecer un modelo matemático que permita estimar las propiedades electromagnéticas a partir de pruebas radar en un ambiente libre de interferencias.

1.3.2. *Justificación aplicativa*

La tecnología SDRadar permite diseñar prototipos adaptables a diferentes necesidades con una reducción significativa en cuanto a los costes de implementación y operación de los mismos. La plataforma usada para desarrollar el sistema SDRadar es la tarjeta NI USRP-2932, la cual permite desplegar varios sistemas de transmisión y recepción inalámbrica, entre ellos, un sistema radar FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave).

En inicio, se estudian las limitaciones y requerimientos de la tecnología SDRadar, y con la información obtenida se desarrolla un modelo matemático teórico basado en la teoría de reflexión y transmisión de ondas planas para relacionar la información obtenida en las pruebas radar con el valor de la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de los materiales en estudio.

El sistema propuesto consta de dos antenas, una trasmisora para irradiar la señal FCMW hacia el sustrato dieléctrico y otra antena para receptor la energía reflejada en la superficie del sustrato dieléctrico o a su vez, la energía transmitida luego de atravesar dicho sustrato. Las señales deben ser almacenadas y procesadas mediante una interfaz de control desarrollada en el software LabVIEW. Las pruebas con el sistema radar deben ser realizadas en un entorno limpio, libre de perturbaciones electromagnéticas, o interferencias de cualquier fuente de ruido, para evitar resultados erróneos durante la etapa de mediciones. Por tal motivo, se hace indispensable efectuar dichas pruebas dentro de la cámara anecoica con la que cuenta la Facultad de Informática y Electrónica. Habiendo realizado tales mediciones, se procesan las señales obtenidas mediante un script para estimar las propiedades dieléctricas de la baquelita, madera seca y vidrio.

1.4. Objetivo General

Caracterizar materiales dieléctricos usando diferentes técnicas SDRadar con tarjetas NI USRP-2932.

1.5. Objetivos específicos

- Determinar las características y requerimientos de la tarjeta USRP-2932 para aplicaciones SDRadar.
- Crear la interfaz de control y procesamiento de la tarjeta USRP-2932 en LabVIEW para la transmisión de señales radar FMCW.
- Diseñar el modelo del sistema para aplicar las técnicas radar en objetivos que sean sustratos de materiales dieléctricos.
- Desarrollar un modelo matemático para describir la permitividad compleja de un material dieléctrico en función de las variables encontradas en las pruebas radar.
- Crear un script en MATLAB para procesar los resultados de las mediciones y extraer valores específicos de las variables de interés que forman parte del modelo matemático desarrollado.
- Realizar pruebas con diferentes materiales dieléctricos para obtener radargramas de los cuales se pueda extraer información de las variables físicas del sistema.
- Aplicar el modelo matemático para caracterizar la permitividad compleja de los materiales dieléctricos en estudio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Sistema Radar

2.1.1. Definición

El Radar (en inglés Radio Detection and Ranging) es un sistema que permite detectar objetivos en el espacio utilizando formas de onda moduladas y antenas para transmitir un haz directivo de energía electromagnética. Los objetivos que se encuentren dentro de un rango específico, dependiendo de su composición física, reflejarán una cierta cantidad de energía electromagnética de regreso hacia el sistema radar. A partir del análisis y procesamiento de los ecos de radar, y dependiendo del tipo de ondas utilizadas, se puede extraer información de los objetivos como la distancia o rango, posición angular, velocidad, entre otras (Mahafza, 2012, p. 26).

A pesar de los usos militares que le dieron al radar durante el siglo XX, actualmente se ha visto necesario aplicarlo en distintas áreas como la meteorología, geología, agricultura, cartografía, hidrología, oceanografía, control marítimo, entre otros.

2.1.2. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de un sistema radar se basa en la emisión de ondas electromagnéticas en una dirección tal que, estas se reflejen en la superficie de algún objetivo y regresen a la fuente para estimar cierta información sobre dicho objetivo. Por tanto, se considera al radar como un sensor electromagnético para la detección y localización de objetos reflectantes (Skolnik, 2009, p. 23).

En resumen, la operación de un sistema radar es la siguiente:

- Un transmisor genera una señal y la canaliza hacia una antena, la cual irradia ondas de energía electromagnética en el espacio.
- Cierta cantidad de energía irradiada choca en la superficie de algún objetivo que se encuentre a una distancia específica de la fuente de generación de la señal.
- Una parte de la energía interceptada por el objetivo se absorbe, se refracta y otra retorna hacia la fuente para ser recibida por una antena.
- Luego de realizar un procesamiento de la señal recibida, se puede extraer cierta información sobre el objetivo como: el rango o distancia, la velocidad, su posición angular, composición física, entre otras.

En la Figura 1-2 se detalla de forma simplificada el principio de funcionamiento de un sistema radar.

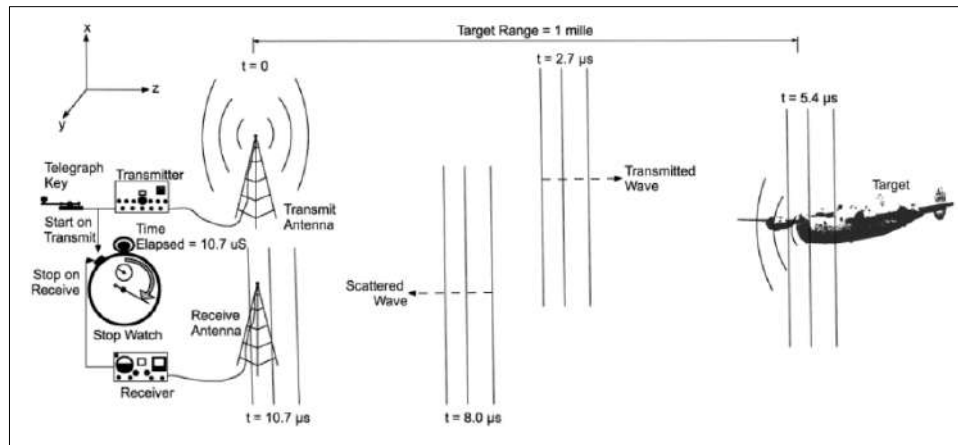


Figura 1-2: Principio de funcionamiento del sistema radar

Fuente: Charvat, 2014, p. 1.

2.1.3. Arquitectura de un sistema Radar

Básicamente un sistema radar cuenta con un transmisor, receptor y antenas.

2.1.3.1. Transmisor

El transmisor es el encargado de generar las ondas de radio con una modulación específica de forma estable y con la menor cantidad de ruido de modo que el rendimiento del sistema radar sea el más óptimo posible (Stimson, 2014, p. 4). Generalmente el transmisor se encuentra en la misma ubicación geográfica del receptor. En la Figura 2-2 se observan los componentes básicos de un sistema radar.

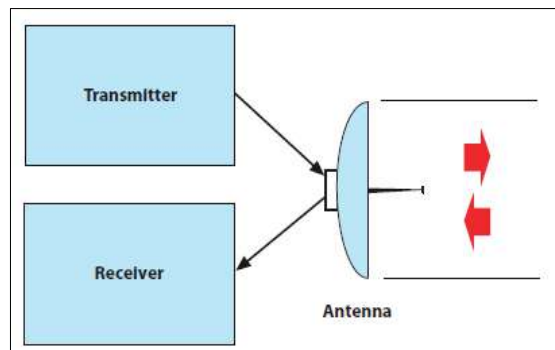


Figura 2-2: Componentes de un sistema radar

Fuente: Stimson, 2014, p. 4.

En cuanto a las características de un transmisor, este debe tener un ancho de banda suficiente para que se garantice una buena resolución. También es necesario que cuente con una buena potencia de transmisión para cubrir el rango máximo del sistema radar (Skolnik, 2009, p. 24).

2.1.3.2. Receptor

El receptor es el encargado de escuchar los ecos de radar captados por la antena de recepción. La primera etapa del receptor es definir el nivel de ruido del canal para separar el ruido e interferencias de la señal deseada.

En el receptor se lleva a cabo la amplificación de los ecos de radar recibidos, pues al ser señales débiles, el ruido del canal puede llegar a limitar la capacidad de detección del radar. Otra tarea que se lleva a cabo en el receptor es el procesamiento de las señales, que incluye un subproceso de filtrado para eliminar ciertas interferencias (Skolnik, 2009, p. 25).

2.1.3.3. Antenas

Las antenas son la etapa de transición entre los equipos del sistema radar y el espacio libre (Skolnik, 2009, p. 26). Entre las funciones que cumplen están:

- Canalizar las señales provenientes del transmisor para irradiar ondas de energía electromagnética en el espacio.
- Receptar la energía electromagnética de los ecos reflejados.
- Direccionar el haz de radiación para detectar objetivos en determinado lugar del espacio.

Las antenas que se utilizan en sistemas radar son de tipo directivas. Algunas de ellas son: antenas parabólicas, yagi, antenas de apertura sintética, tipo bocina y arreglos de antenas (Charvat, 2014, pp. 8-10).

2.1.4. Clasificación de los sistemas radar

Los sistemas radar se pueden clasificar en función de sus aplicaciones, el número de antenas, tipo de transmisores y receptores, frecuencia de operación y tipo de onda que utilizan.

2.1.4.1. Según la banda de operación

Según Mahafza (2012, p. 26-31), los sistemas radar operan en las siguientes bandas:

- Radares de alta Frecuencia (HF) y muy alta frecuencia (VHF): Aprovechan la ionósfera como superficie reflectante de las ondas electromagnéticas para hacer posible la detección de objetivos que se encuentren más allá del horizonte.
- Radares de ultra alta frecuencia (UHF): Son de muy largo alcance y son usados para sistemas de alerta temprana, un ejemplo es la búsqueda de satélites y misiles balísticos.
- Radares en banda L: Su alcance es de aproximadamente 500 km y son usados principalmente para el control de aviones. Su alcance máximo se ve limitado cuando se detectan objetivos a bajas altitudes, debido a que la curvatura de la tierra impide la detección más allá del horizonte.
- Radares en banda S: Son usados para aplicaciones de medio alcance. Su principal aplicación es el control de tráfico aéreo y marítimo.
- Radares en banda C: Tienen muy buena resolución y son usados para aplicaciones meteorológicas, control de misiles y vigilancia en tierra.
- Radares en banda X: Debido a su frecuencia de operación, el tamaño de las antenas disminuye significativamente. Se usan para inteligencia militar, cartografía y geografía.
- Radares en altas frecuencias (Ku, K y Ka): Son sistemas de muy corto alcance y, además, muy sensibles a las condiciones atmosféricas del entorno. Son usados en aplicaciones de tráfico policial.

En la Tabla 1-2 se detalla el rango de frecuencias correspondiente para cada banda de operación de los sistemas radar.

Tabla 1-2: Bandas de frecuencia de los sistemas radar

Designación de Frecuencias	Rango de frecuencias en GHz (estándar IEEE)
HF	0.003-0.03
VHF	0.03-0.3
UHF	0.3-1.0
Banda L	1.0-2.0
Banda S	2.0-4.0
Banda C	4.0-8.0
Banda X	8.0-12.5
Banda Ku	12.5-18
Banda K	18.0-26.5
Banda Ka	26.5-40.0

Fuente: Mahafza, 2012, p. 27.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

2.1.4.2. Según el número de antenas

De acuerdo al número de antenas, se pueden diferenciar cuatro tipos de sistemas radar. En cada uno de ellos la(s) antena(s) permanecen en una posición estática.

- Radar monoestático: el transmisor y receptor comparten una misma antena a través de un duplexor.
- Radar biestático: este sistema radar cuenta con dos antenas y el transmisor está separado del receptor a una distancia considerable. El ángulo formado por la separación entre el transmisor y receptor con el objetivo se le conoce como ángulo biestático (puede tomar valores entre 0 y 180 grados).
- Radar quasi-monoestático: este tipo de radar es similar al biestático, con la diferencia de que el transmisor y receptor se encuentran ubicados en el mismo punto.
- Radar multiestático: en este sistema radar, se usan varias antenas separadas a distancias considerables para la recepción y una antena para realizar la transmisión.

En la Figura 3-2 se observa gráficamente la disposición de las antenas de transmisión y recepción para cada tipo de radar.

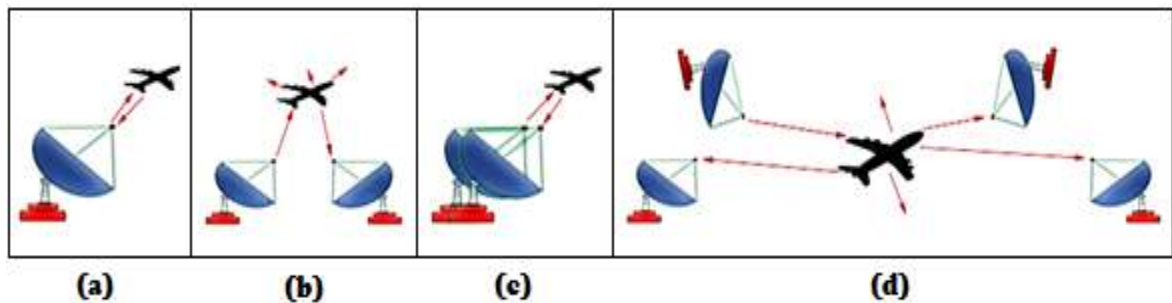


Figura 3-2: Tipos de sistemas radar según el número de antenas. (a) monoestático, (b) biestático, (c) quasi-monoestático, (d) multiestático.

Fuente: <https://www.ingmecafenix.com/wp-content/uploads/2019/01/Multiestatico.jpg>

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

2.1.4.3. Según la forma de onda

Según la forma de onda utilizada se definen dos tipos de radar:

- Radar de onda pulsada: este tipo de radar transmite pulsos de ondas electromagnéticas con una potencia elevada en periodos de tiempo muy cortos. Con este sistema es posible medir la

distancia, pero también se puede estimar la velocidad de un objetivo siempre y cuando se implemente algún tipo de modulación (Vargas, 2014, p. 2).

- Radar de onda continua: a diferencia de los de onda pulsada, estos transmiten señales continuas. Para estimar la distancia y velocidad de un objetivo es necesario implementar una modulación en la señal radiada. Generalmente la resolución y alcance de estos sistemas están estrechamente relacionadas con el ancho de banda (Vargas, 2014, pp. 2-3).

2.1.5. Tipos de señales radar

La generación de una señal radar es seleccionada de acuerdo al tipo de aplicación del sistema radar. Ciertas formas de onda pueden brindar información acerca de la distancia del objetivo, velocidad lineal, velocidad angular y composición física. Por tanto, en sistema radar se pueden utilizar diferentes formas de onda dependiendo del tipo de aplicación (Özdemir, 2012, p.51). Algunas formas de onda son:

- Onda continua (CW)
- Onda continua modulada en frecuencia (FMCW)
- Onda continua de frecuencia escalonada (SFCW)
- Pulso corto

2.1.5.1. Onda continua (CW)

Se transmite continuamente una señal a determinada frecuencia. Al utilizar este tipo de onda, se puede estimar la velocidad de un objetivo. Una señal radar CW expresada en el dominio del tiempo está dada por la Ecuación 1-2.

$$s(t) = A\cos(2\pi f_0 t)$$

Ecuación 1-2: Señal CW en el dominio del tiempo.

Donde:

- A : es la amplitud de la señal transmitida.
- f_0 : es la frecuencia de operación de la señal CW.

En la Figura 4-2 se observa una señal sinusoidal CW en el dominio del tiempo.

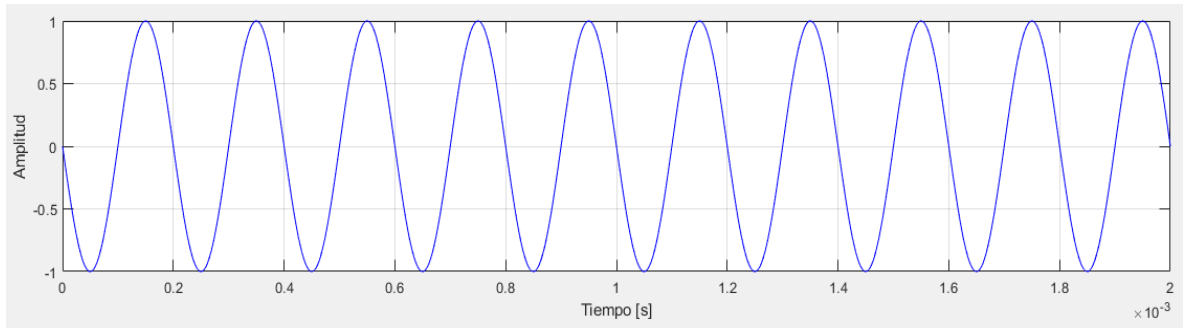


Figura 4-2: Señal continua (CW) en el dominio del tiempo.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

El espectro de la señal sinusoidal de onda continua en el dominio de la frecuencia se muestra en la Figura 5-2.

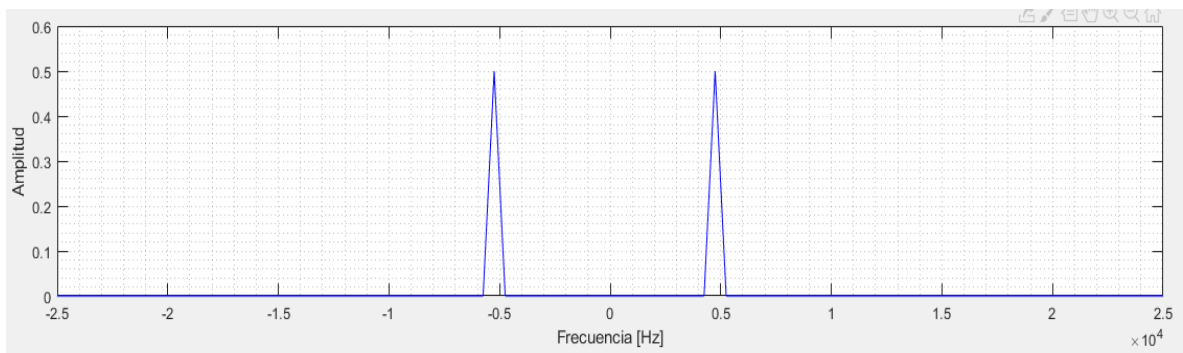


Figura 5-2: Señal continua (CW) en el dominio de la frecuencia.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Cuando el objetivo se encuentra en una posición fija (ver Figura 6-2a), la frecuencia del eco reflejado es la misma de la señal transmitida. Por otro lado, si el objetivo se encuentra en movimiento con respecto al radar, la frecuencia del eco sufre una variación de frecuencia, conocido como desplazamiento de frecuencia Doppler (Özdemir, 2012, p.51).

Si el objetivo se desplaza a determinada velocidad acercándose al radar, la frecuencia del eco reflejado sufrirá un incremento (Figura 6-2b). Por el contrario, si el objetivo se aleja, existirá un decremento con respecto a la frecuencia de la señal transmitida (Figura 6-2c).

Los sistemas radar de onda continua no permiten medir el rango del objetivo. Únicamente son capaces de evaluar la velocidad de los blancos, siempre y cuando estos se encuentren en movimiento (Özdemir,

2012, p.53). Es decir, un objetivo estático es indetectable con este tipo de radar. Su principal aplicación es el control de la velocidad del tráfico de vehículos terrestres y marítimos.

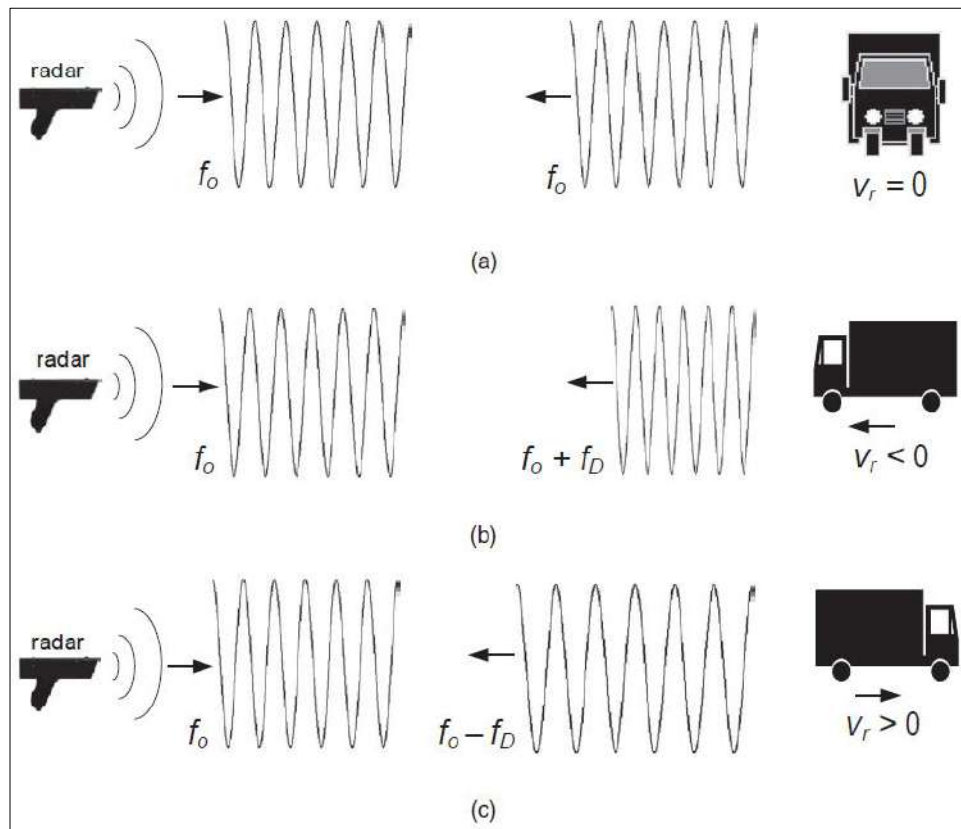


Figura 6-2: Operación de un radar de onda continua (CW).

Fuente: Özdemir, 2012, p.54.

2.1.5.2. Onda continua modulada en frecuencia (FMCW)

A diferencia del radar CW creado para detectar el movimiento de un objetivo, un sistema radar FMCW puede usarse para calcular el rango de un posible blanco. La onda continua modulada en frecuencia consiste en una señal que cambia su frecuencia linealmente en función del tiempo (Moreno, 2015, p. 23). Una señal FMCW en el dominio del tiempo puede ser expresada con la Ecuación 2-2.

$$s(t) = A\cos(2\pi f(t)t)$$

Ecuación 2-2: Señal FMCW en el dominio del tiempo.

Donde:

- A : es la amplitud de la señal transmitida.
- $f(t)$: es la función temporal que expresa la relación entre el cambio de frecuencia y el tiempo.

La función temporal $f(t)$ está definida por la Ecuación 3-2.

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

Ecuación 3-2: Función temporal de la relación frecuencia vs tiempo.

Y la rapidez del cambio de frecuencia (k) se expresa como se indica en la Ecuación 4-2.

$$k = \frac{f_1 - f_0}{T}$$

Ecuación 4-2: Rapidez del cambio de frecuencia en señales FMCW.

Donde:

- k : representa la rapidez del cambio de frecuencia.
- f_1 : es la frecuencia final.
- f_0 : es la frecuencia inicial.
- T : es el periodo de duración para que la señal cambie de una frecuencia f_0 a f_1 .

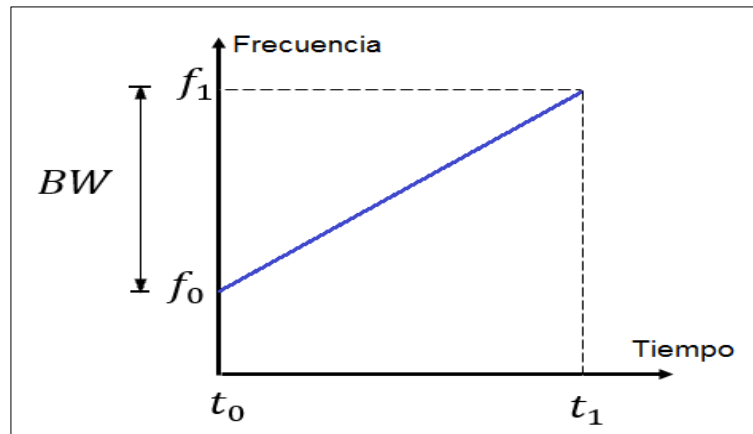


Figura 7-2: Relación frecuencia vs tiempo de una señal FMCW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En la Figura 8-2 se muestra una señal FMCW en el dominio del tiempo donde su frecuencia cambia linealmente en función del tiempo desde una frecuencia f_0 a una frecuencia f_1 .

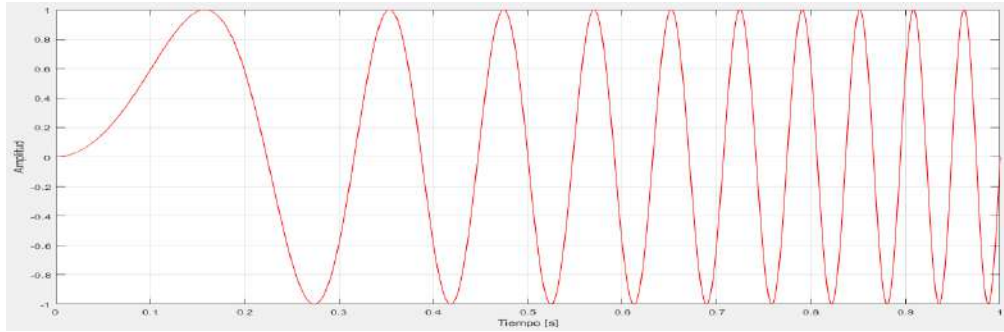


Figura 8-2: Onda continua de frecuencia modulada (FMCW) en el dominio del tiempo.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

La señal $s(t)$ de la Ecuación 2-2 se transmite a través de una antena en el espacio, y cuando un objetivo se encuentra en el camino de propagación de la señal, una parte de esta señal se refleja de vuelta hacia la fuente. Midiendo el tiempo que le toma a la señal recorrer este trayecto se puede estimar el rango del objetivo asumiendo que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es equivalente a la velocidad de la luz. La Ecuación 5-2 muestra la relación existente entre el rango del objetivo y el tiempo de retardo del eco radar.

$$R = \frac{c \cdot t_d}{2}$$

Ecuación 5-2: Rango de un objetivo.

Donde:

- R : es el rango del objetivo (distancia medida desde el radar hasta el objetivo reflectante).
- t_d : es el tiempo de retardo que toma la señal en recorrer desde el radar hasta el objetivo y viceversa.
- c : es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s).

Este tipo de sistemas radar son usados generalmente para detección de objetivos a corta y media distancia. No son adecuados para aplicaciones de largo alcance (Özdemir, 2012, p. 57).

Entre las principales ventajas del radar FMCW encontramos:

- Capacidad para medir simultáneamente el rango y la velocidad de un blanco.
- Alta precisión en la medición del rango, siempre y cuando se cuente con un ancho de banda adecuado para la aplicación.

2.1.6. *Análisis de un sistema radar FMCW*

Los principales parámetros que se deben tener en cuenta al momento de diseñar un sistema radar FMCW son:

- Potencia de transmisión y recepción
- Ancho de banda
- Resolución
- Distancia máxima

Con estas consideraciones, esta sección se dedica al análisis de las señales de transmisión y recepción FMCW para la detección de objetivos reflectantes.

2.1.6.1. *Potencia de transmisión y recepción*

La energía irradiada en un radar FMCW es continua, por tanto, resulta ser un sistema más sencillo en cuanto a la implementación y operación.

Teóricamente no tiene un rango de cobertura mínimo o máximo pero los niveles de potencia de los equipos utilizados imponen un límite práctico en cuanto al rango del sistema radar (Moreno, 2015, p. 24).

Si consideramos que el transmisor y receptor se encuentran en un mismo punto, la potencia de recepción se puede calcular con la Ecuación 6-2.

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

Ecuación 6-2: Potencia de recepción.

Donde:

- P_r : es la potencia de recepción.
- P_t : es la potencia de transmisión.
- G_t : es la ganancia del transmisor.
- G_r : es la ganancia del receptor.
- λ : es la longitud de onda.

- R : es el rango del objetivo.

Como se observa en la Ecuación 6-2, la potencia de recepción es inversamente proporcional al rango del objetivo, es decir, mientras mayor sea la distancia del blanco menor será la potencia del eco reflejado (Mejía, 2017, p. 14.).

2.1.6.2. Ancho de banda

Las señales FMCW cambian su frecuencia en función del tiempo, la forma de onda comienza transmitiéndose en una determinada frecuencia y mientras transcurre el tiempo, dicha frecuencia se va desplazando ascendente o descendentemente hasta alcanzar una frecuencia limite.

El ancho de banda de estas señales se determina mediante la Ecuación 7-2.

$$B = f_f - f_i$$

Ecuación 7-2: Ancho de banda.

Donde:

- B : es el ancho de banda.
- f_f : es la frecuencia final o frecuencia máxima.
- f_i : es la frecuencia inicial.

Un mayor o menor ancho de banda determina la capacidad de resolución del sistema radar.

2.1.6.3. Resolución

Según Charvat (2014, p. 75) la resolución de un sistema radar es la medida que permite distinguir dos blancos dentro de un determinado rango. Para radares FMCW la resolución máxima depende directamente del ancho de banda, dicha relación se expresa en la Ecuación 8-2.

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

Ecuación 8-2: Resolución de un sistema radar FMCW.

Donde:

- ΔB : es la resolución del sistema radar.
- c : es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s).
- B : es el ancho de banda de la señal FMCW.

2.1.6.4. Distancia máxima

El rango o distancia máximo depende del periodo de duración de la señal FMCW. Asumiendo que la señal viaja aproximadamente a la velocidad de la luz en el espacio libre, la distancia máxima teórica se puede calcular mediante la Ecuación 9-2.

$$d_{max} = \frac{c t_f}{2}$$

Ecuación 9-2: Distancia máxima un sistema radar.

Donde:

- d_{max} : es la distancia máxima.
- c : es la velocidad de la luz.
- t_f : es el tiempo de duración de la señal FMCW.

2.1.6.5. Señal transmitida

Una señal FMCW transmitida en el dominio del tiempo $s(t)$ puede ser expresada según la Ecuación 10-2.

$$s(t) = A \cos(2\pi f(t)t + \theta)$$

Ecuación 10-2: Señal FMCW transmitida.

Siendo:

- A : es la amplitud inicial.
- $f(t)$: es la función que relaciona el cambio de frecuencia con el tiempo (ver Ecuación 3-2).
- θ : es la fase inicial.

En la Figura 9-2 se puede observar gráficamente el comportamiento de una señal FMCW transmitida en el dominio del tiempo.

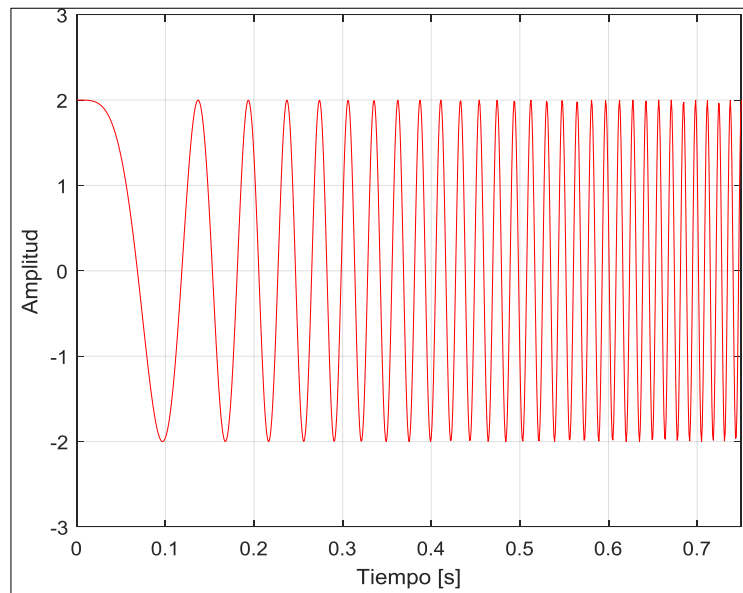


Figura 9-2: Señal FMCW transmitida en el dominio del tiempo.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

2.1.6.6. Señal recibida

La señal recibida $r(t)$ corresponde a un eco de la señal transmitida. Por tanto, esta señal presenta un retardo en tiempo debido a su trayecto recorrido. La Ecuación 11-2 muestra esta señal considerando un factor de atenuación por las pérdidas existentes en el espacio.

$$r(t) = A * k * \cos(2\pi f(t - 2t_r)(t - 2t_r) + \theta)$$

Ecuación 11-2: Señal FMCW recibida.

Donde:

- A : es la amplitud inicial de la señal transmitida.
- k : es el factor de atenuación de la señal.
- θ : es la fase inicial.
- t_r : es el tiempo de retardo.

En la Figura 10-2 se observa gráficamente una señal FMCW con un retardo específico de 50 ms. Durante este tiempo de retardo el receptor únicamente detecta el ruido existente del canal, que generalmente tiene una potencia muy pequeña en comparación con la señal FMCW recibida.

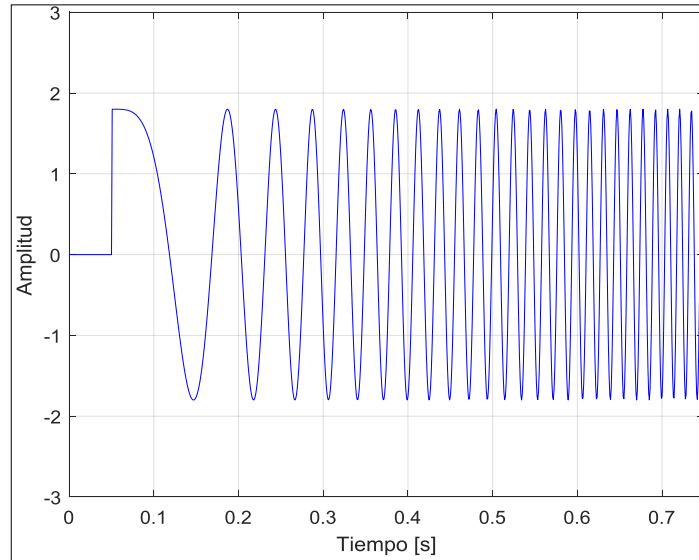


Figura 10-2: Señal FMCW recibida en el dominio del tiempo un retardo de 50 ms.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

2.1.6.7. Detección de un objetivo

Para la detección del objetivo se multiplica la señal transmitida con la reflejada. Siendo ambas señales sinusoidales, el resultado de la multiplicación es una señal con una frecuencia equivalente a ΔB (ver Figura 11-2) provocada por el tiempo de retardo t_r .

El rango (R) de un objetivo sometido a un radar FMCW puede ser calculado con la expresión de la Ecuación 12-2.

$$R = \frac{c T_s \Delta B}{2 BW}$$

Ecuación 12-2: Rango de un sistema radar FMCW.

Siendo:

- c : la velocidad de la luz.
- T_s : el tiempo de duración de la señal FMCW.

- ΔB : la diferencia de frecuencia de la señal transmitida con respecto a la recibida en un instante de tiempo cualquiera.
- BW : es el ancho de banda.

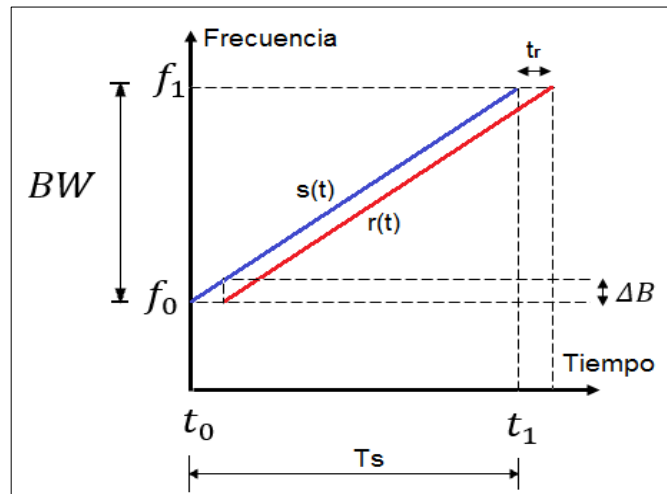


Figura 11-2: Relación tiempo vs frecuencia de la señal FMCW transmitida $s(t)$ y recibida $r(t)$.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Una vez multiplicadas las señales en el dominio del tiempo, es necesario aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) para obtener su espectro, el cual representa un radargrama en el dominio frecuencial.

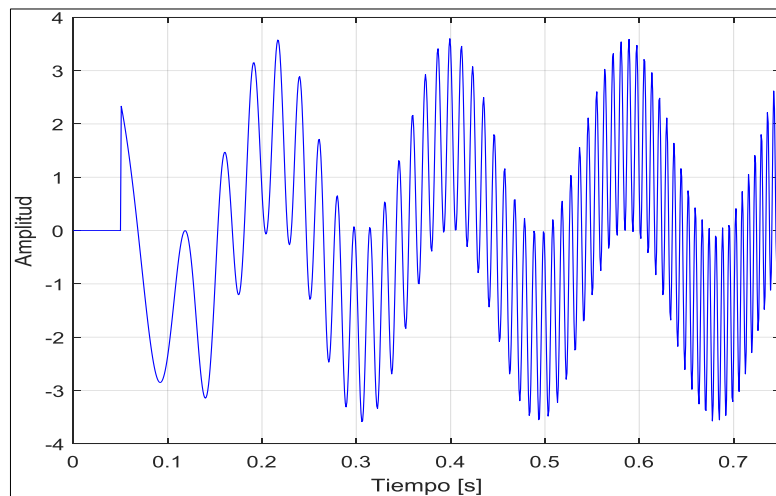


Figura 12-2: Multiplicación de la señal transmitida y recibida en el dominio del tiempo cuando existe la presencia de un solo objetivo.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

El pico más alto de la gráfica obtenida en el radargrama de la Figura 13-2 indica la presencia de un objetivo y su coordenada en el eje de la frecuencia representa el valor de ΔB . Con estas consideraciones, dicho radargrama puede ser normalizado al dominio espacial con la ayuda de la Ecuación 12-2.

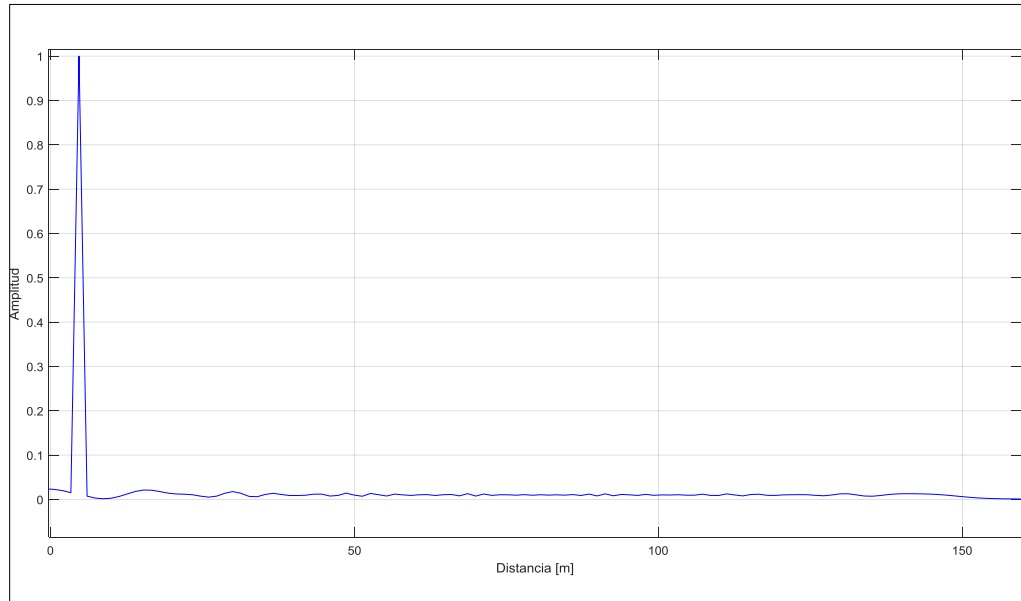


Figura 13-2: Radargrama con la presencia de un solo objetivo.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

2.1.6.8. Detección de dos objetivos

Cuando existe la presencia de dos objetivos, la señal recibida $r(t)$ está compuesta por la suma de dos ecos radar, uno por cada objeto reflectante tal y como se muestra en la Ecuación 13-2.

$$r(t) = r_1(t) + r_2(t)$$

Ecuación 13-2: Señal FMCW recibida.

Siendo $r_1(t)$ la reflexión en el primer objetivo y $r_2(t)$ en el segundo. En la Ecuación 14-2 se detalla la expresión matemática que define el eco reflejado en un primer objetivo con un tiempo de retardo t_{r1} .

$$r_1(t) = A * k_1 * \cos(2\pi f(t - 2t_{r1})(t - 2t_{r1}) + \theta_1)$$

Ecuación 14-2: Eco reflejado en un primer objetivo.

El segundo eco reflejado tiene un tiempo de retardo t_{r2} , y puede ser expresado como se indica en la Ecuación 15-2.

$$r_2(t) = A * k_2 * \cos(2\pi f(t - 2t_{r2})(t - 2t_{r2}) + \theta_2)$$

Ecuación 15-2: Eco reflejado en un segundo objetivo.

El eco reflejado $r_1(t)$ presenta ciertas diferencias con respecto a la señal transmitida. Una de ellas es el retardo en el dominio del tiempo (t_{r1}) generado por la trayectoria recorrida por la señal. Además del retardo, existe una atenuación que depende de la distancia recorrida por la señal y el contraste entre el espacio libre con la superficie del objeto reflectante. En la Figura 14-2 se muestra gráficamente la señal recibida $r_1(t)$ con un tiempo de retardo de 50 ms.

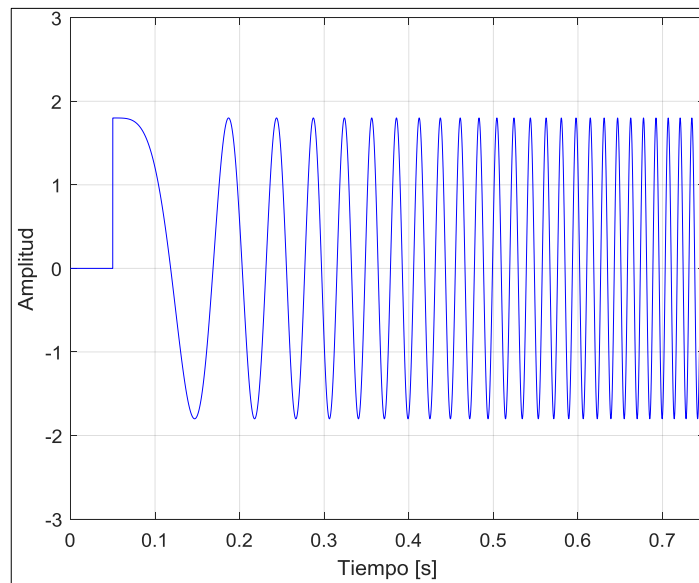


Figura 14-2: Eco radar $r_1(t)$ con 50 ms de retardo generado por la reflexión en un primer objetivo.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

De igual forma, la segunda señal reflejada presenta características similares a las del eco $r_1(t)$. Si se considera que el objetivo que genera la señal $r_2(t)$ es el mismo objetivo que genera la señal $r_1(t)$ pero ahora este se encuentra ubicado a una distancia mayor, la atenuación y el retardo aumenta en función de esta distancia. Con estas consideraciones, la señal $r_2(t)$ se muestra gráficamente en la Figura 15-2.

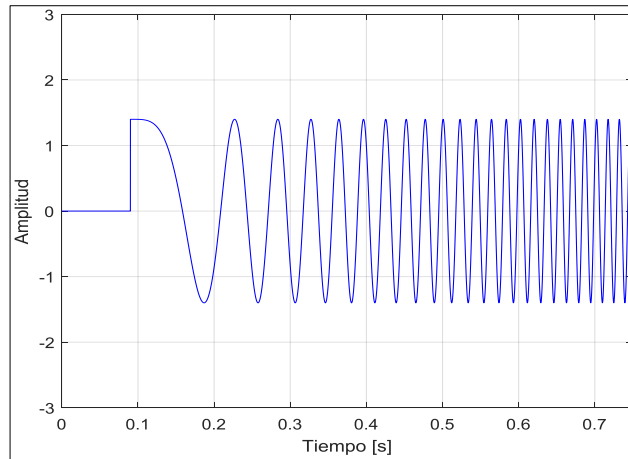


Figura 15-2: Eco radar $r_2(t)$ con 90 ms de retardo generado por la reflexión en un segundo objetivo.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Al igual que en el caso de la existencia de un solo objetivo, para estimar el rango de cada objetivo se debe multiplicar la señal transmitida (ver Ecuación 10-2) con la señal reflejada $r(t)$ de la Ecuación 13-2. El resultado de esta operación refleja la presencia de dos picos de potencia en el radargrama (ver Figura 16-2), uno generado por la reflexión de la señal en el blanco 1 a una determinada distancia y otro correspondiente a la reflexión de la señal en el blanco 2 a una distancia mayor.

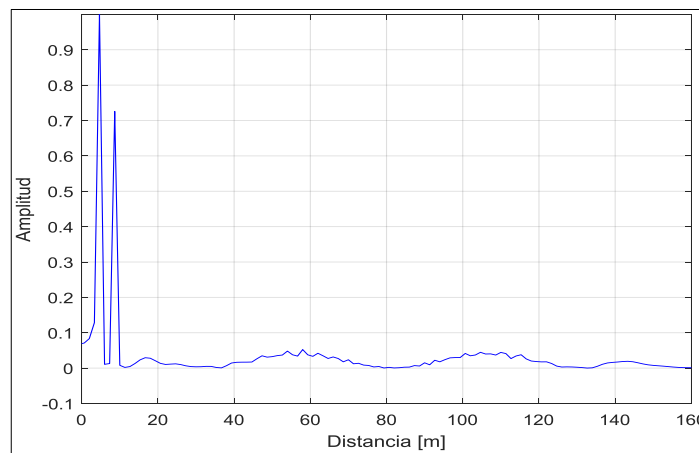


Figura 16-2: Radargrama con la presencia de dos objetivos.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

2.2. Ondas electromagnéticas

Los sistemas radar basan su principio de funcionamiento en la propagación de ondas electromagnéticas teniendo en cuenta que el medio de propagación gobierna en cierta forma la

propagación de dichas ondas. Las variaciones que estas ondas sufren dentro un determinado medio pueden ser analizadas con el fin de obtener información sobre las propiedades del medio de propagación (Gacitúa, 2006, p. 4).

En la presente sección se estudian las propiedades de los medios de propagación y los fenómenos de reflexión y transmisión que sufren las ondas en el recorrido de su trayectoria a través de estos medios.

2.2.1. Propagación de ondas electromagnéticas

La base teórica para la propagación de ondas es la teoría de campos electromagnéticos desarrollada en 1867 por James Clerk Maxwell, que mediante la formulación de las ecuaciones básicas de la teoría electromagnética relaciona el campo eléctrico y magnético cuando estos interactúan con un medio (Vega, 2001, p. 76).

Las Ecuaciones 16-2, 17-2, 18-2 y 19-2 describen las relaciones establecidas por Maxwell para comprender los fenómenos del electromagnetismo cuando una onda electromagnética interactúa con un medio.

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

Ecuación 16-2: Ley de Gauss para el campo eléctrico.

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

Ecuación 17-2: Ley de Gauss para el campo magnético.

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

Ecuación 18-2: Ley de Faraday.

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

Ecuación 19-2: Ley de Ampere-Maxwell.

Donde:

- E : es el campo eléctrico.

- H : es el campo magnético.
- ρ : es la densidad de carga eléctrica.
- B : es la densidad de flujo magnético.
- D : es la densidad de flujo eléctrico.
- J : es la densidad de corriente eléctrica debida al movimiento de las cargas en la materia.

Si el medio de propagación de las ondas electromagnéticas es un medio isotrópico y homogéneo, se puede relacionar las magnitudes de las ecuaciones de Maxwell con la conductividad (σ), la permitividad dieléctrica (ϵ) y la permeabilidad magnética (μ) las cuales son propiedades electromagnéticas de un medio (Vega, 2001, p. 77).

Las Ecuaciones 20-2, 21-2 y 22-2 detallan las relaciones constitutivas de Maxwell.

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

Ecuación 20-2: Ecuación constitutiva de Maxwell para la permitividad.

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

Ecuación 21-2: Ecuación constitutiva de Maxwell para la permeabilidad.

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

Ecuación 22-2: Ecuación constitutiva de Maxwell para la conductividad.

Donde:

- ϵ : es la permitividad dieléctrica.
- μ : es la permeabilidad magnética.
- σ : es la conductividad.

Estas ecuaciones son útiles para describir el comportamiento de un material cuando es sometido a ondas electromagnéticas (Flores, 2013, p. 7).

La base teórica del trabajo de titulación es caracterizar la permitividad y la tangente de pérdidas mediante el análisis de las ondas electromagnéticas de un sistema radar cuando estas interactúan con la superficie de ciertos materiales dieléctricos.

2.2.2. Propiedades electromagnéticas de un medio

Las ondas electromagnéticas sufren fenómenos de atenuación, desfase, reflexión, refracción y absorción cuando atraviesan o cambian de medio de propagación, dichos fenómenos se dan en mayor o menor proporción dependiendo del contraste entre los parámetros electromagnéticos de cada medio (Rodríguez, 2017, pp. 20.21).

2.2.2.1. Conductividad

Se define a la conductividad como una medida de la respuesta de las cargas libres en el interior del material a la presencia de un campo eléctrico externo. Es decir, la capacidad del medio de poder conducir corriente eléctrica (Vega, 2001, pp. 78-19).

De acuerdo a la ley de Ohm, la conductividad (σ) relaciona el campo eléctrico externo aplicado (\vec{E}) y la densidad de corriente debido a las caras libres (\vec{J}) como se indica la Ecuación 22-2.

La conductividad se mide, según el Sistema Internacional, en Siems/metro [S/m]. En muchos casos, la conductividad de un material está definida por la cantidad de agua existente en los poros del mismo y por la composición química (Vega, 2001, p. 79).

Según Gacitúa (2006, p. 9), los materiales considerados como aislantes o dieléctricos presentan una baja conductividad, por lo que no es un parámetro relevante en los resultados que definen las características de un medio o material.

2.2.2.2. Permitividad eléctrica

La permitividad absoluta es una medida que indica la resistencia al formarse un campo eléctrico dentro de un medio. Es decir, la permitividad es una medida del grado de afectación que causa un campo eléctrico en un medio y viceversa (Moreno, 2015, p. 41).

El campo eléctrico (E) y la densidad de flujo eléctrico (D) se relacionan a través de la permitividad eléctrica (ϵ) como se muestra en la Ecuación 23-2.

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

Ecuación 23-2: Ecuación constitutiva de Maxwell para la permitividad eléctrica.

La permitividad eléctrica absoluta de un medio (ϵ) se define también, como el producto entre la permitividad eléctrica del vacío (ϵ_0) y la permitividad relativa del medio (ϵ_r). La relación matemática de este producto se indica en la Ecuación 24-2.

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

Ecuación 24-2: Permitividad eléctrica absoluta.

Siendo $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$, y ϵ_r un factor de proporcionalidad adimensional que indica la capacidad de polarización de un material o medio de propagación cuando se somete a un campo eléctrico. La permitividad relativa también es conocida como constante dieléctrica, y es una magnitud compleja expresada como se muestra en la Ecuación 25-2.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

Ecuación 25-2: Permitividad relativa.

Donde:

- ϵ_r' : es la parte real de la permitividad relativa.
- ϵ_r'' : es la parte imaginaria de la permitividad relativa.

El valor mínimo que puede tomar la permitividad relativa es 1, correspondiente al espacio libre. El valor de la permitividad relativa en otros medios depende de algunos factores como: la humedad, la temperatura, la composición física y química, la densidad, entre otros (Veloz, 2018, p. 28). Por otro lado, la parte imaginaria de la permitividad relativa indica el factor de pérdidas dieléctricas existentes en el medio.

La Ecuación 26-2 muestra que el cociente entre la parte real e imaginaria de la permitividad relativa se conoce como tangente de pérdidas ($\tan \delta$) o factor de disipación.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$$

Ecuación 26-2: Tangente de pérdidas.

Por otro lado, la permitividad relativa y la conductividad se encuentran relacionadas como se indica en la Ecuación 27-2.

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j \frac{\sigma}{\omega}$$

Ecuación 27-2: Relación entre la permitividad eléctrica y la conductividad.

Donde σ es la conductividad del medio y ω , la frecuencia angular del campo eléctrico aplicado, siendo $\omega = 2\pi f$.

Los valores de la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de algunos materiales se muestran en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Valores aproximados de la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de algunos materiales dieléctricos.

Material	ϵ'_r	$\tan \delta$
Aire	1.005	---
Baquelita	4.74 – 4.9	$(22 - 3045) \times 10^{-3}$
Hielo	4.2	50.00×10^{-3}
Vidrio	4 – 9	2.00×10^{-3}
Papel	3	8.00×10^{-3}
Polietileno	2.26	0.20×10^{-3}
Porcelana	6	14.00×10^{-3}
Tierra seca	2.8	50.00×10^{-3}
Teflón	2.1	0.30×10^{-3}
Madera seca	1.5 – 4	$(40 - 70) \times 10^{-3}$

Fuente: Neri, 2013, p. 48.; Serway & Jewett, 2007, p. 736.; Moreno, 2015, p. 67.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los valores de permitividad relativa y tangente de pérdidas detallados en la Tabla 2-2 son valores aproximados y varían dependiendo de la bibliografía seleccionada, pues las técnicas de caracterización, y la composición física y química de las muestras seleccionadas es diferente en cada fuente bibliográfica.

2.2.2.3. Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética indica la capacidad de un material o medio para dejar pasar un campo magnético. Este parámetro relaciona el campo magnético (H) con la densidad de densidad de flujo magnético (B) como se muestra en la Ecuación 28-2.

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

Ecuación 28-2: Ecuación constitutiva de Maxwell para la permeabilidad magnética.

Al igual que en el caso de la permitividad eléctrica, la permeabilidad absoluta (μ) es el producto entre la permeabilidad del vacío (μ_0) y la permeabilidad relativa de un material (μ_r). La relación matemática de este producto se indica en la Ecuación 29-2.

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

Ecuación 29-2: Permeabilidad magnética.

La permeabilidad absoluta se mide en Henri/metro [H/m], siendo $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$. Además, la permeabilidad relativa es una magnitud compleja, y se puede expresar como se indica en la Ecuación 30-2.

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$$

Ecuación 30-2: Permeabilidad relativa.

La parte real de la permeabilidad magnética (μ_r') indica una medida de la energía electromagnética almacenada en el medio y la parte compleja (μ_r'') indica las pérdidas magnéticas (Vega, 2001, p. 84).

2.2.3. *Velocidad de propagación de onda*

2.2.3.1. *Velocidad de propagación en el espacio libre*

A partir de las ecuaciones formuladas por James Maxwell, una onda plana que se propaga en un medio en la dirección \vec{z} puede expresarse como se indica en la Ecuación 31-2.

$$\vec{E}(\vec{z}, t) = E_0 e^{(j\omega t - \gamma \vec{z})}$$

Ecuación 31-2: Ecuación de la onda plana en el espacio.

La expresión se compone de dos partes, $e^{(j\omega t)}$ define la propagación de la onda en función del tiempo, mientras que la otra parte del exponencial, $e^{(-\gamma \vec{z})}$ define los efectos de propagación que sufre la onda al atravesar un determinado medio. El término γ se conoce como constante de propagación, y es un término complejo, tal como se observa en la Ecuación 32-2.

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

Ecuación 32-2: Constante de propagación.

Siendo:

- α : constante de atenuación
- β : constante de fase

La constante de fase, es el término que permite determinar la velocidad de propagación de la onda en el medio o material por el cual esta se propague (Vega, 2001, p. 87). Esta relación se detalla en la Ecuación 33-2.

$$v = \frac{\omega}{\beta}$$

Ecuación 33-2: Velocidad de propagación de una onda.

Siendo v , la velocidad de propagación de la onda y ω su frecuencia angular. Por otro lado, la Ecuación 33-2 también se puede expresar en función de la permitividad y permeabilidad relativa como muestra es la Ecuación 34-2.

$$v = \frac{c}{Re\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}$$

Ecuación 34-2: Velocidad de propagación de una onda.

Cuando la onda se propaga en medios no magnéticos, como el espacio libre, $\mu_r = 1$. Además, en el apartado dedicado a la permitividad eléctrica de un medio, se mencionó que la permitividad relativa del vacío es equivalente a la unidad: $\epsilon_r = 1$. Con estas consideraciones se observa que cuando una onda se propaga en el espacio, lo hace con una velocidad equivalente a la de la luz, tal como se aprecia en la Ecuación 35-2.

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

Ecuación 35-2: Velocidad de la luz.

2.2.3.2. *Velocidad de propagación en un medio diferente al espacio libre*

Cuando la onda se propaga en medios diferentes al espacio libre, la velocidad de propagación se ve afectada directamente por los parámetros electromagnéticos del medio.

En el presente trabajo de titulación se trabaja con substratos de materiales dieléctricos de bajas pérdidas ($\tan \delta < 0,01$) y la permeabilidad relativa de este tipo de materiales se encuentra alrededor de la unidad (Carerero, 2015, pp. 7-8).

Además, la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en materiales dieléctricos depende de la permitividad relativa del material. La relación entre estos parámetros se muestra en la Ecuación 36-2.

$$v = \frac{c}{Re\sqrt{\epsilon_r}}$$

Ecuación 36-2: Velocidad de propagación en materiales dieléctricos.

2.2.4. Atenuación

Las ondas se ven afectadas por un factor de atenuación que depende de los parámetros electromagnéticos del medio de propagación. Si se considera un medio dieléctrico donde $\mu_r \approx 1$, la disminución de amplitud depende, por un lado, de la distancia recorrida por la onda y por otro, de la constante de atenuación (α), que a su vez es dependiente de la parte imaginaria de la permitividad relativa del medio. La relación existente entre la constante de atenuación y la permitividad relativa se detalla en la Ecuación 37-2.

$$\alpha = \frac{\omega}{c} Im\sqrt{\epsilon_r}$$

Ecuación 37-2: Constante de atenuación.

2.2.5. Reflexión y transmisión de ondas electromagnéticas

Cuando una señal electromagnética cambia de medio de propagación, a uno con diferentes propiedades electromagnéticas, se producen fenómenos de reflexión, transmisión y absorción de la señal. Es decir, una parte de la señal se refleja hacia la fuente, otra continúa su trayectoria y un porcentaje de esta se absorbe en el medio.

Si la superficie de incidencia de la onda es plana, el ángulo de incidencia es el mismo que el ángulo de reflexión. La ley de Snell (Ecuación 38-2) relaciona los ángulos de incidencia, refracción y reflexión con los índices de refracción del medio 0 y del medio 1.

$$\eta_1 \sin(\theta_1) = \eta_2 \sin(\theta_2)$$

Ecuación 38-2: Ley de Snell.

En la Figura 17-2 se muestra esquemáticamente el proceso de incidencia de una onda plana cuando entra en contacto con una superficie plana que tiene diferentes propiedades electromagnéticas del medio de propagación inicial (Vega, 2001, p. 94). Siendo η_1 y η_2 los índices de refracción de los medios 1 y 2, θ_1 el ángulo de incidencia formado entre el rayo incidente y una línea normal imaginaria perpendicular a la superficie y θ_2 el ángulo de la onda refractada.

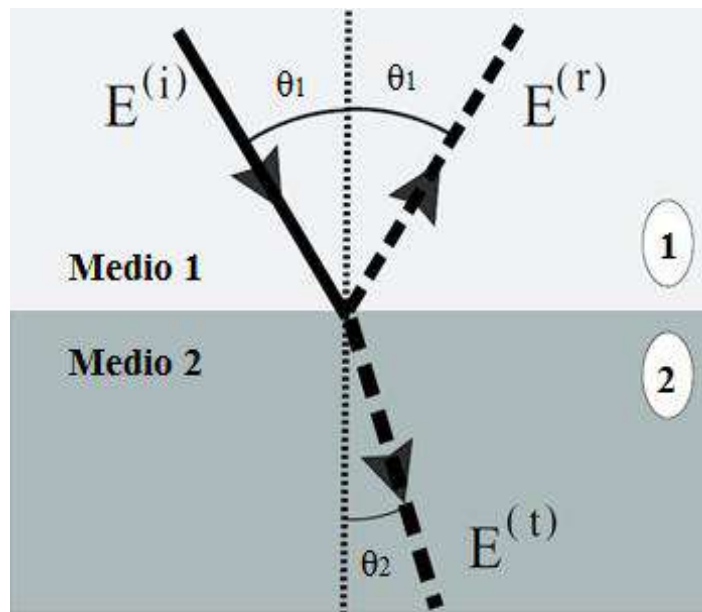


Figura 17-2: Esquema de los fenómenos de reflexión, refracción y transmisión de una onda electromagnética.

Fuente: Yonte, 2004, p. 3.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Cuando existen estas discontinuidades en el medio, una parte de la señal se refleja y otra se refracta provocando una desviación en la dirección de propagación. El porcentaje de la energía reflejada y transmitida depende esencialmente del contraste entre los parámetros electromagnéticos del medio 1 y del medio 2 (Vega, 2001, p. 94).

Para medir el nivel de señal reflejada o transmitida es necesario conocer el valor del coeficiente de transmisión y reflexión cuando la onda atraviesa un material dieléctrico. Estos coeficientes se pueden calcular a partir de la impedancia intrínseca de un campo electromagnético (η), que a su vez es el cociente entre el campo eléctrico y magnético tal como se muestra en la Ecuación 39-2 (Gacitúa, 2006, p. 16).

$$\eta_1 = \frac{\vec{E}_r}{H_r} = \frac{\sqrt{\mu_0 \mu_{r_1}}}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_{r_1}}}$$

Ecuación 39-2: Impedancia intrínseca de un campo electromagnético.

Donde:

- μ_0 y μ_{r_1} corresponden al valor de la permeabilidad en el vacío y la permeabilidad relativa del medio 1.
- ϵ_0 y ϵ_{r_1} corresponden al valor de la permitividad en el vacío y la permitividad relativa del medio 1.
- E_r y H_r son el campo eléctrico y magnético reflejado en el medio 1 (ver Figura 17-2).

Si el análisis mostrado en la Ecuación 39-2 es aplicado en el medio 2 de la Figura 17-2, el índice de refracción de este medio puede ser expresado como se muestra en la Figura 40-2.

$$\eta_2 = \frac{\vec{E}_t}{H_t} = \frac{\sqrt{\mu_0 \mu_{r_2}}}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_{r_2}}}$$

Ecuación 40-2: Impedancia intrínseca de un campo electromagnético.

Donde:

- μ_{r_2} : corresponde al valor de la permeabilidad relativa del medio 2.
- ϵ_{r_2} : corresponde al valor de la permitividad relativa del medio 2.
- E_t y H_t : son el campo eléctrico y magnético transmitidos del medio 1 al medio 2 (ver Figura 17-2).

Por otro lado, según las ecuaciones de Fresnel, el coeficiente de reflexión (Γ) y transmisión (T) puede ser expresado como se indica en las Ecuaciones 41-2 y 42-2.

$$\Gamma = \frac{\overline{E}_r}{\overline{E}_i} = \frac{\eta_1 \cos(\theta_1) - \eta_2 \cos(\theta_2)}{\eta_1 \cos(\theta_1) + \eta_2 \cos(\theta_2)}$$

Ecuación 41-2: Coeficiente de reflexión.

$$T = \frac{\overline{E}_t}{\overline{E}_i} = \frac{2 * \eta_2 \cos(\theta_1)}{\eta_1 \cos(\theta_1) + \eta_2 \cos(\theta_2)}$$

Ecuación 42-2: Coeficiente de transmisión.

En el trabajo de titulación, las expresiones del coeficiente de transmisión y reflexión se pueden simplificar, pues al considerarse una superficie reflectiva lo más plana posible, el ángulo de incidencia y reflexión tiende a ser muy pequeño ($\theta_1 = 0$ y $\theta_2 = 0$).

La impedancia intrínseca η_1 y η_2 puede ser expresada en términos de la permitividad eléctrica y permeabilidad magnética como se detalla en la Ecuación 39-2 y 40-2. Si además se considera que los materiales son dieléctricos, la permeabilidad relativa tiene un valor igual a la unidad, y el coeficiente de reflexión y transmisión pueden ser expresados como se indica en las Ecuaciones 43-2 y 44-2.

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

Ecuación 43-2: Coeficiente de reflexión.

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

Ecuación 44-2: Coeficiente de transmisión.

Se puede observar que la suma del coeficiente de reflexión con el de transmisión es igual a la unidad y que el porcentaje de onda reflejada depende directamente de la diferencia entre los parámetros electromagnéticos de los medios contrastados, si la diferencia de estos parámetros aumenta, también lo hará el coeficiente de reflexión (Vega, 2001, p. 95).

2.3. Software Defined Radio

Los sistemas de Software Defined Radio (SDR), o radio definida por software en español, surgen como respuesta a las exigencias de los sistemas de comunicación inalámbricas. La mayoría de los sistemas tradicionales basados en hardware no pueden adaptarse con facilidad a las exigencias requeridas en la actualidad, quedando obsoletos a medida que surgen nuevas tecnologías y protocolos.

Por tanto, en 1991 se crea el término “Radio Definida por Software” para referirse a “radios” reconfigurables y mitigar los inconvenientes con los sistemas tradicionales de la época.

2.3.1. Definición

El término “Software Defined Radio” se refiere a plataformas de radio reprogramables. Es decir, un dispositivo de hardware de propósito general donde la mayoría de las tareas de transmisión, recepción y procesamiento de señales se realiza en software (Manobanda, 2015, p. 32). Esto permite que los sistemas diseñados sean reconfigurables y adaptables para diferentes aplicaciones sin la necesidad de cambiar el hardware al momento de integrar nuevas funcionalidades al sistema de comunicación inalámbrico.

En los sistemas SDR, la mayoría o todas las funciones de la capa física se definen por software. Esto permite la creación de sistemas multipropósito reconfigurables a través de actualizaciones de software o hardware.

Con la tecnología SDR es posible modificar algunos parámetros de un sistema de comunicaciones inalámbrico, como la frecuencia portadora, codificación, modulación y potencia de transmisión a través de modificaciones en software sin realizar cambios en el hardware (Guamo, 2019, p. 23).

2.3.2. Arquitectura

Como se detalla en la Figura 18-2, un sistema SDR se compone esencialmente de 3 partes funcionales: la sección de radio frecuencia (RF), la sección de frecuencia intermedia (IF) y la sección de banda base (Velasco, 2016, p. 41).

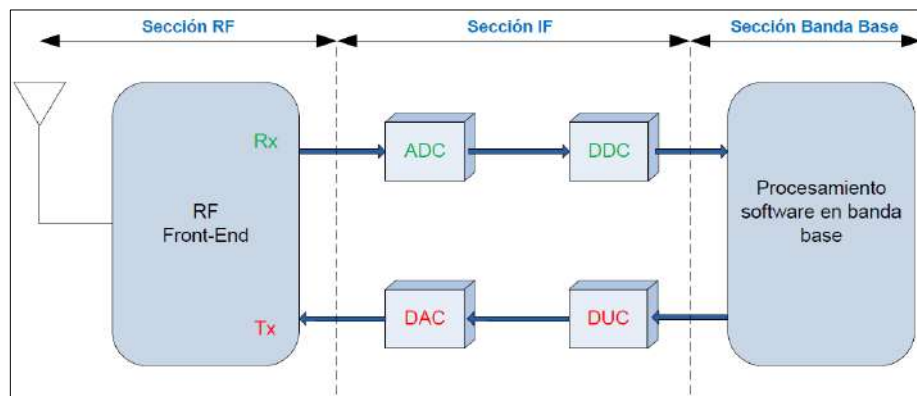


Figura 18-2: Partes funcionales de un sistema SDR.

Fuente: Pinar & Murillo, 2011, p. 13.

La sección de banda base se implementa a través de software mientras que las secciones de radio frecuencia y frecuencia intermedia se implementan en hardware.

2.3.2.1. Sección RF

La sección de radio frecuencia puede operar en dos modos: transmisión y recepción.

- Cuando opera en el modo de transmisión, se encarga de modular y amplificar las señales de IF para transmitir las a través de frecuencias de radio.
- Cuando opera en el modo de recepción, se encarga de filtrar y convertir las señales de radio a frecuencias intermedias.

2.3.2.2. Sección IF

Al igual que en sección RF, se pueden tener dos modos de operación:

- En el caso de transmisión, esta sección se encarga de convertir la señal de banda base a una de frecuencia intermedia aumentando la tasa de muestreo con un módulo DUC (Digital Up Converter) y realizando una conversión digital-analógica.
- En el caso de recepción, esta sección convierte la señal de IF a una de banda base con un proceso de conversión analógico-digital y una reducción de la tasa de muestreo con un módulo DDC (Digital Down Converter).

2.3.2.3. Sección Banda Base

Como se había mencionado, esta sección se implementa a través de software para realizar el procesamiento digital de la señal. Las principales tareas de esta sección son la modulación y demodulación de la señal dependiendo del modo de operación del sistema SDR (transmisión/recepción).

2.3.3. SDRadar

La arquitectura de un sistema SDRdar o Software Defined Radar (radar definido por software) se refiere a una tecnología radar, en donde las operaciones de la sección de banda base se realizan a través de software.

Esta característica permite el desarrollo de sistemas radar multipropósito adaptables y reconfigurables a distintas necesidades. La mayoría de las tareas de modulación, demodulación, filtrado y procesamiento de señales se realizan a través de módulos funcionales programados en software; de esta forma se logra reducir los costos de implementación y operación en los sistemas radar (Veloz, 2018, p. 18).

Entre las ventajas que brindan los sistemas SDRadar están:

- Creación de sistemas radar de bajo coste.
- Desarrollo de sistemas radar adaptables multipropósito.
- Reutilización de hardware para nuevos sistemas radar.
- Reducción de la complejidad del procesamiento de señales.

2.4. Universal Software Radio Peripheral (USRP)

El término Universal Software Radio Peripheral o Periférico Universal de Software de Radio (USRP) se refiere a dispositivos hardware diseñados para trabajar como transceptores de radio en conjunto con el procesador externo de otro equipo para desarrollar prototipos de comunicación inalámbricos (Pinar & Murillo, 2011, p. 17).

Las tarjetas USRP cumplen con todas las características de SDR, por tanto, su arquitectura cuenta con una sección RF, IF y de banda base como de muestra en la Figura 19-2. La sección de banda base consiste en un FPGA (Field-Programmable Gate Array o Matriz de Puertas Reprogramables) encargado del procesamiento de las señales (Mejía, 2017, p. 21).

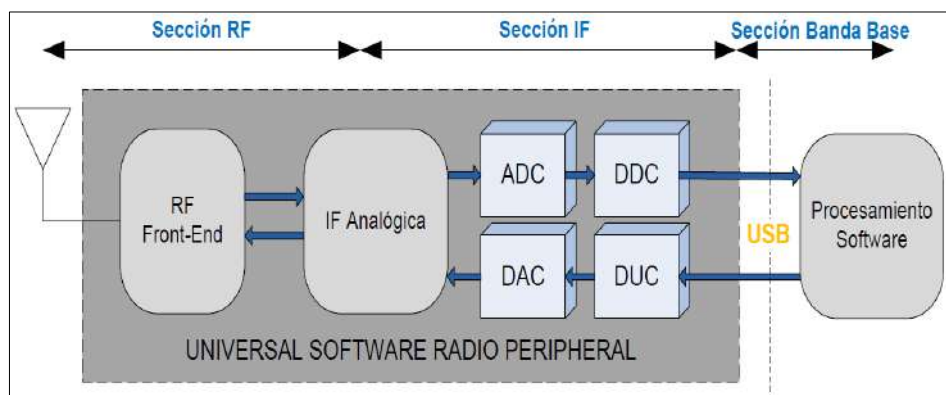


Figura 19-2: Bloques principales de una tarjeta USRP.

Fuente: Pinar & Murillo, 2011, p. 18.

Una tarjeta USRP puede tener varias interfaces de transmisión y recepción. Además, los relojes y osciladores de cada interfaz son coherentes, por tanto, la tarjeta puede transmitir y recibir señales al mismo tiempo; lo cual permite implementar sistemas MIMO (Múltiples Entradas, Múltiples Salidas).

2.4.1. Tarjeta NI USRP 2932

Con la definición de SDR, National Instruments ha venido desarrollando tarjetas USRP de propósito general, convirtiéndose en plataformas flexibles y adaptables al momento de generar prototipos para sistemas de comunicación por radio.

Entre las ventajas que ofrecen estos dispositivos, se encuentra el uso de un lenguaje de programación gráfico a través de bloques funcionales con el software LabVIEW. Esto permite que se pueden añadir algoritmos para el procesamiento de las señales en tiempo real (Vera & Mora, 2017, p. 44).

2.4.1.1. Estructura física de la tarjeta NI USRP-2932

La tarjeta NI USRP-2932 se puede apreciar en la Figura 20-2. Esta permite trabajar con frecuencias centrales desde 400MHz hasta 4.4 GHz, cubriendo las bandas de radar UHF, L y S. Para su funcionamiento, la tarjeta USRP se apoya en un sistema computacional (computador personal) que aloja los bloques funcionales del sistema a través del software LabVIEW.



Figura 20-2: Tarjeta NI USRP 2932.

Fuente: <https://www.ni.com/es-cr/support/model.usrp-2932.html>.

En la Figura 21-2, se detallan las interfaces físicas presentes en la tarjeta NI USRP 2932.

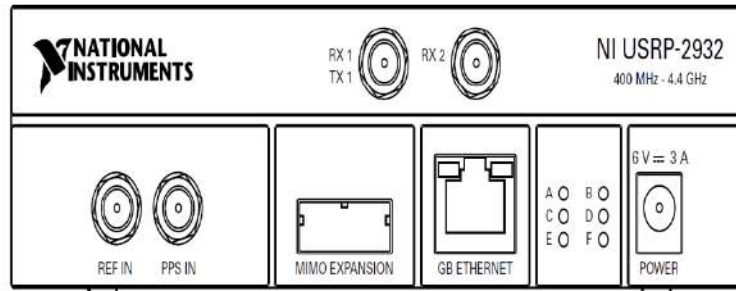


Figura 21-2: Vista frontal de la tarjeta NI USRP 2932.

Fuente: National Instruments, 2017a: p.15.

Entre las interfaces más importantes de la parte frontal tenemos:

- TX1/RX1: terminal SMA (50Ω) para entrada y salida RF.
- RX2: terminal SMA (50Ω) para entrada RF.
- GB ETHERNET: Puerto Gigabit RJ-45 para conectar la USRP con un computador.
- POWER: Entrada de voltaje DC (6V-3A).

En la Figura 22-2 se aprecia la parte posterior de la tarjeta USRP, donde existe un terminal de entrada SMA (50Ω) para señales GPS.

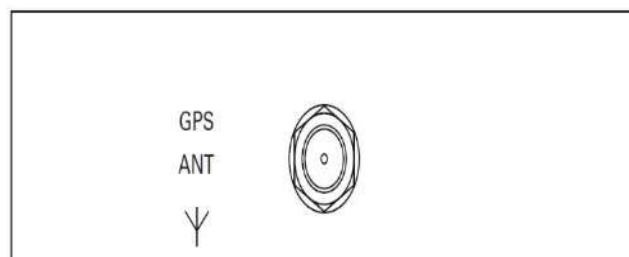


Figura 22-2: Vista trasera de la tarjeta NI USRP 2932.

Fuente: National Instruments, 2017a: p.15.

2.4.1.2. Esquema funcional de la tarjeta NI USRP-2932

La tarjeta NI USRP-2932 tiene dos modos de operación separados: transmisión y recepción. Dependiendo de su configuración en software, la tarjeta USRP puede operar solo en uno de los dos modos de operación o simultáneamente en ambos. Además, el switch o conmutador RF permite que una misma antena sea compartida para que se realicen operación de transmisión y recepción.

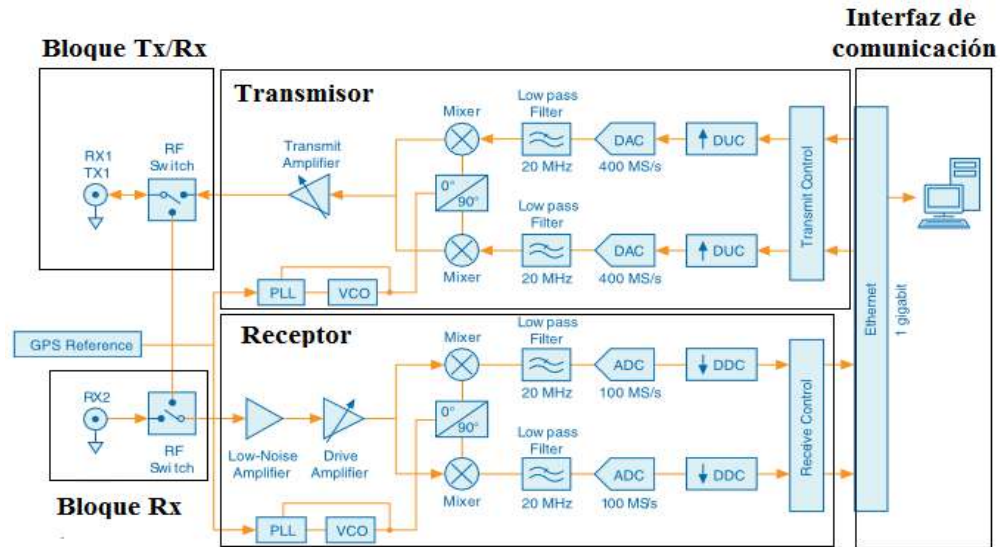


Figura 23-2: Diagrama de bloques funcional de la tarjeta NI USRP 2932.

Fuente: <https://www.ni.com/documentation/en/usrp-software-defined-radio-device/latest/usrp-2932/block-Diagram/>

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Como se puede observar en la Figura 23-2, la estructura interna de la tarjeta NI USRP 2932 cuenta con 5 bloques bien definidos:

- El bloque de transmisión.
- El bloque de recepción.
- La interfaz de comunicación entre la tarjeta USRP y el ordenador. Es una comunicación full-dúplex mediante un puerto Gigabit Ethernet.
- Una interfaz adaptable para transmisión o recepción de señales.
- Una interfaz únicamente de recepción.

Además de estos bloques, la tarjeta USRP también cuenta con un bloque que permite sincronizar los canales de transmisión y recepción mediante una señal de referencia GPS.

2.4.1.3. Características

En la Tabla 3-2 y 4-2 se describen las especificaciones técnicas del transmisor y receptor de la tarjeta NI USRP 2932.

Tabla 3-2: Especificaciones del transmisor de la tarjeta NI URSP 2932

Rango de frecuencias	0.4 GHz – 4.4 GHz
Pasos de frecuencia	<1kHz

Máxima potencia de salida	50 mW-100 mW (17 dBm-20dBm)
Rango de Ganancia	0 dB-30dB
Pasos de Ganancia	0.5 dB
Máximo ancho de banda instantáneo en tiempo real	
Muestras de 16 bit	20 MHz
Muestras de 8 bit	40 MHz
Velocidad de muestreo máxima I/Q	
Muestras de 16 bit	25 MS/s
Muestras de 8 bit	50 MS/s
Convertidor Digital-Analógico (DAC)	2 canales, 400 MS/s, 16 bit

Fuente: National Instruments, 2017b, p. 2.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Tabla 4-2: Especificaciones del receptor de la tarjeta NI URSP 2932

Rango de frecuencias	0.4 GHz – 4.4 GHz
Pasos de frecuencia	<1kHz
Máxima potencia de entrada	50 mW-100 mW (17 dBm-20dBm)
Rango de Ganancia	0 dBm
Figura de ruido	5 dB-7dB
Máximo ancho de banda instantáneo en tiempo real	
Muestras de 16 bit	20 MHz
Muestras de 8 bit	40 MHz
Velocidad de muestreo máxima I/Q	
Muestras de 16 bit	25 MS/s
Muestras de 8 bit	50 MS/s
Convertidor Analógico-Digital (ADC)	2 canales, 100 MS/s, 14 bit

Fuente: National Instruments, 2017b, p. 2.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

La tarjeta NI USRP-2932 se conecta al ordenador a través de un puerto Gigabit Ethernet para garantizar la mayor tasa de transferencia. Si se trabaja con muestras de 16 bit, el ancho de banda máximo es de 20 MHz con una velocidad de muestreo de 25 MS/s. Pero, este modelo de tarjeta USRP permite trabajar con muestras de 8 bits con una velocidad de muestreo de 50 MS/s con lo cual el ancho se duplica a 40 MHz (National Instruments, 2017b, p. 2).

El ancho de banda instantáneo, la velocidad de muestreo y el ancho de las muestras también dependen de algunos factores como el rendimiento del procesador del computador y la configuración de la red entre la USRP y el ordenador (National Instruments, 2017b, p. 2).

2.5. LabVIEW

LabVIEW es un software de ingeniería de sistemas para aplicaciones que necesitan controlar los componentes de hardware y acceder a los datos del sistema en tiempo real (National Instruments, 2020a, p. 1).

LabVIEW trabaja con un lenguaje de programación gráfico desarrollado por National Instruments en el que se manejan bloques e iconos conectados entre sí para crear distintos tipos de aplicaciones. De esta forma se reemplazan las líneas de código tradicionales y se brinda una mejor visualización esquemática de los prototipos desarrollados en el software.

2.5.1. *LabVIEW y otros lenguajes de programación*

Si bien el lenguaje de programación gráfico es adecuado para el desarrollo de ciertos prototipos, no necesariamente es ideal para algunas tareas. Si se necesitan insertar algoritmos, fórmulas y ecuaciones matemáticas la mejor manera de hacerlo es a través de líneas de texto (National Instruments, 2020b, p. 1). Por tanto, LabVIEW incorpora ciertas estructuras que permiten vincular los datos con otros lenguajes de programación. Entre las más conocidas están:

- El nodo de fórmula: utiliza la misma sintaxis del lenguaje C para definir fórmulas, ecuaciones, constantes, etc.
- El nodo MathScript: es un nodo de programación orientado a las matemáticas y utiliza la misma sintaxis de los archivos .m de MATLAB. La principal desventaja es que dicho nodo no cuenta con todas las funcionalidades presentes en MATLAB.

LabVIEW está disponible para plataformas basadas en Windows, UNIX, MAC OS y GNU/Linux.

2.6. MATLAB

MATLAB es la abreviatura de “Matrix Laboratory” o Laboratorio Matricial. Es un software que permite trabajar con números escalares y complejos para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices (Casado, 2017, p. 4).

Entre las principales novedades que ofrece MATLAB están:

- Cálculos numéricos avanzados con números reales y complejos.
- Manipulación de vectores y matrices.
- Implementación de algoritmos.

- Gráficos de funciones complejas.
- Procesamiento digital de señales

MATLAB tiene su propio lenguaje de programación, el lenguaje “.m”. Pero esto no implica que no pueda relacionarse con otros programas que no utilizan este lenguaje de programación.

MATLAB está disponible para plataformas con sistemas operativos Windows, UNIX, MAC OS y GNU/Linux en algunas de sus distribuciones.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Introducción

En el presente capítulo se describe el proceso llevado a cabo en el diseño del sistema para caracterizar materiales dieléctricos con diferentes técnicas SDRadar. Además, se explica la estructura y funcionalidad de los principales bloques que forman parte del sistema, así como el proceso llevado a cabo al desarrollar el modelo matemático que permite estimar la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de los materiales dieléctricos en estudio mediante las diferentes técnicas SDRadar.

En base a los requerimientos del sistema SDRadar, el presente capítulo también describe las características de los componentes de hardware y software utilizados en la fase de implementación, así como la configuración y conexión de los mismos para garantizar la obtención de los resultados esperados.

3.2. Metodología de la Investigación

El punto de partida para desarrollar el trabajo de titulación es la fase de investigación, la cual brinda un enfoque para comprender las bases teóricas relacionadas con sistemas SDRadar y aplicarlas para la caracterización de materiales a partir del análisis de señales electromagnéticas.

3.2.1. Investigación bibliográfica

Este tipo de investigación permitió discernir la información sobre trabajos similares desarrollados con anterioridad y brindar un enfoque general para aplicar los conceptos de la literatura al diseño del sistema SDRadar.

Las fuentes de investigación bibliográfica fueron: libros electrónicos, artículos científicos, trabajos de titulación, manuales de laboratorios, hojas de datos de dispositivos e internet.

3.2.2. Investigación experimental

Este tipo de investigación permitió estimar algunas características de materiales dieléctricos a partir de la experimentación y observación de las alteraciones que sufren las señales radar cuando interactúan con medios que tengan diferentes propiedades electromagnéticas.

3.3. Proceso para el desarrollo del trabajo de titulación

El proceso del trabajo de titulación se ha desarrollado de acuerdo a los objetivos específicos planteados al inicio del mismo y se han definido 3 fases para dar cumplimiento a dichos objetivos, tal y como se detalla en el Gráfico 1-3.

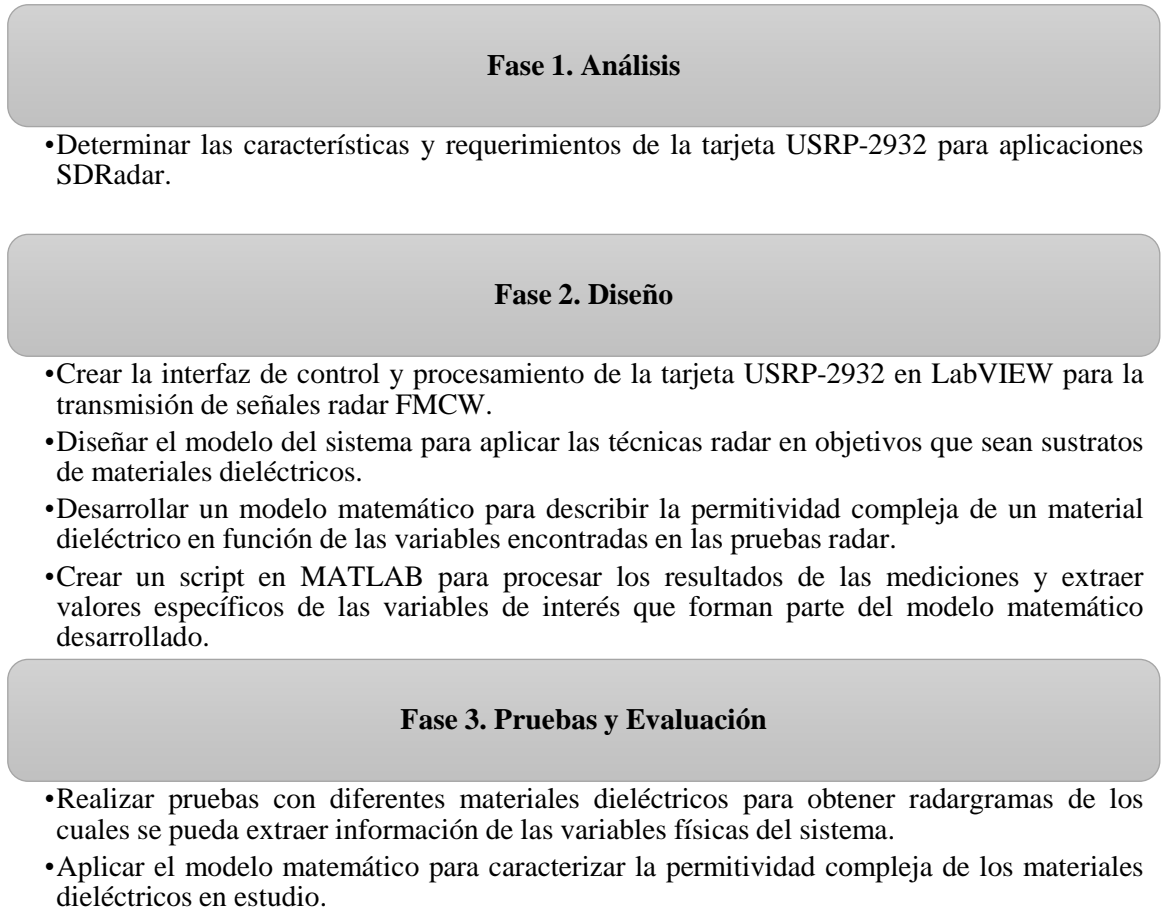


Gráfico 1-3: Etapas del trabajo de titulación.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En el Gráfico 2-3 se detalla la secuencia de los procesos utilizados para el desarrollo del trabajo de titulación.

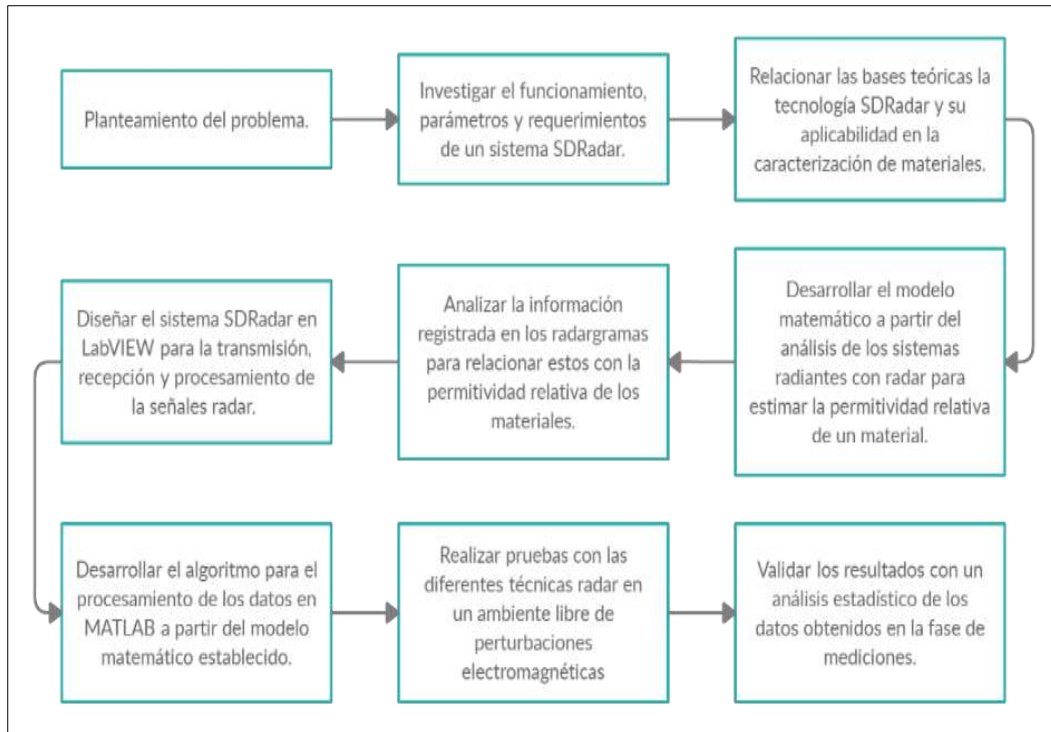


Gráfico 2-3: Diagrama secuencial de los pasos para la realización del trabajo de titulación.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.4. Parámetros del sistema SDRadar

En esta sección se detallan las características de operación de la tecnología SDRadar utilizada para el desarrollo del trabajo de titulación.

3.4.1. Resolución máxima

La tarjeta NI USRP-2932 puede trabajar con dos anchos de banda instantáneo dependiendo del tamaño de muestra utilizada. Si se trabaja con una muestra de 8 bits, el máximo ancho instantáneo es de 40 MHz, y si se trabaja con muestras de 16 bits, se entrega un ancho de banda instantáneo de 20 MHz. La Ecuación 1-3 muestra la resolución de un sistema radar.

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

Ecuación 1-3: Resolución de un sistema radar FMCW.

Siendo:

- ΔB : la resolución del sistema.
- B : el ancho de banda.
- c : la velocidad de la luz

$$\Delta B_{16 \text{ bits}} = \frac{3 \times 10^8}{2(20 \times 10^6)} = 7.5 \text{ metros}$$

$$\Delta B_{8 \text{ bits}} = \frac{3 \times 10^8}{2(40 \times 10^6)} = 3.75 \text{ metros}$$

Al desarrollar la Ecuación 1-3 se puede observar que la tarjeta USRP-2932 ofrece una resolución máxima de 3.75 metros. Es decir, los objetivos entre 0 y 3.75 metros serán posicionados a una misma distancia, y así sucesivamente para los múltiplos de esta resolución.

3.4.2. Ancho de banda

Una señal radar FMCW cambia linealmente su frecuencia en función del tiempo. La señal inicia a transmitirse a una frecuencia inicial f_{min} aumentando hasta una frecuencia f_{max} . Por tanto, la señal FMCW trabaja dentro de un ancho de banda B que depende de las frecuencias de operación inicial y final. La Ecuación 2-3 indica como calcular el ancho de banda de una señal FMCW.

$$B = f_{max} - f_{min}$$

Ecuación 2-3: Ancho de banda en un sistema radar FMCW.

Las características de la tarjeta permiten utilizar dos anchos de banda diferentes, en el presente trabajo se utilizó el máximo ancho de banda instantáneo permitido por la tarjeta NI USRP-2932 que es de 40 MHz.

$$B = 40 \text{ MHz} - 0 \text{ MHz} = 40 \text{ MHz}$$

3.5. Modelamiento matemático para la caracterización de materiales dieléctricos.

Luego de haber realizado la investigación bibliográfica sobre sistemas radar, se plantearon tres posibles escenarios de pruebas para caracterizar la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de un material dieléctrico a partir del coeficiente de reflexión o transmisión, según sea el escenario

planteado. En la presente sección se describen las bases teóricas para establecer el modelo matemático que relacione la permitividad de un dieléctrico con la información registrada en los radargramas.

3.5.1. Coeficientes de reflexión y transmisión

Cuando una señal electromagnética que se propaga en un medio cualquiera se encuentra con una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos de este, se producen fenómenos reflexión y refracción como se muestra en la Figura 1-3. Estos fenómenos se dan en mayor o menor proporción dependiendo del contraste entre las propiedades electromagnéticas de las estructuras.

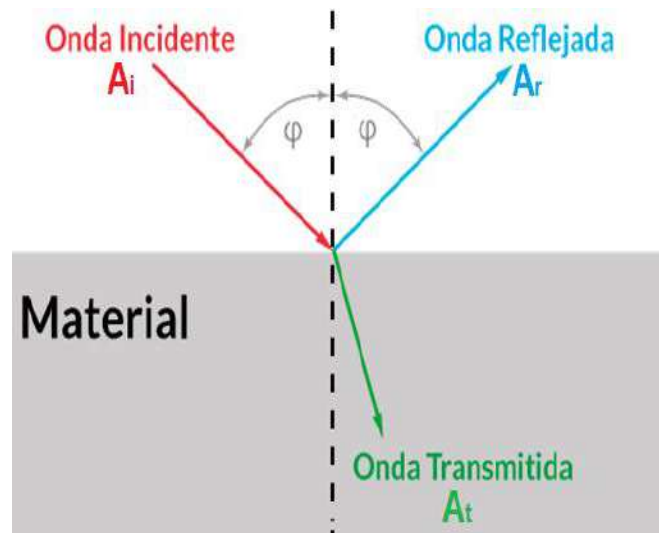


Figura 1-3: Onda incidente, reflejada y transmitida en estructuras con parámetros electromagnéticos distintos.

Fuente: <https://www.prored.es/wp-content/uploads/2018/07/prored-reflexion-onda-electromagnetica-v2.png>.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

En estas condiciones, el coeficiente de reflexión (Γ) indica la cantidad de onda reflejada y el coeficiente transmisión (T) indica la cantidad de onda transmitida.

3.5.1.1. Coeficiente de reflexión

El coeficiente de reflexión (Γ), en términos de amplitud, puede ser relacionado con la amplitud de onda reflejada (A_{rx}), la amplitud de la onda incidente (A_i) y un factor K que expresa pérdidas o ganancias generadas por el sistema, tal como se aprecia en la Ecuación 3-3.

$$A_{rx}^2 = \Gamma * K * A_i^2$$

Ecuación 3-3: Amplitud de una señal reflejada.

El factor K depende de algunos parámetros como: el rango del sistema radar (distancia entre la antena de transmisión/recepción y el material reflectante), las condiciones ambientales y propiedades electromagnéticas del medio de propagación, las características de las antenas y los parámetros de adquisición de datos (Vega, 2001, p.529).

Si una señal se propaga en el espacio y choca en la superficie de un conductor eléctrico perfecto (PEC) se produce una reflexión total de la señal, es decir, el coeficiente de reflexión toma un valor equivalente a la unidad. Por tanto, la amplitud de la señal reflejada en el PEC (A_R) se puede expresar como se indica en la Ecuación 4-3.

$$A_R^2 = K * A_i^2$$

Ecuación 4-3: Amplitud de una señal reflejada en un PEC.

Por otro lado, si la misma señal choca en la superficie de otro material, el porcentaje de onda reflejada depende del contraste entre las propiedades electromagnéticas del medio de propagación y las del material reflectante. En estas condiciones, el coeficiente de reflexión toma un valor entre 0 y 1 dependiendo de dicho contraste, y la amplitud de la señal reflejada en el material (A_r) puede ser expresada según se indica en la Ecuación 5-3.

$$A_r^2 = \Gamma * K * A_i^2$$

Ecuación 5-3: Amplitud de una señal reflejada en un dieléctrico.

Si se aplican las mismas condiciones de medición, tanto para el PEC y para otro material, el factor K se mantiene constante en ambos casos. Con esta consideración, se podría relacionar la Ecuación 4-3 y 5-3 para estimar el valor del coeficiente de reflexión como se muestra en la Ecuación 6-3.

$$\Gamma = \frac{A_r^2}{A_R^2}$$

Ecuación 6-3: Coeficiente de reflexión en un sistema radar.

Donde:

- A_r : es la amplitud de la señal para la reflexión en la superficie del material dieléctrico.
- A_R : es la amplitud de la señal para la reflexión en la superficie de un PEC.

3.5.1.2. Coeficiente de transmisión

El coeficiente de transmisión (T), en términos de amplitud, puede ser relacionado con la amplitud de onda transmitida (A_{tx}), la amplitud de la onda incidente (A_i) y un factor K que expresa pérdidas o ganancias generadas por el sistema, tal como se muestra en la Ecuación 7-3.

$$A_{tx}^2 = T * K * A_i^2$$

Ecuación 7-3: Amplitud de una señal transmitida.

En este caso, el factor K depende de algunos parámetros como: la distancia entre la antena de transmisión y recepción, las condiciones ambientales y propiedades electromagnéticas del medio de propagación, las características de las antenas y los parámetros de adquisición de datos.

Si una señal se transmite directamente entre la antena de transmisión y recepción, sin ningún obstáculo entre ellas existe una transmisión total, es decir, el coeficiente de transmisión es equivalente a la unidad. Por tanto, la amplitud de la señal medida (A_T) se puede expresar como se indica en la Ecuación 8-3.

$$A_T^2 = K * A_i^2$$

Ecuación 8-3: Amplitud de una señal transmitida en un solo medio de propagación.

Por otro lado, si la señal cambia a otro medio de propagación con propiedades electromagnéticas diferentes a las iniciales, una parte de ella se refleja hacia la fuente y la otra continua con su trayectoria. La cantidad de onda transmitida depende del contraste entre los parámetros electromagnéticos de los dos medios. En estas condiciones, la amplitud de la señal transmitida (A_t) luego de atravesar la estructura del material dieléctrico se puede expresar tal y como se indica en la Ecuación 9-3.

$$A_t^2 = T * K * A_i^2$$

Ecuación 9-3: Amplitud de una señal transmitida entre dos medios de propagación.

Al igual que en el caso del coeficiente de reflexión, si se mantiene constantes todos los parámetros que hacen variar a la función K , se puede calcular el valor del coeficiente de transmisión como se expresa en la Ecuación 10-3.

$$T = \frac{A_t^2}{A_T^2}$$

Ecuación 10-3: Coeficiente de transmisión.

Donde:

- A_T : es la amplitud de la señal medida luego de propagarse en un mismo medio.
- A_t : es la amplitud de la señal medida luego de cambiar de un medio de propagación a otro con propiedades electromagnéticas diferentes.

3.5.2. Técnicas SDRadar para la caracterización de materiales dieléctricos

La caracterización de las propiedades electromagnéticas de los materiales dieléctricos se llevó a cabo mediante tres técnicas SDRadar diferentes, las cuales se detallan en las secciones siguientes.

3.5.2.1. Técnica SDRadar 1

En este apartado se desarrolla el modelamiento matemático para caracterizar la parte real de la permitividad relativa de un material dieléctrico. El análisis relaciona la amplitud de las ondas incidentes y reflejadas (coeficiente de reflexión) con la parte real de la permitividad relativa.

De acuerdo a la Ecuación 6-3, el coeficiente de reflexión puede ser calculado a partir de la relación entre la amplitud de la señal reflejada en el dieléctrico y la amplitud de la señal reflejada en un conductor eléctrico perfecto (señal de calibración). Dado que en la naturaleza no existe un PEC, se utilizó un conductor eléctrico de cobre, el cual tiene una alta conductividad en comparación con otros materiales conductores. Por tanto, el escenario utilizado para registrar la amplitud de la señal de calibración se muestra en la Figura 2-3.

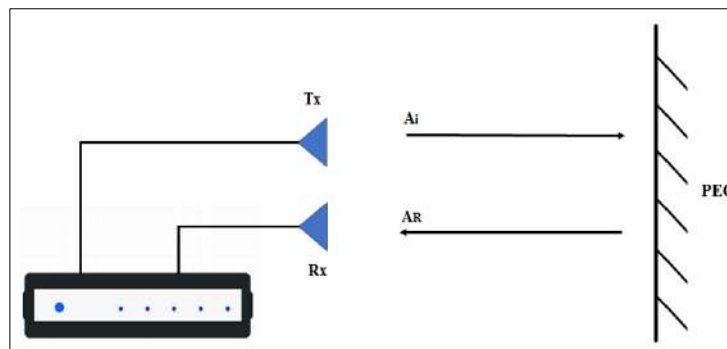


Figura 2-3: Escenario para la calibración del coeficiente de reflexión.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Una vez registrada la señal de calibración, y conservando el mismo escenario de la Figura 2-3, se debe reemplazar la placa conductora de cobre por un sustrato de material dieléctrico para obtener la amplitud de la señal reflejada en la superficie del nuevo material reflectante tal y como se aprecia en la Figura 3-3.

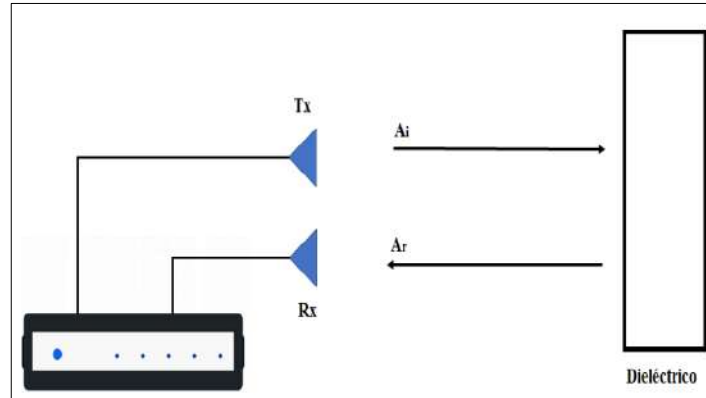


Figura 3-3: Reflexión de la señal en la superficie de un de material dieléctrico.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En estas condiciones y luego de haber registrado las respectivas señales, el coeficiente de reflexión es calculado con la Ecuación 11-3.

$$\Gamma = \frac{A_r^2}{A_R^2}$$

Ecuación 11-3: Coeficiente de reflexión en el sistema SDRadar propuesto.

Siendo:

- A_r : la amplitud de la señal luego de reflejarse en la superficie de un material dieléctrico.
- A_R : la amplitud de la señal luego de reflejarse en la superficie del conductor eléctrico de cobre.

En la Figura 3-3 la señal incidente cambia de un medio de propagación 1 (en este caso el aire con una permitividad relativa $\epsilon_1 = 1$) a otro medio de propagación 2 (material dieléctrico con una permitividad relativa ϵ_2'). Con estas consideraciones la Ecuación 43-2 que relaciona el coeficiente de reflexión con la permitividad relativa de dos medios de propagación diferentes se puede simplificar y mostrarse como se indica en la Ecuación 12-3.

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon_2'} - 1}{\sqrt{\varepsilon_2'} + 1}$$

Ecuación 12-3: Coeficiente de reflexión con la técnica SDRadar 1.

Siendo ε_2' la parte real de la permitividad relativa del dieléctrico que a su vez se puede expresar en función del coeficiente de reflexión, tal como se muestra en la Ecuación 13-3.

$$\varepsilon_2' = \left[\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right]^2$$

Ecuación 13-3: Permitividad relativa con la técnica SDRadar 1.

3.5.2.2. Técnica SDRadar 2

En esta sección se desarrolla el modelamiento matemático para caracterizar la tangente de pérdidas y consecuentemente la parte imaginaria de la permitividad relativa de materiales dieléctricos en base a un análisis de las pérdidas generadas por el sustrato dieléctrico cuando la señal radar atraviesa su estructura.

Las pérdidas generadas por la estructura del material dieléctrico provocan una atenuación de las señales incidentes. Si en principio se registra una señal que se refleja sobre la superficie de un conductor eléctrico con una alta conductividad (ver Figura 2-3) y luego, se coloca un sustrato de material dieléctrico delante de ese conductor eléctrico (ver Figura 4-3) se puede apreciar el fenómeno de atenuación al comparar las señales recibidas en cada caso.

Considerando la configuración mostrada en la Figura 4-3, la energía de la onda reflejada es la suma de dos contribuciones significantes, una dada por el coeficiente de reflexión cuando la señal se refleja en la superficie del material dieléctrico, y otra cuando la señal incidente atraviesa el dieléctrico y posteriormente se refleja en la placa conductora para nuevamente regresar hacia la fuente. La Ecuación 13-2 describe matemáticamente este fenómeno y en la Figura 16-2 se muestra gráficamente el radargrama correspondiente para este caso, donde el primer y segundo pico de potencia representan dichas reflexiones.

Debido a la resolución de las tarjetas NI-URSP 2932 (resolución de 3.75m con un BW=40MHz), es imposible obtener el radargrama mencionado, pues el dieléctrico debería tener un espesor equivalente o superior a la resolución indicada. En el presente trabajo de titulación, la contribución de energía

producida por la reflexión en el conductor eléctrico de cobre tendrá lugar a la misma distancia de la reflexión producida por la superficie del dieléctrico, por tanto, las dos contribuciones de energía se suman y se hace imposible obtener el radargrama de la Figura 16-2.

Con una resolución adecuada del sistema radar la suma de los dos picos de potencia mencionados es aproximadamente equivalente a la unidad si se considera un ambiente libre de pérdidas. Pero según la teoría de propagación de ondas planas, cuando la señal viaja en un medio diferente al espacio libre se ve afectada por la constante de atenuación α , disminuyendo la amplitud de la señal recibida. Con estas consideraciones, la amplitud de la señal luego de atravesar el dieléctrico y regresar hacia la fuente se puede expresar como se indica en la Ecuación 14-3.

$$A_r^2 = \Gamma' * A_R^2 e^{-2\alpha h}$$

Ecuación 14-3: Amplitud de una señal reflejada con la técnica SDRadar 2.

Donde:

- A_r^2 : es la amplitud de la señal reflejada de la Figura 4-3.
- A_R^2 : es la amplitud de la señal al reflejarse en la superficie de un conductor eléctrico.
- h : es el espesor del dieléctrico en estudio.
- Γ' : es el coeficiente de reflexión entre en el material dieléctrico y el conductor eléctrico, $\Gamma' \approx 1$.

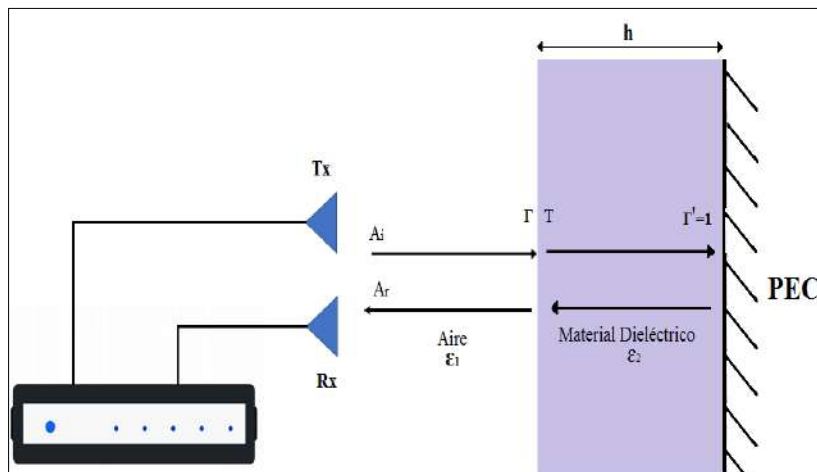


Figura 4-3: Reflexión de la señal en la superficie de una estructura de material dieléctrico con un conductor eléctrico de cobre por detrás.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Si se calcula el cociente entre las señales reflejadas de la Ecuación 14-3, se obtiene la expresión de la Ecuación 15-3 que corresponde al coeficiente de reflexión.

$$\frac{A_r^2}{A_R^2} = e^{-2\alpha h}$$

Ecuación 15-3: Relación entre las señales reflejadas y la constante de atenuación.

En este caso, la relación entre la amplitud de la señal reflejada sin el conductor eléctrico y la amplitud de la señal de calibración con el conductor eléctrico de cobre es un coeficiente de reflexión muy cercano a la unidad. Por comodidad el cociente entre las magnitudes mencionadas se expresará con Γ^* , tal y como se indica en la Ecuación 16-3.

$$\alpha = \frac{\ln(\Gamma^*)}{-2h}$$

Ecuación 16-3: Constante de atenuación.

Según Neri (2013, p. 237), para materiales dieléctricos de pocas pérdidas la tangente de pérdidas y la constante de atenuación pueden expresarse como se indica en las Ecuaciones 17-3 y 18-3.

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon}$$

Ecuación 17-3: Tangente de pérdidas.

$$\alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

Ecuación 18-3: Constante de atenuación.

Si se despeja la conductividad de la Ecuación 17-3 y se reemplaza en la Ecuación 18-3, se obtiene la expresión mostrada en la Ecuación 19-3.

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan(\delta) \omega \sqrt{\mu \epsilon}$$

Ecuación 19-3: Constante de atenuación.

Según Neri (2013, p. 237), un material dieléctrico es considerado de pocas pérdidas cuando tangente de pérdidas tiene un valor mucho menor a la unidad ($\sigma/\omega\epsilon \ll 1$), condición que cumplen la mayoría de

materiales dieléctricos (madera, mica, vidrio, papel, polietileno, polipropileno, porcelana, tierra seca, teflón, baquelita, fibra de vidrio, entre otros.)

A partir de la Ecuación 16-3 y 19-3, es posible expresar la tangente de pérdidas en función de parámetros conocidos como el espesor del dieléctrico, el coeficiente de reflexión y la permitividad relativa del material. Esta relación se detalla en la Ecuación 20-3.

$$\tan(\delta) = \frac{\ln(\Gamma)}{-2\pi f_c h \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\epsilon' u'}}$$

Ecuación 20-3: Expresión para la tangente de pérdidas.

En materiales dieléctricos, la permeabilidad relativa del material es igual a la unidad: $u' = 1$. Por tanto, la Ecuación 20-3 puede simplificarse a la Ecuación 21-3.

$$\tan(\delta) = \frac{\ln(\Gamma) c}{-2\pi f_c h \sqrt{\epsilon'}}$$

Ecuación 21-3: Expresión para la tangente de pérdidas con la técnica SDRadar 2.

Una vez establecido el valor de la tangente de pérdidas, se puede calcular la permitividad compleja del dieléctrico mediante la relación que se indica en la Ecuación 22-3.

$$\epsilon_r'' = \epsilon_r' * \tan(\delta)$$

Ecuación 22-3: Parte compleja de la permitividad relativa.

3.5.2.3. Técnica SDRadar 3

En esta sección se realiza el análisis correspondiente para caracterizar la parte real de la permitividad con otra técnica SDRadar. El modelamiento matemático busca relacionar el coeficiente de transmisión y la permitividad relativa del material dieléctrico mediante un radar biestático, asumiendo una separación máxima entre la antena de transmisión y la de recepción.

Según la Ecuación 10-3, para estimar el coeficiente de transmisión es necesario registrar una señal transmitida en línea de vista directa entre la antena transmisora y receptora (señal de calibración A_T). El escenario para registrar la señal de calibración se detalla en la Figura 5-3.

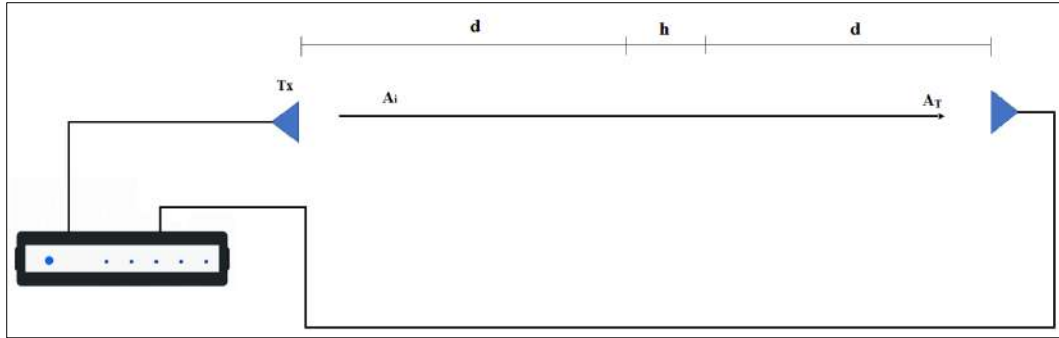


Figura 5-3: Escenario para la calibración del coeficiente de transmisión.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En estas mismas condiciones, sin cambiar la distancia de separación entre la antena de transmisión y recepción, parámetros de adquisición de datos y ganancias de transmisión/recepción se coloca el sustrato del material dieléctrico entre la antena de Tx y Rx como se muestra en la Figura 6-3 para registrar la cantidad de onda transmitida (señal transmitida A_t) a causa de la discontinuidad en los parámetros electromagnéticos cuando la señal atraviesa la estructura del dieléctrico.

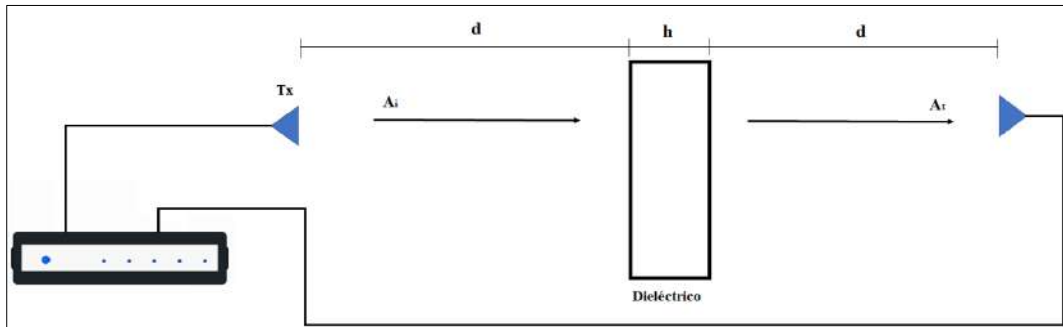


Figura 6-3: Escenario para medir la cantidad de energía transmitida cuando la señal radar pasa a través del dieléctrico.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En estas condiciones, el coeficiente de transmisión del sistema mostrado en la Figura 6-3 se puede expresar tal y como se indica en la Ecuación 23-3.

$$T^* = \frac{A_t^2}{A_r^2}$$

Ecuación 23-3: Coeficiente de transmisión.

Para este caso en particular, el coeficiente de transmisión (T^*) depende del contraste cuando la señal en el espacio libre atraviesa el dieléctrico y vuelve a propagarse nuevamente en el espacio libre. Si se

analiza la propagación en una estructura por capas (ver Figura 7-3) se puede expresar el coeficiente de transmisión en función de la permitividad de los medios contrastados.

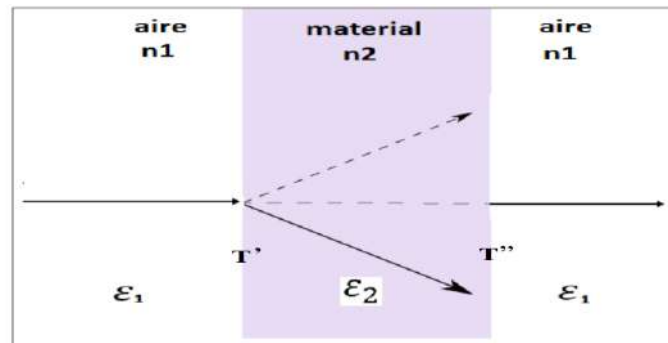


Figura 7-3: Propagación de una señal en una estructura compuesta por capas.

Fuente: Aldas, 2019, p. 36.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

De acuerdo a la Figura 7-3, la señal incidente pasa a través de una estructura compuesta por tres capas, generándose dos puntos de contraste en la trayectoria de dicha señal y, por tanto, el coeficiente de transmisión global de la estructura (T^*) es la multiplicación de los coeficientes de transmisión generados en cada punto de contraste. La expresión matemática de esta relación se indica en la Ecuación 24-3.

$$T^* = T' \times T''$$

Ecuación 24-3: Coeficiente de transmisión en una estructura por capas.

Siendo:

- T' : el coeficiente de transmisión cuando la señal que se propaga en el espacio libre cambia al dieléctrico.
- T'' : el coeficiente de transmisión cuando la que se propaga en el dieléctrico cambia al espacio libre.

En la Figura 7-3 la señal incidente cambia de un medio de propagación 1 (en este caso el aire con una permitividad relativa $\epsilon_1 = 1$) a otro medio de propagación 2 (material dieléctrico con una permitividad relativa ϵ_2') y finalmente la señal vuelve a propagarse en el aire. Con estas consideraciones, el coeficiente de transmisión mostrado en la Ecuación 44-2 puede simplificarse e incluirse en la Ecuación 24-3 dando como resultado la relación que me muestra en la Ecuación 25-3.

$$T^* = \frac{2\sqrt{\epsilon_2}}{1 + \sqrt{\epsilon_2}} * \frac{2}{1 + \sqrt{\epsilon_2}} = \frac{4\sqrt{\epsilon_2}}{(1 + \sqrt{\epsilon_2})^2}$$

Ecuación 25-3: Coeficiente de transmisión en el sistema SDRadar 3.

Si se despeja el valor de la parte real de la permitividad relativa del dieléctrico (ϵ_2), se obtiene la Ecuación 26-3 que expresa la permitividad en función del coeficiente de transmisión del sistema SDRadar.

$$\epsilon_2 = \left[\frac{-(2 T^* - 4) + \sqrt{(2 T^* - 4)^2 - 4(T^*)^2}}{2T^*} \right]^2$$

Ecuación 26-3: Permitividad relativa para el sistema SDRadar 3.

3.6. Diseño del sistema SDRadar

El diseño funcional del sistema SDRadar fue realizado con el uso del software de programación LabVIEW. En esta sección se detallan los bloques de envío, recepción, almacenamiento y procesamiento de las señales radar, así como los componentes de software y hardware que componen el sistema SDRadar.

3.6.1. Equipos y elementos requeridos por el sistema SDRadar

3.6.1.1. Características del computador

Según investigaciones similares con tecnología SDRdar y tarjetas USRP el computador debe tener las mejores características para garantizar una adquisición de datos adecuada. Las características del computador utilizado se detallan en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3: Características del computador

Características	Descripción
Procesador	Core i7
Memoria RAM	8 GB
Sistema Operativo	Windows 7 x 64 bits
Puerto para conectividad con la tarjeta USRP	Gigabit Ethernet o USB 3.0

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

3.6.1.2. Antena de transmisión y recepción

Las antenas utilizadas para la transmisión y recepción fueron dos antenas Yagi (ver Figura 8-3) con frecuencia central de operación en 2.45 GHz propiedad de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH. La antena es de tipo directiva con 3 elementos parásitos o directores que aumentan la ganancia y directividad. Además en la Tabla 2-3 se detallan las características de estas antenas.

Tabla 2-3: Características de las antenas Yagi

Parámetro	Descripción
Frecuencia central	2.45 GHz
Tipo	Antena Yagi
Constante Dieléctrica	4.7
Tangente de pérdidas	0.025
Espesor del dieléctrico	1.6 mm

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

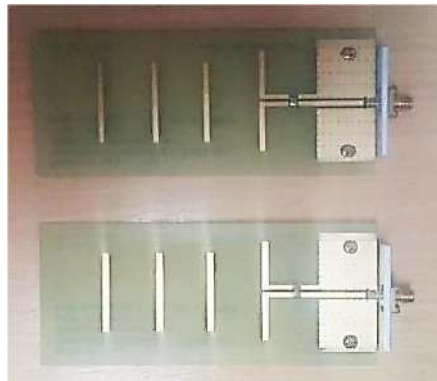


Figura 8-3: Antenas Yagi utilizadas.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.1.3. Cámara anecoica

Una cámara anecoica consiste en un espacio libre de perturbaciones electromagnéticas que absorbe la energía que incide sobre su estructura. Refleja el sonido proveniente del exterior y en el interior es capaz de absorber cualquier señal electromagnética evitando reflexiones indeseadas en sus paredes, simulando características similares a las del espacio libre (Ordóñez & Vélez, 2015, p. 1).

Las pruebas con el sistema SDRadar se realizaron dentro de la cámara anecoica de la Facultad de Informática y Electrónica (ver Figura 9-3) para evitar posibles perturbaciones electromagnéticas de

señales no deseadas que puedan afectar los resultados. Las dimensiones de la cámara anecoica son de 2.4 metros de largo, 0.8 metros de ancho y 0.8 metros de altura.



Figura 9-3: Cámara anecoica utilizada para las pruebas de caracterización de materiales dieléctricos con técnicas SDRadar.

Fuente: Suárez & Sarmiento, 2019, p. 30.

Las ondas electromagnéticas son sensibles a ciertas variables atmosféricas del medio de propagación. Por tal motivo se midieron las variables atmosféricas dentro de la cámara anecoica como se muestra en la Figura 10-3, y todas las pruebas de caracterización de materiales dieléctricos se realizaron bajo las mismas condiciones atmosféricas para evitar ambigüedad en los resultados.



Figura 10-3: Medición de las variables atmosféricas dentro de la cámara anecoica con los sensores de un teléfono.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Los resultados obtenidos luego de medir las variables atmosféricas se muestran en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Medidas de las variables atmosféricas dentro de la cámara anecoica.

Variable	Valor
Presión	230.5 hPa, 0.7209 atm.

Temperatura	21.8 °C
Humedad	40.1 %

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

3.6.2. Selección de muestras

Los materiales utilizados para la caracterización con técnicas SDRadar fueron seleccionados de acuerdo a su disponibilidad en el mercado y a la existencia de información sobre sus propiedades electromagnéticas (permitividad relativa y tangente de pérdidas). Los materiales dieléctricos con propiedades electromagnéticas conocidas permiten validar los resultados obtenidos en el trabajo de titulación. Las características de los materiales utilizados para la caracterización de sus propiedades electromagnéticas se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Características de los materiales utilizados.

Materiales	Dimensiones	Espesor
Baquelita	30 x 20 cm	15 mm
Madera de pino seca	30 x 25 cm	15 mm
Vidrio crudo	30 x 30 cm	15 mm
Conductor eléctrico de cobre	30 x 40 cm	35 μ m

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los tres primeros materiales de la Tabla 4-3 fueron caracterizados con las tres técnicas SDRadar mencionadas en el apartado del modelamiento matemático. Mientras que el conductor eléctrico de cobre fue utilizado en la calibración del sistema con la técnica SDRadar 1 y 2 para obtener una reflexión de aproximadamente el 100% de la señal incidente. En la Figura 11-3 se aprecia la estructura de los materiales utilizados.

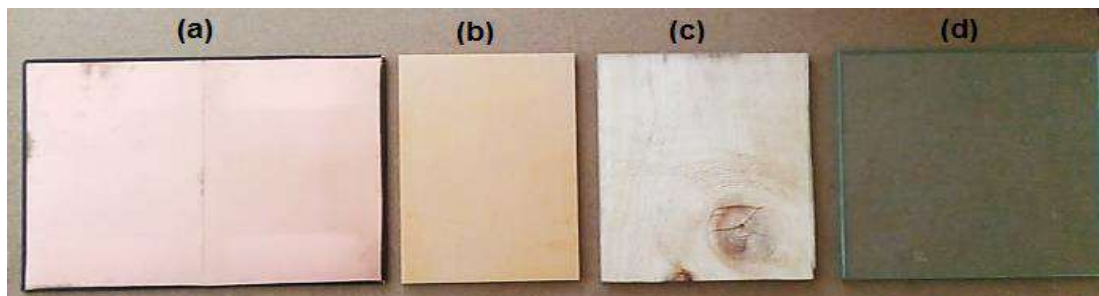


Figura 11-3: Vista superior de los materiales utilizados en el sistema SDRadar: (a) conductor eléctrico de cobre, (b) baquelita, (c) madera seca, (d) vidrio.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Los sustratos de materiales dieléctricos fueron seleccionados con el mismo espesor (ver Figura 12-3) para que las condiciones de medición sean las mismas para cada muestra.



Figura 12-3: Vista frontal de las muestras de materiales dieléctricos utilizadas (madera, baquelita y vidrio).

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.3. *Transmisor*

Los bloques básicos que conforman el transmisor se muestran en la Figura 13-3, los cuales deben ser configurados de acuerdo a las necesidades del proyecto e incluso se pueden añadir otros bloques para realizar tareas de sincronización.

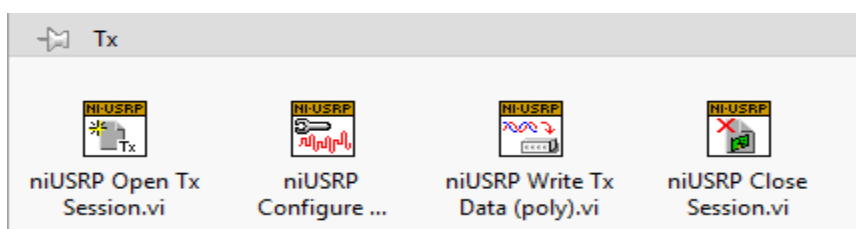


Figura 13-3: Bloques básicos de un transmisor en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

El transmisor fue diseñado dentro de una estructura secuencial plana, Figura 14-3, para asegurarse que todos los procesos se ejecuten en un orden específico. Las tramas de una estructura secuencial plana se ejecutan de izquierda a derecha.

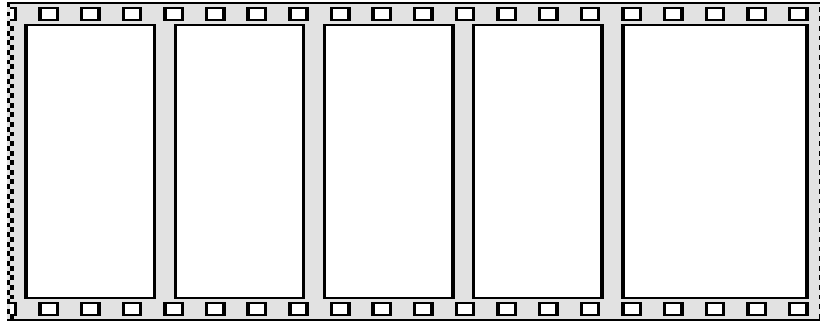


Figura 14-3: Estructura secuencial plana en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Para mayor comprensión, el transmisor fue dividido en etapas y en cada una se detallan sus características y funcionalidades.

3.6.3.1. Etapa 1 de transmisión

Esta etapa se dedica a generar la señal FMCW con los parámetros de configuración requeridos por el sistema SDRadar. Los parámetros que se deben ingresar en el panel frontal de LabVIEW para generar la señal FMCW se muestran en la Figura 15-3.

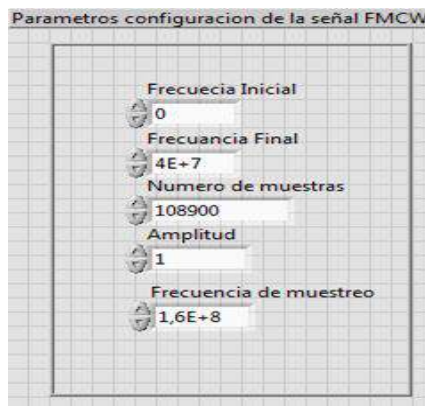


Figura 15-3: Parámetros de configuración de la señal FMCW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

La señal FMCW tiene una frecuencia inicial de 0 MHz y una frecuencia final de 40 MHz. La frecuencia de muestreo debe cumplir con la condición de Nyquist, siendo mayor o igual a dos veces el valor de la frecuencia superior. El proceso tomado para generar la señal FMCW se detalla en la Figura 16-3.

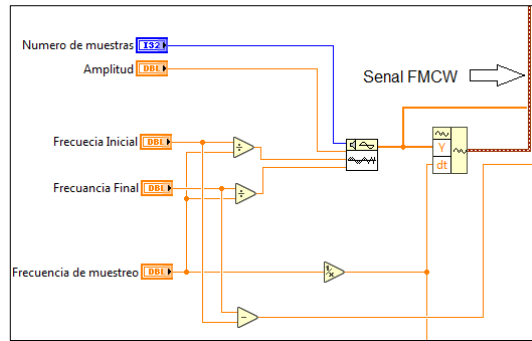


Figura 16-3: Diagrama para la generación de la señal FMCW en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.3.2. Etapa 2 de transmisión

En esta etapa se inicia la sesión de la tarjeta NI USRP-2932, por tanto, en esta sección se especifica la dirección IP del dispositivo. Para que se inicie la sesión, la tarjeta NI USRP-2932 se conectó a la PC a través de una conexión Gigabit Ethernet. El diagrama de esta etapa se muestra en la Figura 17-3.

3.6.3.3. Etapa 3 de transmisión

Esta etapa es la encargada de configurar los parámetros de operación de la tarjeta USRP para realizar la transmisión de señales (ver Figura 17-3).

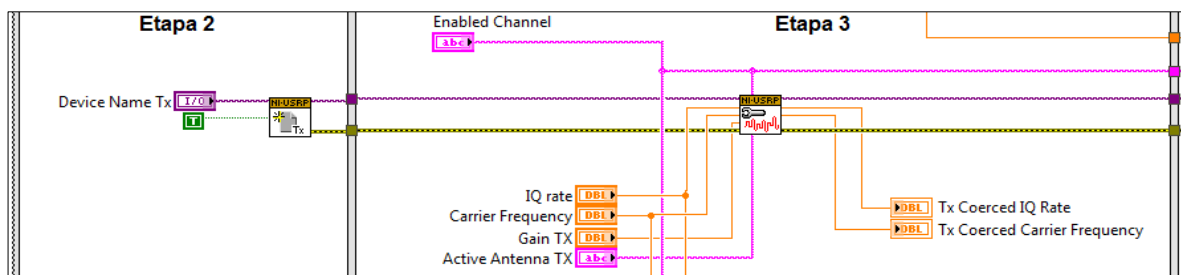


Figura 17-3: Etapa de inicialización y configuración de los parámetros operativos del transmisor en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Entre los parámetros que se configuraron están: la ganancia de la antena transmisora, la frecuencia portadora, la antena activa y la velocidad I/Q. Estos datos fueron por el usuario en el panel gráfico que se observa en la Figura 18-3.

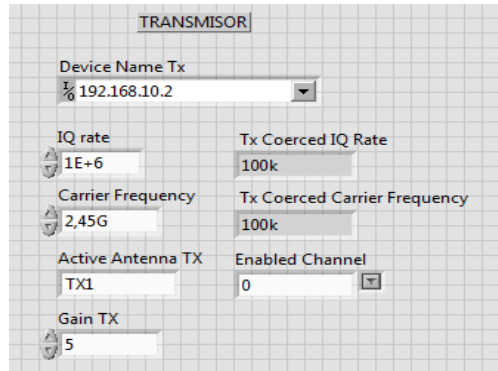


Figura 18-3: Parámetros de configuración del transmisor en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.3.4. Etapa 4 de transmisión

La Figura 19-3 muestra la estructura de esta etapa que es la encargada de sincronizar los canales de transmisión y recepción de la tarjeta NI USRP-2932. Se añadieron dos bloques, el primero establece el tiempo en el reloj del dispositivo para marcar la hora inicial de adquisición o generación de datos, y el segundo bloque especifica el tiempo de espera antes de iniciar a adquirir o generar la primera muestra de datos.

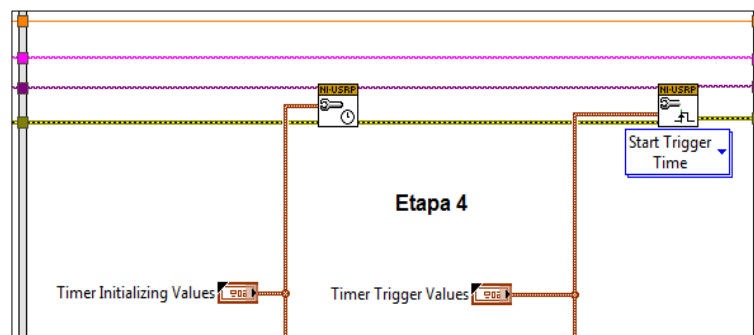


Figura 19-3: Bloque de sincronización para los canales de transmisión y recepción en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.3.5. Etapa 5 de transmisión

Es la encargada de la transmisión de la señal FMW en un canal de la tarjeta USRP, en este punto la señal generada en el ordenador pasa a la tarjeta USRP para que la energía se canalice y transmita a través de una antena hacia el espacio.

Esta etapa fue diseñada dentro de un ciclo while como se muestra en la Figura 20-3 para que la transmisión de la señal FMCW sea de forma continua.

3.6.3.6. Etapa 6 de transmisión

Esta etapa es la encargada de finalizar la sesión de la tarjeta NI USRP-2932 luego de haber terminado el envío de la señal FMCW. Si existe algún error durante cualquiera de las etapas se finaliza el proceso de transmisión.

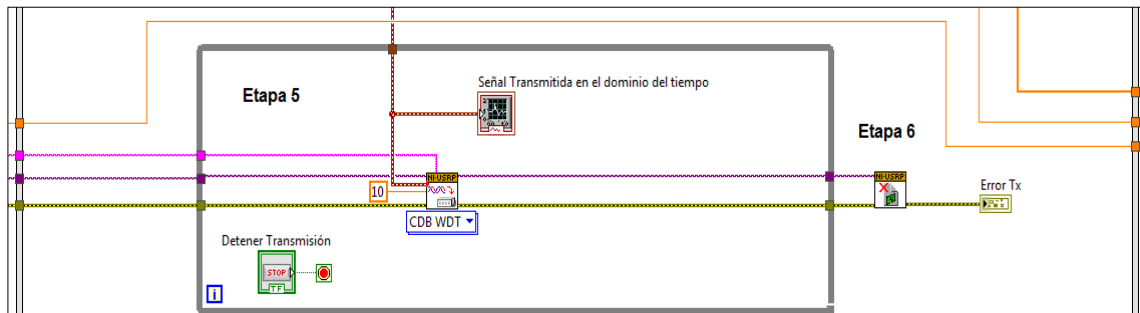


Figura 20-3: Bloque de transmisión y finalización de sesión en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.4. Receptor

Al igual que en el caso del transmisor, el diseño del receptor se realizó mediante bloques preestablecidos en LabVIEW. En la figura 21-3 se muestran los bloques básicos para configurar el receptor.



Figura 21-3: Bloques básicos de un receptor en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

El receptor comparte la misma estructura secuencial del transmisor debido a que la tarjeta NI USRP-2932 trabaja en modo full-dúplex. Las etapas definidas para el receptor se detallan en los siguientes apartados.

3.6.4.1. Etapa 1 de recepción

Es la encargada de establecer el inicio de sesión de la tarjeta USRP con la dirección IP del dispositivo. El bloque correspondiente de esta etapa se muestra en la Figura 22-3.

3.6.4.2. Etapa 2 de recepción

Esta etapa se encarga de configurar los parámetros de operación de la tarjeta USRP para la recepción de las señales FMCW.

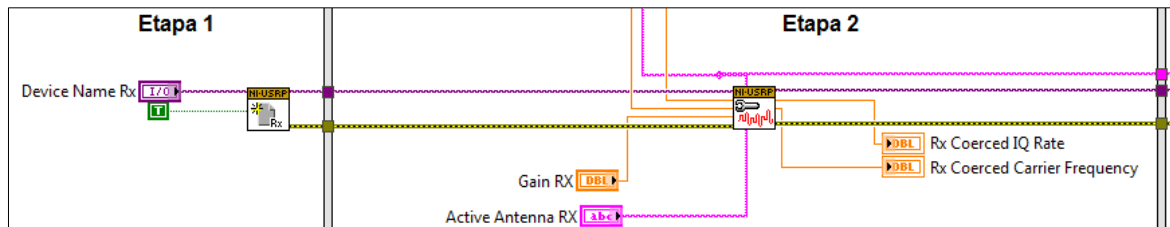


Figura 22-3: Etapa de inicialización y configuración de los parámetros operativos del receptor en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Los parámetros de configuración son los mismos que utiliza el transmisor a excepción de la antena activa utilizada para el proceso de recepción. Los parámetros definidos en el receptor para este trabajo de titulación se muestran en la Figura 23-3.

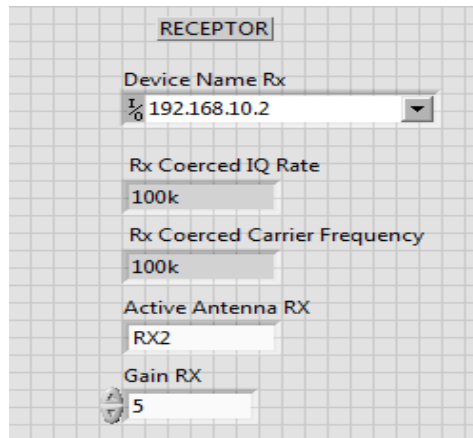


Figura 23-3: Parámetros de configuración del receptor en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.4.3. Etapa 3 de recepción

Esta etapa cumple la misma función que la etapa 4 de transmisión, ambas etapas (la del transmisor y del receptor) se encuentran dentro del mismo bloque secuencial y se configuraron con los mismos parámetros. La sincronización se compone de dos bloques (ver Figura 24-3), el primero establece el tiempo en el reloj del dispositivo para marcar la hora inicial de adquisición o generación de datos, y el segundo bloque especifica el tiempo de espera antes de iniciar a adquirir o generar la primera muestra de datos.

3.6.4.4. Etapa 4 de recepción

En la Figura 24-3 se muestra esta etapa, la cual se encarga de calcular el número de muestras para reconstruir la señal recibida e iniciar el proceso de recepción de señales.

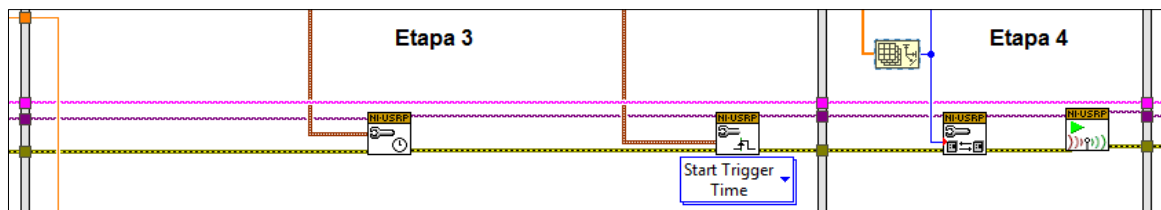


Figura 24-3: Etapa para la sincronización de los canales Tx/Rx y preparación del canal de recepción para la adquisición de señales.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.4.5. Etapa 5 de recepción

Esta etapa se muestra en la Figura 25-3 y se dedica a la recepción de la señal a través de un canal de la tarjeta USRP y enviarla al ordenador para su procesamiento. Al igual que en el caso del transmisor, esta etapa se encuentra dentro de un ciclo while para repetir continuamente el proceso de adquisición de señales.

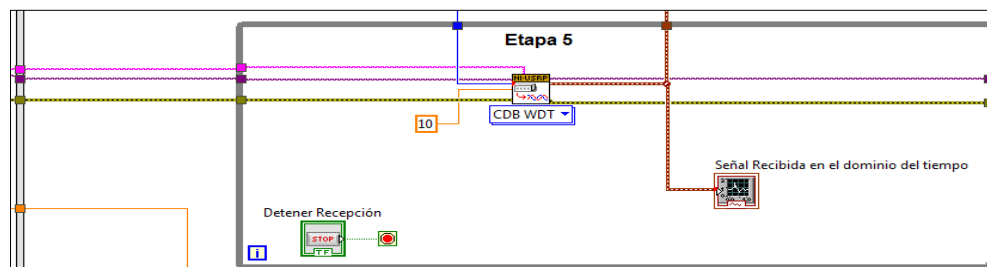


Figura 25-3: Etapa de recepción de señales de la tarjeta USRP en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.4.6. Etapa 6 de recepción

Esta es la etapa final del receptor, se compone de dos bloques que se muestran en la Figura 26-3. El primero se encarga de finalizar la adquisición de datos y el segundo cierra la sesión de la tarjeta USRP. Al igual que en el transmisor, si existe algún error durante cualquiera de las etapas, la sesión se cierra automáticamente.

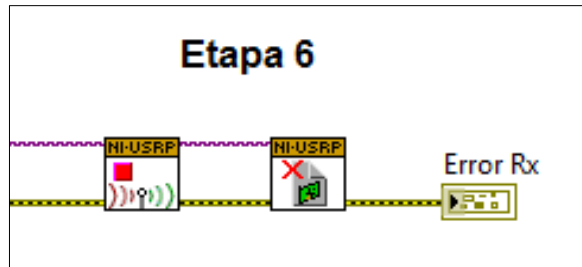


Figura 26-3: Bloques de finalización de sesión de la tarjeta USRP.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.5. Almacenamiento de las señales

Para aprovechar todos los recursos del computador, no se puede realizar el envío, recepción y procesamiento de las señales FMCW al mismo tiempo. Por tal motivo se hizo necesario almacenar las señales para realizar su procesamiento luego de la adquisición de los datos.

La Figura 27-3 muestra el bloque que se dedica a guardar las señales en archivos de texto diferentes, dependiendo de la técnica radar utilizada.

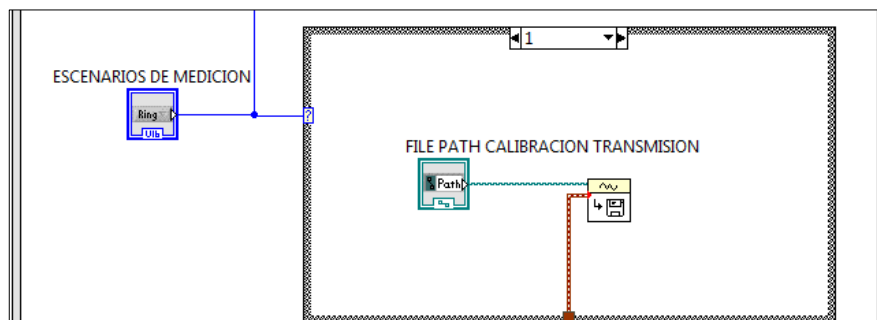


Figura 27-3: Bloque para el almacenamiento de las señales en LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Los escenarios de prueba que se establecieron para la caracterizaron de materiales dieléctricos se desprenden del apartado de modelamiento matemático y fueron los siguientes:

- Calibración del coeficiente de reflexión: se refiere al escenario para registrar la señal reflejada en la superficie del conductor eléctrico.
- Calibración del coeficiente de transmisión: hace referencia al escenario para registrar la señal cuando se transmite en línea de vista directa sin obstáculos.
- Reflexión sin PEC: cuando se registra la señal reflejada sobre la superficie del sustrato dieléctrico sin la lámina del conductor eléctrico detrás del material (Técnica SDRadar 1).
- Reflexión con PEC: cuando se registra la señal reflejada sobre la superficie del sustrato dieléctrico con la lámina del conductor eléctrico detrás del material (Técnica SDRadar 2).
- Transmisión: cuando se registra la señal transmitida luego de atravesar la estructura del material dieléctrico (Técnica SDRadar 3).

En la Figura 28-3 se muestra el bloque correspondiente del almacenamiento de las señales, el cual consiste en una estructura “case” para guardar las señales de interés en el archivo correspondiente.

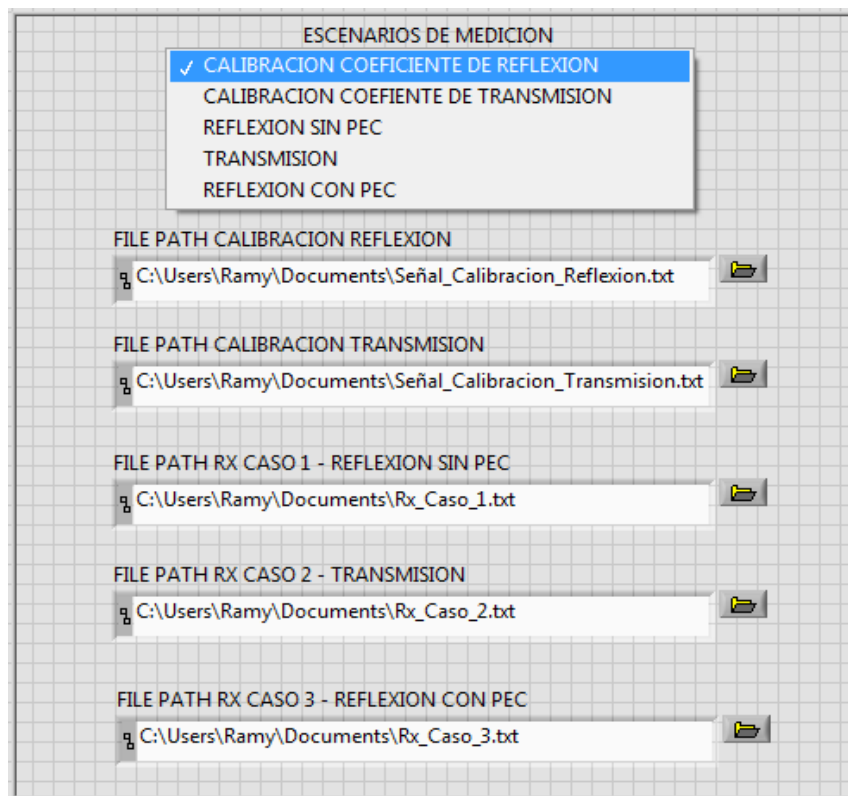


Figura 28-3: Panel para la selección del escenario de medición.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.6.6. Procesamiento de las señales

El procesamiento de las señales se realizó en LabVIEW con ayuda de un nodo MathScript donde se programó el algoritmo que contiene en el modelamiento matemático para caracterizar los materiales dieléctricos.

El bloque para el procesamiento de las señales se muestra en la Figura 29-3, el cual tiene como variables de entrada a las señales guardadas en el bloque de almacenamiento de datos, y las variables de salida son la permitividad relativa y la tangente de pérdidas del dieléctrico.

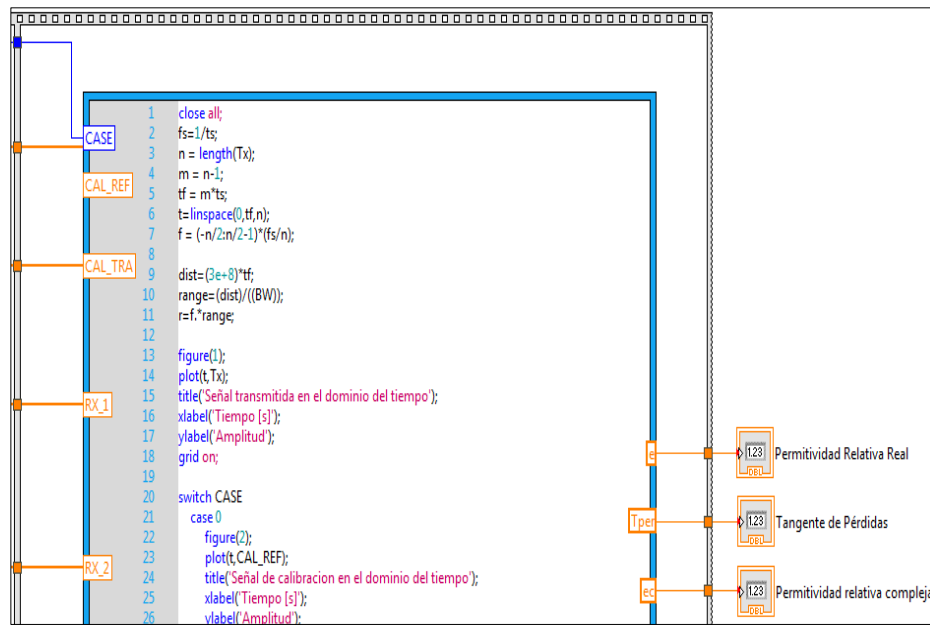


Figura 29-3: Bloque para el procesamiento de las señales en un nodo MathScript de LabVIEW.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Dependiendo de la técnica SDRadar utilizada, el algoritmo calcula la permitividad relativa o la tangente de pérdidas del material dieléctrico. El procedimiento general para caracterizar un dieléctrico con una técnica en particular se muestra en la Figura 30-3.

En inicio se selecciona la técnica SDRadar que se vaya a utilizar para guardar la señal de calibración (señal reflejada o transmitida) en un archivo de texto. A continuación, se registra la señal medida en presencia del dieléctrico, ya sea la señal reflejada o transmitida, para guardarla en otro archivo que posteriormente es importado al bloque de procesamiento de señales para ejecutar el algoritmo del nodo MathScript y estimar las propiedades electromagnéticas de interés.

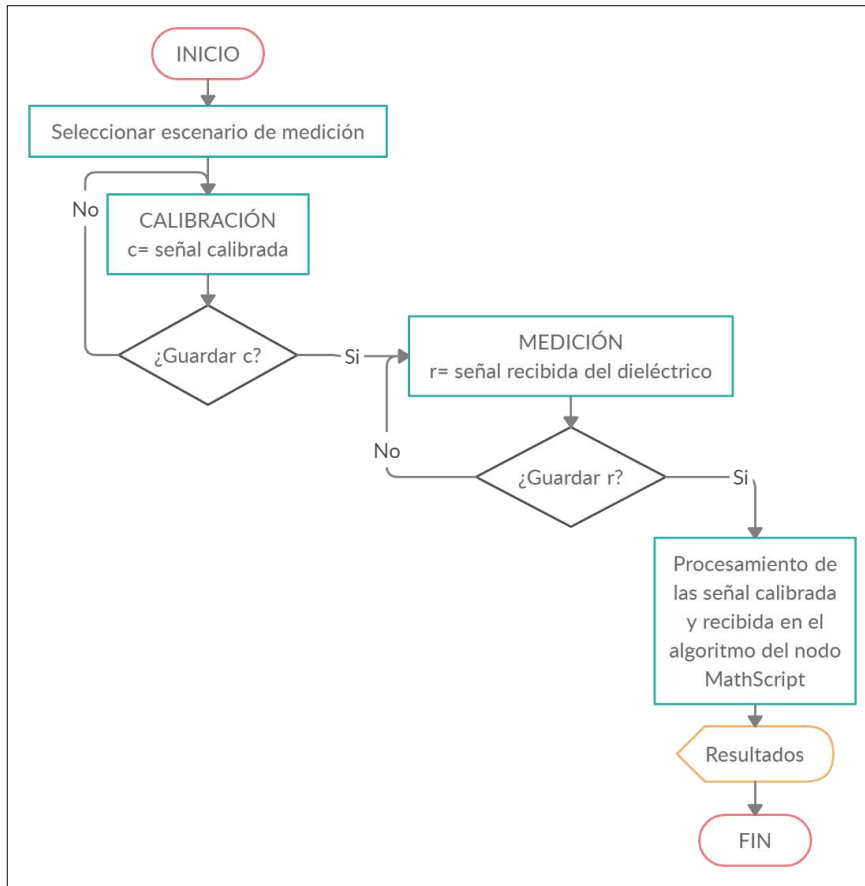


Figura 30-3: Diagrama de flujo para la caracterización de materiales dieléctrico con diferentes técnicas SDRadar.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.7. Metodología de las mediciones

Las mediciones con cada técnica SDRadar fueron realizadas tomando en cuenta que la distancia de separación mínima entre el sistema de antenas y la muestra del material dieléctrico debe cumplir la condición de campo lejano para que la onda sea considerada como estacionaria. La ecuación 27-3 describe la condición de campo lejano.

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

Ecuación 27-3: Campo lejano.

Donde:

- R : es la distancia de campo lejano.
- D : es la dimensión máxima de la antena.
- λ : es la longitud de onda en la frecuencia de operación.

Considerando que la dimensión máxima de la antena Yagi utilizada es de aproximadamente λ , se calculó la distancia mínima de campo lejano para la frecuencia central del sistema SDRadar (2.45 GHz).

$$R = \frac{2\lambda^2}{\lambda} = 2\lambda = 2 \times \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} = 0.245 \text{ metros}$$

Por otro lado, para los ingenieros en antenas, el campo lejano se considera a partir de una distancia equivalente a 3 veces la longitud de onda de la frecuencia de operación de la antena.

$$R = 3\lambda = 3 \times \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} = 0.3673 \text{ metros}$$

Para garantizar que la onda sea estacionaria, se trabajó con la condición de campo lejano de 3λ .

3.7.1. Mediciones con la técnica SDRadar 1

Mediante la técnica SDRadar 1 se puede estimar la parte real de la permitividad relativa de los materiales dieléctricos. Las mediciones fueron realizadas a diferentes distancias: 3λ (0.367 m), 4λ (0.49 m) y 5λ (0.612 m) con el fin de comparar los resultados y corroborar que los valores de permitividad no dependen de la distancia de medición. La configuración del sistema SDRadar para esta técnica se muestra en la Figura 31-3.

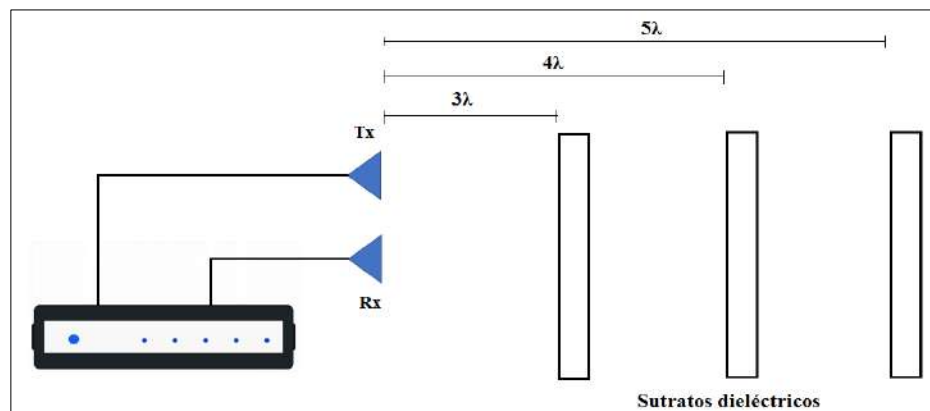


Figura 31-3: Metodología de las mediciones con la técnica SDRadar 1.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.7.1.1. Señal de calibración para la técnica SDRadar1

La señal de calibración se obtuvo a partir de la reflexión de la señal transmitida en la superficie del conductor eléctrico de cobre. Para cada una de las distancias (3λ , 4λ y 5λ), el conductor eléctrico debe colocarse de tal forma que la incidencia de la señal FMCW sea normal. Para asegurar la incidencia normal, la placa conductora de cobre se fijó en una base que permite ajustar el ángulo de inclinación con la ayuda de un nivelador de burbuja (ver Figura 32-3). Este mismo proceso se repitió para todas las muestras de los materiales dieléctricos con las diferentes técnicas SDRadar.



Figura 32-3: Preparación del conductor eléctrico de cobre con un nivelador de burbuja para asegurar una incidencia normal.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

La reflexión de la señal FMCW en la superficie del conductor eléctrico representa un coeficiente de reflexión equivalente a la unidad, es decir la onda se refleja aproximadamente en un 100%. Esta señal fue guardada en un archivo de texto para su posterior procesamiento. La Figura 33-3 muestra el sistema implementado para registrar la señal de calibración con esta técnica SDRadar.

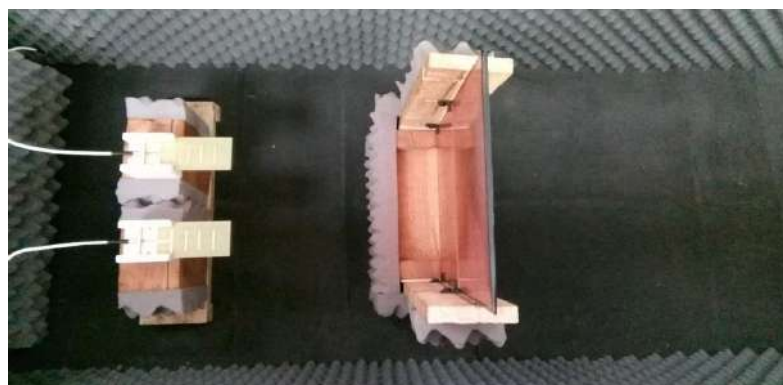


Figura 33-3: Escenario para la calibración de la señal con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En la Figura 34-3 se muestra la señal FMCW en el dominio del tiempo que se generó en el bloque de transmisión del sistema SDRadar.

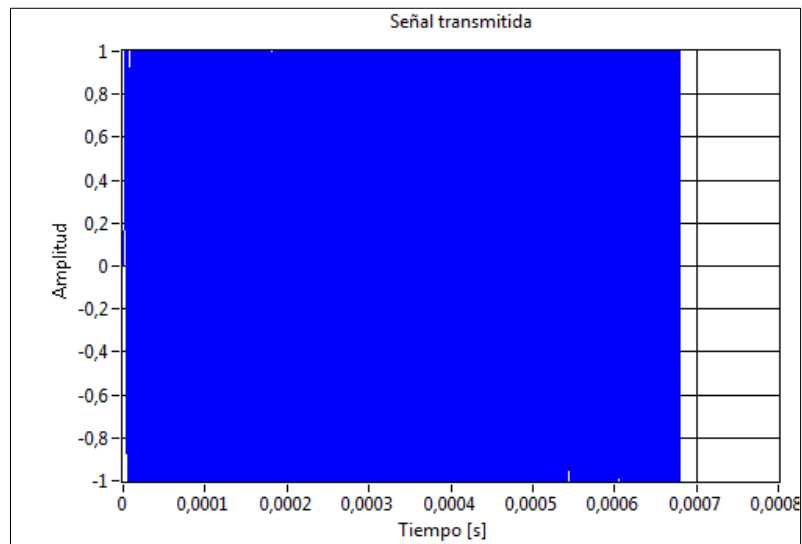


Figura 34-3: Señal FMCW transmitida en el dominio del tiempo.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

La señal FMCW se transmitió con un ancho de banda de 40 MHz, el máximo permitido por la tarjeta NI USRP-2932. El espectro de esta señal se puede apreciar en la Figura 35-3.

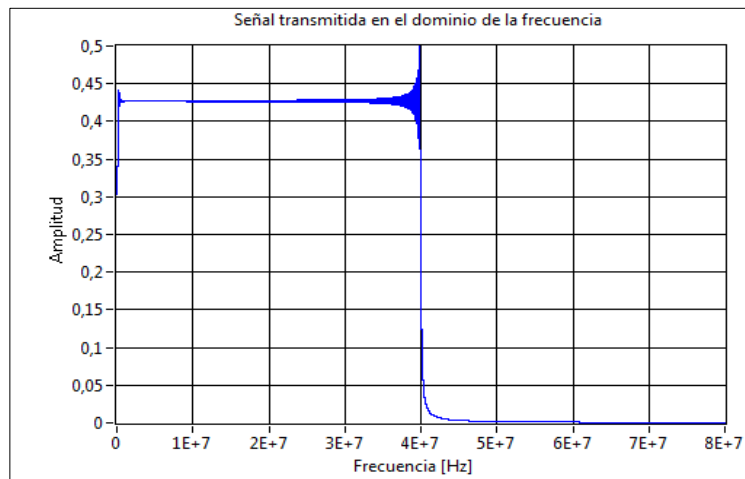


Figura 35-3: Señal FMCW transmitida en el dominio de la frecuencia.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Durante el proceso de recepción se registró la señal que se muestra en la Figura 36-3, la cual corresponde al eco reflejado sobre la superficie del conductor eléctrico de cobre.

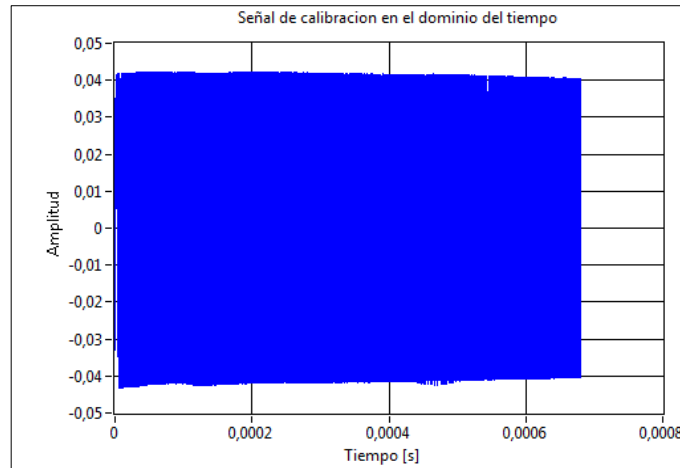


Figura 36-3: Señal FMCW recibida (señal de calibración) en el dominio del tiempo.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.7.1.2. Caracterización de dieléctricos con la técnica SDRadar1

Una vez guardada la señal de calibración, se retiró el conductor eléctrico de cobre y en lugar de este se colocó el sustrato del material dieléctrico. Para asegurar una incidencia normal, se siguió el mismo proceso realizado para la calibración con el conductor eléctrico de cobre (Ver Figura 32-3). En la Figura 37-3 se muestra el escenario de medición implementado para caracterizar la baquelita.



Figura 37-3: Escenario para la caracterizar la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En estas condiciones, la señal recibida que se muestra en la Figura 38-3 tuvo una amplitud inferior a la de la señal de calibración, pues una parte de la onda incidente se refleja hacia la fuente y la otra sigue su trayectoria atravesando la estructura del dieléctrico.

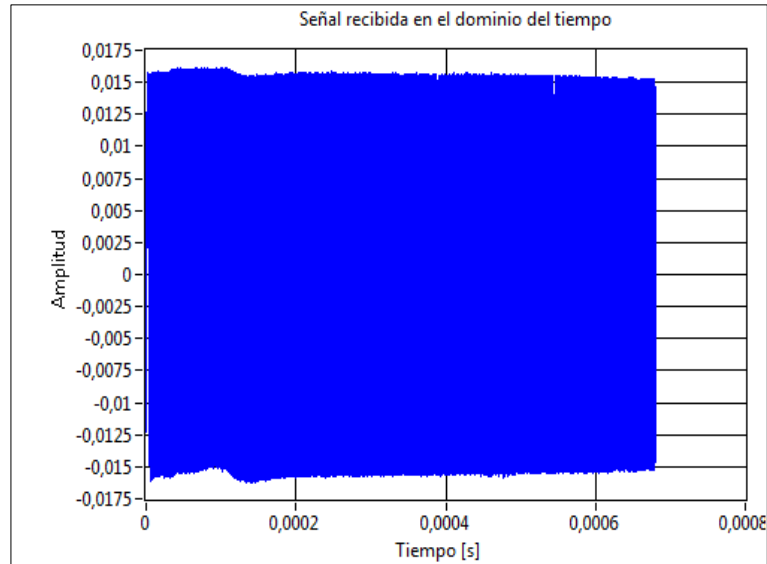


Figura 38-3: Señal recibida de la baquelita en el dominio del tiempo con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En la Figura 39-3 se muestra el espectro de la señal FMCW recibida con un ancho de banda de aproximadamente 40 MHz.

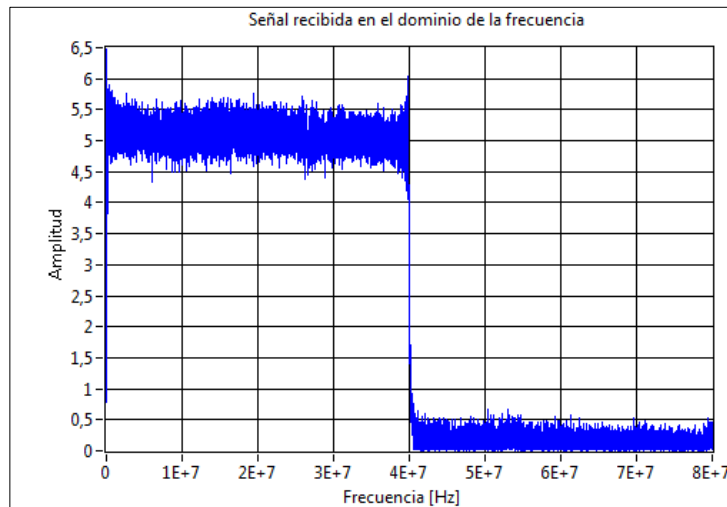


Figura 39-3: Señal recibida de la baquelita en el dominio de la frecuencia con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Para obtener el radargrama correspondiente, se multiplicó la señal transmitida con la recibida. Para que las señales puedan ser multiplicadas deben tener el mismo número de muestras y coincidir en el dominio del tiempo, pues el procesamiento se realizó en un nodo MathScript de LabVIEW, el cual requiere almacenar los datos en vectores con la misma longitud. El resultado de la multiplicación de las señales en el dominio del tiempo se muestra en la Figura 40-3.

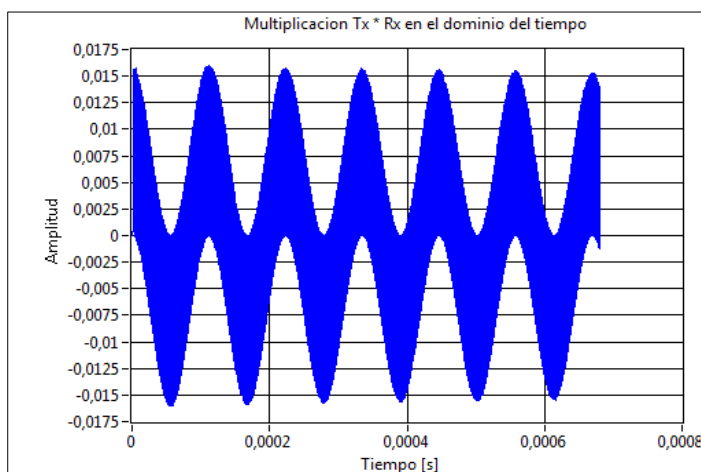


Figura 40-3: Multiplicación de la señal transmitida y recibida con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Una vez realizada la multiplicación, se transformó la señal resultante del dominio de tiempo al dominio de la frecuencia con la ayuda de la transformada de Fourier. Con esta operación se obtuvo un radargrama en el dominio de la frecuencia, el cual fue convertido al dominio espacial para expresarlo en términos de distancia vs amplitud.

Además, la amplitud de este radargrama fue normalizada en relación al radargrama obtenido con la señal de calibración. El resultado de esta operación permite calcular el coeficiente de reflexión para caracterizar la permitividad relativa del dieléctrico.

En la Figura 41-3 se muestra el radargrama normalizado. La gráfica en color azul corresponde al coeficiente de reflexión que se obtiene con la señal de calibración, como se aprecia, el coeficiente de reflexión es igual a la unidad. Es decir, existe una reflexión total de la señal cuando incide sobre la superficie de la placa conductora de cobre. La gráfica de color rojo representa el coeficiente de reflexión obtenido con un sustrato de material dieléctrico. En el Anexo B se detalla el algoritmo encargado de realizar todas las operaciones.

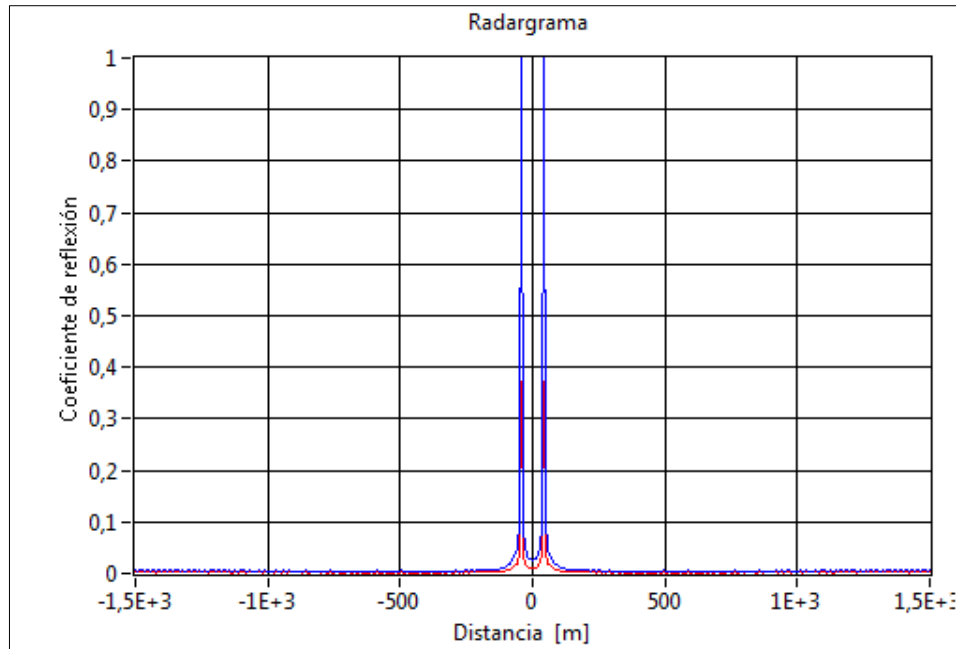


Figura 41-3: Radargrama normalizado con el coeficiente de reflexión resultante obtenido con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

El coeficiente de reflexión de la estructura aire-baquelita corresponde al valor máximo de la gráfica en color rojo. Este valor se utilizó en el algoritmo del nodo MathScript para calcular la permitividad relativa del dieléctrico en estudio (en este caso la baquelita). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 42-3.

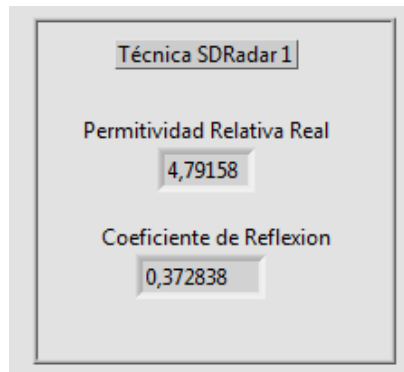


Figura 42-3: Resultados de la caracterización de la baquelita.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Este proceso se repitió para todos los materiales dieléctricos y a diferentes distancias de medición (3λ , 4λ y 5λ). Los resultados obtenidos se detallan en el Marco de Resultados

3.7.2. Mediciones con la técnica SDRadar 2

Con la técnica SDRadar 2 es posible calcular la tangente de pérdidas y consecuentemente la parte imaginaria de la permitividad relativa de los materiales dieléctrico. La metodología utilizada para las mediciones se muestra en la Figura 43-3. Con el fin de comparar los resultados y corroborar que los valores de tangente de pérdidas no dependen de la distancia de medición se realizaron pruebas a diferentes distancias: 3λ (0.367 m), 4λ (0.49 m) y 5λ (0.612 m).

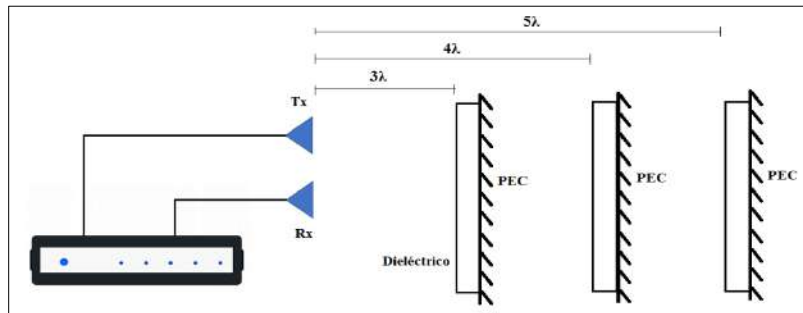


Figura 43-3: Metodología de mediciones con la técnica SDRadar 2.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En principio se registró una señal de calibración que indica la existencia de una reflexión total de la señal incidente. El escenario para realizar esta tarea es el mismo que se muestra en la Figura 33-3.

Luego de guardar la señal de calibración, se colocó la muestra del material dieléctrico delante del conductor eléctrico de cobre tal como se muestra en la Figura 44-3.

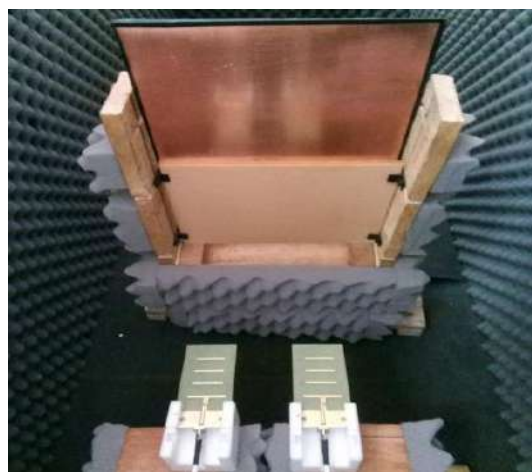


Figura 44-3: Escenario para caracterizar un dieléctrico con la técnica SDRadar 2.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En estas condiciones, la señal recibida que se muestra en la Figura 45-2 fue muy similar a la señal de calibración de la Figura 36-3, pues el conductor eléctrico de cobre hace que la onda incidente se refleje casi en su totalidad hacia la fuente.

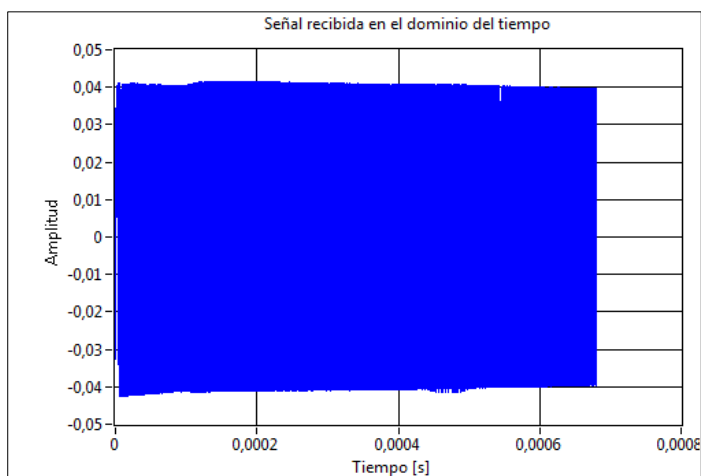


Figura 45-3: Señal recibida de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Para obtener el radargrama correspondiente, se multiplicó la señal recibida con la transmitida. El resultado de esta operación en el dominio del tiempo se muestra en la Figura 46-3.

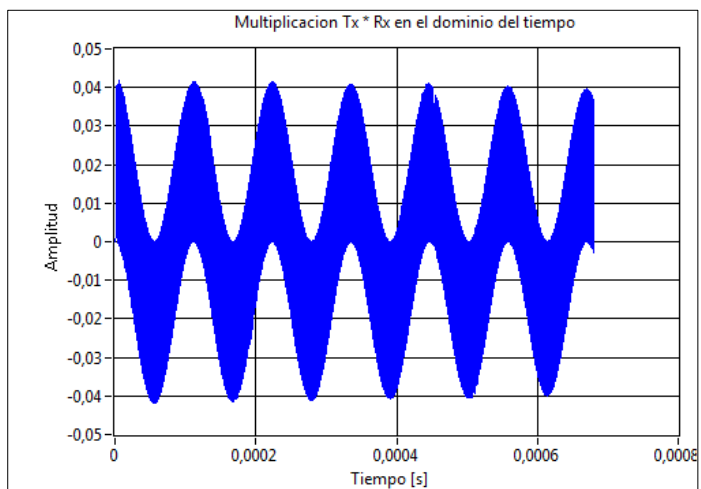


Figura 46-3: Multiplicación de la señal transmitida con la recibida con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Luego de realizar esta operación, el radargrama fue normalizado con respecto a la señal de calibración. En esta técnica SDRadar, la señal calibrada fue muy similar a la recibida en amplitud,

por tanto, el coeficiente de reflexión generado por la estructura aire-dieléctrico será muy cercano a la unidad.

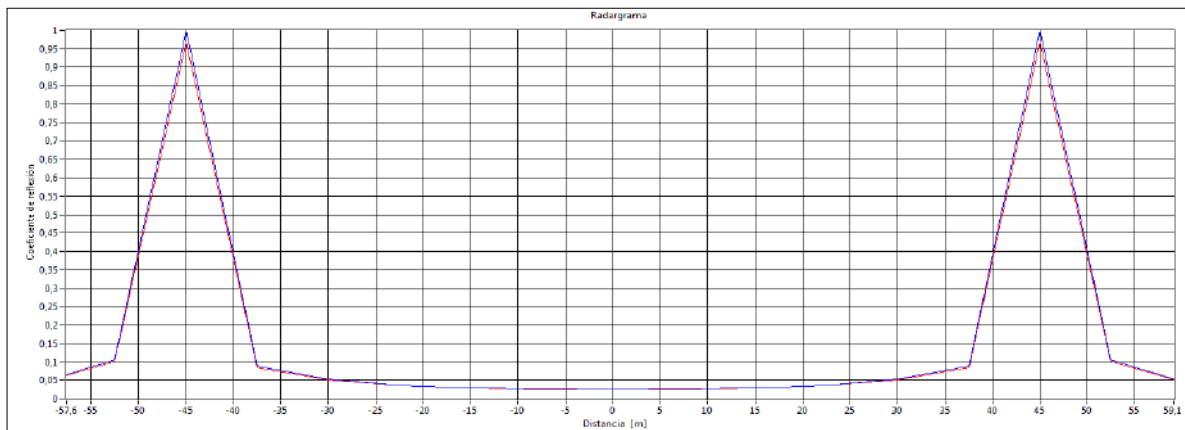


Figura 47-3: Radargrama normalizado con el coeficiente de reflexión resultante obtenido con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Como se aprecia en la Figura 47-3, el gráfico en color azul corresponde al coeficiente de reflexión de la señal de calibración, y el gráfico en color rojo representa el coeficiente de reflexión generado en la estructura del material dieléctrico con la placa conductora de cobre como pared reflectora.

De acuerdo al modelamiento matemático de la técnica SDRadar 2, la tangente de pérdidas es dependiente de la parte real de la permitividad relativa del material y de su espesor (Ecuación 21-3). Por tanto, estos parámetros fueron ingresados previamente tal y como se muestra en le Figura 48-3.

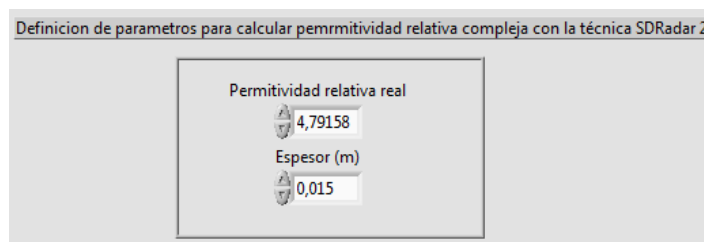


Figura 48-3: Definición de parámetros para caracterizar la baquelita con la técnica SDRadar 2.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

El espesor es una variable conocida y la parte real de la permitividad relativa se conoce de los resultados arrojados con la técnica SDRadar 1 (ver Figura 42-3). En la Figura 49-3 se muestran los resultados obtenidos luego del procesamiento de los datos con esta técnica SDRadar.

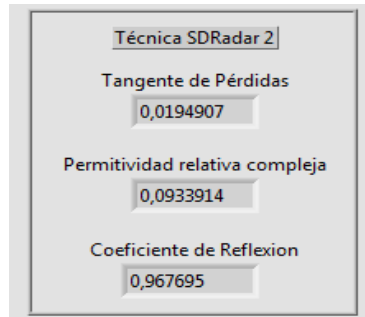


Figura 49-3: Resultados de la caracterización de la baquelita

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Para caracterizar los demás materiales dieléctricos se siguió el proceso descrito en esta sección, y las pruebas se realizaron a las distancias de 3λ , 4λ y 5λ . Los resultados finales se detallan en el Marco de Resultados

3.7.3. Mediciones con la técnica SDRadar 3

Mediante la técnica SDRadar 3 se puede estimar la parte real de la permitividad relativa de los materiales dieléctricos a partir del análisis del coeficiente de transmisión. Las mediciones fueron realizadas a distintas separaciones: 6λ (0.7346 m), 8λ (0.9795 m) y 10λ (01.2244 m) para asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Esta última técnica permite comprobar los valores de permitividad relativa obtenidos con la técnica SDRadar 1.

Se tomaron valores de distancia de separación (d) de 6λ , 8λ y 10λ . En esta técnica, el sustrato del material dieléctrico fue situado el punto medio de la separación existente entre la antena de transmisión y recepción. La figura 50-3 muestra la disposición del sistema para caracterizar los materiales dieléctricos con esta técnica SDRadar.

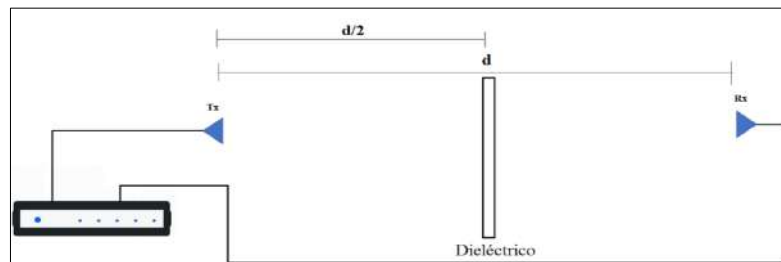


Figura 50-3: Metodología de las mediciones con la técnica SDRadar 3.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.7.3.1. Señal de calibración para la técnica SDRadar 3

La señal de calibración se obtuvo transmitiendo una señal entre la antena Tx y Rx con una línea de vista directa sin la presencia de obstáculos, tal como se muestra en la Figura 51-3.

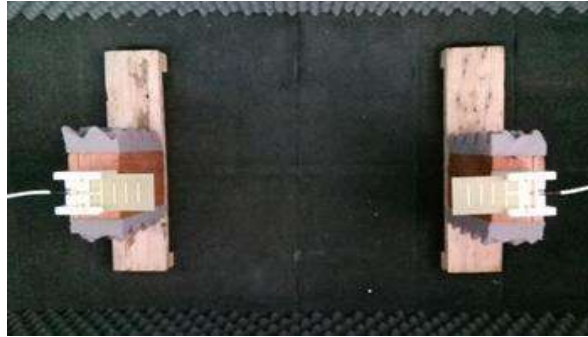


Figura 51-3: Escenario para la señal de calibración la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En estas condiciones, la trayectoria de la señal transmitida no se ve sometida a la presencia de obstáculos o discontinuidades en el medio de propagación. Por tanto, la señal de calibración representa un coeficiente de transmisión equivalente a 1. La señal obtenida en la antena de recepción se muestra en la Figura 52-3.

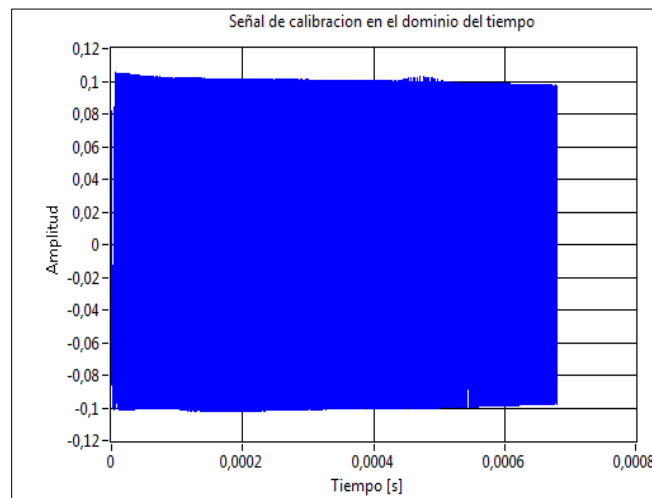


Figura 52-3: Señal de calibración en el dominio del tiempo con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

3.7.3.2. Caracterización de dieléctricos con la técnica SDRadar 3

Luego de guardar la señal de calibración, y sin modificar la distancia de separación (d) indicada en la Figura 50-3, se colocó la muestra del material dieléctrico entre las antenas de transición y recepción como se aprecia en la Figura 53-3.

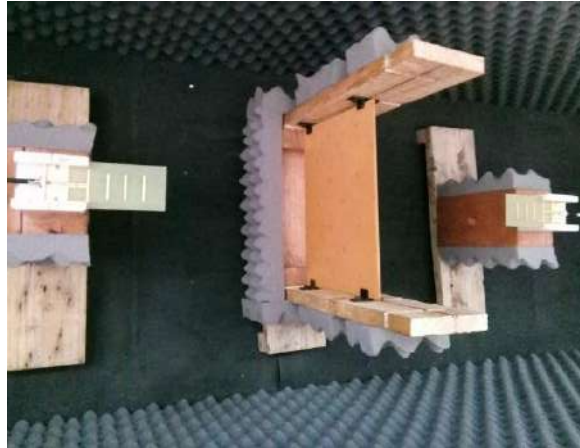


Figura 53-3: Escenario para caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a 6λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

En este escenario, la señal transmitida incide sobre la superficie del material dieléctrico (baquelita) y una parte de esta se refleja hacia la fuente y otra parte continua su trayectoria atravesando la estructura del material hasta llegar a la antena de recepción. La cantidad de onda transmitida en relación a la onda incidente define el coeficiente de transmisión del sistema. La señal recibida se muestra en la Figura 54-3.

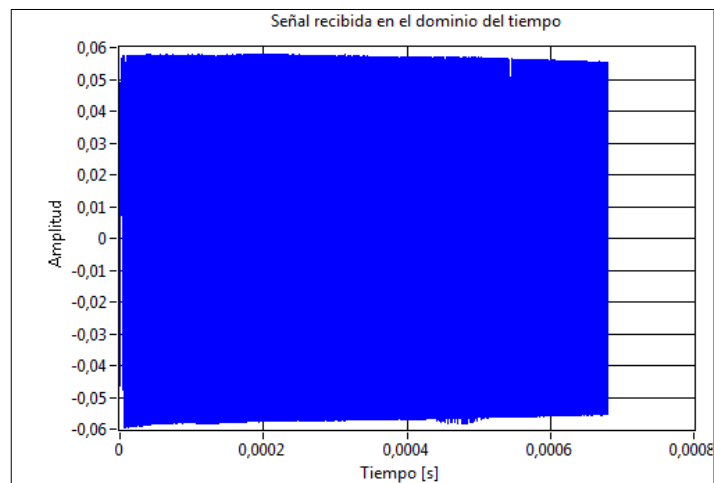


Figura 54-3: Señal recibida con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

A continuación, el algoritmo multiplicó la señal de transmisión y recepción. El resultado de esta operación en el dominio del tiempo se muestra en la Figura 55-3.

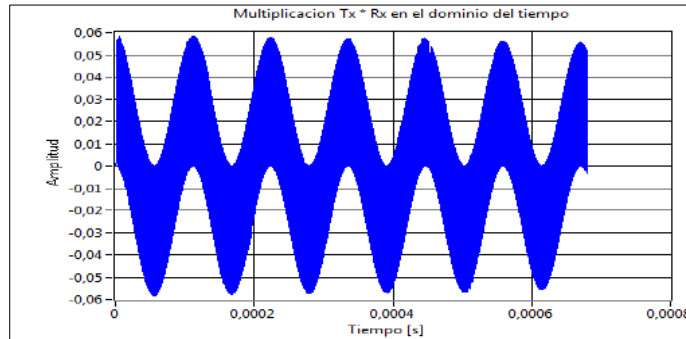


Figura 55-3: Multiplicación de la señal transmitida y recibida en el escenario SDRadar con una separación de 6λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Luego de realizar esta operación, se aplicó la transformada de Fourier a la señal resultante de la Figura 55-3 para obtener el radargrama correspondiente. Al igual que en las técnicas anteriores, la amplitud del radargrama fue normalizada en función de la señal de calibración. El resultado de esta operación permite encontrar el valor del coeficiente de transmisión generado por la estructura del dieléctrico.

En la Figura 56-3 se aprecia el radargrama generado con esta técnica SDRadar, el gráfico en color azul representa la señal de calibración con un coeficiente de transmisión igual a la unidad, y el gráfico en color rojo indica el coeficiente de transmisión del sistema en presencia de la muestra del material dieléctrico.

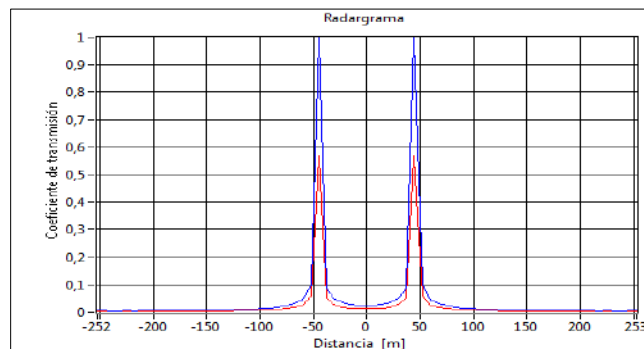


Figura 56-3: Coeficiente de transmisión obtenido con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Finalmente, el algoritmo tomó el valor del coeficiente de transmisión y calculó la permitividad relativa de la baquelita en base de la Ecuación 26-3. El procedimiento tratado en esta sección se repitió para las demás muestras de dieléctricos, y los resultados obtenidos luego de realizar las pruebas se detallan en el Marco de Resultados.

4. MARCO DE RESULTADOS

4.1. Introducción

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos en la caracterización de materiales dieléctricos con diferentes técnicas SDRadar. Los valores de permitividad relativa y tangente de pérdidas fueron validados mediante un análisis estadístico con resultados muy favorables que respaldan la confiabilidad de los resultados.

Para cada muestra de material dieléctrico en estudio se realizaron 20 pruebas durante 5 días diferentes con cada una de las técnicas SDRadar. Todas las pruebas se realizaron en el mismo entorno de medición, dentro de la cámara anecoica de la Facultad de Informática y Electrónica.

4.2. Resultados de caracterización con la técnica SDRadar 1

Las pruebas de caracterización de los materiales dieléctricos con esa técnica en particular requieren de una señal de calibración con un conductor eléctrico para normalizar el radargrama que se obtiene con cada muestra de material dieléctrico. De esta forma se pudo estimar el coeficiente de reflexión y por consiguiente la parte real de la permitividad relativa de los materiales dieléctricos.

4.2.1. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 1

En la Figura 1-4 se muestra el sistema de medición utilizado para caracterizar la baquelita.



Figura 1-4: Sistema de medición para la baquelita con la técnica SDRadar 1.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Como se había planteado en el Marco Metodológico, las pruebas se realizaron a diferentes distancias de separación entre el sistema de antenas y el material dieléctrico (ver Figura 31-3). Para cada distancia en particular, se realizaron un total de 100 mediciones distribuidas en 5 días diferentes.

4.2.1.1. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ

Los valores de permitividad relativa obtenidos para la baquelita a una distancia de 3λ se detallan en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4: Datos de la permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	4,84068	4,78356	4,79609	4,75455	4,83598
2	4,83363	4,74698	4,76684	4,87105	4,82264
3	4,84947	4,75934	4,78788	4,89271	4,76669
4	4,84333	4,80759	4,79039	4,89522	4,75698
5	4,76987	4,81654	4,79699	4,91401	4,76728
6	4,78429	4,77642	4,81312	4,84845	4,87340
7	4,76602	4,74359	4,81464	4,82405	4,80568
8	4,77851	4,83979	4,83766	4,82946	4,79976
9	4,83621	4,82146	4,80217	4,72117	4,78760
10	4,79887	4,83278	4,83769	4,72380	4,79185
11	4,81159	4,86765	4,83684	4,75570	4,72282
12	4,80421	4,80373	4,84976	4,76502	4,75259
13	4,78846	4,82539	4,84234	4,78433	4,81408
14	4,84674	4,83161	4,84004	4,77443	4,77354
15	4,85032	4,79971	4,84512	4,78537	4,76486
16	4,82234	4,80318	4,88123	4,81811	4,84459
17	4,81975	4,83364	4,73776	4,74104	4,80091
18	4,81789	4,76162	4,81760	4,86821	4,86893
19	4,78338	4,78127	4,82699	4,82758	4,84849
20	4,83107	4,77075	4,83085	4,82792	4,90914
PROMEDIO	4,81383	4,80033	4,81760	4,81111	4,80539

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la mayoría de los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la baquelita (ver Tabla 2-2). El 94 % de los valores se encuentran dentro de este rango (4.74 – 4.9), el 4% tiene un valor menor al del rango establecido y el 2% sobrepasa el valor máximo del rango de permitividad. Cada una de las 100 pruebas se realizaron

en sesiones diferentes de la tarjeta NI USRP-2932, por tanto, en cada medición pueden variar en pequeña proporción algunos parámetros como la estabilidad del oscilador y el ruido de fase generado por la misma tarjeta USRP. La estabilidad de algunos osciladores depende de variables como temperatura, voltaje de la fuente de alimentación e incluso efectos gravitacionales. En el Gráfico 1-4 se muestran los resultados de permitividad de la baquelita agrupados en función de los días de prueba.

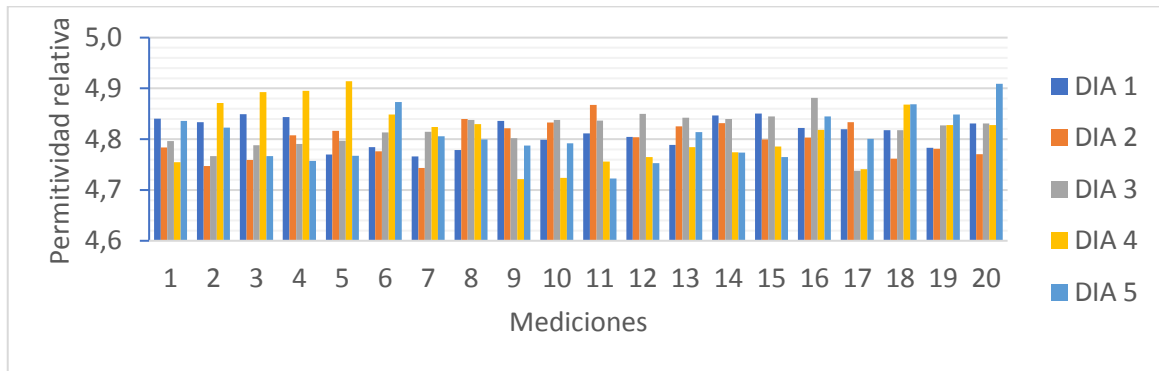


Gráfico 1-4: Permitividad de la baquelita con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.2.1.2. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ

Luego de haber realizado las pruebas a una distancia de separación de 3λ , sin modificar ningún parámetro del sistema de medición SDRadar, salvo la distancia de separación (ahora 4λ), se realizó nuevamente la caracterización de la baquelita. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4: Datos de la permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	4,82405	4,75241	4,75043	4,7825	4,77478
2	4,77797	4,72661	4,76467	4,73408	4,75845
3	4,77909	4,86055	4,75925	4,79907	4,79061
4	4,76131	4,86297	4,70648	4,76704	4,77631
5	4,86741	4,78963	4,86537	4,84989	4,82692
6	4,78488	4,76523	4,87641	4,8228	4,81599
7	4,86741	4,74331	4,83846	4,81302	4,77261
8	4,78488	4,73006	4,82006	4,79341	4,7844
9	4,89704	4,80347	4,83515	4,77573	4,7659
10	4,78457	4,78888	4,81993	4,75105	4,84079
11	4,8212	4,78492	4,80149	4,83094	4,85577
12	4,90767	4,73576	4,8037	4,79509	4,89887

13	4,80975	4,68804	4,78684	4,79528	4,75075
14	4,87777	4,88116	4,74022	4,83201	4,72997
15	4,86537	4,78776	4,71401	4,80722	4,71208
16	4,88067	4,65921	4,85696	4,79205	4,84353
17	4,88491	4,66123	4,77429	4,75461	4,85689
18	4,8641	4,68128	4,78643	4,77051	4,82182
19	4,69995	4,82552	4,82897	4,76358	4,90402
20	4,72595	4,7078	4,82899	4,74377	4,90767
PROMEDIO	4,82330	4,76179	4,79791	4,78868	4,80941

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la mayoría de los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la baquelita. El 82 % de los valores se encuentran dentro de este rango (4.74 – 4.9), el 15% tiene un valor menor al del rango establecido y el 3% sobrepasa el valor máximo del rango de permitividad. En el Gráfico 2-4 se detallan los resultados de la permitividad de la baquelita agrupados en función de los días de prueba.

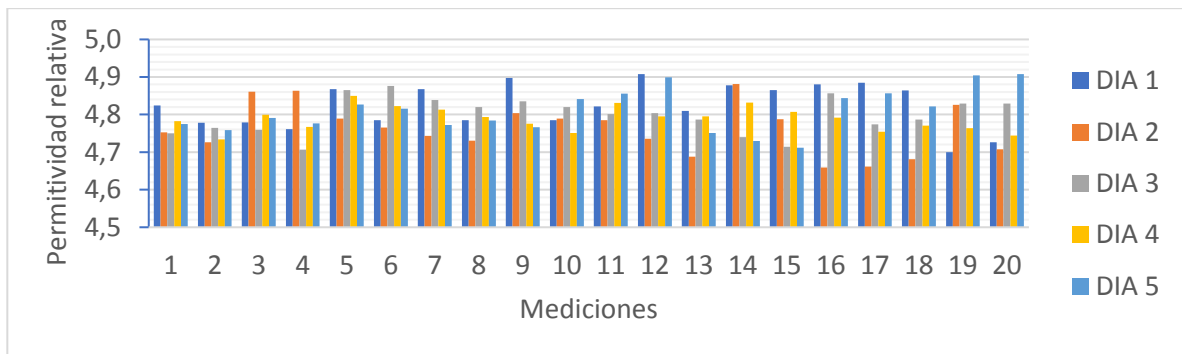


Gráfico 2-4: Permitividad de la baquelita con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 4λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.2.1.3. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ

A continuación, se muestran los resultados luego de haber realizado las pruebas de caracterización de la baquelita con una distancia de separación de 5λ . Los datos obtenidos se detallan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Datos de la permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	4,79118	4,79509	4,82832	4,79401	4,83537
2	4,79355	4,81034	4,84754	4,82066	4,85407

3	4,77842	4,83819	4,86543	4,82467	4,78323
4	4,72897	4,60822	4,76584	4,82601	4,86987
5	4,9054	4,80839	4,83905	4,80607	4,85494
6	4,87832	4,60853	4,85025	4,81646	4,84827
7	4,87562	4,79388	4,85811	4,84442	4,83821
8	4,83702	4,6757	4,72944	4,82022	4,82782
9	4,6106	4,78553	4,71726	4,85198	4,81327
10	4,79944	4,76945	4,79295	4,82715	4,80464
11	4,76202	4,85233	4,79253	4,83556	4,83397
12	4,63813	4,87431	4,79291	4,79414	4,83414
13	4,80546	4,8157	4,77505	4,7597	4,85566
14	4,8262	4,8463	4,74791	4,8134	4,70509
15	4,7902	4,84038	4,6461	4,76176	4,74886
16	4,79035	4,87547	4,89085	4,81972	4,80799
17	4,81094	4,83677	4,8282	4,8239	4,77797
18	4,82612	4,79137	4,78515	4,82925	4,78735
19	4,83965	4,78018	4,78392	4,67035	4,80799
20	4,80839	4,79678	4,79704	4,69787	4,78721
PROMEDIO	4,79480	4,79015	4,79669	4,80187	4,81380

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la mayoría de los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la baquelita. El 87 % de los valores se encuentran dentro de este rango (4.74 – 4.9), el 12% tiene un valor menor al del rango establecido y el 1% sobrepasa el valor máximo del rango de permitividad.

En el Gráfico 3-4 se aprecian los resultados de la permitividad de la baquelita agrupados en función de los días de prueba.

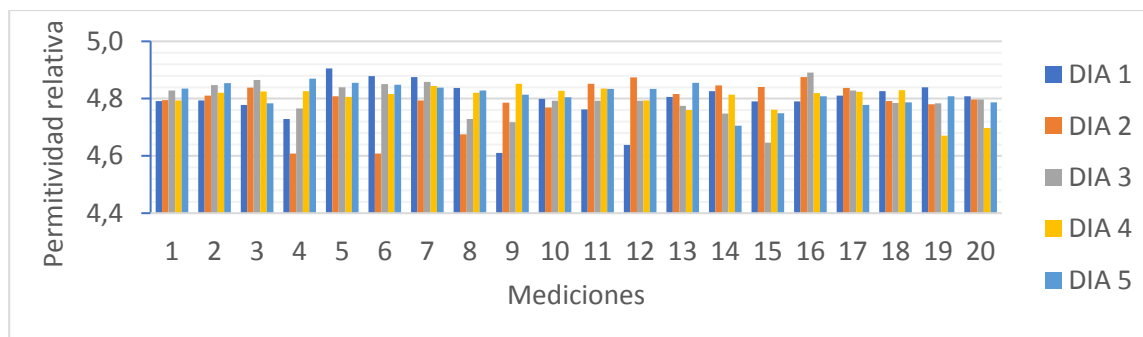


Gráfico 3-4: Permitividad de la baquelita con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 5λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.2.2. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 1

En la Figura 2-4 se muestra el sistema de medición utilizado para caracterizar la madera de pino seca.

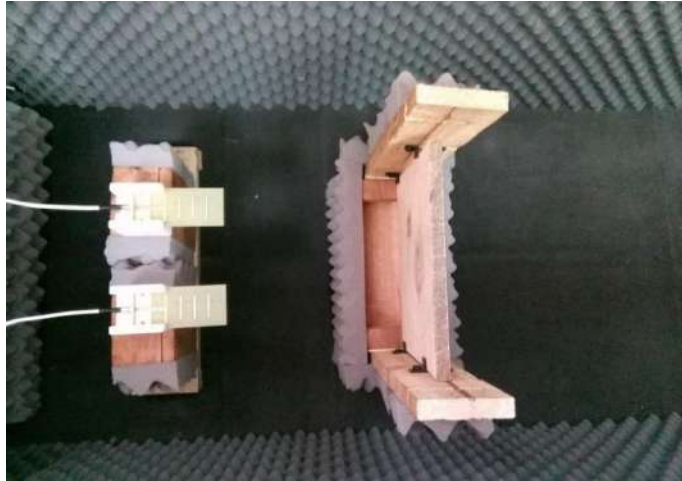


Figura 2-4: Sistema de medición para la madera seca con la técnica SDRadar 1.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Las pruebas para la caracterización de la madera de madera seca se realizaron a diferentes distancias de separación entre el sistema de antenas y el material dieléctrico (ver Figura 31-3). Para cada distancia en particular, se realizaron un total de 100 mediciones distribuidas en 5 días diferentes.

4.2.2.1. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ

Los valores de permitividad relativa obtenidos para la madera de pino seca a una distancia de 3λ se muestran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Datos de la permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	3,21766	3,20554	3,20565	3,23842	3,20912
2	3,20237	3,20036	3,21643	3,17814	3,22404
3	3,22122	3,21579	3,22572	3,17146	3,2147
4	3,20758	3,21558	3,2063	3,22484	3,21125
5	3,17269	3,21309	3,20345	3,20874	3,22548
6	3,20357	3,21534	3,21096	3,18961	3,22045
7	3,19197	3,17722	3,20332	3,19934	3,20739
8	3,18699	3,20824	3,20192	3,17386	3,189

9	3,18034	3,19862	3,20442	3,17368	3,21789
10	3,20218	3,19252	3,21386	3,20787	3,19144
11	3,18012	3,20473	3,19347	3,22954	3,18798
12	3,20723	3,20424	3,17759	3,20425	3,21099
13	3,20865	3,21996	3,17415	3,20181	3,19009
14	3,21099	3,21514	3,19159	3,22878	3,18033
15	3,20524	3,21558	3,20704	3,22405	3,221
16	3,19555	3,18279	3,19723	3,20262	3,22797
17	3,20635	3,18207	3,22922	3,18889	3,2093
18	3,21412	3,20453	3,20362	3,18905	3,20405
19	3,21791	3,18499	3,2147	3,20912	3,2166
20	3,21516	3,18741	3,17833	3,18918	3,18533
PROMEDIO	3,20239	3,20219	3,20295	3,20166	3,20722

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la madera seca (ver Tabla 2-2). Es decir, el 100 % de los datos están dentro del rango de permitividad de 1.5 a 4. El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 3.17146, y el valor máximo del conjunto de datos es de 3.23852. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas son cercanas entre sí. Con estos datos, en secciones posteriores se detalla un análisis estadístico que permite determinar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

En el Gráfico 4-4 se muestran los resultados de permitividad de la madera de pino seca agrupados en función de los días de prueba.

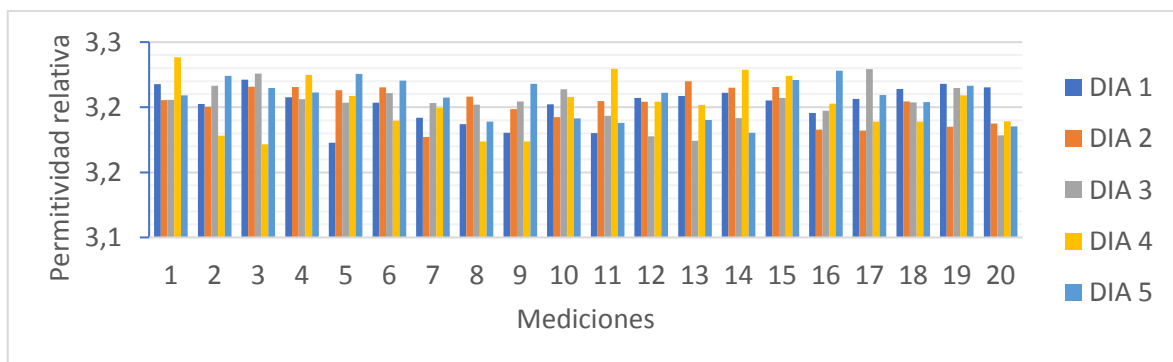


Gráfico 4-4: Permitividad de la madera seca con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.2.2.2. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ

Luego de haber realizado las pruebas a una distancia de separación de 3λ , sin modificar ningún parámetro del sistema de medición SDRadar, salvo la distancia de separación (ahora 4λ), se realizaron nuevamente las pruebas de caracterización a la madera seca. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4: Datos de la permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	3,20757	3,18174	3,1971	3,20923	3,24115
2	3,20215	3,22589	3,17184	3,2044	3,21187
3	3,19016	3,20467	3,23716	3,22253	3,19208
4	3,18369	3,21438	3,24053	3,18831	3,21605
5	3,19161	3,21023	3,24715	3,20984	3,23508
6	3,19615	3,21656	3,25528	3,20091	3,216
7	3,19634	3,21833	3,20002	3,19716	3,22225
8	3,2226	3,19807	3,20711	3,20032	3,21076
9	3,23555	3,21795	3,21998	3,20818	3,21265
10	3,21301	3,20452	3,20141	3,18653	3,21442
11	3,2486	3,20937	3,21069	3,18943	3,19846
12	3,22433	3,1718	3,21271	3,19755	3,20035
13	3,18697	3,1882	3,20268	3,18072	3,22674
14	3,18498	3,18356	3,19678	3,2019	3,20405
15	3,19553	3,19062	3,21296	3,2018	3,21038
16	3,21092	3,18444	3,19663	3,19221	3,21348
17	3,19539	3,18509	3,1889	3,185	3,19756
18	3,17852	3,24477	3,21247	3,17941	3,20239
19	3,23948	3,24961	3,1977	3,22378	3,18297
20	3,18751	3,18544	3,20849	3,24378	3,20563
PROMEDIO	3,20455	3,20426	3,21088	3,20115	3,21072

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la madera seca (1.5 – 4). El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 3.1718, y el valor máximo del conjunto de datos es de 3.25528. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los datos de permitividad son similares entre sí.

En el Gráfico 5-4 se muestran los resultados de permitividad de la madera de pino seca agrupados en función de los días de prueba para una distancia de 4λ .

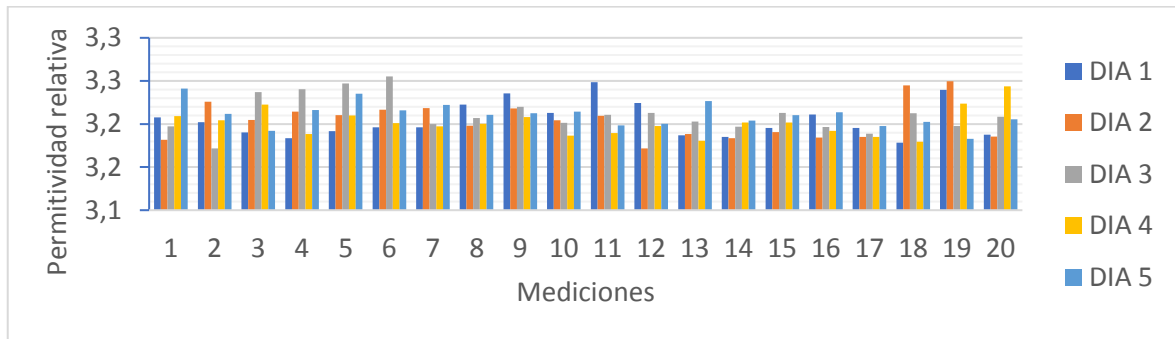


Gráfico 5-4: Permitividad de la madera seca con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 4λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.2.2.3. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ

A continuación, se muestran los resultados luego de haber realizado las pruebas de caracterización de la madera de pino seca a una distancia de separación de 5λ . Los datos obtenidos se detallan en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4: Datos de la permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	3,21621	3,17369	3,22998	3,21487	3,22154
2	3,18936	3,14198	3,1959	3,22839	3,20076
3	3,22379	3,26873	3,22741	3,18763	3,22044
4	3,20702	3,19917	3,2443	3,22188	3,2138
5	3,1774	3,19693	3,20648	3,20889	3,20342
6	3,17178	3,20178	3,21505	3,1857	3,20952
7	3,18733	3,17787	3,21829	3,21628	3,17348
8	3,26904	3,17762	3,21767	3,2298	3,17656
9	3,23728	3,1872	3,20874	3,19396	3,20622
10	3,20079	3,22264	3,21423	3,20998	3,20347
11	3,18675	3,20043	3,20259	3,17418	3,20865
12	3,17892	3,19599	3,19733	3,20248	3,1923
13	3,21028	3,17677	3,19459	3,24375	3,21733
14	3,20725	3,17724	3,20662	3,237	3,21897
15	3,22595	3,22109	3,19719	3,20409	3,24557
16	3,20016	3,21501	3,20113	3,22337	3,1625
17	3,18575	3,20366	3,18586	3,17173	3,22852

18	3,20847	3,23491	3,24761	3,22588	3,18046
19	3,23005	3,24825	3,24435	3,16333	3,21352
20	3,16882	3,16504	3,18739	3,188	3,19411
PROMEDIO	3,20412	3,19930	3,21214	3,20656	3,20456

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la madera seca (1.5 – 4). El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 3.14198, y el valor máximo del conjunto de datos es de 3.26904. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los datos de permitividad son similares entre sí.

En el Gráfico 6-4 se muestran los resultados de permitividad de la madera seca agrupados en función de los días de prueba para una distancia de 5λ .

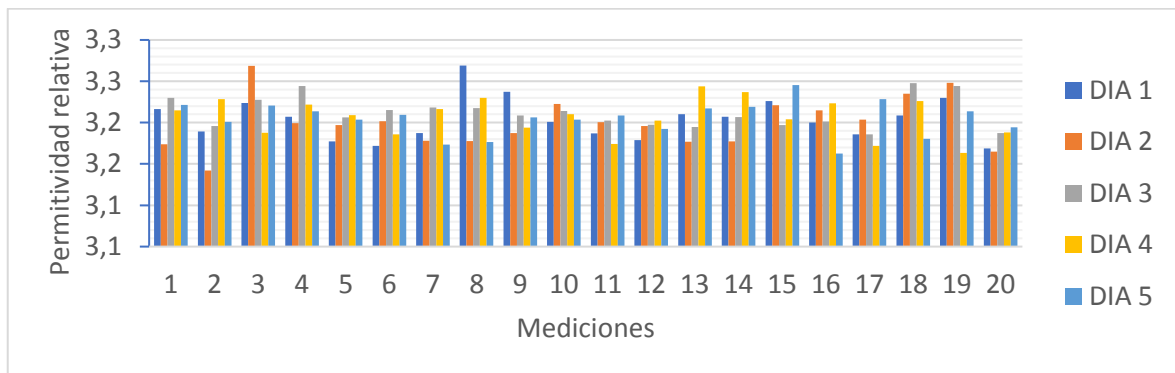


Gráfico 6-4: Permitividad de la madera seca con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 5λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.2.3. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 1

En la Figura 3-4 se muestra el sistema de medición utilizado para caracterizar el vidrio con la técnica SDRadar 1.

Las pruebas para la caracterización de este dieléctrico se realizaron a diferentes distancias de separación entre el sistema de antenas y el material dieléctrico (ver Figura 31-3). Para cada distancia en particular, se realizaron un total de 100 mediciones distribuidas en 5 días diferentes.

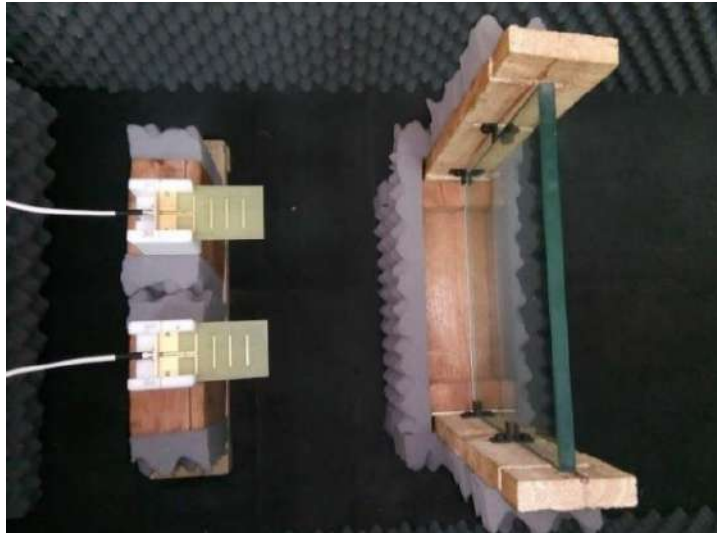


Figura 3-4: Sistema de medición para el vidrio con la técnica SDRadar 1.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.2.3.1. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ

Los valores de permitividad relativa obtenidos al caracterizar el vidrio a una distancia de 3λ se muestran en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4: Datos de la permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	7,85995	7,86244	7,76017	7,77535	7,78009
2	7,86078	7,8799	7,8631	7,77103	7,66161
3	7,85218	7,93754	7,81917	7,77981	7,70594
4	7,85492	7,9473	7,86647	7,89552	7,69896
5	7,86574	7,9662	7,81353	7,85613	7,65522
6	7,82659	7,96899	7,82343	7,84012	7,87467
7	7,82224	7,71496	7,7564	7,88231	7,87515
8	7,79832	7,89121	7,85935	7,83171	7,87087
9	7,74851	7,86853	7,82003	7,88833	7,82141
10	7,70371	7,84654	7,83583	7,82055	7,79288
11	7,73256	7,84238	7,74523	7,86878	7,81373
12	7,67453	7,84689	7,76372	7,85684	7,76381
13	7,6383	7,88408	7,97404	7,84697	7,69873
14	7,87544	7,846	7,76412	7,85879	7,70843
15	7,82992	7,8138	7,84954	7,86549	7,74141

16	7,78802	7,83915	7,88174	7,81802	7,79429
17	7,73698	7,84025	7,84552	7,84707	7,69263
18	7,83843	7,8325	7,84704	7,87265	7,80834
19	7,7625	7,96943	7,84788	7,88419	7,82712
20	7,75692	7,77167	7,8284	7,7929	7,75821
PROMEDIO	7,79133	7,86849	7,82824	7,84263	7,76718

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa del vidrio (ver Tabla 2-2). Es decir, el 100 % de los datos están dentro del rango de permitividad de 4 a 9. El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 7.6383, y el valor máximo del conjunto de datos es de 7.97404. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas son cercanas entre sí. Con estos datos, en secciones posteriores se detalla un análisis estadístico para determinar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

En el Gráfico 7-4 se muestran los resultados de permitividad del vidrio agrupados en función de los días de prueba.

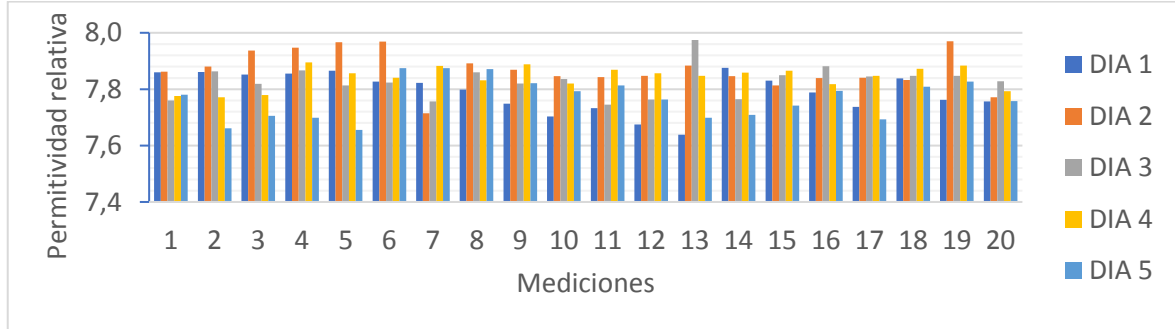


Gráfico 7-4: Permitividad del vidrio con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.2.3.2. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ

Luego de haber realizado las pruebas a una distancia de separación de 3λ , sin modificar ningún parámetro del sistema de medición SDRadar, salvo la distancia de separación (ahora 4λ), se realizaron nuevamente las pruebas de caracterización del vidrio. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 8-4.

Tabla 8-4: Datos de la permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	7,76719	7,83926	7,86347	7,77916	7,77511
2	7,81131	7,81725	7,84274	7,80279	7,80094
3	7,7959	7,83437	7,84633	7,82707	7,76611
4	7,77895	7,83277	7,88526	7,79813	7,7971
5	7,76419	7,81603	7,71093	7,76809	7,7547
6	7,77895	7,80656	7,75062	7,76686	7,84947
7	7,75928	7,81728	7,77559	7,80258	7,75255
8	7,75286	7,79209	7,7647	7,77645	7,77644
9	7,75446	7,80596	7,89979	7,84984	7,82049
10	7,97376	7,76752	7,81016	7,80725	7,82247
11	7,95298	7,7963	7,81169	7,79869	7,89029
12	7,95491	7,79503	7,82861	7,77542	7,81779
13	7,88213	7,76625	7,82949	7,79283	7,83145
14	7,91103	7,7499	7,85648	7,8107	7,7888
15	7,92989	7,84001	7,83622	7,81113	7,77624
16	7,92057	7,87346	7,78658	7,80392	7,82264
17	7,83839	7,89561	7,81325	7,81293	7,80373
18	7,84884	7,86794	7,832	7,79894	7,8128
19	7,83513	7,87542	7,81505	7,82218	7,80491
20	7,85225	7,83993	7,80205	7,75644	7,74118
PROMEDIO	7,84315	7,82145	7,81805	7,79807	7,80026

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa del vidrio (4-9). El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 7.71093, y el valor máximo del conjunto de datos es de 7.97376. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los datos de permitividad son similares entre sí.

En el Gráfico 8-4 se muestran los resultados de permitividad del vidrio agrupados en función de los días de prueba para una distancia de 4λ .

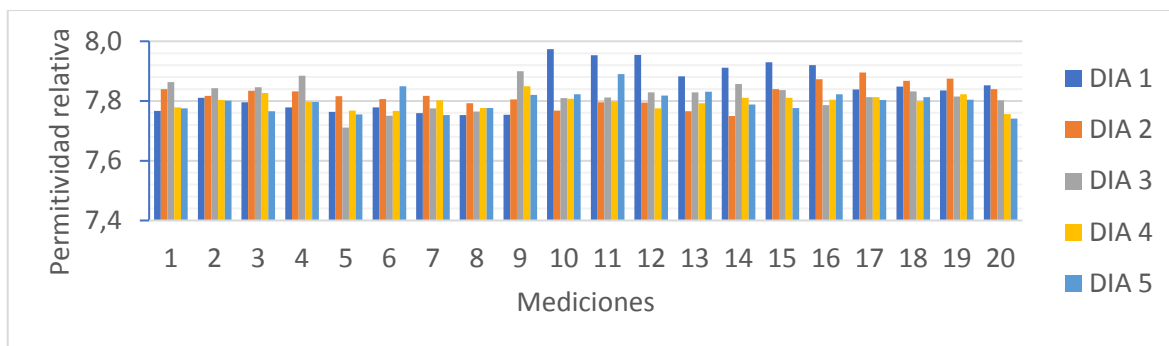


Gráfico 8-4: Permittividad del vidrio con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 4λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.2.3.3. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ

A continuación, se muestran los resultados luego de haber realizado las pruebas de caracterización del vidrio con una distancia de separación de 5λ . Los datos obtenidos se detallan en la Tabla 9-4.

Tabla 9-4: Datos de la permittividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	7,80409	7,77859	7,80281	7,89173	7,77597
2	7,7216	7,77118	7,89061	7,78774	7,83835
3	7,82584	7,87659	7,83604	7,80785	7,85935
4	7,8545	7,75159	7,75649	7,80636	7,8112
5	7,82273	7,76812	7,795	7,83118	7,79375
6	7,77062	7,8097	7,79122	7,77465	7,76429
7	7,7414	7,8192	7,84166	7,75679	7,84184
8	7,76529	7,85913	7,8311	7,8517	7,88981
9	7,80898	7,79698	7,77875	7,8534	7,82174
10	7,73201	7,75473	7,89741	7,81065	7,76304
11	7,81652	7,80823	7,77452	7,83289	7,78137
12	7,71981	7,83083	7,81424	7,8071	7,74131
13	7,85061	7,87272	7,85472	7,82309	7,81396
14	7,79497	7,78767	7,85478	7,83046	7,79267
15	7,73601	7,7755	7,782	7,7311	7,84013
16	7,84214	7,78683	7,88781	7,79447	7,88185
17	7,78365	7,75073	7,79797	7,77566	7,88536
18	7,79579	7,77193	7,74526	7,76542	7,71565
19	7,87463	7,79235	7,83404	7,8596	7,76884
20	7,77813	7,89532	7,86335	7,75469	7,81813
PROMEDIO	7,79197	7,80290	7,82149	7,80733	7,80993

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa del vidrio (4 - 9). El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 7.71565, y el valor máximo del conjunto de datos es de 7.89741. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los datos de permitividad son similares entre sí.

En el Gráfico 9-4 se muestran los resultados de permitividad del vidrio agrupados en función de los días de prueba para una distancia de 5λ .

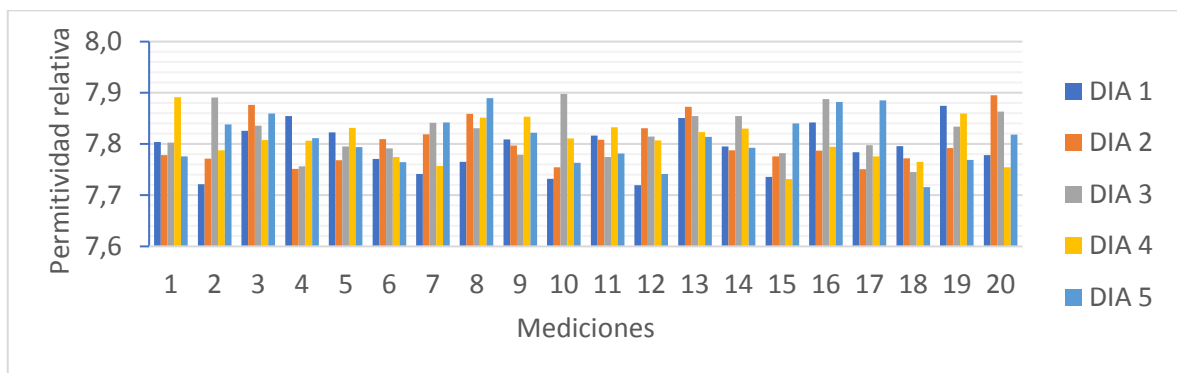


Gráfico 9-4: Permitividad del vidrio con la técnica SDRdar 1 a una distancia de 5λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.3. Resultados de caracterización con la técnica SDRdar 2

En esta sección se detallan los datos obtenidos de la caracterización de los materiales dieléctricos con la técnica SDRadar 2. Al igual que en la técnica SDRadar 1, se requiere de una señal de calibración para normalizar el radargrama obtenido con las muestras de los dieléctricos. De esta forma se pudo estimar el coeficiente de reflexión y por consiguiente la tangente de pérdidas de los materiales dieléctricos que a su vez está directamente relacionada con la parte imaginaria de la permitividad relativa.

4.3.1. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 2

En la Figura 4-4 se muestra el sistema de medición utilizado para caracterizar la tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2.



Figura 4-4: Sistema de medición para la baquelita con la técnica SDRdar 2.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Las pruebas se realizaron a diferentes distancias de separación entre el sistema de antenas y el material dieléctrico (ver Figura 43-3). Para cada distancia en particular, se realizaron un total de 100 mediciones distribuidas en 5 días diferentes.

4.3.1.1. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ

Los resultados obtenidos de la tangente de pérdidas al caracterizar la baquelita a una distancia de 3λ con la técnica SDRadar 2 se muestran en la Tabla 10-4.

Tabla 10-4: Datos de la tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	0,01332	0,03236	0,02991	0,01333	0,03368
2	0,02544	0,03585	0,02284	0,03276	0,02301
3	0,01067	0,01273	0,02322	0,04259	0,01254
4	0,03556	0,01466	0,0271	0,04192	0,02689
5	0,01588	0,02265	0,02563	0,03249	0,02278
6	0,03283	0,02024	0,02605	0,02325	0,03262
7	0,03152	0,01515	0,03311	0,03594	0,01449
8	0,02568	0,03258	0,03062	0,0228	0,01522
9	0,03048	0,02209	0,01292	0,01313	0,02049
10	0,02299	0,03302	0,02377	0,01262	0,01346
11	0,02103	0,0115	0,01317	0,02043	0,01407
12	0,02324	0,02594	0,01569	0,03118	0,02261

13	0,01644	0,0159	0,02326	0,03313	0,02612
14	0,02432	0,0302	0,01762	0,03946	0,03193
15	0,02398	0,02233	0,0241	0,02317	0,01361
16	0,03207	0,02314	0,02282	0,01853	0,03301
17	0,02016	0,01542	0,03098	0,01648	0,02324
18	0,01707	0,03265	0,03387	0,02597	0,03006
19	0,02873	0,02596	0,01396	0,02332	0,03191
20	0,01253	0,03076	0,02303	0,01313	0,02867
PROMEDIO	0,02320	0,02376	0,02368	0,02578	0,02352

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la tangente de pérdidas de la baquelita toma valores entre 0.01067 y 0.04259. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los valores de la tangente de pérdidas son similares entre sí. Para comprobar la validez de estos datos, en secciones posteriores se detalla un análisis estadístico de los resultados obtenidos en cada escenario de medición.

En el Gráfico 10-4 se muestran los datos obtenidos del valor de la tangente de pérdidas de la baquelita agrupados en función de los días de prueba.

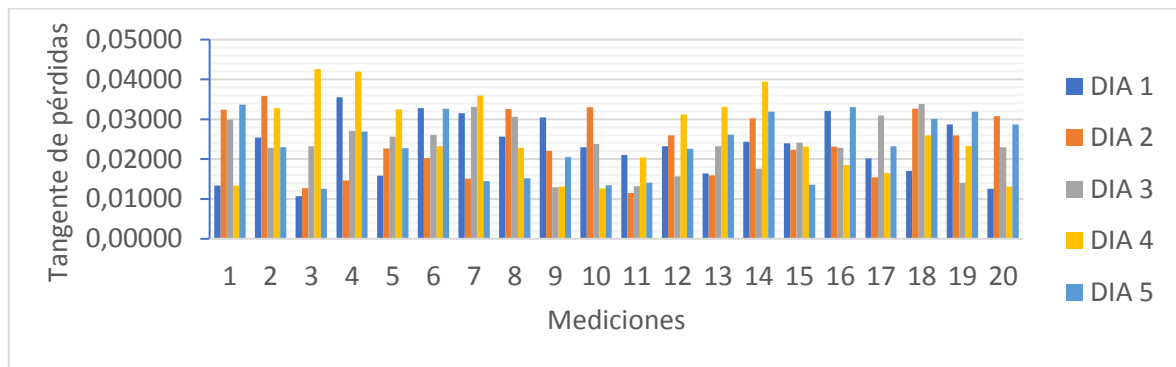


Gráfico 10-4: Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.3.1.2. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ

Luego de haber realizado las pruebas a una distancia de separación de 3λ , sin modificar ningún parámetro del sistema de medición SDRadar, salvo la distancia de separación (ahora 4λ), se realizaron nuevamente las pruebas de caracterización de la tangente de pérdidas de la baquelita. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 11-4.

Tabla 11-4: Datos de la tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	0,02776	0,03875	0,02871	0,03967	0,02367
2	0,03326	0,02618	0,03779	0,03375	0,03733
3	0,01916	0,02766	0,02796	0,01019	0,01928
4	0,0351	0,03276	0,02496	0,01445	0,01324
5	0,0123	0,03497	0,01827	0,03242	0,02905
6	0,01102	0,02855	0,01426	0,02722	0,01991
7	0,01745	0,03646	0,03339	0,03129	0,04278
8	0,02108	0,03654	0,03102	0,02198	0,01791
9	0,01881	0,02353	0,01124	0,01761	0,02921
10	0,03241	0,01308	0,02629	0,01932	0,03251
11	0,03221	0,03204	0,02526	0,02325	0,02655
12	0,02207	0,02404	0,01167	0,03765	0,04085
13	0,02703	0,03406	0,02584	0,0244	0,0201
14	0,03489	0,02249	0,02647	0,02882	0,02316
15	0,02565	0,01896	0,03187	0,0488	0,01219
16	0,01372	0,02552	0,03678	0,02675	0,01768
17	0,03693	0,01836	0,03498	0,01559	0,02904
18	0,01647	0,01536	0,02987	0,02156	0,01091
19	0,03212	0,03174	0,03912	0,02299	0,04578
20	0,03616	0,02705	0,04704	0,03195	0,03871
PROMEDIO	0,02528	0,02741	0,02814	0,02648	0,02649

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la tangente de pérdidas de la baquelita toma valores entre 0.01019 y 0.04880. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los valores de la tangente de pérdidas son similares entre sí.

En el Gráfico 11-4 se muestran los datos obtenidos del valor de la tangente de pérdidas de la baquelita agrupados en función de los días de prueba.

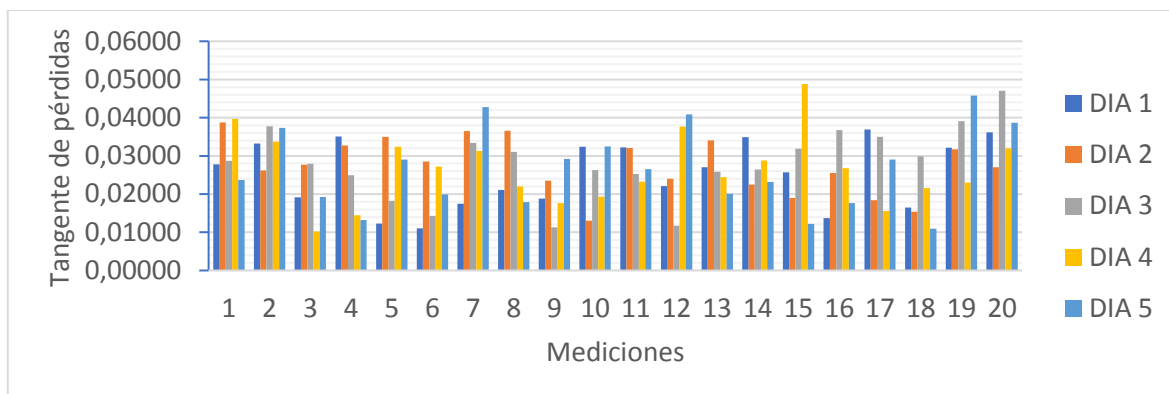


Gráfico 11-4: Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 4λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.3.1.3. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ

A continuación, se muestran los resultados luego de haber realizado las pruebas de caracterización de la tangente de pérdidas de la baquelita con una distancia de separación de 5λ . Los datos obtenidos se detallan en la Tabla 12-4.

Tabla 12-4: Datos de la tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	0,03032	0,01734	0,02414	0,03297	0,02485
2	0,03281	0,01101	0,01967	0,02761	0,0362
3	0,02024	0,01605	0,01012	0,01357	0,03425
4	0,01306	0,0264	0,0121	0,03787	0,03055
5	0,0198	0,03271	0,02117	0,01208	0,01416
6	0,01759	0,02335	0,02556	0,01658	0,01967
7	0,03293	0,01305	0,04043	0,02864	0,03287
8	0,03697	0,01677	0,04241	0,01811	0,01665
9	0,00433	0,01598	0,02764	0,02928	0,01028
10	0,04358	0,02925	0,02279	0,0387	0,01917
11	0,03384	0,01396	0,01485	0,01065	0,01157
12	0,0402	0,02904	0,02591	0,01947	0,0114
13	0,00121	0,01443	0,01086	0,0296	0,04787
14	0,02415	0,04379	0,01747	0,0193	0,03621
15	0,02778	0,01533	0,0434	0,0487	0,02439
16	0,03779	0,02065	0,03204	0,00203	0,03847
17	0,01822	0,03049	0,02438	0,01576	0,03333
18	0,0259	0,03388	0,01153	0,02656	0,01092

19	0,02643	0,02638	0,02786	0,01991	0,01622
20	0,03738	0,02329	0,01826	0,03408	0,03317
PROMEDIO	0,02623	0,02266	0,02363	0,02407	0,02511

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la tangente de pérdidas de la baquelita toma valores entre 0.00121 y 0.04870. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los valores de la tangente de pérdidas son similares entre sí. En el Gráfico 12-4 se muestran los datos obtenidos agrupados en función de los días de prueba.

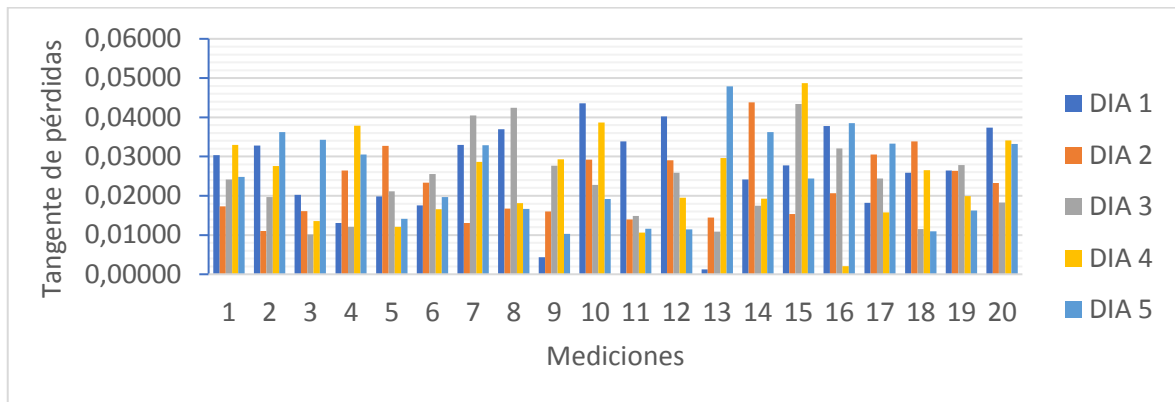


Gráfico 12-4: Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 5λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.3.2. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 2

En la Figura 5-4 se muestra el sistema de medición utilizado para caracterizar la tangente de pérdidas de la madera de pino seca con la técnica SDRadar 2.

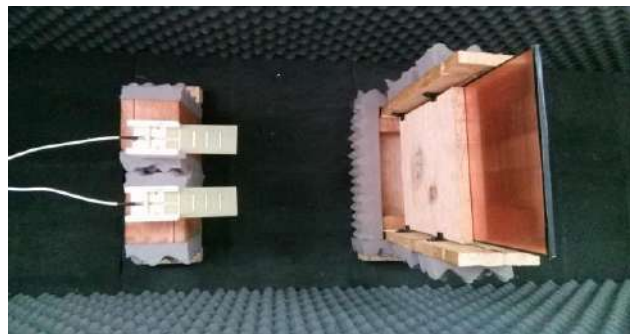


Figura 5-4: Sistema de medición para la madera seca con la técnica SDRadar 2.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Las pruebas se realizaron a diferentes distancias de separación entre el sistema de antenas y el material dieléctrico (ver Figura 43-3). Para cada distancia en particular, se realizaron un total de 100 mediciones distribuidas en 5 días diferentes.

4.3.2.1. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ

Los resultados obtenidos de la tangente de pérdidas al caracterizar la madera seca una distancia de 3λ con la técnica SDRadar 2 se muestran en la Tabla 13-4.

Tabla 13-4: Datos de la tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	0,06414	0,07508	0,07202	0,07267	0,07223
2	0,07034	0,07607	0,07314	0,07223	0,0716
3	0,06338	0,07733	0,07355	0,07308	0,07301
4	0,07043	0,07775	0,07306	0,07317	0,0725
5	0,05655	0,07849	0,07343	0,07294	0,07239
6	0,05859	0,07705	0,07303	0,07321	0,07332
7	0,07157	0,07802	0,07331	0,07277	0,07289
8	0,06353	0,07472	0,07458	0,07272	0,07281
9	0,06316	0,07945	0,072	0,07273	0,07159
10	0,0491	0,07709	0,07319	0,07265	0,07457
11	0,06554	0,07978	0,07372	0,07355	0,07187
12	0,06184	0,07995	0,07272	0,07289	0,07255
13	0,07138	0,07936	0,07381	0,07422	0,07346
14	0,07192	0,07707	0,07309	0,07385	0,07301
15	0,07111	0,07682	0,07368	0,07227	0,07269
16	0,07372	0,0767	0,07263	0,07328	0,07305
17	0,06644	0,07786	0,07278	0,07389	0,07271
18	0,07422	0,07532	0,07301	0,07413	0,07286
19	0,07246	0,07897	0,07315	0,0751	0,07323
20	0,07658	0,07885	0,07154	0,07461	0,07246
PROMEDIO	0,06680	0,07759	0,07307	0,07330	0,07274

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la tangente de pérdidas de la madera seca toma valores entre 0.04910 y 0.07995. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los valores de la tangente de pérdidas son similares entre sí. Para comprobar la validez

de estos datos, en secciones posteriores se detalla un análisis estadístico de los resultados obtenidos en cada escenario de medición.

En el Gráfico 13-4 se muestran los datos obtenidos agrupados en función de los días de prueba.

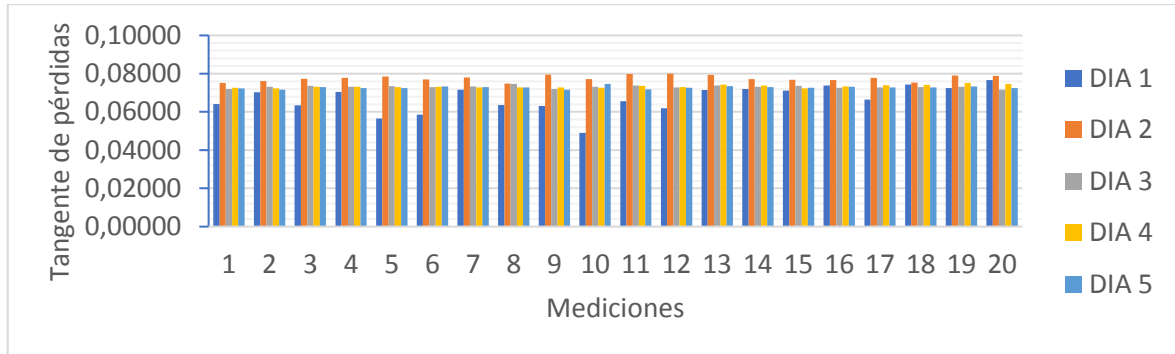


Gráfico 13-4: Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.3.2.2. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ

Luego de haber realizado las pruebas a una distancia de separación de 3λ , sin modificar ningún parámetro del sistema de medición SDRadar, salvo la distancia de separación (ahora 4λ), se realizaron nuevamente las pruebas de caracterización de la tangente de pérdidas de la madera seca. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 14-4.

Tabla 14-4: Datos de la tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	0,06316	0,06658	0,06582	0,07137	0,06582
2	0,06402	0,0697	0,06433	0,07026	0,06666
3	0,07213	0,07233	0,07534	0,07552	0,06692
4	0,07789	0,08022	0,07325	0,06629	0,06966
5	0,08354	0,07922	0,06836	0,06533	0,07035
6	0,07359	0,07833	0,07599	0,0675	0,07395
7	0,07475	0,07683	0,07263	0,07271	0,06946
8	0,07295	0,0753	0,07407	0,07388	0,06726
9	0,06999	0,06826	0,07145	0,08682	0,07531
10	0,06367	0,07646	0,07005	0,07603	0,072
11	0,06378	0,06576	0,07516	0,07638	0,07437
12	0,07313	0,06703	0,07325	0,07177	0,07473

13	0,07512	0,07279	0,06416	0,0747	0,0762
14	0,0702	0,07867	0,08296	0,07793	0,08502
15	0,08099	0,07034	0,07599	0,07694	0,08494
16	0,07332	0,06473	0,07147	0,07537	0,07572
17	0,07232	0,0714	0,07078	0,06785	0,07821
18	0,07318	0,0698	0,06741	0,06855	0,0745
19	0,07564	0,08022	0,06937	0,069	0,06459
20	0,07945	0,07768	0,07449	0,08273	0,07784
PROMEDIO	0,07264	0,07308	0,07182	0,07335	0,07318

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la tangente de pérdidas de la madera seca toma valores entre 0.06316 y 0.086282. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los valores de la tangente de pérdidas son similares entre sí. En el Gráfico 14-4 se muestran los datos obtenidos agrupados en función de los días de prueba.

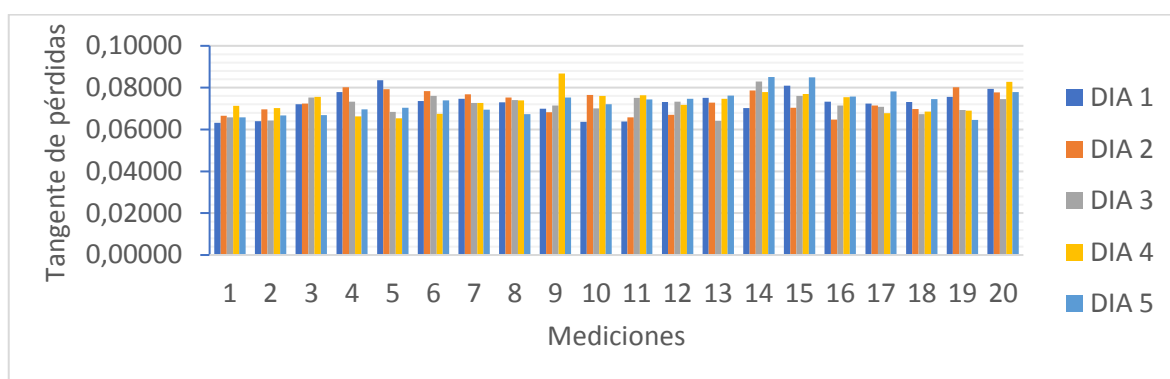


Gráfico 14-4: Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 4λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.3.2.3. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ

A continuación, se muestran los resultados luego de haber realizado las pruebas de caracterización de la tangente de pérdidas de la madera seca con una distancia de separación de 5λ . Los datos obtenidos se detallan en la Tabla 15-4.

Tabla 15-4: Datos de la tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	0,08073	0,07102	0,08018	0,06934	0,08079

2	0,08009	0,06668	0,08109	0,07012	0,07337
3	0,07701	0,07813	0,07598	0,08189	0,08055
4	0,07573	0,08237	0,06574	0,07971	0,07183
5	0,07937	0,07649	0,07816	0,07693	0,06663
6	0,07326	0,07389	0,06687	0,0694	0,07218
7	0,08527	0,06914	0,0672	0,0778	0,07681
8	0,08192	0,08185	0,06366	0,0779	0,06434
9	0,08437	0,08173	0,08386	0,08149	0,07668
10	0,08321	0,06721	0,0762	0,07583	0,07249
11	0,0774	0,07708	0,07022	0,07921	0,06919
12	0,06232	0,07073	0,07553	0,07426	0,08035
13	0,07544	0,07072	0,07201	0,07457	0,07938
14	0,06043	0,07034	0,07764	0,079	0,07549
15	0,06111	0,06922	0,06751	0,08181	0,07391
16	0,07709	0,07138	0,08246	0,08465	0,08457
17	0,06133	0,08092	0,07374	0,06781	0,08509
18	0,06858	0,07766	0,06737	0,08069	0,07795
19	0,07572	0,07663	0,07781	0,07148	0,06354
20	0,06184	0,06796	0,07501	0,08046	0,07363
PROMEDIO	0,07411	0,07406	0,07391	0,07672	0,07492

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la tangente de pérdidas de la baquelita toma valores entre 0.06043 y 0.08527. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los valores de la tangente de pérdidas son similares entre sí. En el Gráfico 15-4 se muestran los datos obtenidos agrupados en función de los días de prueba.

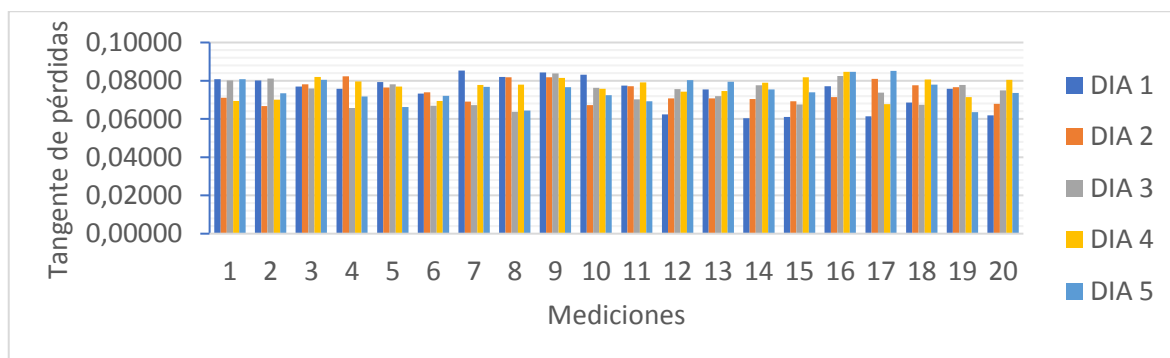


Gráfico 15-4: Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 5λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.3.3. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 2

En la Figura 6-4 se muestra el sistema de medición utilizado para caracterizar la tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2.

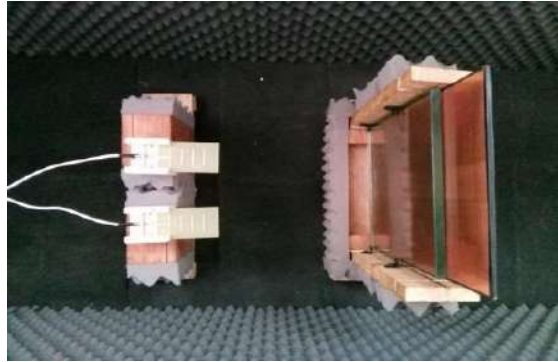


Figura 6-4: Sistema de medición para el vidrio con la técnica SDRadar 2.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Las pruebas se realizaron a diferentes distancias de separación entre el sistema de antenas y el material dieléctrico (ver Figura 43-3). Para cada distancia en particular, se realizaron un total de 100 mediciones distribuidas en 5 días diferentes.

4.3.3.1. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ

Los resultados obtenidos de la tangente de pérdidas al caracterizar el vidrio con una distancia de separación de 3λ con la técnica SDRadar 2 se muestran en la Tabla 16-4.

Tabla 16-4: Datos de la tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	0,02949	0,03291	0,02853	0,03505	0,03438
2	0,0378	0,03419	0,03312	0,03557	0,03551
3	0,03412	0,03111	0,02956	0,03363	0,03427
4	0,0335	0,03209	0,03327	0,03501	0,02849
5	0,03194	0,03001	0,03301	0,03366	0,03074
6	0,03275	0,0351	0,03208	0,02599	0,03521
7	0,03151	0,03356	0,03174	0,02294	0,03485
8	0,03147	0,03481	0,02717	0,02413	0,02832
9	0,03205	0,03417	0,0286	0,02026	0,03359
10	0,03247	0,02928	0,02997	0,0257	0,02996

11	0,03333	0,03407	0,03201	0,02521	0,03045
12	0,03421	0,03101	0,03182	0,02473	0,03171
13	0,03387	0,03502	0,03119	0,02842	0,03305
14	0,0357	0,03129	0,03095	0,02408	0,02791
15	0,03665	0,03319	0,03157	0,028	0,0358
16	0,03635	0,03528	0,03163	0,02902	0,03615
17	0,03643	0,03458	0,03124	0,03209	0,02818
18	0,03541	0,03105	0,03255	0,0304	0,03142
19	0,03437	0,03042	0,03134	0,03406	0,0341
20	0,03389	0,03241	0,03243	0,03983	0,03257
PROMEDIO	0,03387	0,03278	0,03119	0,02939	0,03233

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la tangente de pérdidas del vidrio toma valores entre 0.02026 y 0.03983. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los valores de la tangente de pérdidas son similares entre sí. Para comprobar la validez de estos datos, en secciones posteriores se detalla un análisis estadístico de los resultados obtenidos en cada escenario de medición.

En el Gráfico 16-4 se muestran los datos obtenidos agrupados en función de los días de prueba.

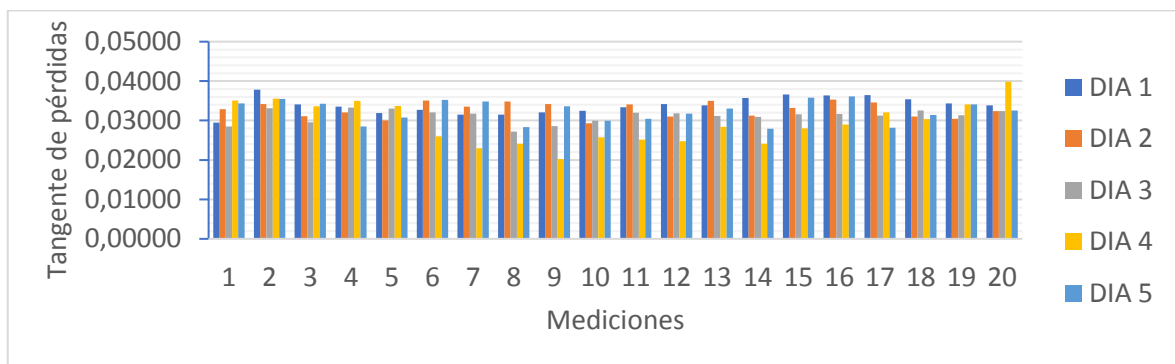


Gráfico 16-4: Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 3λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.3.3.2. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ

Luego de haber realizado las pruebas a una distancia de separación de 3λ , sin modificar ningún parámetro del sistema de medición SDRadar, salvo la distancia de separación (ahora 4λ), se realizaron nuevamente las pruebas de caracterización de la tangente de pérdidas del vidrio. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 17-4.

Tabla 17-4: Datos de la tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	0,03322	0,03379	0,02988	0,02803	0,02588
2	0,03045	0,03321	0,02891	0,02855	0,03517
3	0,03108	0,03305	0,0318	0,03107	0,03709
4	0,03349	0,0329	0,03273	0,02799	0,02806
5	0,03437	0,03338	0,03307	0,03264	0,03399
6	0,03158	0,02897	0,031	0,02968	0,03207
7	0,02951	0,02763	0,02806	0,03125	0,02753
8	0,02868	0,03128	0,0274	0,0281	0,03078
9	0,0293	0,03237	0,03651	0,03238	0,02814
10	0,02845	0,03654	0,03753	0,03168	0,02825
11	0,03224	0,02873	0,02873	0,02981	0,02704
12	0,0276	0,02784	0,02962	0,03303	0,02998
13	0,02899	0,02987	0,02977	0,03439	0,03299
14	0,03217	0,03155	0,03288	0,02956	0,03126
15	0,03039	0,02974	0,03303	0,02797	0,03016
16	0,03253	0,03184	0,03183	0,03199	0,02826
17	0,031	0,03183	0,02984	0,03206	0,02756
18	0,03289	0,03108	0,03456	0,02837	0,03702
19	0,03338	0,03136	0,03201	0,03303	0,03439
20	0,03313	0,03208	0,02973	0,02973	0,03238
PROMEDIO	0,03122	0,03145	0,03144	0,03057	0,03090

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la tangente de pérdidas del vidrio toma valores entre 0.02588 y 0.037532. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los valores de la tangente de pérdidas son similares entre sí. En el Gráfico 17-4 se muestran los datos obtenidos agrupados en función de los días de prueba.

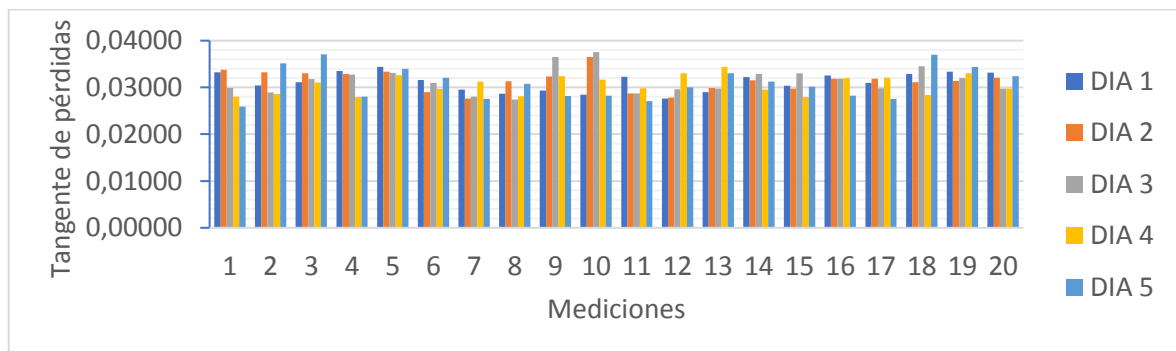


Gráfico 17-4: Tangente de pérdidas del vidrio la técnica SDRdar 2 a una distancia de 4λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.3.3.3. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ

A continuación, se muestran los resultados luego de haber realizado las pruebas de caracterización de la tangente de pérdidas del vidrio con una distancia de separación de 5λ . Los datos obtenidos se detallan en la Tabla 18-4.

Tabla 18-4: Datos de la tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	0,02977	0,03544	0,03044	0,03187	0,02899
2	0,03754	0,03254	0,02695	0,03274	0,03562
3	0,03653	0,03765	0,02629	0,02975	0,02988
4	0,0298	0,03189	0,03537	0,02763	0,0349
5	0,02876	0,03284	0,0367	0,03542	0,03027
6	0,02986	0,03765	0,03894	0,03076	0,02795
7	0,03876	0,02976	0,03391	0,03186	0,03295
8	0,03209	0,02876	0,0266	0,02897	0,03876
9	0,02858	0,02864	0,02469	0,02987	0,03564
10	0,02784	0,03147	0,02999	0,03463	0,02795
11	0,02973	0,03642	0,0306	0,03072	0,02973
12	0,03193	0,03543	0,02995	0,03038	0,02864
13	0,03294	0,03265	0,03013	0,02973	0,03765
14	0,03429	0,02988	0,03166	0,03124	0,03274
15	0,02809	0,03184	0,02735	0,03455	0,03084
16	0,02873	0,03533	0,03142	0,02973	0,03174
17	0,03629	0,03064	0,0301	0,02876	0,02974
18	0,03573	0,03076	0,03287	0,02977	0,02684
19	0,02984	0,03174	0,03173	0,03832	0,03274
20	0,03285	0,02973	0,03287	0,03239	0,03127
PROMEDIO	0,03200	0,03255	0,03093	0,03145	0,03174

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la tangente de pérdidas del vidrio toma valores entre 0.02469 y 0.03894. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas muestran que los valores de la tangente de pérdidas son similares entre sí. En el Gráfico 18-4 se muestran los datos obtenidos agrupados en función de los días de prueba.

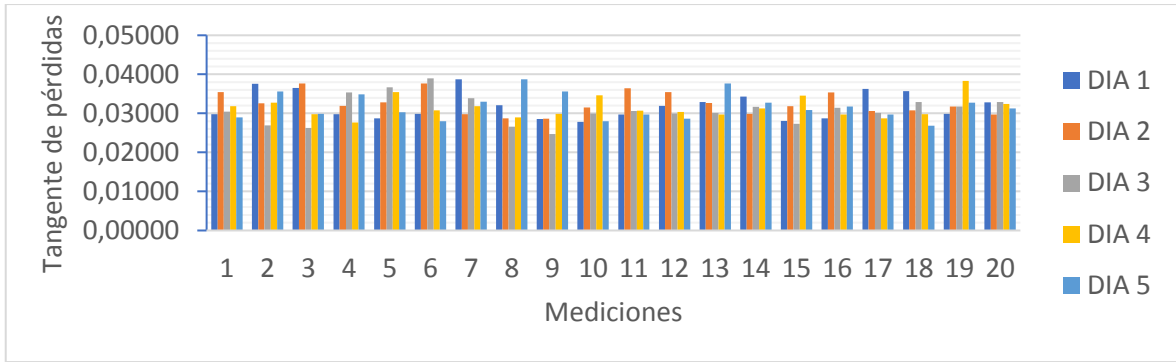


Gráfico 18-4: Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRdar 2 a una distancia de 5λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.4. Resultados de caracterización con la técnica SDRdar 3

En esta sección se detallan los datos obtenidos de la caracterización de los materiales dieléctricos con la técnica SDRadar 3. Al igual que en las técnicas SDRadar 1 y 2, se requiere de una señal de calibración (ver Figura 51-3) para normalizar el radargrama obtenido con las muestras de los dieléctricos. De esta forma se pudo estimar el coeficiente de transmisión y por consiguiente la parte real de la permitividad relativa de los dieléctricos en estudio.

4.4.1. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3

En la Figura 7-4 se muestra el sistema de medición utilizado para caracterizar la permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRadar 3.



Figura 7-4: Sistema de medición para la baquelita con la técnica SDRdar 3.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Las pruebas se realizaron a diferentes distancias de separación entre la antena transmisora y receptora (ver Figura 50-3). Para cada distancia en particular, se realizaron un total de 100 mediciones distribuidas en 5 días diferentes.

4.4.1.1. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ

Los datos de permitividad relativa obtenidos al caracterizar la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de separación 6λ se muestran en la Tabla 19-4.

Tabla 19-4: Datos de la permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	4,75737	4,76622	4,75194	4,81077	4,81104
2	4,78881	4,72917	4,78591	4,86743	4,88428
3	4,8194	4,80588	4,81952	4,85498	4,82389
4	4,80723	4,81263	4,75682	4,87198	4,78571
5	4,88099	4,81154	4,83003	4,83451	4,78631
6	4,85285	4,81859	4,84428	4,88707	4,79666
7	4,86471	4,80294	4,8306	4,83692	4,75209
8	4,82424	4,6995	4,81091	4,86204	4,79407
9	4,82741	4,84273	4,80636	4,8122	4,80423
10	4,80918	4,83997	4,75807	4,77444	4,69597
11	4,73704	4,85576	4,76955	4,78919	4,80196
12	4,7649	4,82834	4,7969	4,7865	4,82616
13	4,7681	4,88291	4,77729	4,79626	4,89422
14	4,68274	4,849	4,82027	4,85396	4,87647
15	4,75279	4,7821	4,83625	4,73993	4,75731
16	4,8043	4,75417	4,84598	4,74481	4,75152
17	4,73668	4,7449	4,8953	4,78444	4,75021
18	4,78721	4,7438	4,85794	4,79421	4,70536
19	4,79566	4,68412	4,79733	4,78769	4,71385
20	4,82024	4,76004	4,80306	4,73263	4,73645
PROMEDIO	4,79409	4,79072	4,80972	4,81110	4,78739

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la mayoría de los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la baquelita (ver Tabla 2-2). El 88 % de los valores se encuentran dentro de este rango (4.74 – 4.9), y el 12% de estos tiene un valor menor al del rango establecido. Cada una de las 100 pruebas se realizaron en sesiones diferentes de la tarjeta NI USRP-

2932, por tanto, en cada medición pueden variar en pequeña proporción algunos parámetros del sistema como la estabilidad del oscilador y el ruido de fase generado por la misma tarjeta USRP.

En el Gráfico 19-4 se muestran los resultados de permitividad relativa de la baquelita agrupados en función de los días de prueba.

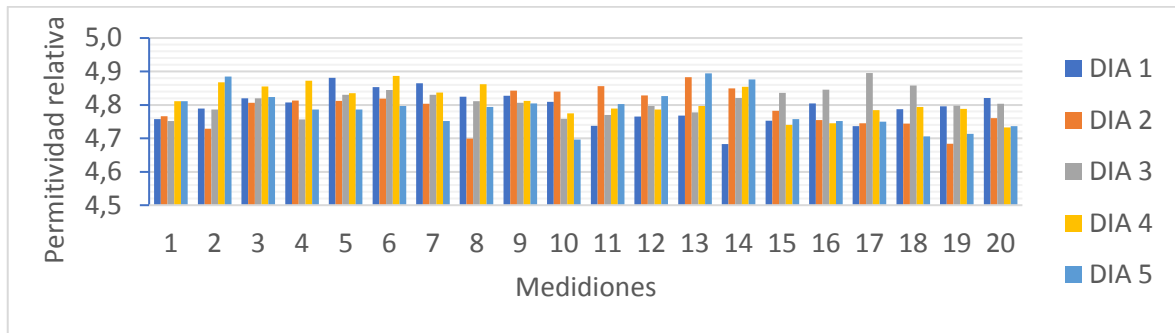


Gráfico 19-4: Permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 6λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.4.1.2. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ

Luego de haber realizado las pruebas a una distancia de separación de 6λ , sin modificar ningún parámetro del sistema de medición SDRadar, salvo la distancia de separación (ahora 8λ), se realizaron nuevamente las pruebas de caracterización a la baquelita. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 20-4.

Tabla 20-4: Datos de la permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	4,74223	4,82877	4,82847	4,79988	4,76522
2	4,76209	4,82515	4,75479	4,81565	4,78102
3	4,75901	4,79972	4,81714	4,82192	4,77077
4	4,76192	4,79594	4,84584	4,81821	4,79494
5	4,7747	4,81087	4,83466	4,80261	4,76853
6	4,68174	4,75053	4,81489	4,81286	4,74456
7	4,78775	4,82543	4,80372	4,67058	4,86011
8	4,6936	4,8062	4,82128	4,78576	4,79802
9	4,79724	4,82343	4,74979	4,74972	4,74881
10	4,82117	4,80382	4,77795	4,7943	4,76945
11	4,80695	4,74651	4,82108	4,86282	4,7512
12	4,82097	4,81645	4,74392	4,87992	4,77193

13	4,82223	4,79055	4,80575	4,80449	4,88892
14	4,86278	4,7936	4,7464	4,79907	4,83959
15	4,81211	4,85468	4,82469	4,76213	4,75762
16	4,73288	4,79639	4,80748	4,82011	4,84514
17	4,76871	4,78453	4,84613	4,72865	4,78189
18	4,81043	4,854	4,8192	4,77402	4,80549
19	4,8011	4,8484	4,75981	4,84522	4,83337
20	4,80662	4,88464	4,7943	4,71219	4,80533
PROMEDIO	4,78131	4,81198	4,80086	4,79301	4,79410

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la mayoría de los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la baquelita. El 94 % de los valores se encuentran dentro de este rango (4.74 – 4.9), y el 6% de estos tienen un valor menor al del rango mencionado. En el Gráfico 20-4 se aprecian los resultados de la permitividad relativa de la baquelita agrupados en función de los días de prueba.

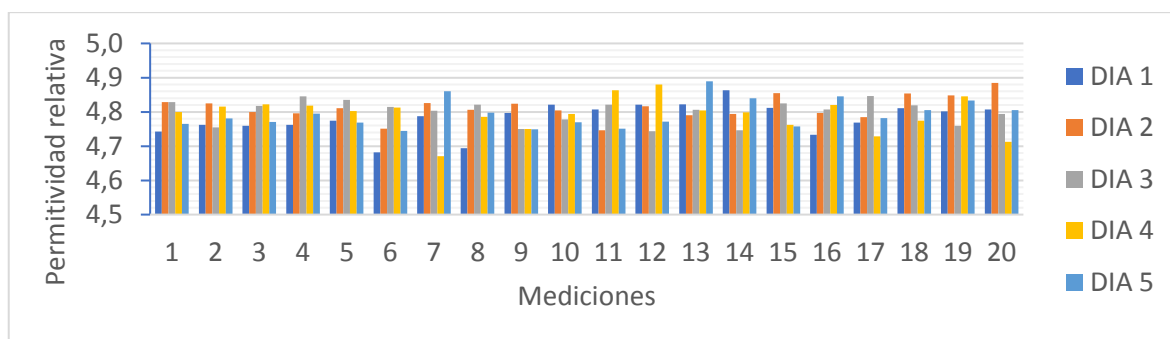


Gráfico 20-4: Permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 8λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.4.1.3. Caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ

A continuación, se muestran los resultados luego de haber realizado las pruebas de caracterización de la baquelita con una distancia de separación de 10λ . Los datos de permitividad relativa obtenidos se detallan en la Tabla 21-4.

Tabla 21-4: Datos de la permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	4,86574	4,85822	4,75037	4,81323	4,7746

2	4,88923	4,87561	4,73081	4,84175	4,79479
3	4,83758	4,77216	4,70209	4,86183	4,83163
4	4,86953	4,70399	4,68155	4,82888	4,80163
5	4,74373	4,76427	4,73431	4,77197	4,80463
6	4,85688	4,83874	4,76579	4,86288	4,82084
7	4,82687	4,76285	4,71759	4,89657	4,79443
8	4,85618	4,70662	4,78663	4,79609	4,82193
9	4,81435	4,70976	4,77157	4,78813	4,81374
10	4,82826	4,84546	4,84765	4,75197	4,79701
11	4,86987	4,84464	4,85373	4,79056	4,78159
12	4,8381	4,81681	4,74622	4,76775	4,7813
13	4,77761	4,8266	4,78364	4,75622	4,78404
14	4,74454	4,82233	4,83844	4,84524	4,79764
15	4,80862	4,80383	4,84081	4,84406	4,81016
16	4,77713	4,81624	4,81367	4,86229	4,8527
17	4,77461	4,81621	4,82672	4,76448	4,82593
18	4,82009	4,82313	4,65573	4,74537	4,83903
19	4,85258	4,77993	4,82508	4,78199	4,80213
20	4,8306	4,76434	4,80552	4,80298	4,85596
PROMEDIO	4,82411	4,79759	4,77390	4,80871	4,80929

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que la mayoría de los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la baquelita. El 91 % de los valores se encuentran dentro de este rango (4.74 – 4.9), y el 9% de estos tienen un valor menor al del rango mencionado.

En el Gráfico 21-4 se aprecian los resultados de la permitividad de la baquelita agrupados en función de los días de prueba.

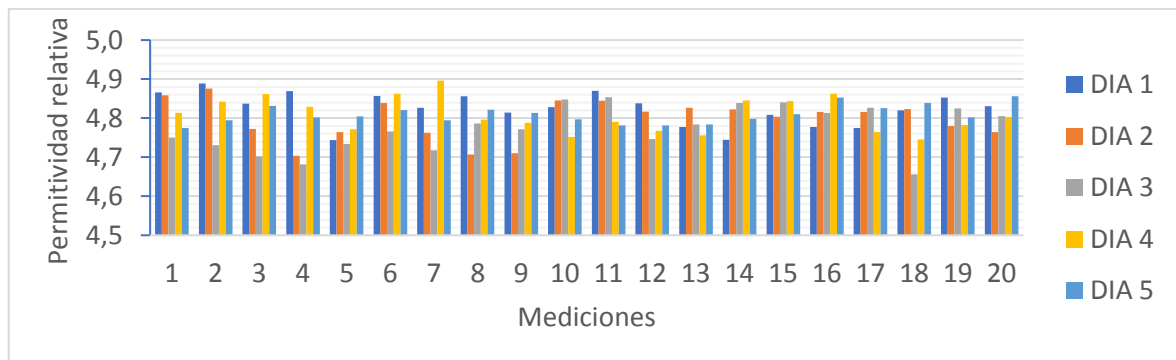


Gráfico 21-4: Permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 10λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.4.2. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 3

En la Figura 8-4 se muestra el sistema de medición utilizado para caracterizar la permitividad relativa de la madera seca con la técnica SDRadar 3.

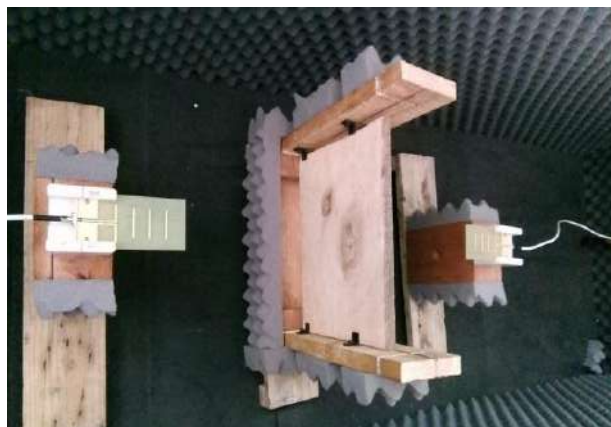


Figura 8-4: Sistema de medición para la madera seca con la técnica SDRadar 3.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Las pruebas se realizaron a diferentes distancias de separación entre la antena transmisora y receptora (ver Figura 50-3). Para cada distancia en particular, se realizaron un total de 100 mediciones distribuidas en 5 días diferentes.

4.4.2.1. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ

Los datos de permitividad relativa obtenidos al caracterizar la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de separación 6λ se muestran en la Tabla 22-4.

Tabla 22-4: Datos de la permitividad relativa de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	3,25122	3,20371	3,20888	3,20838	3,20585
2	3,25699	3,26211	3,20216	3,19304	3,2057
3	3,21165	3,18751	3,19044	3,19337	3,20343
4	3,20033	3,22429	3,21338	3,19184	3,20706
5	3,18264	3,23196	3,23012	3,19337	3,21632
6	3,21667	3,21444	3,19393	3,19331	3,21705
7	3,20333	3,17422	3,20799	3,19605	3,21629
8	3,19807	3,19449	3,18887	3,19217	3,21191

9	3,22322	3,25348	3,24271	3,19673	3,21183
10	3,24639	3,22251	3,18724	3,20092	3,21612
11	3,18312	3,25724	3,20192	3,20065	3,20992
12	3,19531	3,20954	3,21137	3,19718	3,21065
13	3,24579	3,19176	3,19521	3,19953	3,21513
14	3,19613	3,24604	3,17317	3,19688	3,21556
15	3,20595	3,24445	3,19436	3,20622	3,2141
16	3,21616	3,23308	3,25361	3,201	3,21238
17	3,20966	3,22285	3,19375	3,20008	3,21484
18	3,21291	3,21967	3,22875	3,20592	3,2034
19	3,25697	3,21336	3,21162	3,20258	3,2092
20	3,20697	3,20698	3,184	3,20677	3,20817
PROMEDIO	3,21597	3,22068	3,20567	3,19880	3,21125

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la madera seca (1.5 – 4). El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 3.17317, y el valor máximo del conjunto de datos es de 3.26211. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas son cercanas entre sí. Con estos datos, en secciones posteriores se detalla un análisis estadístico para determinar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

En el Gráfico 22-4 se muestran los resultados de permitividad relativa de la madera seca agrupados en función de los días de prueba.

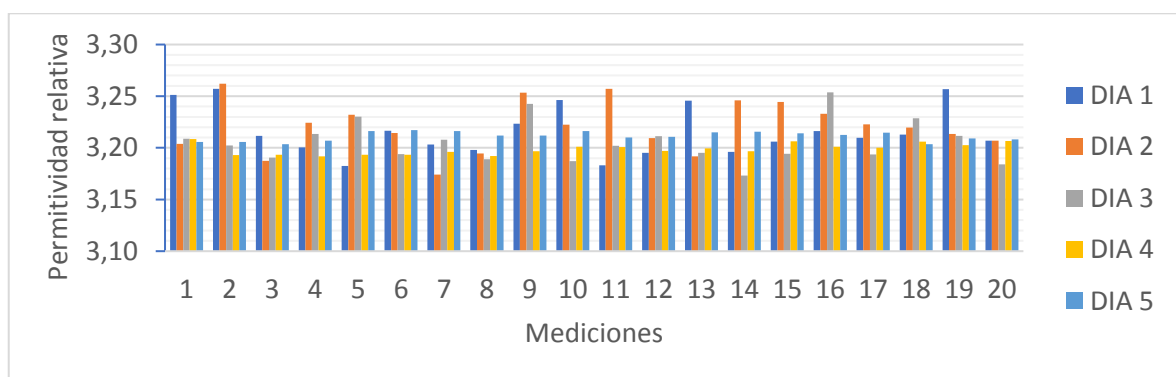


Gráfico 22-4: Permitividad relativa de la baquelita con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 6λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.4.2.2. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ

Luego de haber realizado las pruebas a una distancia de separación de 6λ , sin modificar ningún parámetro del sistema de medición SDRadar, salvo la distancia de separación (ahora 8λ), se realizaron nuevamente las pruebas de caracterización a la madera seca. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 23-4.

Tabla 23-4: Datos de la permitividad relativa de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	3,26038	3,27178	3,25725	3,21776	3,24103
2	3,20968	3,23744	3,25838	3,24195	3,24275
3	3,17874	3,24047	3,20461	3,26392	3,24805
4	3,22602	3,19474	3,18228	3,26003	3,26868
5	3,29408	3,21304	3,19338	3,25132	3,23112
6	3,174	3,27568	3,21783	3,20452	3,20758
7	3,2036	3,24072	3,2415	3,19828	3,22176
8	3,2652	3,24898	3,18612	3,24677	3,1859
9	3,27791	3,25331	3,25247	3,21998	3,2421
10	3,28567	3,208	3,2498	3,2381	3,19948
11	3,26544	3,20737	3,24972	3,18331	3,20741
12	3,19916	3,17081	3,22046	3,20915	3,18367
13	3,18952	3,17499	3,25283	3,19292	3,19395
14	3,22133	3,26114	3,23174	3,23448	3,18955
15	3,1708	3,26919	3,25158	3,23959	3,23022
16	3,19215	3,18558	3,22252	3,22565	3,24489
17	3,24347	3,20857	3,2601	3,2287	3,25915
18	3,21294	3,22818	3,22127	3,24899	3,22305
19	3,20262	3,20825	3,21488	3,18648	3,17499
20	3,21563	3,23508	3,21786	3,20944	3,30241
PROMEDIO	3,22442	3,22667	3,22933	3,22507	3,22489

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la madera seca (1.5 – 4). El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 3.1708, y el valor máximo del conjunto de datos es de 3.30241.

En el Gráfico 23-4 se muestran los resultados de permitividad relativa de la madera seca agrupados en función de los días de prueba.

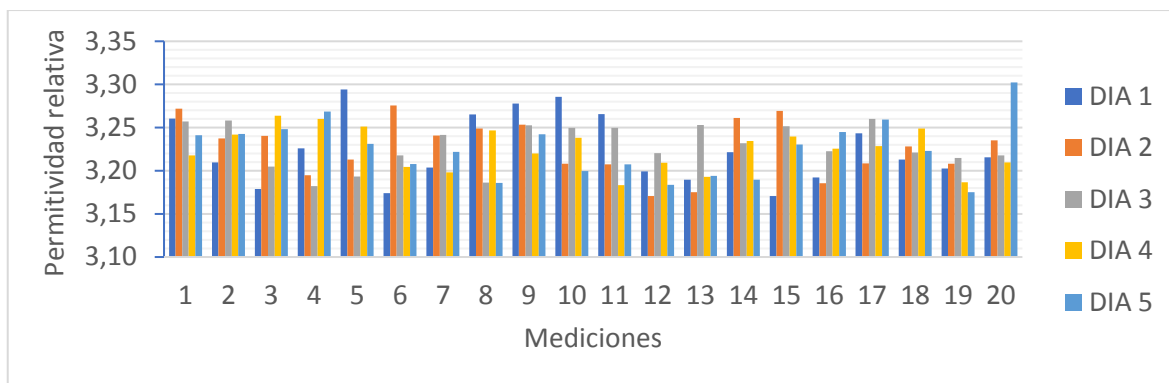


Gráfico 23-4: Permittividad relativa de la madera seca con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 8λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.4.2.3. Caracterización de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ

A continuación, se muestran los resultados luego de haber realizado las pruebas de caracterización de la madera seca con una distancia de separación de 10λ . Los datos de permitividad relativa obtenidos se detallan en la Tabla 24-4.

Tabla 24-4: Datos de la permitividad relativa de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	3,19596	3,2082	3,15731	3,19212	3,21195
2	3,18886	3,21269	3,15407	3,19126	3,21982
3	3,2072	3,18848	3,18159	3,22015	3,22189
4	3,1979	3,22498	3,22459	3,23112	3,21797
5	3,20924	3,18688	3,18007	3,2014	3,2252
6	3,2057	3,20785	3,18398	3,18083	3,23376
7	3,19176	3,21411	3,21303	3,22662	3,20666
8	3,19999	3,20785	3,18865	3,20507	3,15829
9	3,20389	3,19826	3,20319	3,23564	3,187
10	3,20207	3,23519	3,24831	3,22641	3,1491
11	3,19611	3,22223	3,23278	3,22988	3,17907
12	3,211	3,20693	3,20748	3,1983	3,21598
13	3,21077	3,2124	3,21594	3,22372	3,23383
14	3,20651	3,21938	3,21349	3,21338	3,21464
15	3,21202	3,18692	3,20808	3,21244	3,18591
16	3,20772	3,16728	3,19772	3,19076	3,18711
17	3,2083	3,2177	3,19885	3,22101	3,18296
18	3,2182	3,19988	3,2071	3,20548	3,17688

19	3,21585	3,25229	3,22033	3,22669	3,20446
20	3,20948	3,27049	3,19271	3,15469	3,19994
PROMEDIO	3,20493	3,21200	3,20146	3,20935	3,20062

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa de la madera seca (1.5 – 4). El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 3.1491, y el valor máximo del conjunto de datos es de 3.27049.

En el Gráfico 24-4 se muestran los resultados de permitividad relativa de la madera seca agrupados en función de los días de prueba.

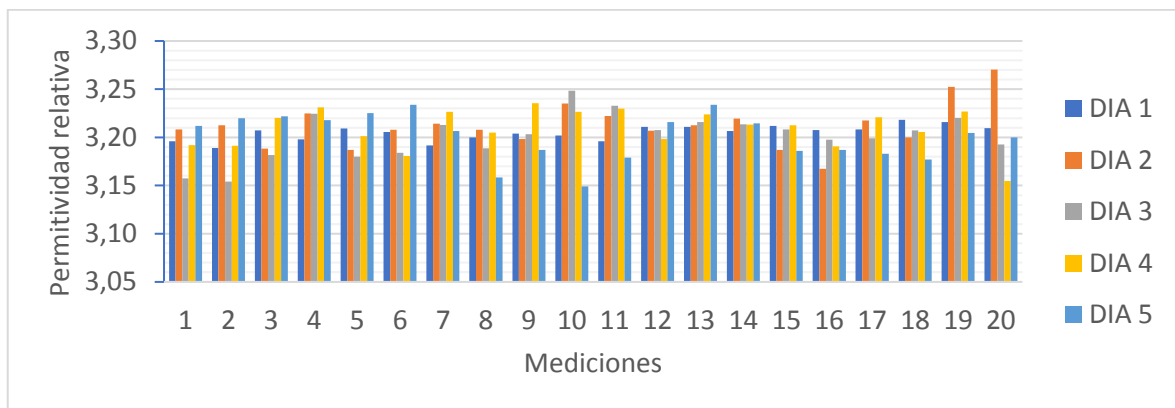


Gráfico 24-4: Permitividad relativa de la madera seca con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 10λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.4.3. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 3

En la Figura 9-4 se muestra el sistema de medición utilizado para caracterizar la permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRadar 3.

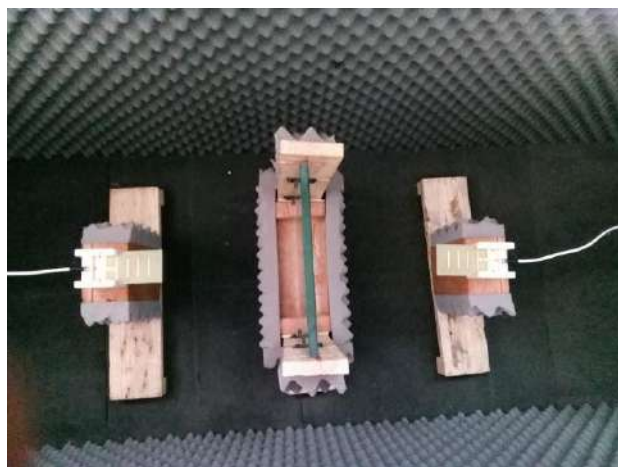


Figura 9-4: Sistema de medición para el vidrio con la técnica SDRadar 3.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

Las pruebas se realizaron a diferentes distancias de separación entre la antena transmisora y receptora (ver Figura 50-3). Para cada distancia en particular, se realizaron un total de 100 mediciones distribuidas en 5 días diferentes.

4.4.3.1. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ

Los datos de permitividad relativa obtenidos al caracterizar el vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de separación 6λ se muestran en la Tabla 25-4.

Tabla 25-4: Datos de la permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	7,86807	7,78334	7,78509	7,82204	7,8202
2	7,81459	7,86648	7,86241	7,79655	7,82116
3	7,84294	7,86163	7,84506	7,87101	7,82635
4	7,82385	7,88645	7,80482	7,8878	7,84859
5	7,7959	7,85066	7,86053	7,85816	7,83878
6	7,8676	7,77468	7,84343	7,80717	7,84897
7	7,83489	7,83093	7,74191	7,79667	7,87199
8	7,85238	7,79193	7,88538	7,77397	7,81942
9	7,81612	7,86357	7,87939	7,91436	7,87977
10	7,79614	7,8049	7,78149	7,88927	7,82626
11	7,82736	7,79312	7,79327	7,87353	7,84909
12	7,78805	7,82154	7,84738	7,80929	7,79033
13	7,851	7,85527	7,82246	7,78834	7,85356

14	7,80586	7,88228	7,80805	7,79471	7,79072
15	7,86567	7,91365	7,797	7,85616	7,86213
16	7,86533	7,82343	7,76693	7,85814	7,87484
17	7,842	7,6842	7,84631	7,79051	7,7863
18	7,85849	7,81217	7,81451	7,85516	7,83781
19	7,86217	7,88655	7,80454	7,81983	7,79399
20	7,78896	7,82181	7,79074	7,86058	7,76517
PROMEDIO	7,83337	7,83043	7,81904	7,83616	7,83027

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa del vidrio (ver Tabla 2-2). Es decir, el 100 % de los datos están dentro del rango de permitividad de 4 a 9. El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 7.6842, y el valor máximo del conjunto de datos es de 7.91436. Además, las medias aritméticas de cada día de pruebas son cercanas entre sí. Con estos datos, en secciones posteriores se detalla un análisis estadístico para determinar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

En el Gráfico 25-4 se muestran los resultados de permitividad del vidrio agrupados en función de los días de prueba.

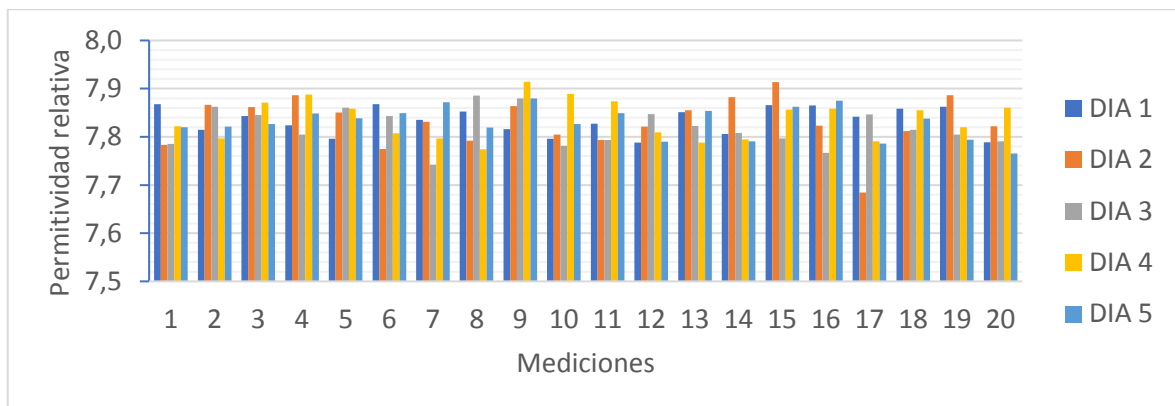


Gráfico 25-4: Permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 6λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.4.3.2. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ

Luego de haber realizado las pruebas a una distancia de separación de 6λ , sin modificar ningún parámetro del sistema de medición SDRadar, salvo la distancia de separación (ahora 8λ), se realizaron

nuevamente las pruebas de caracterización del vidrio. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 26-4.

Tabla 26-4: Datos de la permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	7,83941	7,89949	7,7276	7,77835	7,86579
2	7,82522	7,82936	7,83481	7,71213	7,76437
3	7,84109	7,82841	7,81733	7,78843	7,85982
4	7,86555	7,79314	7,78084	7,80307	7,71417
5	7,78175	7,81884	7,79148	7,81341	7,72415
6	7,77262	7,72023	7,73963	7,81472	7,83475
7	7,77253	7,8159	7,73608	7,82787	7,78773
8	7,71507	7,81847	7,71737	7,73174	7,7594
9	7,76854	7,82763	7,71153	7,761	7,78466
10	7,77113	7,734	7,70657	7,79886	7,80468
11	7,81867	7,7395	7,75062	7,834	7,72943
12	7,74299	7,8051	7,78099	7,81729	7,78312
13	7,753	7,8267	7,82407	7,85878	7,85555
14	7,75865	7,83795	7,73283	7,77715	7,75302
15	7,75054	7,78094	7,61324	7,91798	7,84378
16	7,85438	7,82008	7,66784	7,86478	7,83062
17	7,814	7,86104	7,63319	7,91515	7,88847
18	7,82439	7,80884	7,68298	7,86494	7,77167
19	7,735	7,77872	7,53433	7,81115	7,88297
20	7,88846	7,73046	7,7607	7,78501	7,86278
PROMEDIO	7,79465	7,80374	7,72720	7,81379	7,80505

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa del vidrio (ver Tabla 2-2). Es decir, el 100 % de los datos están dentro del rango de permitividad de 4 a 9. El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 7.53433, y el valor máximo del conjunto de datos es de 7.91798. En el Gráfico 26-4 se muestran los resultados de permitividad del vidrio agrupados en función de los días de prueba.

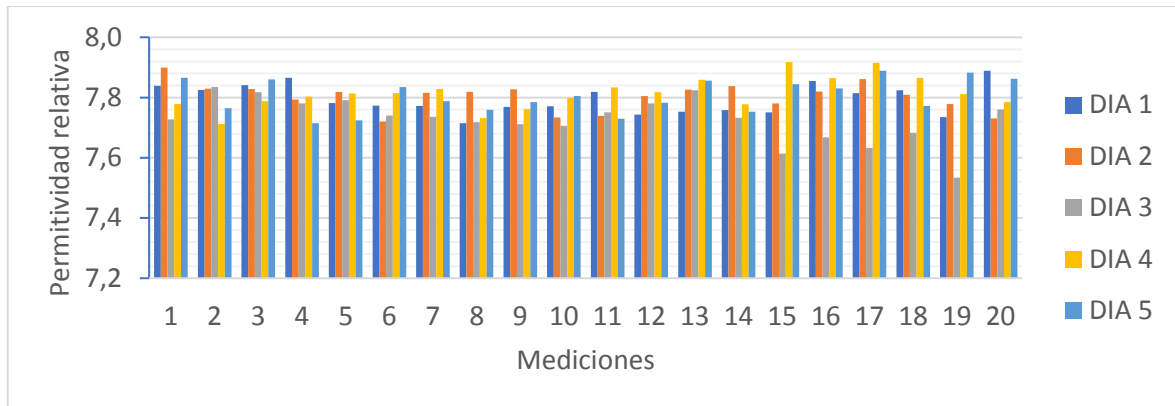


Gráfico 26-4: Permittividad relativa del vidrio con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 8λ .

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.4.3.3. Caracterización del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ

Luego de haber realizado las pruebas a una distancia de separación de 6λ y 8λ , sin modificar ningún parámetro del sistema de medición SDRadar, salvo la distancia de separación (ahora 10λ), se realizaron nuevamente las pruebas de caracterización del vidrio. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 27-4.

Tabla 27-4: Datos de la permittividad relativa del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ .

Mediciones	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
1	7,744	7,7344	7,7441	7,83812	7,85205
2	7,79793	7,79893	7,82159	7,78556	7,83359
3	7,84439	7,83539	7,81313	7,85048	7,81122
4	7,80686	7,81786	7,83536	7,84161	7,83176
5	7,81678	7,80584	7,7896	7,81869	7,86384
6	7,83977	7,82978	7,74186	7,85413	7,82533
7	7,77427	7,73427	7,77346	7,84843	7,83329
8	7,83705	7,73705	7,85965	7,84797	7,85185
9	7,79636	7,71636	7,82694	7,85705	7,83109
10	7,73598	7,83598	7,83566	7,8385	7,82815
11	7,75462	7,81107	7,80829	7,82022	7,84087
12	7,74861	7,84861	7,81022	7,83249	7,85463
13	7,82423	7,85423	7,84563	7,84449	7,86004
14	7,83083	7,83083	7,84301	7,82891	7,85086
15	7,81866	7,83866	7,80889	7,82372	7,82683
16	7,75147	7,85147	7,84437	7,84268	7,84765
17	7,82435	7,81935	7,75034	7,82448	7,84143

18	7,83034	7,82034	7,79663	7,84134	7,87458
19	7,85706	7,84706	7,85346	7,85726	7,82988
20	7,79939	7,80783	7,73528	7,8164	7,87825
PROMEDIO	7,80165	7,80877	7,80687	7,83563	7,84336

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Los resultados obtenidos de las 100 mediciones muestran que todos los valores se encuentran dentro del rango de permitividad relativa del vidrio (ver Tabla 2-2). Es decir, el 100 % de los datos están dentro del rango de permitividad de 4 a 9. El valor mínimo de permitividad obtenido con este escenario de medición es de 7.71636, y el valor máximo del conjunto de datos es de 7.87825.

En el Gráfico 27-4 se muestran los resultados de permitividad del vidrio agrupados en función de los días de prueba.

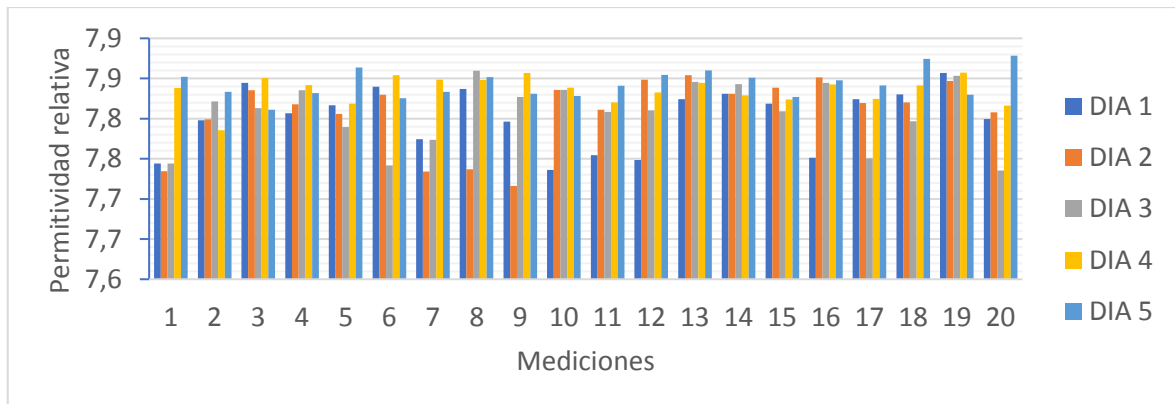


Gráfico 27-4: Permitividad relativa del vidrio con la técnica SDRdar 3 a una distancia de 10λ.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.5. Análisis estadístico de los resultados

En la mayoría de ciencias experimentales, las leyes, hipótesis o modelos planteados deben demostrarse experimentalmente, para lo cual es necesario realizar mediciones. En la mayoría de los casos, la experimentación permite medir cierta magnitud que se supone posee un valor definido. Para una buena estimación del valor real se deben realizar múltiples medidas en iguales condiciones y luego promediar los resultados, siempre y cuando los datos sigan una distribución normal.

El software utilizado para en análisis de los resultados es IBM SPSS Statistics v.25 (ver Figura 10-4).



Figura 10-4: Software IBM SPSS Statistics.

Realizado por: Masaquiza, R. 2020.

4.5.1. Metodología Estadística

El método estadístico utilizado fue la prueba de análisis de varianza (ANOVA), la cual permite probar la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. En este trabajo, las poblaciones son los grupos de datos formados por las mediciones de cada día de prueba y a diferentes distancias para cada técnica SDRadar. Entre las condiciones que supone la prueba ANOVA, se establece que los datos deben seguir una distribución normal, por tanto, en principio se realizó una prueba de normalidad de todos los resultados obtenidos.

Para todas las pruebas estadísticas el intervalo de confianza seleccionado fue del 95%, por tanto, un nivel de significancia de 5%.

4.5.2. Distribución Normal

Para verificar que los datos obtenidos al caracterizar los materiales dieléctricos siguen una distribución normal se plantearon dos hipótesis para cada técnica SDRadar.

4.5.2.1. Pruebas de normalidad de la técnica SDRadar 1

Las hipótesis planteadas para la técnica SDRadar 1 fueron:

- H_0 : Las lecturas de permitividad relativa medidas con la técnica SDRadar 1 siguen una distribución normal en cada día de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las lecturas de permitividad relativa medidas con la técnica SDRadar 1 no siguen una distribución normal en cada día de medición (Hipótesis alternativa).

Las probabilidades obtenidas para las muestras de baquelita, madera seca y vidrio con la técnica SDRadar 1 a diferentes distancias de separación (3λ , 4λ y 5λ) se detallan en la Tabla 28-4.

Tabla 28-4: Pruebas de normalidad de las lecturas con la técnica SDRadar 1.

	Días de Prueba	Probabilidad
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .	Día 1	0,14
	Día 2	1,00
	Día 3	0,68
	Día 4	0,48
	Día 5	0,52
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ .	Día 1	0,19
	Día 2	0,65
	Día 3	0,78
	Día 4	0,96
	Día 5	0,52
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ .	Día 1	0,24
	Día 2	0,43
	Día 3	0,80
	Día 4	0,10
	Día 5	0,13
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .	Día 1	0,13
	Día 2	0,06
	Día 3	0,34
	Día 4	0,37
	Día 5	0,10
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ .	Día 1	0,06
	Día 2	0,26
	Día 3	0,13
	Día 4	0,16
	Día 5	0,90
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ .	Día 1	0,36
	Día 2	0,73
	Día 3	0,16
	Día 4	0,72
	Día 5	0,79

Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ .	Día 1	0,10
	Día 2	0,18
	Día 3	0,07
	Día 4	0,11
	Día 5	0,30
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ .	Día 1	0,05
	Día 2	0,89
	Día 3	0,92
	Día 4	0,74
	Día 5	0,68
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ .	Día 1	0,62
	Día 2	0,05
	Día 3	0,67
	Día 4	0,99
	Día 5	0,84

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Según la Tabla 28-4, las probabilidades obtenidas para cada material dieléctrico son mayores al nivel de significancia, por tanto, se concluye que las lecturas de permitividad de cada material dieléctrico con la técnica SDRadar 1 siguen una distribución normal en cada día de medición.

4.5.2.2. Pruebas de normalidad de la técnica SDRadar 2

Las hipótesis planteadas para la técnica SDRadar 2 fueron:

- H_0 : Las lecturas de la tangente de pérdidas medidas con la técnica SDRadar 2 siguen una distribución normal en cada día de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las lecturas de la tangente de pérdidas medidas con la técnica SDRadar 2 no siguen una distribución normal en cada día de medición (Hipótesis alternativa).

Las probabilidades obtenidas para las muestras de baquelita, madera seca y vidrio con la técnica SDRadar 2 a diferentes distancias de separación (3λ , 4λ y 5λ) se detallan en la Tabla 29-4.

Tabla 29-4: Pruebas de normalidad de las lecturas con la técnica SDRadar 2.

	Días de Prueba	Probabilidad
Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ .	Día 1	0,68
	Día 2	0,15
	Día 3	0,21
	Día 4	0,16

	Día 5	0,04
Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ .	Día 1	0,11
	Día 2	0,60
	Día 3	0,61
	Día 4	0,96
	Día 5	0,42
Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ .	Día 1	0,45
	Día 2	0,17
	Día 3	0,14
	Día 4	0,96
	Día 5	0,13
Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ .	Día 1	0,14
	Día 2	0,57
	Día 3	0,53
	Día 4	0,18
	Día 5	0,26
Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ .	Día 1	0,20
	Día 2	0,14
	Día 3	0,56
	Día 4	0,40
	Día 5	0,25
Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ .	Día 1	0,04
	Día 2	0,08
	Día 3	0,38
	Día 4	0,21
	Día 5	0,73
Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ .	Día 1	0,95
	Día 2	0,17
	Día 3	0,05
	Día 4	0,53
	Día 5	0,11
Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ .	Día 1	0,42
	Día 2	0,64
	Día 3	0,31
	Día 4	0,11
	Día 5	0,24
Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ .	Día 1	0,04
	Día 2	0,12
	Día 3	0,74
	Día 4	0,08
	Día 5	0,32

Según la Tabla 29-4, las probabilidades obtenidas para cada material dieléctrico son mayores al nivel de significancia, por tanto, se concluye que las lecturas de la tangente de pérdidas de cada material dieléctrico con la técnica SDRadar 2 siguen una distribución normal en cada día de medición.

4.5.2.3. Pruebas de normalidad de la técnica SDRadar 3

Las hipótesis planteadas para la técnica SDRadar 3 fueron:

- H_0 : Las lecturas de permitividad relativa medidas con la técnica SDRadar 3 siguen una distribución normal en cada día de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las lecturas de permitividad relativa medidas con la técnica SDRadar 3 no siguen una distribución normal en cada día de medición (Hipótesis alternativa).

Las probabilidades obtenidas para las muestras de baquelita, madera seca y vidrio con la técnica SDRadar 3 a diferentes distancias de separación (6λ , 8λ y 10λ) se detallan en la Tabla 30-4.

Tabla 30-4: Pruebas de normalidad de las lecturas con la técnica SDRadar 3.

	Días de Prueba	Probabilidad
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ .	Día 1	0,95
	Día 2	0,78
	Día 3	0,83
	Día 4	0,41
	Día 5	0,51
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ .	Día 1	0,30
	Día 2	0,72
	Día 3	0,03
	Día 4	0,41
	Día 5	0,08
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ .	Día 1	0,24
	Día 2	0,12
	Día 3	0,46
	Día 4	0,32
	Día 5	0,42
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ .	Día 1	0,05
	Día 2	0,93
	Día 3	0,21
	Día 4	0,14

	Día 5	0,12
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ.	Día 1	0,17
	Día 2	0,50
	Día 3	0,07
	Día 4	0,63
	Día 5	0,61
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ.	Día 1	0,67
	Día 2	0,37
	Día 3	0,90
	Día 4	0,10
	Día 5	0,31
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 6λ.	Día 1	0,06
	Día 2	0,21
	Día 3	0,81
	Día 4	0,19
	Día 5	0,52
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 8λ.	Día 1	0,50
	Día 2	0,16
	Día 3	0,34
	Día 4	0,74
	Día 5	0,27
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 10λ.	Día 1	0,08
	Día 2	0,04
	Día 3	0,07
	Día 4	0,06
	Día 5	0,59

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Según la Tabla 30-4, las probabilidades obtenidas para cada material dieléctrico son mayores al nivel de significancia, por tanto, se concluye que las lecturas de permitividad de cada material dieléctrico con la técnica SDRadar 3 siguen una distribución normal en cada día de medición.

4.5.3. Independencia en la toma de datos

Todas las lecturas obtenidas para cada material dieléctrico con las diferentes técnicas SDRadar fueron tomadas de forma independiente en cada día de medición, de esta forma se cumple otro requisito para realizar la prueba ANOVA.

4.5.4. Prueba estadística con la técnica SDRadar 1

Con los datos obtenidos de la caracterización de materiales dieléctricos con la técnica SDRadar 1, se realizó una prueba estadística de análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5%.

4.5.4.1. Prueba estadística con la técnica SDRadar 1 para la baquelita

Las hipótesis planteadas para la prueba ANOVA fueron:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita son iguales en todos los días de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita no son iguales en todos los días de medición (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada día de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 31-4.

Tabla 31-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 en función de los días de medición.

	Probabilidad
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,705
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,394
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,774

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 31-4, las probabilidades obtenidas son mayores al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias aritméticas de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita son iguales en todos los días de medición para las tres distancias (3λ , 4λ y 5λ).

Por otro lado, también se realiza una prueba ANOVA para comparar si las medias de permitividad son iguales en cada distancia de medición. Para esto se plantearon las siguientes hipótesis:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita no son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada distancia de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 32-4.

Tabla 32-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 en función de las distancias de medición.

	Probabilidad
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ vs 4λ vs 5λ .	0,129

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 32-4, la probabilidad obtenida es mayor al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita son iguales en todas las distancias de medición (3λ , 4λ y 5λ), concluyéndose que los resultados obtenidos son fiables a cualquier distancia de medición.

Luego de haber comprobado la validez de las lecturas de permitividad relativa con la técnica SDRadar 1, se puede asumir que la media global de todos los datos es la permitividad relativa de la baquelita con un valor de 4,8017761.

4.5.4.2. Prueba estadística con la técnica SDRadar 1 para la madera seca

Las hipótesis planteadas para la prueba ANOVA fueron:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca son iguales en todos los días de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca no son iguales en todos los días de medición (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada día de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 33-4.

Tabla 33-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 en función de los días de medición.

	Probabilidad
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,795
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,371

Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,546
--	-------

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 33-4, las probabilidades obtenidas son mayores al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias aritméticas de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca son iguales en todos los días de medición para las tres distancias (3λ, 4λ y 5λ).

Por otro lado, también se realiza una prueba ANOVA para comparar si las medias de permitividad son iguales en cada distancia de medición. Para esto se plantearon las siguientes hipótesis:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca son iguales en todas las distancias de medición: 3λ, 4λ y 5λ (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca no son iguales en todas las distancias de medición: 3λ, 4λ y 5λ (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada distancia de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 34-4.

Tabla 34-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 en función de las distancias de medición.

	Probabilidad
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ vs 4λ vs 5λ.	0,575

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 34-4, la probabilidad obtenida es mayor al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca son iguales en todas las distancias de medición (3λ, 4λ y 5λ), concluyéndose que los resultados obtenidos son fiables a cualquier distancia de medición.

Luego de haber comprobado la validez de las lecturas de permitividad relativa con la técnica SDRadar 1, se puede asumir que la media global de todos los datos es la permitividad relativa de la madera seca con un valor de 3,204976.

4.5.4.3. Prueba estadística con la técnica SDRadar 1 del vidrio

Las hipótesis planteadas para la prueba ANOVA fueron:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa del vidrio son iguales en todos los días de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa del vidrio no son iguales en todos los días de medición (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada día de medición, se obtienen las probabilidades que se muestran en la Tabla 35-4.

Tabla 35-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 en función de los días de medición.

	Probabilidad
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,049
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 4λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,210
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 5λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,339

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 35-4, las probabilidades obtenidas son mayores al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias aritméticas de las lecturas de permitividad relativa del vidrio son iguales en todos los días de medición para las tres distancias (3λ , 4λ y 5λ).

Por otro lado, también se realiza una prueba ANOVA para comparar si las medias de permitividad son iguales en cada distancia de medición. Para esto se plantearon las siguientes hipótesis:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa del vidrio son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa del vidrio no son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada distancia de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 36-4.

Tabla 36-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 en función de las distancias de medición.

	Probabilidad
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 1 a una distancia de 3λ vs 4λ vs 5λ .	0,223

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 36-4, la probabilidad obtenida es mayor al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias de las lecturas de permitividad relativa del vidrio son iguales en todas las distancias de medición (3λ , 4λ y 5λ), concluyéndose que los resultados obtenidos son fiables a cualquier distancia de medición.

Luego de haber comprobado la validez de las lecturas de permitividad relativa con la técnica SDRadar 1, se puede asumir que la media global de todos los datos es la permitividad relativa del vidrio con un valor de 7,8141625.

4.5.5. Prueba estadística con la técnica SDRadar 2

Con los datos obtenidos de la caracterización de materiales dieléctricos con la técnica SDRadar 2, se realizó una prueba estadística de análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5%.

4.5.5.1. Prueba estadística con la técnica SDRadar 2 para la baquelita

Las hipótesis planteadas para la prueba ANOVA fueron:

- H_0 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas de la baquelita son iguales en todos los días de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas de la baquelita no son iguales en todos los días de medición (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de la tangente de pérdidas obtenidos en cada día de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 37-4.

Tabla 37-4: Prueba ANOVA de las lecturas de tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 en función de los días de medición.

	Probabilidad
Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,850
Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,847
Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,854

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 37-4, las probabilidades obtenidas son mayores al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias aritméticas de las lecturas de la tangente de pérdidas de la baquelita son iguales en todos los días de medición para las tres distancias (3λ , 4λ y 5λ).

Por otro lado, también se realiza una prueba ANOVA para comparar si las medias de la tangente de pérdidas son iguales en cada distancia de medición. Para esto se plantearon las siguientes hipótesis:

- H_0 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas de la baquelita son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas de la baquelita no son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de tangente de pérdidas obtenidos en cada distancia de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 38-4.

Tabla 38-4: Prueba ANOVA para las lecturas de la tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 en función de las distancias de medición.

	Probabilidad
Tangente de pérdidas de la baquelita con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ vs 4λ vs 5λ .	0,092

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 38-4, la probabilidad obtenida es mayor al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas de la baquelita son iguales en todas las distancias de medición (3λ , 4λ y 5λ), concluyéndose que los resultados obtenidos son fiables a cualquier distancia de medición.

Luego de haber comprobado la validez de las lecturas de la tangente de pérdidas con la técnica SDRadar 2, se puede asumir que la media global de todos los datos es la tangente de pérdidas de la baquelita con un valor de 0,0250291.

4.5.5.2. Prueba estadística con la técnica SDRadar 2 para la madera seca

Las hipótesis planteadas para la prueba ANOVA fueron:

- H_0 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas de la madera seca son iguales en todos los días de medición (Hipótesis nula).

- H_1 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas de la madera seca no son iguales en todos los días de medición (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de la tangente de pérdidas obtenidos en cada día de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 39-4.

Tabla 39-4: Prueba ANOVA para las lecturas de tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 en función de los días de medición.

	Probabilidad
Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,050
Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,900
Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,595

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 39-4, las probabilidades obtenidas son mayores al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias aritméticas de las lecturas de la tangente de pérdidas de la madera seca son iguales en todos los días de medición para las tres distancias (3λ , 4λ y 5λ).

Por otro lado, también se realiza una prueba ANOVA para comparar si las medias de la tangente de pérdidas son iguales en cada distancia de medición. Para esto se plantearon las siguientes hipótesis:

- H_0 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas de la madera seca son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas de la madera seca no son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de tangente de pérdidas obtenidos en cada distancia de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 40-4.

Tabla 40-4: Prueba ANOVA para las lecturas de la tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 en función de las distancias de medición.

	Probabilidad
Tangente de pérdidas de la madera seca con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ vs 4λ vs 5λ .	0,209

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 40-4, la probabilidad obtenida es mayor al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas de la madera seca son iguales en todas las distancias de medición (3λ , 4λ y 5λ), concluyéndose que los resultados obtenidos son fiables a cualquier distancia de medición.

Luego de haber comprobado la validez de las lecturas de la tangente de pérdidas con la técnica SDRadar 2, se puede asumir que la media global de todos los datos es la tangente de pérdidas de la madera seca con un valor de 0,0734185.

4.5.5.3. Prueba estadística con la técnica SDRadar 2 para el vidrio

Las hipótesis planteadas para la prueba ANOVA fueron:

- H_0 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas del vidrio son iguales en todos los días de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas del vidrio no son iguales en todos los días de medición (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de la tangente de pérdidas obtenidos en cada día de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 41-4.

Tabla 41-4: Prueba ANOVA para las lecturas de tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 en función de los días de medición.

	Probabilidad
Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,048
Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 4λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,763
Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 5λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,580

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 41-4, las probabilidades obtenidas son mayores al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias aritméticas de las lecturas de la tangente de pérdidas del vidrio son iguales en todos los días de medición para las tres distancias (3λ , 4λ y 5λ).

Por otro lado, también se realiza una prueba ANOVA para comparar si las medias de la tangente de pérdidas son iguales en cada distancia de medición. Para esto se plantearon las siguientes hipótesis:

- H_0 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas del vidrio son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas del vidrio no son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de tangente de pérdidas obtenidos en cada distancia de medición, se obtienen las probabilidades que se muestran en la Tabla 42-4.

Tabla 42-4: Prueba ANOVA para las lecturas de la tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 en función de las distancias de medición.

	Probabilidad
Tangente de pérdidas del vidrio con la técnica SDRadar 2 a una distancia de 3λ vs 4λ vs 5λ .	0,152

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 42-4, la probabilidad obtenida es mayor al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias de las lecturas de la tangente de pérdidas del vidrio son iguales en todas las distancias de medición (3λ , 4λ y 5λ), concluyéndose que los resultados obtenidos son fiables a cualquier distancia de medición.

Luego de haber comprobado la validez de las lecturas de la tangente de pérdidas con la técnica SDRadar 2, se puede asumir que la media global de todos los datos es la tangente de pérdidas del vidrio con un valor de 0,0734185.

4.5.6. Prueba estadística con la técnica SDRadar 3

Con los datos obtenidos de la caracterización de materiales dieléctricos con la técnica SDRadar 3, se realizó una prueba estadística de análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5%.

4.5.6.1. Prueba estadística con la técnica SDRadar 3 para la baquelita

Las hipótesis planteadas para la prueba ANOVA fueron:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita son iguales en todos los días de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita no son iguales en todos los días de medición (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada día de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 43-4.

Tabla 43-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 en función de los días de medición.

	Probabilidad
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 3λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,398
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 4λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,205
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 5λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,120

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 43-4, las probabilidades obtenidas son mayores al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias aritméticas de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita son iguales en todos los días de medición para las tres distancias (3λ , 4λ y 5λ).

Por otro lado, también se realiza una prueba ANOVA para comparar si las medias de permitividad son iguales en cada distancia de medición. Para esto se plantearon las siguientes hipótesis:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita no son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada distancia de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 44-4.

Tabla 44-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 en función de las distancias de medición.

	Probabilidad
Permitividad de la baquelita con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 3λ vs 4λ vs 5λ .	0,572

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 44-4, la probabilidad obtenida es mayor al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias de las lecturas de permitividad relativa de la baquelita son iguales

en todas las distancias de medición (3λ , 4λ y 5λ), concluyéndose que los resultados obtenidos son fiables a cualquier distancia de medición.

Luego de haber comprobado la validez de las lecturas de permitividad relativa con la técnica SDRadar 3, se puede asumir que la media global de todos los datos es la permitividad relativa de la baquelita con un valor de 4,7991902.

4.5.6.2. Prueba estadística con la técnica SDRadar 3 para la madera seca

Las hipótesis planteadas para la prueba ANOVA fueron:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca son iguales en todos los días de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca no son iguales en todos los días de medición (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada día de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 45-4.

Tabla 45-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 en función de los días de medición.

	Probabilidad
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 3λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,051
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 4λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,987
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 5λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,341

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 45-4, las probabilidades obtenidas son mayores al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias aritméticas de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca son iguales en todos los días de medición para las tres distancias (3λ , 4λ y 5λ).

Por otro lado, también se realiza una prueba ANOVA para comparar si las medias de permitividad son iguales en cada distancia de medición. Para esto se plantearon las siguientes hipótesis:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis nula).

- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca no son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada distancia de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 46-4.

Tabla 46-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 en función de las distancias de medición.

	Probabilidad
Permitividad de la madera seca con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 3λ vs 4λ vs 5λ .	0,081

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 46-4, la probabilidad obtenida es mayor al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias de las lecturas de permitividad relativa de la madera seca son iguales en todas las distancias de medición (3λ , 4λ y 5λ), concluyéndose que los resultados obtenidos son fiables a cualquier distancia de medición.

Luego de haber comprobado la validez de las lecturas de permitividad relativa con la técnica SDRadar 3, se puede asumir que la media global de todos los datos es la permitividad relativa de la madera seca con un valor de 3,2140735.

4.5.6.3. Prueba estadística con la técnica SDRadar 3 para el vidrio

Las hipótesis planteadas para la prueba ANOVA fueron:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa del vidrio son iguales en todos los días de medición (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa del vidrio no son iguales en todos los días de medición (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada día de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 47-4.

Tabla 47-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 en función de los días de medición.

	Probabilidad

Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 3λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,698
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 4λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,082
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 5λ del día 1 vs día 2 vs día 3 vs día 4 vs día 5.	0,850

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 47-4, las probabilidades obtenidas son mayores al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias aritméticas de las lecturas de permitividad relativa del vidrio son iguales en todos los días de medición para las tres distancias (3λ , 4λ y 5λ).

Por otro lado, también se realiza una prueba ANOVA para comparar si las medias de permitividad son iguales en cada distancia de medición. Para esto se plantearon las siguientes hipótesis:

- H_0 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa del vidrio son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis nula).
- H_1 : Las medias de las lecturas de permitividad relativa del vidrio no son iguales en todas las distancias de medición: 3λ , 4λ y 5λ (Hipótesis alternativa).

Luego de comparar los datos de permitividad obtenidos en cada distancia de medición, se obtuvieron las probabilidades que se muestran en la Tabla 48-4.

Tabla 48-4: Prueba ANOVA para las lecturas de permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 en función de las distancias de medición.

	Probabilidad
Permitividad del vidrio con la técnica SDRadar 3 a una distancia de 3λ vs 4λ vs 5λ .	0,324

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

De acuerdo a la Tabla 48-4, la probabilidad obtenida es mayor al nivel de significancia y se acepta la hipótesis nula. Es decir, las medias de las lecturas de permitividad relativa del vidrio son iguales en todas las distancias de medición (3λ , 4λ y 5λ), concluyéndose que los resultados obtenidos son fiables a cualquier distancia de medición.

Luego de haber comprobado la validez de las lecturas de permitividad relativa con la técnica SDRadar 3, se puede asumir que la media global de todos los datos es la permitividad relativa del vidrio con un valor de 7,8126645.

4.5.7. *Discusión de resultados*

Con el presente trabajo de titulación se logró caracterizar ciertas propiedades electromagnéticas de materiales dieléctricos como la permitividad relativa y la tangente de pérdidas. Para cumplir con este objetivo se usaron tres diferentes técnicas SDRadar, las cuales permiten estimar el valor de las propiedades electromagnéticas mencionadas a partir de un análisis de los coeficientes de transmisión y reflexión generados con cada técnica de caracterización.

Los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales dieléctricos fueron validados mediante un análisis estadístico con pruebas de normalidad y análisis de varianza para garantizar el correcto desempeño del sistema.

Con la validación estadística de los resultados obtenidos se determinó que todas las lecturas de cada técnica SDRadar siguen una distribución normal independientemente del día de medición y de las distancias propuestas en cada técnica. También se observó que los datos de la permitividad relativa y tangente de pérdidas obtenidos en cada grupo de mediciones presentan una varianza muy pequeña, y la mayoría de las lecturas registradas en la caracterización se encuentran dentro de valores de permitividad relativa y tangente de pérdidas expuestos en la literatura.

Para las pruebas de caracterización se utilizaron muestras de baquelita, madera seca y vidrio. Los resultados obtenidos en la caracterización de estos materiales se detallan en la Tabla 49-4. Todos los datos obtenidos fueron muy cercanos a los valores teóricos que se exponen en la literatura existente, con lo cual se pudo comprobar el correcto funcionamiento del sistema SDRadar y del modelo matemático desarrollado.

Tabla 49-4: Resultados de la caracterización de materiales dieléctricos con diferentes técnicas SDRadar.

	Material	Valor
Permitividad Relativa con la técnica SDRadar 1	Baquelita	4,8017
	Madera seca	3,2049
	Vidrio	7,8141
Tangente de pérdidas con la técnica SDRadar 2	Baquelita	0,0250
	Madera seca	0,0734
	Vidrio	0,0315
Permitividad Relativa con la técnica SDRadar 3	Baquelita	4,7991
	Madera seca	3,2140
	Vidrio	7,8126

Realizado por: Masaquiza, R. 2020

Con el presente trabajo de titulación se hace posible estimar de forma confiable la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de materiales dieléctricos con propiedades electromagnéticas desconocidas o en estudio.

Entre las ventajas que ofrece este método de caracterización para materiales dieléctricos se encuentran: la reducción de los costos de implementación del sistema SDRadar, es posible obtener la parte real e imaginaria de la permitividad relativa. El valor de la parte imaginaria de la permitividad depende directamente de la tangente de pérdidas, cuyo valor fue obtenido con una de las técnicas propuestas. Adicionalmente, modificando el algoritmo del nodo MathScript en LabVIEW, es posible mostrar otros parámetros dependientes de la permitividad relativa y la tangente de pérdidas, tales como el coeficiente de reflexión y transmisión, la constante de atenuación y fase y la conductividad.

Este método de caracterización está diseñado para realizar pruebas con materiales sólidos, pero existe la posibilidad de realizar mediciones con materiales en estado líquido simplemente modificando la disposición del sistema SDRadar. En este caso, el líquido puede ser depositado en un recipiente fabricado con materiales absorbentes de ondas electromagnéticas para que el sistema de antenas irradie las señales radar en dirección vertical hacia la superficie del líquido, asegurándose de tener una incidencia normal.

5. CONCLUSIONES

- Mediante la investigación teórica realizada en un inicio se logró identificar las características y funcionamiento de la tecnología SDRadar, así como los requerimientos de la tarjeta NI USRP 2932 para diseñar el sistema de caracterización de materiales dieléctricos usando diferentes técnicas radar.
- Se creó una interfaz de control y procesamiento en el software LabVIEW para una operación correcta de la tarjeta NI USRP 2932 durante la transmisión, recepción y procesamiento de las señales FMCW tomando en cuenta que el ancho de banda máximo permitido por el hardware es de 40 MHz con una frecuencia central de 2,45 GHz a la cual trabajan las antenas Yagi utilizadas.
- Se plantearon y diseñaron diferentes configuraciones del sistema SDRadar para aplicar las técnicas radar y caracterizar los materiales dieléctricos. Para cada técnica SDRadar se desarrolló un modelo matemático que permite relacionar la información registrada en las pruebas de simulación radar con las propiedades electromagnéticas del dieléctrico. De esta forma se logró estimar la permitividad relativa y la tangente de pérdidas en función del coeficiente de reflexión y transmisión que se registra en los radargramas de cada técnica SDRadar.
- Se creó un script en el nodo de MathScript de LabVIEW para procesar las señales del sistema y extraer la información de interés de cada radargrama. El algoritmo programado en el script contiene las fórmulas del modelo matemático desarrollado en cada técnica SDRadar.
- Se aplicó el modelo matemático para caracterizar la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de tres materiales dieléctricos: la baquelita, la madera seca y el vidrio. Todas las pruebas se realizaron en un entorno libre de interferencias electromagnéticas, por lo cual fue indispensable utilizar la cámara anecoica de la Facultad de Informática y Electrónica.
- A través de una prueba estadística de análisis de varianzas (ANOVA), se validaron los resultados y se determinó que, estadísticamente los datos de la permitividad relativa y la tangente de pérdidas obtenidos con las diferentes técnicas SDRadar son confiables y coinciden con los valores expuestos en la literatura.

6. RECOMENDACIONES

- En cuanto a la tecnología SDRadar, se recomienda estudiar previamente los requerimientos necesarios para diseñar correctamente el sistema radar de interés. Es importante definir la banda de frecuencias de operación de la señal FMCW, la frecuencia portadora, la ganancia de las antenas, la tasa de transferencia de datos de tal forma que se aprovechen al máximo las funcionalidades de la tarjeta NI USRP-2932.
- Las características del computador deben garantizar la adquisición adecuada de los datos, por tanto, se recomienda utilizar un computador de alta gama, con procesadores Intel CORE i5 o superiores.
- La comunicación entre el computador y la tarjeta NI USRP-2932 debe realizarse a través de un puerto Gigabit Ethernet o a su vez, si no se dispone de este puerto, se puede utilizar un adaptador USB 3.0 a Gigabit Ethernet.
- Para evitar el solapamiento de los lóbulos de radiación de las antenas es necesario tener una separación adecuada entre la antena de transmisión y recepción. La distancia de separación puede fijarse con las dos antenas en funcionamiento, aumentando la separación hasta que la señal recibida se encuentre por debajo del umbral de ruido.
- La carga computacional debe ser la menor posible durante el envío y recepción de las señales FMCW, por tanto, se recomienda que el procesamiento de las señales no se realice en tiempo real.
- Todas las pruebas con el sistema SDRadar se deben realizar en un entorno libre de perturbaciones electromagnéticas para evitar posibles alteraciones en las señales que puedan afectar la fiabilidad de los resultados. Por esta razón, es aconsejable efectuar las mediciones en una cámara anecoica.
- Las señales de calibración en cada técnica SDRadar juegan un papel importante en el sistema de caracterización de materiales dieléctricos, por tal motivo, el conductor eléctrico debe ser seleccionado para que se garantice una reflexión total de las señales incidentes. En este trabajo de titulación el conductor eléctrico seleccionado consistió en una lámina de cobre con una superficie lo más plana posible.

- Para la caracterización de los sustratos de materiales dieléctricos se debe asegurar que las señales tengan una incidencia normal sobre la superficie de los sustratos. Por tanto, se recomienda utilizar algún instrumento de graduación para que se asegure esta incidencia.

GLOSARIO

ADC	Convertidor Analógico a Digital
ANOVA	Análisis de Varianzas
CW	Onda Continua
DAC	Convertidor Digital a Analógico
DDC	Convertidor Digital Descendente
DUC	Convertidor Digital Ascendente
FFT	Transformada Rápida de Fourier
FMCW	Onda Continua de Frecuencia Modulada
FPGA	Matriz de Puertas Reprogramables
HF	Alta Frecuencia
IF	Frecuencia Intermedia
MIMO	Múltiple Entrada Múltiple Salida
PEC	Conductor Eléctrico Perfecto
RF	Radio Frecuencia
SDR	Radio Definida por Software
SFCW	Onda Continua de Frecuencia Escalonada
UHF	Ultra Alta Frecuencia
USRP	Periférico de Radio de Software Universal
VHF	Muy Alta Frecuencia

BIBLIOGRAFÍA

ALDAS SAMANIEGO, Génesis Alondra. *Evaluación de pérdidas de penetración en materiales mediante parámetros de potencia en la banda de 1 a 20 GHz para ondas milimétricas* [en línea] (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes. Riobamba, Ecuador. 2019. pp. 36. [Consulta: 2020-10-27]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13485/1/98T00255.pdf>.

CARNERERO CANO, Javier. *Caracterización de materiales para sensores de radiofrecuencia* [en línea] (Tesis de grado). Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, España. 2015. pp. 7-36. [Consulta: 2020-08-11]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/23439>.

CASADO FERNANDEZ, Cristina. *Manual Básico de MATLAB* [en línea]. Universidad Complutense de Madrid, Servicios Informáticos. Madrid, España. 2017. p. 4. [Consulta: 2020-08-21]. Disponible en: <http://webs.ucm.es/centros/cont/descargas/documento11541.pdf>.

CHARVAT, Gregory. *Small and Short-Range Radar Systems*. Miami, USA: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2014. 978-1-4398-6600-9, pp. 1-150.

CHEN, Linfeng; et al. *Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization*. 1ª ed. Chichester-Inglaterra: Jhon Wiley and Sons, Ltd., 2004. 0470844922, p.10.

FLORES VIDAL, María de la Sierra. *Reflectividad en estructuras compuesto-metal. Permitividad eléctrica y permeabilidad magnética efectivas de compuestos* [en línea] (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física de materiales. Madrid, España. 2013. pp. 6-17. [Consulta: 2020-09-17]. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/22285/1/T34606.pdf>.

GACITÚA LOVERA, Guisella Fabiola. *Estudio en Estructuras de Hormigón Armado Mediante el uso de un Radar de Penetración Terrestre* [en línea] (Tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Electricidad y Electrónica. Valdivia, Chile. 2006. pp. 4-26 [Consulta: 2020-10-14]. Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcig121e/sources/bmfcig121e.pdf>.

GUAMO MOROCHO, Andrea Katherine. *Implementación de un enlace de comunicaciones basado en principios de sistemas de radio cognitiva en la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja a través de SDR (Radio Definido por Software* [en línea] (Tesis de grado). Universidad Nacional de Loja, Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables. Loja, Ecuador. 2019. pp. 22-23. [Consulta: 2020-10-20]. Disponible en: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22050/1/Guamo%20Morocho%2c%20Andrea%20Katherine.pdf>.

HERNÁNDEZ GÓMEZ, Edel Serafín. *Desarrollo de un sensor de permitividad dieléctrica de bajo costo a la frecuencia de 2.45 GHz* [en línea] (Tesis Postgrado). Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica. Tonantzintla, Puebla – México. 2014. pp. 12-13 [Consulta: 2020-09-07]. Disponible en: <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/182/1/HernandezGES.pdf>.

MAHAFZA, Bassem R. *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. 3ª ed. Huntsville, Alabama - USA: A Chapman & Hall Book, 2012. pp. 26-95.

MANOBANDA DÁVALOS, David Alejandro. *Sistema de Análisis y Registro de datos de espectros en el rango de 50Mhz-2.2Ghz a través de Radio Definido por Software* [en línea] (Tesis de grado). Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial. Ambato, Ecuador. 2015. pp. 32-40. [Consulta: 2020-10-20]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/15081>.

MEJÍA CANDO, Julio César. *Desarrollo de un algoritmo en MATLAB para la optimización de la resolución de una tarjeta USRP B210 para aplicaciones SDRadar* [en línea] (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes. Riobamba, Ecuador. 2017. pp. 21-22. [Consulta: 2020-09-21]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/7523/1/98T00160.pdf>.

MORENO, Paul. *Permittivity characterization of a dielectric material using radar techniques*. (Tesis Postgrado). Università della Calabria, Italia. 2015. pp. 21-55.

NATIONAL INSTRUMENTS. *NI USRP-2930/2932 Getting Started Guide* [en línea]. 2017. pp. 15-17. [Consulta: 2020-09-21]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376356a.pdf>.

NATIONAL INSTRUMENTS. *USRP-2930/2932 Specifications* [en línea]. 2017. pp. 2-3. [Consulta: 2020-09-21]. Disponible en: <https://www.ni.com/pdf/manuals/375988d.pdf>.

NATIONAL INSTRUMENTS. *¿Qué es LabVIEW?* [en línea]. National Instruments. 2020. p. 1. [Consulta: 2020-09-22]. Disponible en: <https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>.

NATIONAL INSTRUMENTS. *Los beneficios de la programación gráfica en NI LabVIEW* [en línea]. National Instruments. 2020. p. 1. [Consulta: 2020-09-22]. Disponible en: <https://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/13/benefits-of-programming-graphically-in-ni-labview.html>.

NERI VELA, Rodolfo. *Líneas de transmisión*. Xalapa, México: Universidad Veracruzana, 2013. 786075021874, pp. 46-241.

ORDÓNEZ JARA, Carlos Gabriel & VÉLEZ PONCE Pablo Andrés. *Estudio, diseño e implementación de una cámara anecoica para el análisis acústico de sistemas mecánicos del motor de combustión interna alternativo* [en línea] (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca. Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz. Cuenca, Ecuador. 2014. p. 1. [Consulta: 2020-10-27]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7461/1/UPS-CT004412.pdf>.

ÖZDEMİR, Caner. *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 978-0-470-28484-1, pp. 51-68.

PINAR DOMINGUEZ, Iván & MURILLO FUENTES, Juan. *Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definidas por Software*. Sevilla, España: Departamento Teoría de la Señal y Comunicaciones, 2011, pp. 13-17.

RODRÍGUEZ ARISMÉNDIZ, Rodolfo. *Estudio de la espectroscopía dieléctrica para la medición del contenido de humedad en productos alimenticios* [en línea] (Tesis doctoral). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Piura, Perú. 2017. pp. 20-32. [Consulta: 2020-09-17]. Disponible en: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3487/DOC_ING_AUT_002.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

SANFUENTES, Jorge Parker. “Historia del radar”. *Revista de Marina–Armada de Chile* [en línea], 2000, Santiago-Chile, No. 854, pp. 1-7. [Consulta: 2020-02-09]. Disponible en: <http://revistamarina.cl/revistas/2000/1/parker.pdf>.

SERWAY, Raymond A. & JEWETT, Jhon W. *Física para Ciencias e Ingeniería con Física Moderna*. 7ª ed., Vol. 2. México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V., 2007. ISBN: 978-607-481-358-6, p. 736.

SKOLNIK, Merrill. *Radar Handbook*. 3ª ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2009. 9780071485470, pp. 23-46.

STIMSON, George; et al. *Introduction to Airborne Radar*. 3ª ed. Raleigh, Carolina del Norte – USA: SciTech Publishing, Inc., 2014. 9781613530221, pp. 4-5.

SUÁREZ CHÁVEZ, Marco Javier & SARMIENTO LÓPEZ, Edison Mauricio. *Determinación de un modelo de propagación empírico para establecer las pérdidas de propagación en una cámara anecoica* [en línea] (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes. Riobamba, Ecuador. 2019. p. 30. [Consulta: 2020-10-27]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/10958/1/98T00230.pdf>.

VARGAS GONZÁLES, Daniel. *Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W* [en línea] (Tesis Pregrado). Universidad Politécnica de Catalunya. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones de Barcelona. Barcelona, España. 2014. pp. 1-23 [Consulta: 2020-09-10]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21313/deteccion%20de%20movimiento%20mediante%20tecnicas%20radar%20CWFM%20en%20banda%20W.pdf>.

VEGA PÉREZ, Gracia. *Radar de subsuelo - Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico* [en línea] (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería de Terreno, Cartografía y Geofísica. Barcelona, España. 2001. pp. 73-97. [Consulta: 2020-08-12]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/6216>.

VELASCO ARIAS, César Augusto. *Implementación de un sistema de recepción de imágenes meteorológicas utilizando tecnología de Radio Definido por Software (RDS)* [en línea] (Tesis de grado). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito, Ecuador. 2019. pp. 41. [Consulta: 2020-10-21]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16941>.

VELOZ PARRA, Nancy Paola. *Estudio de un sistema de medición de niveles de riesgo para zonas de desprendimiento a través de tecnología SDRadar en un ambiente de laboratorio* [en línea] (Tesis

de postgrado). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 2018. pp. 24-38. [Consulta: 2020-09-15]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8111/1/20T00981.pdf>.

VERA ROSALES, Francisco Isaac & MORA GUIJARRO, Andrea Michelle. *Diseño de un prototipo de pruebas de un radar monoestático utilizando radio definida por software* [en línea] (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingenierías. Guayaquil, Ecuador. 2017. pp. 42-49. [Consulta: 2020-09-21]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14151/1/UPS-GT001828.pdf>.

YONTE SANCHIDRIÁN, Teresa. *Fundamentos geométricos de la óptica de multicapas* [en línea] (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Óptica. Madrid, España. 2004. pp. 3-6. [Consulta: 2020-10-19]. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/7152/1/T28643.pdf>.

ANEXOS

ANEXO A: Especificaciones técnicas USRP-2932.

SPECIFICATIONS

USRP-2932

Software Defined Radio Device

Contents

Definitions.....	1
Conditions.....	1
Transmitter.....	2
Receiver.....	2
GPS Disciplined Oscillator (GPSDO).....	3
Power.....	3
Physical Characteristics.....	4
Environment.....	4
Operating Environment.....	4
Storage Environment.....	4
Shock and Vibration.....	4
Compliance and Certifications.....	5
Safety.....	5
Electromagnetic Compatibility.....	5
CE Compliance	6
Online Product Certification.....	6
Environmental Management.....	6

Definitions

Warranted specifications describe the performance of a model under stated operating conditions and are covered by the model warranty.

Characteristics describe values that are relevant to the use of the model under stated operating conditions but are not covered by the model warranty.

- *Typical* specifications describe the expected performance met by a majority of the models.
- *Nominal* specifications describe parameters and attributes that may be useful in operation.

Specifications are *Characteristics* unless otherwise noted.

Conditions

Specifications are valid at 25 °C unless otherwise noted.

Transmitter

Frequency range	400 MHz to 4.4 GHz
Frequency step	<1 kHz
Maximum output power (P_{out})	50 mW to 100 mW (17 dBm to 20 dBm)
Gain range ¹	0 dB to 31 dB
Gain step	0.5 dB
Maximum instantaneous real-time bandwidth ²	
16-bit sample width	20 MHz
8-bit sample width	40 MHz
Maximum I/Q sampling rate ³	
16-bit sample width	25 MS/s
8-bit sample width	50 MS/s
DAC	2 channels, 400 MS/s, 16 bit
DAC spurious-free dynamic range (sFDR)	80 dB

Receiver

Frequency range	400 MHz to 4.4 GHz
Frequency step	<1 kHz
Gain range ⁴	0 dB to 31.5 dB
Gain step	0.5 dB
Maximum input power (P_{in})	0 dBm
Noise figure	5 dB to 7 dB
Maximum instantaneous real-time bandwidth ⁵	
16-bit sample width	20 MHz
8-bit sample width	40 MHz

¹ The output power resulting from the gain setting varies over the frequency band and among devices.

² Instantaneous bandwidth depends on many factors including, but not limited to, network configuration and host computer performance. Actual data throughput may be chipset dependent.

³ I/Q sampling rate depends on many factors including, but not limited to, network configuration and host computer performance. Actual data throughput may be chipset dependent.

⁴ The received signal amplitude resulting from the gain setting varies over the frequency band and among devices.

⁵ Instantaneous bandwidth depends on many factors including, but not limited to, network configuration and host computer performance. Actual data throughput may be chipset dependent.

Maximum I/Q sample rate⁶

16-bit sample width	25 MS/s
8-bit sample width	50 MS/s
Analog-to-digital converter (ADC)	2 channels, 100 MS/s, 14 bit
ADC sFDR	88 dB

GPS Disciplined Oscillator (GPSDO)

Frequency accuracy⁷

OCXO (not locked to GPS)	25 ppb
OCXO (locked to GPS)	10 ppb

Active antenna

Voltage	5 V
Power	0.7 W

Power



Caution The protection provided by this product may be impaired if it is used in a manner not described in this document.

Total power, typical operation

Typical	12 W to 15 W
Maximum	18 W

Power requirement	Accepts a 6 V, 3 A external DC power connector
-------------------	--



Note You must use either the power supply provided in the shipping kit, or another UL listed ITE power supply marked *LPS*, with the USRP-2932.

⁶ I/Q sample rate depends on many factors including, but not limited to, network configuration and host computer performance. Actual data throughput may be chipset dependent.

⁷ *Frequency accuracy* is based on oven-controlled crystal oscillator (OCXO) vendor specifications and is not measured. Alternatively, you can incorporate an external reference source to provide a more precise frequency Reference Clock and to achieve better frequency accuracy.

Physical Characteristics

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

Physical dimensions

(L × W × H)	15.875 cm × 4.826 cm × 21.209 cm (6.25 in. × 1.9 in. × 8.35 in.)
Weight	1.193 kg (2.63 lb)

Environment

Maximum altitude	2,000 m (800 mbar) (at 25 °C ambient temperature)
Pollution Degree	2

Indoor use only.

Operating Environment

Ambient temperature range	0 °C to 55 °C (Tested in accordance with IEC 60068-2-1 and IEC 60068-2-2. Meets MIL-PRF-28800F Class 3 low temperature limit and MIL-PRF-28800F Class 2 high temperature limit.)
Relative humidity range	10% to 90%, noncondensing (Tested in accordance with IEC 60068-2-56.)

Storage Environment

Ambient temperature range	-40 °C to 71 °C (Tested in accordance with IEC 60068-2-1 and IEC 60068-2-2. Meets MIL-PRF-28800F Class 3 limits.)
Relative humidity range	5% to 95%, noncondensing (Tested in accordance with IEC 60068-2-56.)

Shock and Vibration

Operating shock	30 g peak, half-sine, 11 ms pulse (Tested in accordance with IEC 60068-2-27. Meets MIL-PRF-28800F Class 2 limits.)
-----------------	--

Random vibration

Operating	5 Hz to 500 Hz, 0.3 g _{rms} (Tested in accordance with IEC 60068-2-64.)
Nonoperating	5 Hz to 500 Hz, 2.4 g _{rms} (Tested in accordance with IEC 60068-2-64. Test profile exceeds the requirements of MIL-PRF-28800F, Class 3.)

Compliance and Certifications

Safety

This product is designed to meet the requirements of the following electrical equipment safety standards for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA C22.2 No. 61010-1



Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or the [Online Product Certification](#) section.

Electromagnetic Compatibility

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326-1 (IEC 61326-1): Class A emissions; Basic immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- EN 55022 (CISPR 22): Class A emissions
- EN 55024 (CISPR 24): Immunity
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 22: Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



Note In the United States (per FCC 47 CFR), Class A equipment is intended for use in commercial, light-industrial, and heavy-industrial locations. In Europe, Canada, Australia, and New Zealand (per CISPR 11), Class A equipment is intended for use only in heavy-industrial locations.



Note Group 1 equipment (per CISPR 11) is any industrial, scientific, or medical equipment that does not intentionally generate radio frequency energy for the treatment of material or inspection/analysis purposes.



Note For EMC declarations, certifications, and additional information, refer to the [Online Product Certification](#) section.

ANEXO B: Código de procesamiento de datos.

```
1 close all;
2 %CREACION DEL VECTOR DE FRECUENCIA
3 fs=1/ts;
4 n = length(Tx);
5 m = n-1;
6 tf = m*ts;
7 t=linspace(0,tf,n);
8 f = (-n/2:n/2-1)*(fs/n);
9
10 %CONVERSION FRECUENCIA A DISTANCIA
11 dist=(3e+8)*tf;
12 range=(dist)/(BW);
13 r=f.*range;
14
15 %GRAFICAR SEÑAL TX
16 figure(1);
17 plot(t,Tx);
18 title('Señal transmitida en el dominio del tiempo');
19 xlabel('Tiempo [s]');
20 ylabel('Amplitud');
21 grid on;
22
23 switch CASE
24 case 0
25 %CALIBRACION DEL COEFICIENTE DE REFLEXION
26 figure(2);
27 plot(t,CAL_REF);
28 title('Señal de calibracion en el dominio del tiempo');
29 xlabel('Tiempo [s]');
30 ylabel('Amplitud');
31 grid on;
32
33
34 case 1
35 %CALIBRACION DEL COEFICIENTE DE TRANSMISION
36 figure(2);
37 plot(t,CAL_TRA);
38 title('Señal de calibracion en el dominio del tiempo');
39 xlabel('Tiempo [s]');
40 ylabel('Amplitud');
41 grid on;
42
43 case 2
44 %TECNICA SDRADAR 1
45
46 figure(2);
47 plot(t,CAL_REF);
48 title('Señal de calibracion en el dominio del tiempo');
49 xlabel('Tiempo [s]');
50 ylabel('Amplitud');
51 grid on;
52
53 figure(3);
54 plot(t,RX_1);
55 title('Señal recibida en el dominio del tiempo');
56 xlabel('Tiempo [s]');
57 ylabel('Amplitud');
58 grid on;
59
```

```

60 figure(4);
61 Mx=Tx.*RX_1;
62 plot(t,Mx);
63 title('Multiplicacion Tx * Rx en el dominio del tiempo');
64 xlabel('Tiempo [s]');
65 ylabel('Amplitud');
66 grid on;
67
68 figure(5);
69 FTx = fft(Tx);
70 FTx = fftshift(FTx);
71 FTx = abs(FTx);
72 plot(f,FTx);
73 title('Señal transmitida en el dominio de la frecuencia');
74 xlabel('Frecuencia [Hz]');
75 ylabel('Amplitud');
76 axis([0 inf 0 inf]);
77 grid on;
78
79 figure(6);
80 FRx = fft(RX_1);
81 FRx = fftshift(FRx);
82 FRx = abs(FRx);
83 plot(f,FRx);
84 title('Señal recibida en el dominio de la frecuencia');
85 xlabel('Frecuencia [Hz]');
86 ylabel('Amplitud');
87 axis([0 inf 0 inf]);
88 grid on;
89
90 figure(7);
91 %RADARGRAMA DE CALIBRACION
92 CaRe = Tx.*CAL_REF;
93 FCaRe = fft(CaRe);
94 FCaRe = fftshift(FCaRe);
95 FCaRe = abs(FCaRe);
96 PmaxFCaRe = max(FCaRe);
97 FCaRe = FCaRe./PmaxFCaRe;
98 plot(r,FCaRe,'b');
99 title('Radargrama');
100 xlabel('Distancia [m]');
101 ylabel('Coeficiente de reflexión');
102 axis([0 inf 0 inf]);
103 grid on
104 hold on
105
106 %RADARGRAMA NORMALIZADO
107 FMx = fft(Mx);
108 FMx = fftshift(FMx);
109 FMx = abs(FMx);
110 FMx = FMx./PmaxFCaRe;
111 plot(r,FMx,'r')
112 CoRef = max(FMx);
113 e = ((1+CoRef)/(1-CoRef))^2;
114
115 case 3
116 %TECNICA SDRADAR 3
117
118 figure(2);
119 plot(t,CAL_TRA);
120 title('Señal de calibracion en el dominio del tiempo');
121 xlabel('Tiempo [s]');
122 ylabel('Amplitud');
123 axis([0 inf -1 1]);
124 grid on;

```



```

125
126 figure(3);
127 plot(t,RX_2);
128 title('Señal recibida en el dominio del tiempo');
129 xlabel('Tiempo [s]');
130 ylabel('Amplitud');
131 axis([0 inf -1 1]);
132 grid on;
133
134 figure(4);
135 Mx=Tx.*RX_2;
136 plot(t,Mx);
137 title('Multiplicacion Tx * Rx en el dominio del tiempo');
138 xlabel('Tiempo [s]');
139 ylabel('Amplitud');
140 axis([0 inf -1 1]);
141 grid on;
142
143 figure(5);
144 FTx=fft(Tx);
145 FTx = fftshift(FTx);
146 FTx= abs(FTx);
147 plot(f,FTx);
148 title('Señal transmitida en el dominio de la frecuencia');
149 xlabel('Frecuencia [Hz]');
150 ylabel('Amplitud');
151 axis([0 2*BW 0 inf]);
152 grid on;
153
154 figure(6);
155 FRx=fft(RX_2);
156 FRx = fftshift(FRx);
157 FRx= abs(FRx);
158 plot(f,FRx);
159 title('Señal recibida en el dominio de la frecuencia');
160 xlabel('Frecuencia [Hz]');
161 ylabel('Amplitud');
162 axis([0 2*BW 0 inf]);
163 grid on;
164
165 figure(7);
166 %RADARGRAMA DE CALIBRACION
167 CaTr = Tx.*CAL_TRA;
168 FCaTr = fft(CaTr);
169 FCaTr = fftshift(FCaTr);
170 FCaTr = abs(FCaTr);
171 PmaxFCaTr = max(FCaTr);
172 FCaRe = FCaTr./PmaxFCaTr;
173 plot(r,FCaTr);
174 title('Radargrama');
175 xlabel('Distancia [m]');
176 ylabel('Coeficiente de transmision');
177 axis([0 inf 0 inf]);
178 grid on;
179 hold on;
180
181 %RADARGRAMA NORMALIZADO
182 FMx = fft(Mx);
183 FMx = fftshift(FMx);
184 FMx = abs(FMx);
185 FMx = FMx./PmaxFCaTr;
186 plot(r,FMx,'r');
187
188 CoTra=max(FMx);
189 e=((-2*CoTra-4)+sqrt((2*CoTra-4)^2 -4*CoTra^2))/(2*CoTra);

```

```

190
191 case 4
192 %TECNICA SDRADAR 2
193
194 figure(2);
195 plot(t,CAL_REF);
196 title('Señal de calibracion en el dominio del tiempo');
197 xlabel('Tiempo [s]');
198 ylabel('Amplitud');
199 axis([0 inf -1 1]);
200 grid on;
201
202 figure(3);
203 plot(t,RX_3);
204 title('Señal recibida en el dominio del tiempo');
205 xlabel('Tiempo [s]');
206 ylabel('Amplitud');
207 axis([0 inf -1 1]);
208 grid on;
209
210 figure(4);
211 Mx=Tx.*RX_3;
212 plot(t,Mx);
213 title('Multiplicacion Tx * Rx en el dominio del tiempo');
214 xlabel('Tiempo [s]');
215 ylabel('Amplitud');
216 axis([0 inf -1 1]);
217 grid on;
218
219 figure(5);
220 FTx=fft(Tx);
221 FTx = fftshift(FTx);
222 FTx= abs(FTx);
223 plot(f,FTx);
224 title('Señal transmitida en el dominio de la frecuencia');
225
226 figure(6);
227 FRx = fft(RX_3);
228 FRx = fftshift(FRx);
229 FRx = abs(FRx);
230 plot(f,FRx);
231 title('Señal recibida en el dominio de la frecuencia');
232 xlabel('Frecuencia [Hz]');
233 ylabel('Amplitud');
234 axis([0 2*BW 0 inf]);
235 grid on;
236
237 figure(7);
238 %RADARGRAMA DE CALIBRACION
239 CaRe = Tx.*CAL_REF;
240 FCaRe = fft(CaRe);
241 FCaRe = fftshift(FCaRe);
242 FCaRe = abs(FCaRe);
243 PmaxFCaRe = max(FCaRe);
244 FCaRe = FCaRe./PmaxFCaRe;
245 plot(r,FCaRe);
246 title('Radargrama');
247 xlabel('Distancia [m]');
248 ylabel('Coeficiente de reflexión');
249 axis([0 inf 0 inf]);
250 grid on;
251 hold on;
252
253 %RADARGRAMA NORMALIZADO
254 FMx = fft(Mx);
255 FMx = fftshift(FMx);
256 FMx = abs(FMx);
257 FMx = FMx./PmaxFCaRe;
258 plot(r,FMx);
259
260 CoRef = max(FMx);
261 Tper=-(300000000*log(CoRef))/(2*pi*fc*h*sqrt(er));
262 e=er;
263 ec=Tper*e;
264 end

```

ANEXO C: Manual de caracterización de materiales dieléctricos usando diferentes técnicas SDRadar con tarjetas NI USRP-2932.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES Y
REDES

MANUAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
MATERIALES DIELECTRICOS USANDO DIFERENTES
TÉCNICAS SDRADAR CON TARJETAS NI USRP-2932

Elaborado por: Alex Ramiro Masaquiza Caiza	Revisado por: Ing. Paul David Moreno Avilés PhD.
---	---

Riobamba-Ecuador

2020

INTRODUCCIÓN

El presente manual tiene como objetivo describir los procedimientos realizados para la caracterización de sustratos de materiales dieléctricos con diferentes técnicas SDRadar usando tarjetas NI USRP-2932 y el software LabVIEW.

Se detallan los conceptos básicos y procesos a seguir para que estudiantes e investigadores puedan estimar ciertas propiedades electromagnéticas de materiales dieléctricos utilizando el sistema SDRadar propuesto en el manual. Los laboratorios planteados incluyen procesos de transmisión, recepción y procesamiento de señales radar para determinar la permitividad relativa y la tangente de pérdidas de los materiales que se pretendan caracterizar.

Todas las pruebas con el sistema SDRadar deben realizarse en un ambiente libre de interferencias electromagnéticas, por tanto, se recomienda utilizar la cámara anecoica de la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. El objetivo de esto es asegurar la calidad y confiabilidad de los datos obtenidos durante la caracterización de los materiales dieléctricos.

INDICE

1. OBJETIVOS	4
1.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2. RECURSOS NECESARIOS	4
2.1. Hardware	4
2.2. Software	4
3. ARCHIVOS NECESARIOS	4
4. Sistema SDRadar	6
5. Proceso de caracterización de materiales dieléctricos	7
5.1. Configuración de parámetros del sistema SDRadar	7
5.2. Generación de la señal radar	8
5.3. Sincronización de los canales de transmisión y recepción	9
5.4. Selección de la técnica SDRadar	9
5.5. Técnica SDRadar 1	10
<i>A. Selección del escenario de medición</i>	10
<i>B. Señal de calibración</i>	10
<i>C. Señal de Caracterización</i>	13
5.6. Técnica SDRadar 2	17
<i>A. Selección del escenario de medición</i>	17
<i>B. Señal de calibración</i>	18
<i>C. Señal de Caracterización</i>	20
5.7. Técnica SDRadar 3	24
<i>D. Selección del escenario de medición</i>	24
<i>E. Señal de calibración</i>	24
<i>F. Señal de Caracterización</i>	26

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Brindar una guía técnica para la caracterización de materiales dieléctricos con diferentes técnicas SDRadar usando tarjetas NI USRP-2932 y el software LabVIEW.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Especificar los requerimientos de hardware y software necesarios para la caracterización de dieléctricos con el sistema SDRadar.
- Describir los procedimientos de transmisión, recepción y procesamiento de las señales radar.
- Estimar las propiedades electromagnéticas (permitividad relativa y tangente de pérdidas) de los materiales dieléctricos a caracterizar usando el sistema SDRadar.

2. RECURSOS NECESARIOS

2.1. Hardware

- Tarjeta NI USRP-2932
- Adaptador de corriente universal para NI USRP
- Cable Ethernet
- Computador con puerto Gigabit Ethernet o USB 3.0
- Adaptador USB 3.0 - Gigabit Ethernet
- 2 antenas Yagi Microstrip con frecuencia central de 2,45 GHz
- 2 cables SMA male to male

2.2. Software

- NI LabVIEW 2019 o superior
- NI USRP 19.0
- LabVIEW MathScript Add On

3. ARCHIVOS NECESARIOS

La caracterización de materiales dieléctricos se realizará con un archivo “.vi” que deber ser ejecutado en LabVIEW.

El archivo “CARACTERIZACION DE MATERIALES DIELECTRICOS USANDO DIFERENTES TECNICAS SDRADAR CON TARJETAS NI USRP 2932.vi” se encuentra en el CD adjuntado a este manual. Este archivo debe copiarse en la siguiente ruta del ordenador: *C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 2019\examples\instr\niUSRP*.

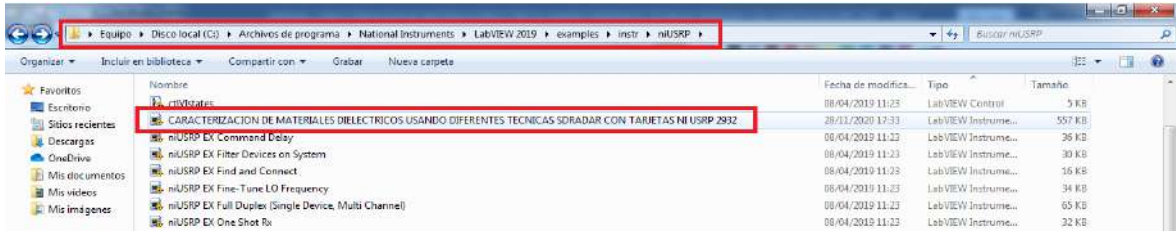


Figura 11. Ruta para la ejecución del archivo .vi

A continuación, se debe abrir el software LabVIEW 2019, se recomienda utilizar la versión de 64 bits. Una vez que se presente la interfaz de bienvenida, damos clic en “Open Existing” y seleccionamos el archivo copiado previamente en la ruta que se muestra en la Figura 1.

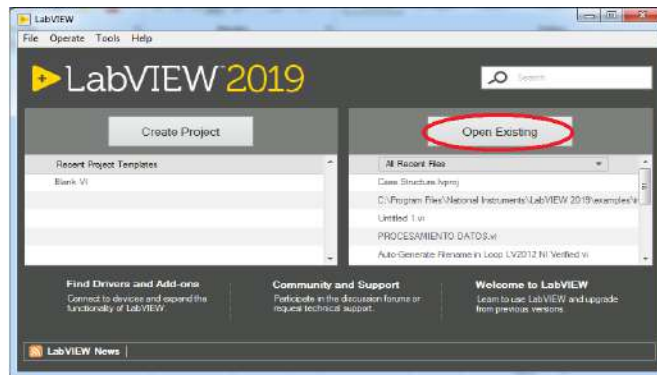


Figura 12. Inicialización del LabVIEW

Luego de esto se abrirá el archivo que contiene el sistema SDRadar desarrollado. En la Figura 3 se observa la interfaz gráfica para la caracterización de materiales dieléctricos.

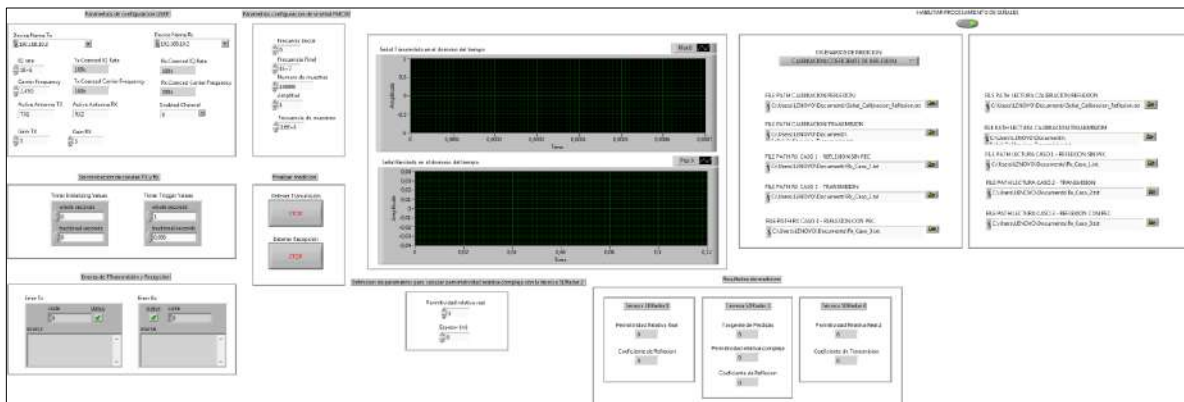


Figura 13. Interfaz gráfica en LabVIEW para la caracterización de materiales dieléctricos

El diagrama que contiene los instrumentos virtuales (VIs) del sistema SDRadar se muestra en la Figura 4.

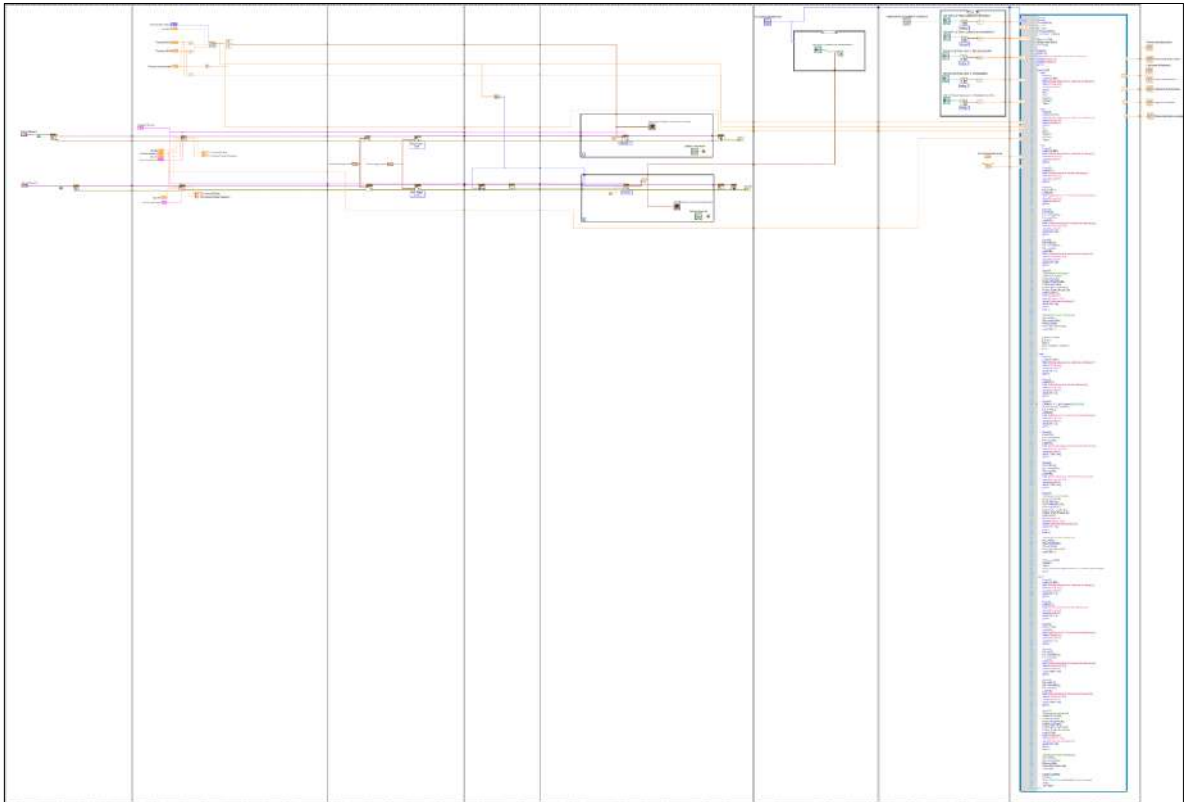


Figura 14. Diagrama VI del sistema SDRadar

4. Sistema SDRadar

Un Sistema SDRadar se compone de tecnología radar, en donde las operaciones de la sección de banda base se realizan a través de software. La comunicación entre la tarjeta NI USRP-2932 y el computador debe ser mediante una conexión Gigabit Ethernet para garantizar la correcta adquisición de los datos. En la Figura 5 se muestra el esquema simplificado de la configuración de un sistema SDRadar.

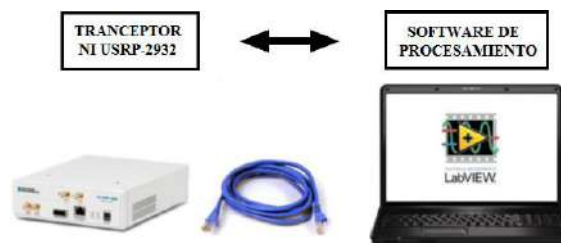


Figura 15. Configuración simplificada del sistema SDRadar.

El sistema de caracterización de materiales dieléctricos propuesto en el presente manual se compone de tres técnicas SDRadar diferentes. En cada una de ellas se respeta la configuración mostrada en la Figura 6.

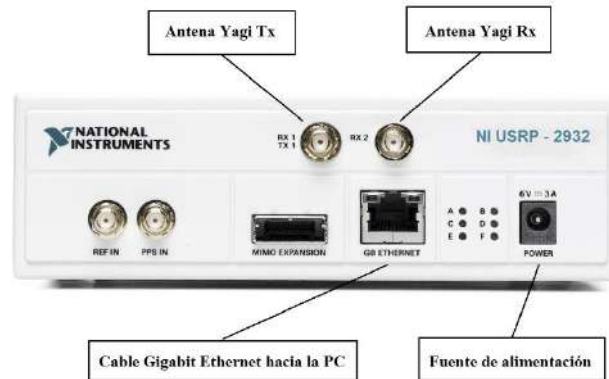


Figura 16. Configuración de los puertos del panel frontal de la tarjeta NI USRP-2932.

5. Proceso de caracterización de materiales dieléctricos

La caracterización de dieléctricos se lleva a cabo mediante tres técnicas SDRadar basándose en la teoría de reflexión y transmisión de ondas electromagnéticas.

Todas las técnicas se basan en la transmisión y recepción de señales FMCW para el posterior procesamiento de las mismas mediante un algoritmo que contiene las fórmulas y ecuaciones de un modelo matemático que relaciona el coeficiente de reflexión y transmisión con la permitividad relativa y la tangente de pérdidas.

5.1. Configuración de parámetros del sistema SDRadar

Los parámetros de configuración para la operación correcta de la tarjeta NI USRP-2932 se detallan en la Figura 7. Tanto el transmisor y receptor deben estar configurados con la misma velocidad I/Q, frecuencia portadora y ganancia con el fin de garantizar la correcta adquisición de los datos durante las pruebas.

Como se había detallado en la Figura 6, la antena activa del transmisor será conectada al puerto TX1. Mientras que la antena activa del receptor será conecta al puerto RX2.

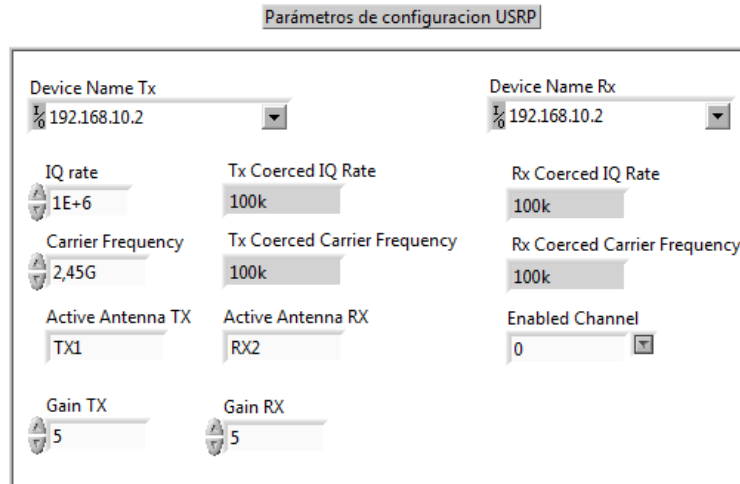


Figura 17. Parámetros de configuración de la tarjeta NI USRP-2932.

5.2. Generación de la señal radar

Para la caracterización de las propiedades electromagnéticas de los dieléctricos se utilizan señales de onda continua modulada en frecuencia (FMCW). Este tipo de señales cambian su frecuencia en función del tiempo, es decir trabajan con un determinado ancho de banda desde una frecuencia inicial a una final.

La tarjeta NI USRP-2932 puede trabajar con un ancho de banda máximo instantáneo de 40 MHz. Los parámetros para la generación de la señal FMCW se detallan en la Figura 8.

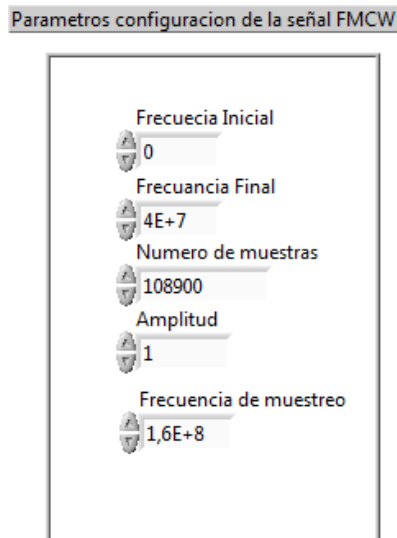


Figura 18. Parámetros para la generación de la señal FMCW.

Es recomendable que la amplitud de la señal generada no sobrepase la unidad para evitar el desbordamiento del procesador digital de señales (DSP) de la tarjeta USRP.

La señal FMCW generada tiene una frecuencia inicial de 0 MHz y una frecuencia final de 40 MHz. La frecuencia de muestreo es de 160 MHz, cumpliéndose la condición de Nyquist, siendo esta frecuencia de muestreo mayor o igual a dos veces el valor de la frecuencia superior (40MHz).

5.3. Sincronización de los canales de transmisión y recepción

Es importante sincronizar los canales de transmisión y recepción para registrar adecuadamente los radargramas de cada técnica de caracterización. En la Figura 9 se muestra la configuración del reloj del dispositivo para marcar el tiempo inicial para la adquisición o generación de datos, y también se especifica el tiempo de espera antes de iniciar a adquirir o generar la primera muestra. Se recomienda que este último parámetro se configure en el orden de los milisegundos.

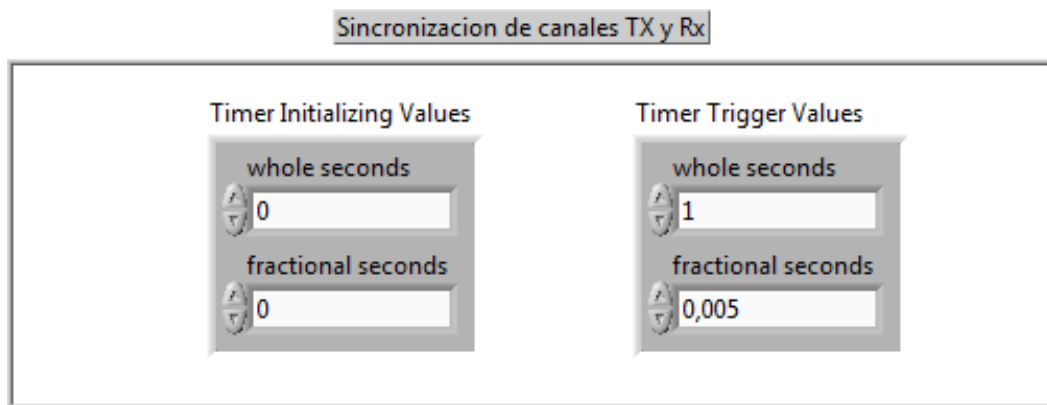


Figura 19. Parámetros para la sincronización de los canales Tx/Rx.

5.4. Selección de la técnica SDRadar

Luego de haber configurado todos los parámetros anteriores, se debe seleccionar uno de los siguientes escenarios de medición (ver Figura 10):

- Calibración del coeficiente de reflexión: se refiere al escenario para registrar la señal reflejada en la superficie del conductor eléctrico perfecto (PEC).

- Calibración del coeficiente de transmisión: hace referencia al escenario para registrar la señal cuando se transmite en línea de vista directa sin obstáculos.
- Reflexión sin PEC: cuando se registra la señal reflejada sobre la superficie del sustrato dieléctrico sin la lámina del conductor dieléctrico perfecto detrás del material (Técnica SDRadar 1).
- Reflexión con PEC: cuando se registra la señal reflejada sobre la superficie del sustrato dieléctrico con la lámina del conductor dieléctrico perfecto detrás del material (Técnica SDRadar 2).
- Transmisión: cuando se registra la señal transmitida luego de atravesar la estructura del material dieléctrico (Técnica SDRadar 3).

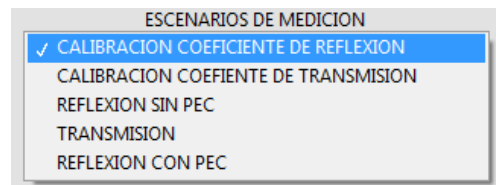


Figura 20. Escenarios de posibles pruebas.

5.5. Técnica SDRadar 1

Mediante esta técnica se puede calcular el valor de la permitividad relativa de los materiales dieléctricos analizando el coeficiente de reflexión registrado en un radargrama.

El procedimiento para esta técnica se detalla a continuación:

A. Selección del escenario de medición

Se debe seleccionar el escenario: “CALIBRACION COEFICIENTE DE REFLEXIÓN” como se observa en la Figura 11.

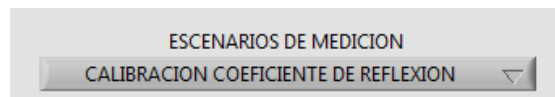


Figura 21. Selección del escenario para la calibración del coeficiente de reflexión.

B. Señal de calibración

Para determinar la permitividad relativa de un dieléctrico es necesario obtener una señal de calibración que represente un coeficiente de reflexión equivalente a la unidad. La configuración para registrar dicha señal de calibración se muestra en la Figura 12.

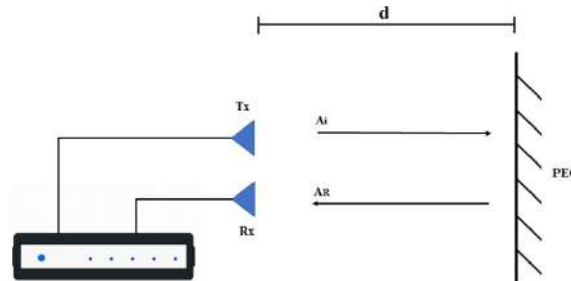


Figura 22. Sistema para obtener la señal de calibración con la técnica SDRadar 1.

La superficie reflectante que se muestra en la Figura 12 debe ser un material conductor perfecto. Por otro lado, la distancia de separación (d) entre el sistema de antenas y el PEC debe ser de por lo menos 3λ con el fin de garantizar la condición de campo lejano. Además, se recomienda que la superficie reflectante sea colocada de tal manera que se garantice una incidencia normal de la señal radar.

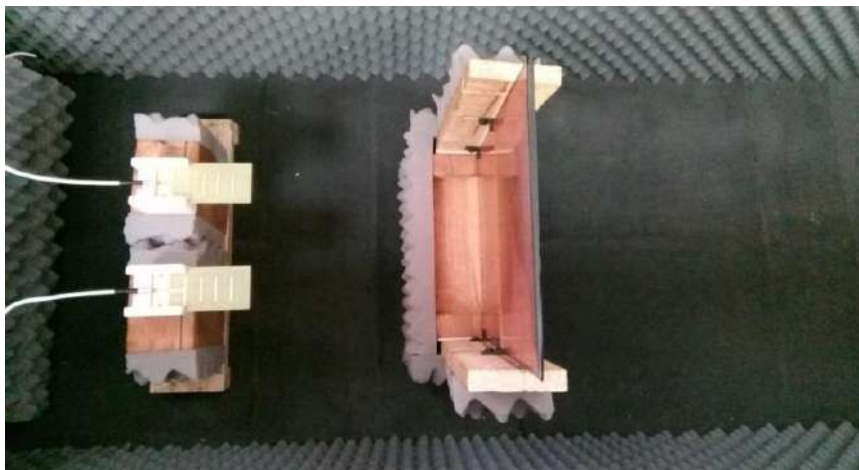


Figura 23. Sistema implementado para la señal de calibración con la técnica SDRadar 1.

Una vez montado el sistema de la Figura 13, se inicia el proceso de transmisión y recepción de la señal radar dando clic en el botón “run” como se muestra en la Figura 14.

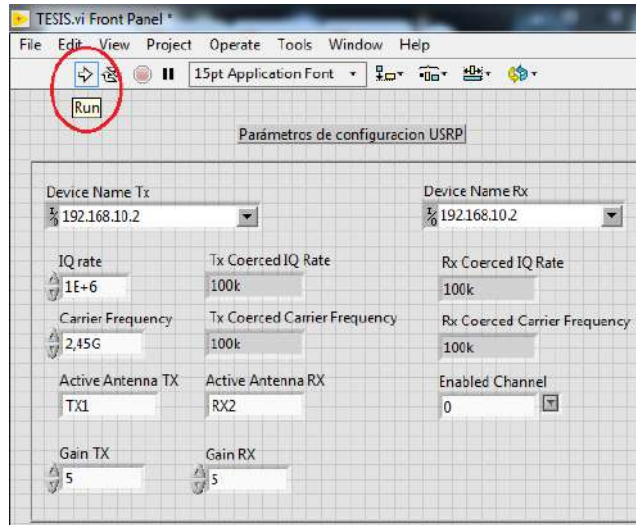


Figura 24. Ejecución de los procesos de transmisión y recepción de la señal radar.

Una vez iniciado este proceso, la señal transmitida y reflejada se mostrará gráficamente en un “waveform” tal como se observa en la Figura 15.

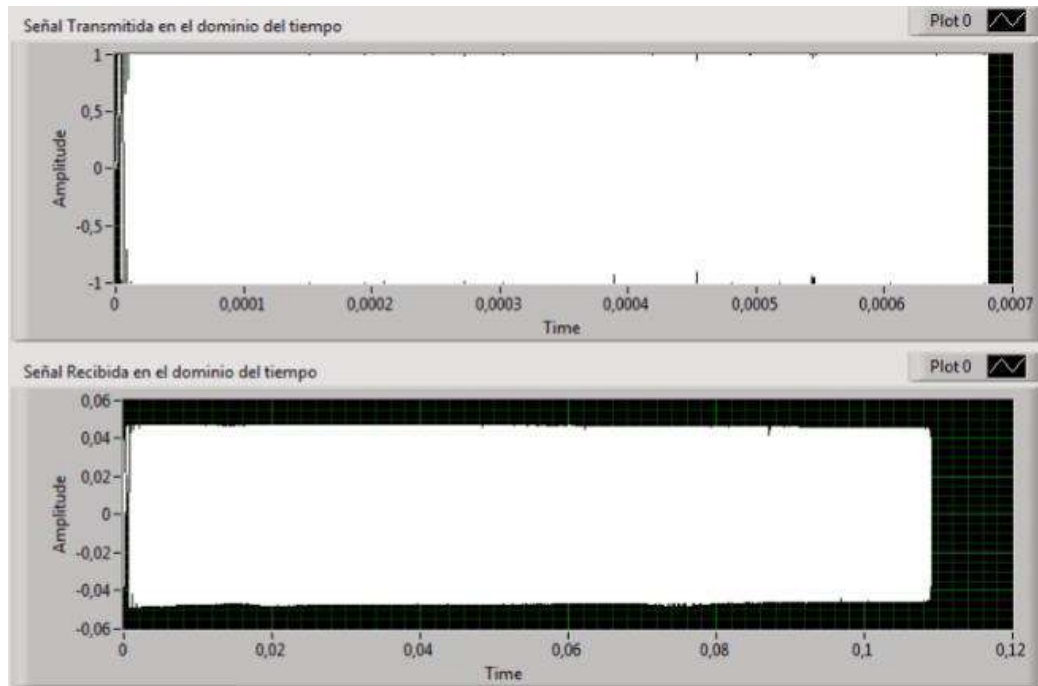


Figura 25. Señal de calibración transmitida y reflejada en el dominio del tiempo.

Luego de que la señal recibida se muestre estable, damos clic en el botón “STOP” del proceso de transmisión y recepción para guardar la señal recibida en un archivo de texto. Esta señal

será utilizada posteriormente para normalizar el coeficiente de reflexión. En primer lugar, se debe detener el proceso de recepción como se aprecia en la Figura 16.

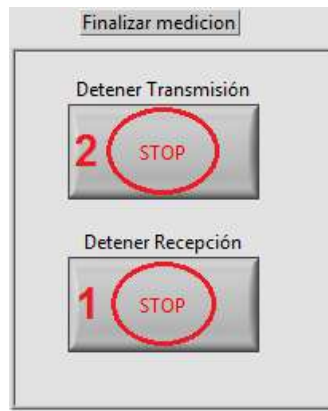


Figura 26. Proceso para grabar la señal recibida.

C. Señal de Caracterización

Luego de haber guardado la señal de calibración, se debe registrar la señal reflejada sobre la superficie del dieléctrico para calcular el coeficiente de reflexión y consecuentemente la permitividad elativa. La configuración de este sistema se detalla en la Figura 17.

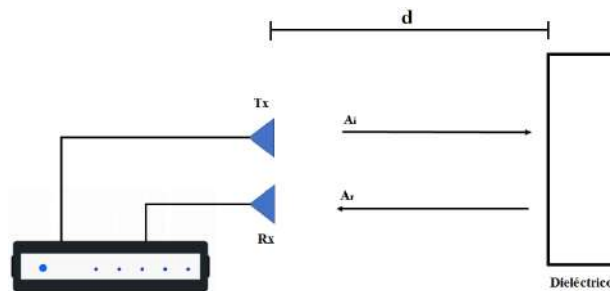


Figura 27. Configuración de la señal de caracterización con la técnica SDRadar 1.

La distancia de separación (d) entre el sistema de antenas y la superficie del dieléctrico debe ser la misma que se utilizó para registrar la señal de calibración con el PEC. El sistema implementado se muestra en la Figura 18, y el dieléctrico seleccionado para demostración es la baquelita.



Figura 28. Implementación del sistema de caracterización con la técnica SDRadar 1.

Una vez montado el sistema mostrado en la Figura 18, se debe seleccionar el escenario de medición: “REFLEXIÓN SIN PEC” como se observa en la Figura 19.

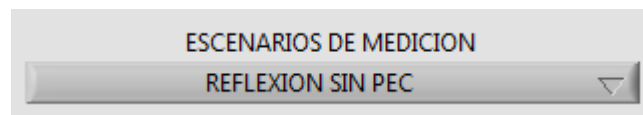


Figura 29. Selección del escenario para la señal de caracterización.

Luego se inicia el proceso de transmisión y recepción de la señal radar dando clic en el botón “run” como se había mostrado en la Figura 14.

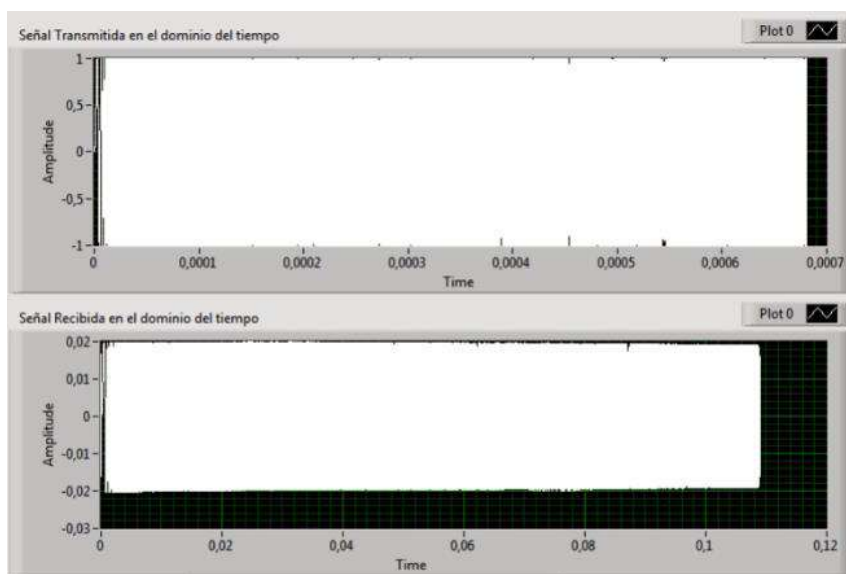


Figura 30. Señal de caracterización transmitida y reflejada en el dominio del tiempo.

Cuando la señal que se registra en el “waveform” se mantiene estable detenemos el proceso de recepción y transmisión como se detalló en la Figura 16. Una vez grabada la señal de

caracterización en un archivo de texto, el algoritmo procesa las señales e imprime los resultados correspondientes.

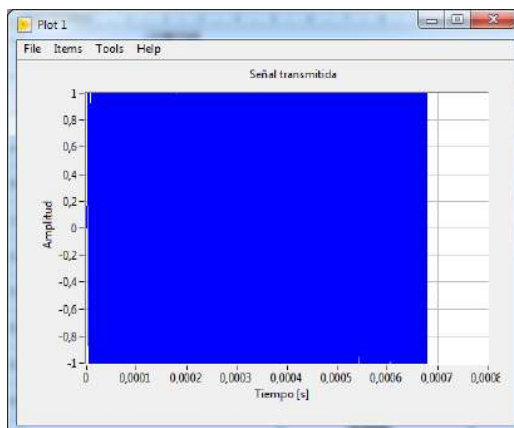


Figura 31. Señal transmitida en el dominio del tiempo.

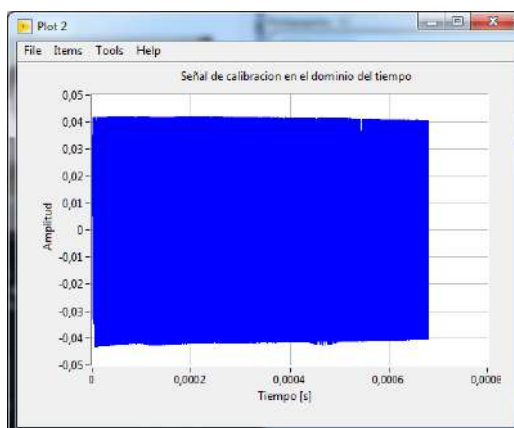


Figura 32. Señal de calibración en el dominio del tiempo.

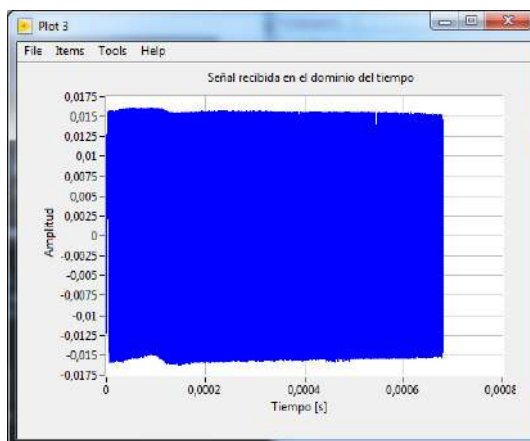


Figura 33. Señal de caracterización en el dominio del tiempo.

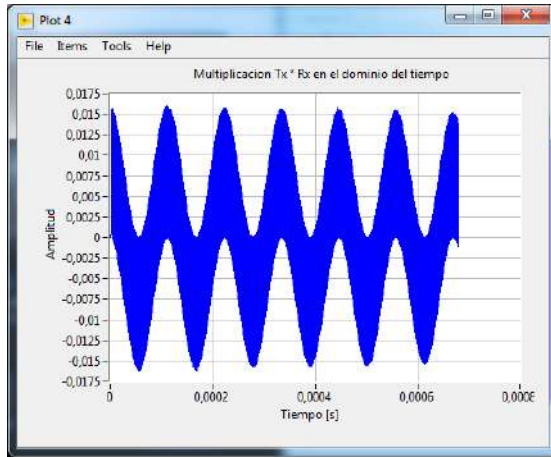


Figura 34. Multiplicación de la señal Tx y Rx en el dominio del tiempo.

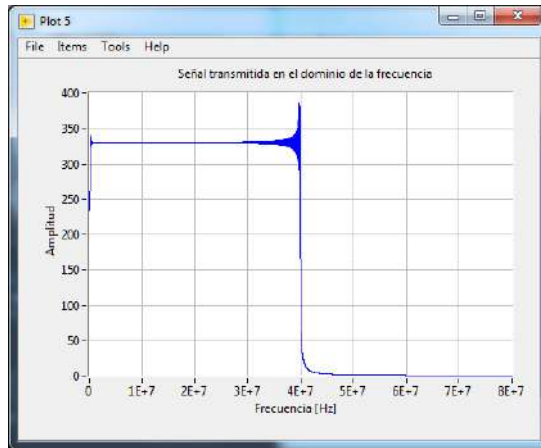


Figura 35. Señal transmitida en el dominio de la frecuencia.

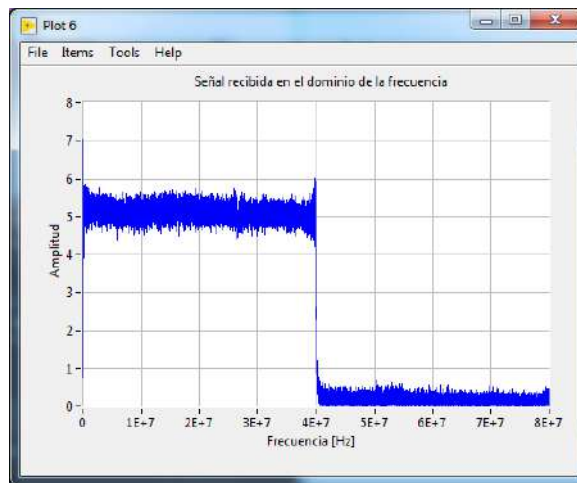


Figura 36. Señal recibida en el dominio de la frecuencia.

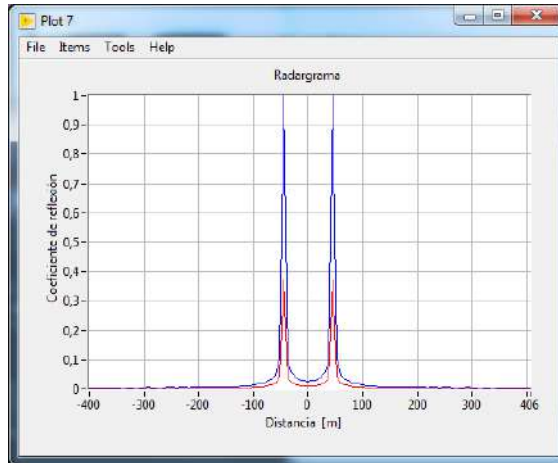


Figura 37. Radargrama normalizado.

Una vez obtenido el radargrama correspondiente, el algoritmo extrae el valor más alto de la gráfica en color rojo de la Figura 27, el cual corresponde al coeficiente de reflexión que permite calcular la permitividad relativa del dieléctrico. Los resultados que imprime el algoritmo se muestran en la Figura 28.

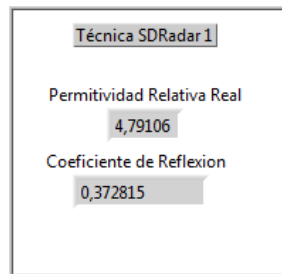


Figura 38. Resultados de la caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 1.

5.6. Técnica SDRadar 2

Mediante esta técnica se puede calcular el valor de la tangente de pérdidas de los materiales dieléctricos analizando el coeficiente de reflexión registrado en un radargrama.

El procedimiento para esta técnica se detalla a continuación:

A. Selección del escenario de medición

Se debe seleccionar el escenario: “CALIBRACION COEFICIENTE DE REFLEXIÓN” como se observa en la Figura 29.

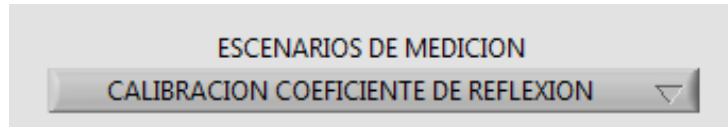


Figura 39. Selección del escenario para la calibración del coeficiente de reflexión.

B. Señal de calibración

Para determinar la permitividad relativa de un dieléctrico es necesario obtener una señal de calibración que represente un coeficiente de reflexión equivalente a la unidad. La configuración para registrar dicha señal de calibración se muestra en la Figura 30.

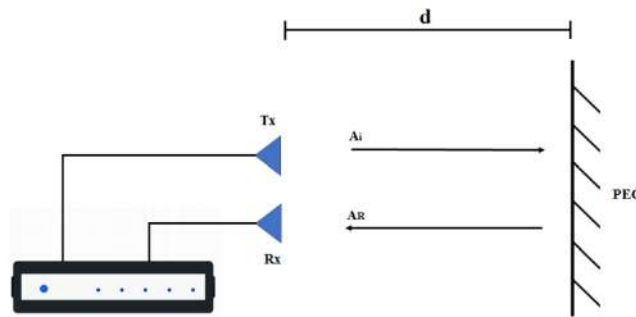


Figura 40. Sistema para obtener la señal de calibración con la técnica SDRadar 2.

La superficie reflectante que se muestra en la Figura 30 debe ser un material conductor perfecto. Por otro lado, la distancia de separación (d) entre el sistema de antenas y el PEC debe ser de por lo menos 3λ con el fin de garantizar la condición de campo lejano. Además, se recomienda que la superficie reflectante sea colocada de tal manera que se garantice una incidencia normal de la señal radar.

Una vez montado el sistema (ver Figura 13), se inicia el proceso de transmisión y recepción de la señal radar dando clic en el botón “run” como se muestra en la Figura 31.

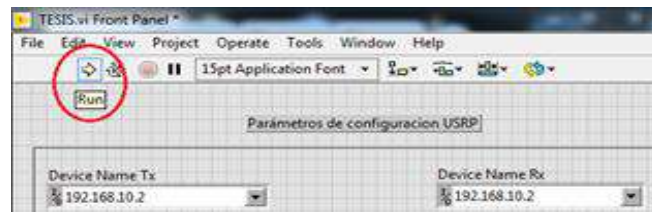


Figura 41. Ejecución de los procesos de transmisión y recepción de la señal radar.

Una vez iniciado este proceso, la señal transmitida y recibida se visualiza gráficamente en un “waveform” tal como se observa en la Figura 32.

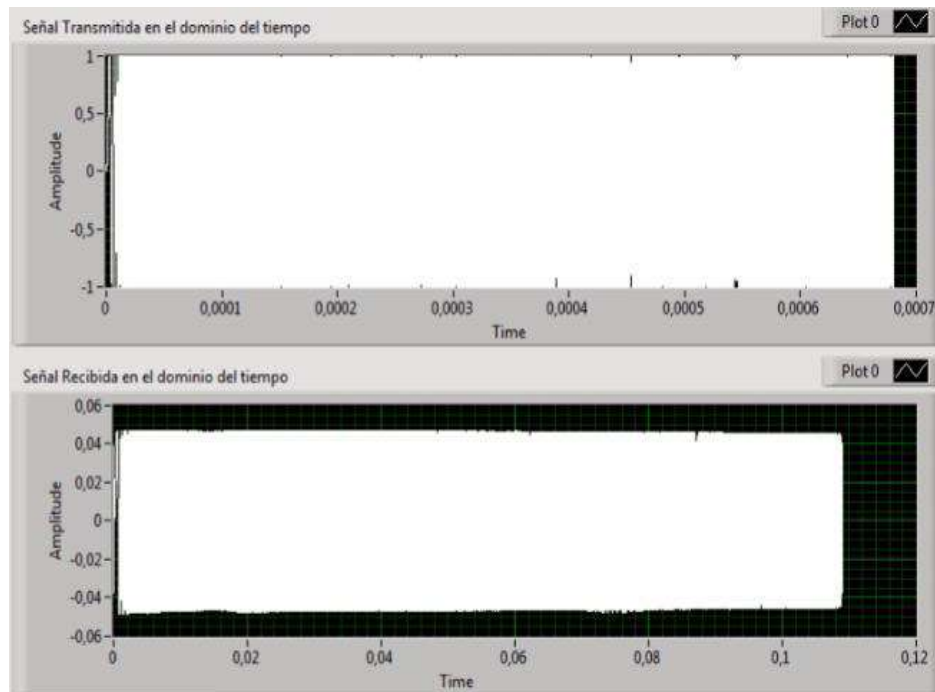


Figura 42. Señal de calibración transmitida y reflejada en el dominio del tiempo.

Luego de que la señal recibida se muestre estable, damos clic en el botón “STOP” del proceso de recepción y transmisión para guardar la señal recibida en un archivo de texto. Esta señal será utilizada posteriormente para normalizar el coeficiente de reflexión. En primer lugar, se debe detener el proceso de recepción como se aprecia en la Figura 33.

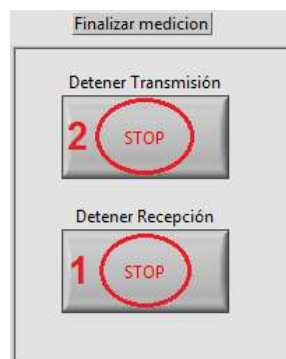


Figura 43. Proceso para grabar la señal recibida.

C. Señal de Caracterización

Luego de haber guardado la señal de calibración, se debe registrar la señal reflejada sobre la superficie del dieléctrico con un PEC en la parte posterior como se muestra en la Figura 34.

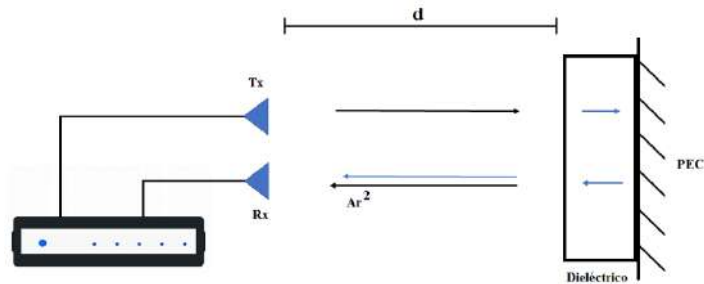


Figura 44. Configuración para la señal de caracterización con la técnica SDRadar 2.

La distancia de separación (d) entre el sistema de antenas y la superficie del dieléctrico debe ser la misma que se utilizó para registrar la señal de calibración con el PEC. El sistema implementado se muestra en la Figura 35, y el dieléctrico seleccionado para demostración es la baquelita.



Figura 45. Implementación del sistema de caracterización con la técnica SDRadar 2.

Una vez montado el sistema mostrado en la Figura 35, se debe seleccionar el escenario de medición: “REFLEXIÓN CON PEC” como se observa en la Figura 36.

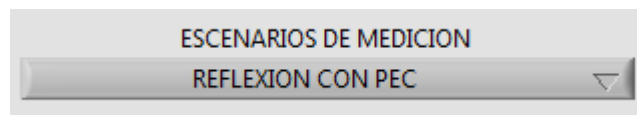


Figura 46. Selección del escenario para la caracterización con la técnica SDRadar 2.

Para esta técnica de caracterización el algoritmo necesita la información de la permitividad relativa y el espesor del material. En la Figura 37 se muestran la interfaz para ingresar estos valores.

Definición de parámetros para calcular permitividad relativa compleja con la técnica SDRadar 2

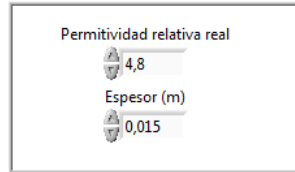


Figura 47. Interfaz para ingresar los datos necesarios en la técnica SDRadar 2.

Luego se inicia el proceso de transmisión y recepción de la señal radar dando clic en el botón “run” como se muestra en la Figura 31. Cuando la señal que se registra en el “waveform” se mantiene estable detenemos el proceso de recepción y transmisión como se detalla en la Figura 33. Una vez grabada la señal de caracterización en un archivo de texto, el algoritmo procesa las señales e imprime los resultados correspondientes.

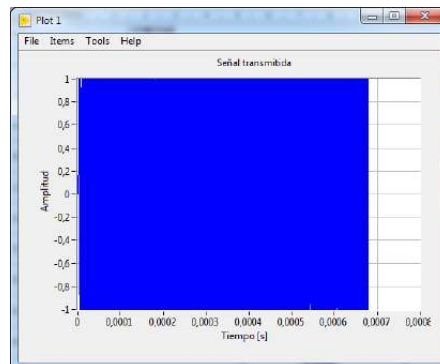


Figura 48. Señal transmitida en el dominio del tiempo.

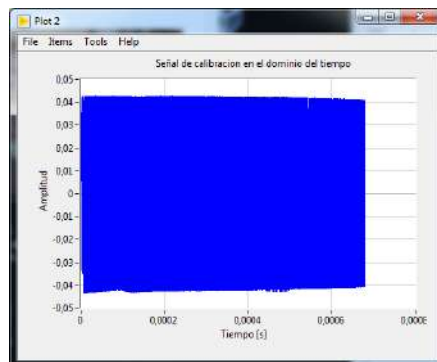


Figura 49. Señal de calibración en el dominio del tiempo.

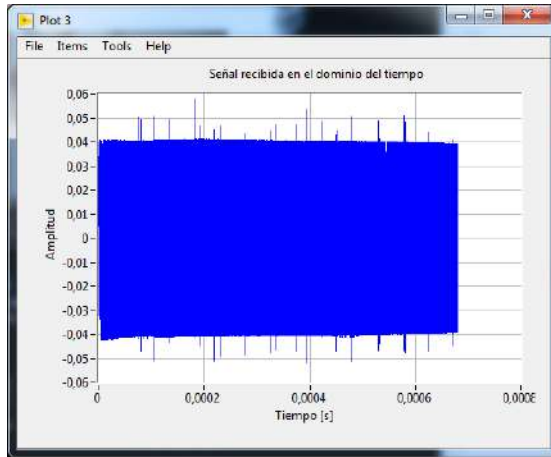


Figura 50. Señal de caracterización en el dominio del tiempo.

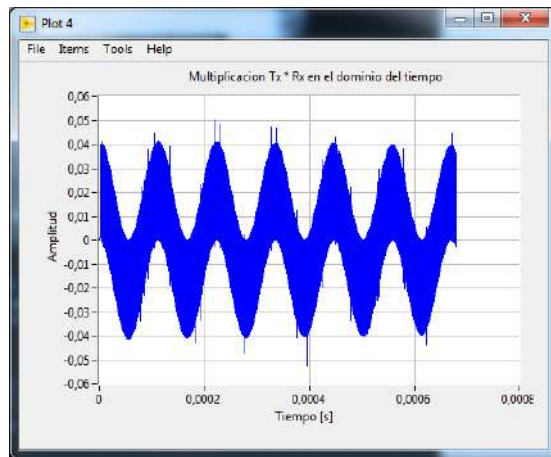


Figura 51. Multiplicación de la señal Tx y Rx en el dominio del tiempo.

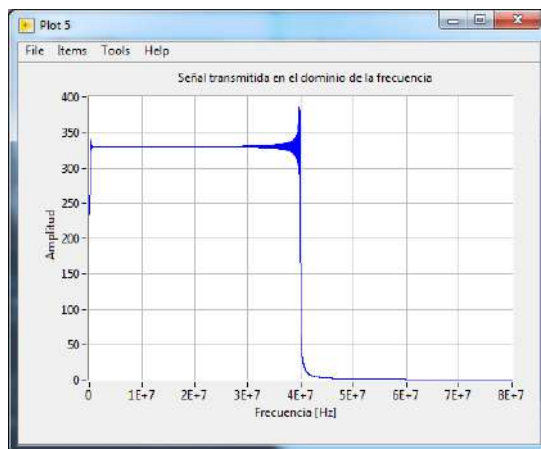


Figura 52. Señal transmitida en el dominio de la frecuencia.

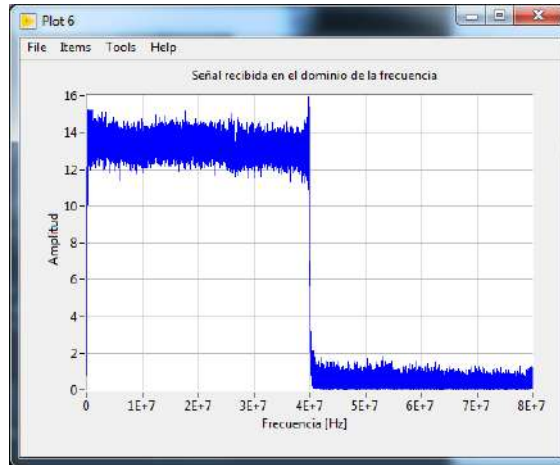


Figura 53. Señal recibida en el dominio de la frecuencia.

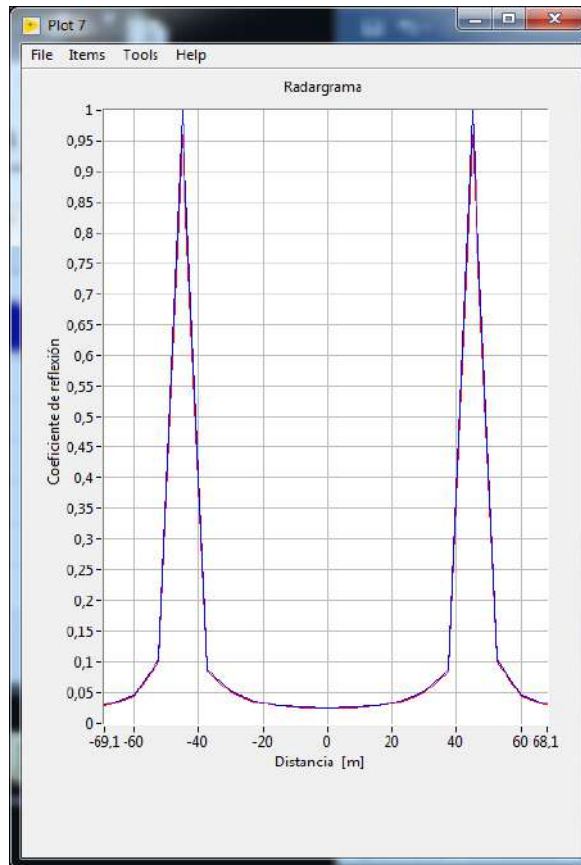


Figura 54. Radargrama normalizado.

Una vez obtenido el radargrama correspondiente, el algoritmo extrae el valor más alto de la gráfica en color rojo de la Figura 44, el cual corresponde al coeficiente de reflexión que es muy cercano a la unidad y permite estimar la tangente de pérdidas del dieléctrico. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 45.

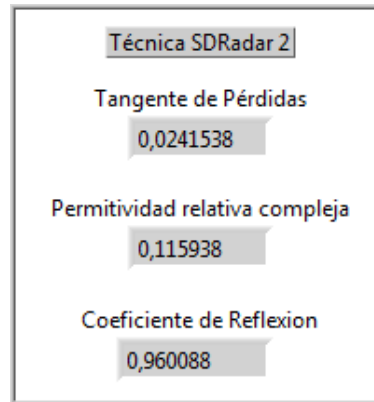


Figura 55. Resultados de la caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 2.

5.7. Técnica SDRadar 3

Mediante esta técnica se puede calcular el valor de la permitividad relativa de los materiales dieléctricos analizando el coeficiente de transmisión registrado en un radargrama.

El procedimiento para esta técnica se detalla a continuación:

D. Selección del escenario de medición

Se debe seleccionar el escenario: “CALIBRACION COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN” como se observa en la Figura 46.

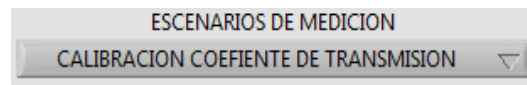


Figura 56. Selección del escenario para la calibración del coeficiente de transmisión.

E. Señal de calibración

Para determinar la permitividad relativa de un dieléctrico es necesario obtener una señal de calibración que represente un coeficiente de transmisión equivalente a la unidad. La configuración para registrar dicha señal de calibración se muestra en la Figura 47.

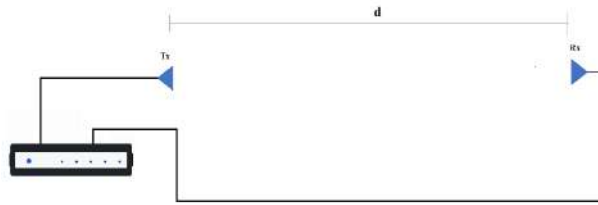


Figura 57. Sistema para obtener la señal de calibración con la técnica SDRadar 3.

La distancia de separación (d) entre la antena transmisora y receptora por lo menos 6λ con el fin de garantizar la condición de campo lejano.

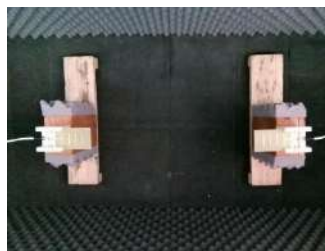


Figura 58. Sistema implementado para la señal de calibración con la técnica SDRadar 3.

Una vez montado el sistema de la Figura 48, se inicia el proceso de transmisión y recepción de la señal radar dando clic en el botón “run” como se muestra en la Figura 49.

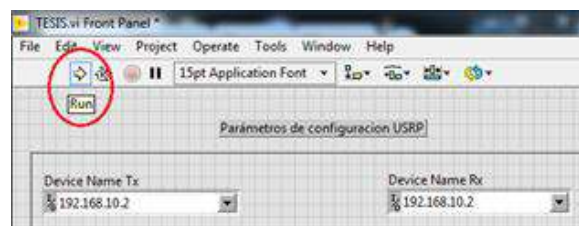


Figura 59. Ejecución de los procesos de transmisión y recepción de la señal radar.

Una vez iniciado este proceso, la señal transmitida y recibida se muestran gráficamente en un “waveform” tal como se observa en la Figura 50.

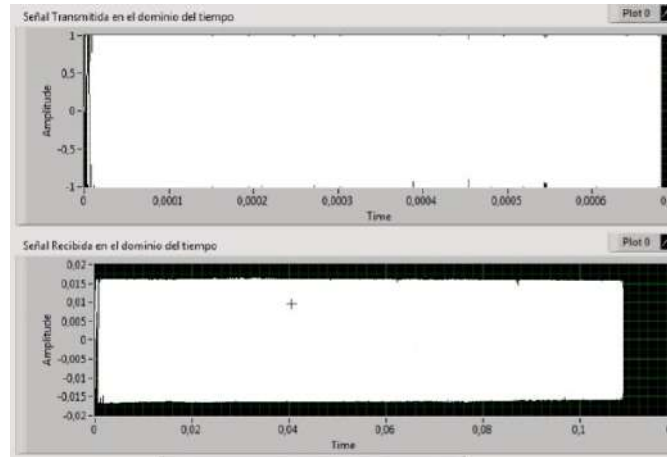


Figura 60. Señal de calibración transmitida y reflejada en el dominio del tiempo.

Luego de que la señal recibida se muestre estable, damos clic en el botón “STOP” del proceso de transmisión y recepción para guardar la señal recibida en un archivo de texto. Esta señal será utilizada posteriormente para normalizar el coeficiente de transmisión. En primer lugar, se debe detener el proceso de recepción como se aprecia en la Figura 51.

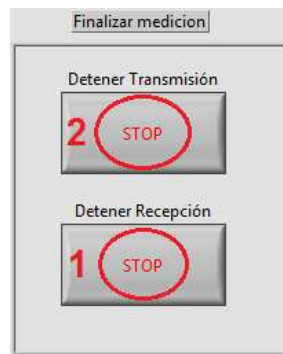


Figura 61. Proceso para grabar la señal recibida.

F. *Señal de Caracterización*

Luego de haber guardado la señal de calibración, se debe registrar la señal luego de que atraviese la estructura del dieléctrico para calcular el coeficiente de transmisión y consecuentemente la permitividad relativa. La configuración de este sistema se detalla en la Figura 52.

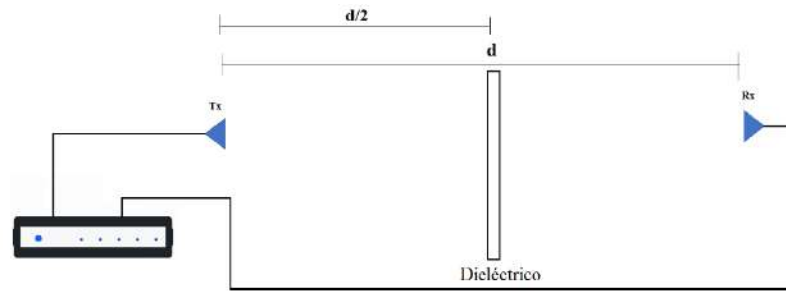


Figura 62. Configuración de la señal de caracterización con la técnica SDRadar 3.

La distancia de separación (d) entre el sistema de antenas y la superficie del dieléctrico debe ser la misma que se utilizó para registrar la señal de calibración (ver Figura 47). El sistema implementado se muestra en la Figura 53, y el dieléctrico seleccionado para demostración es la baquelita.



Figura 63. Implementación del sistema de caracterización con la técnica SDRadar 3.

Una vez montado el sistema mostrado en la Figura 53, se debe seleccionar el escenario de medición: “TRANSMISIÓN” como se observa en la Figura 54.

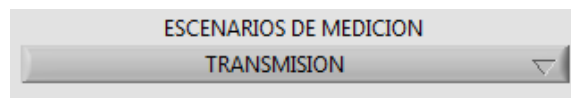


Figura 64. Selección del escenario para la señal de caracterización.

Luego se inicia el proceso de transmisión y recepción de la señal radar dando clic en el botón “run” como se muestra en la Figura 49. A continuación se visualizará una señal dentro del “waveform” (ver Figura 50), y cuando la señal se mantenga estable detenemos el proceso de recepción y transmisión como se detalla en la Figura 51. Una vez grabada la señal de

caracterización en un archivo de texto, el algoritmo procesa las señales e imprime los resultados correspondientes.

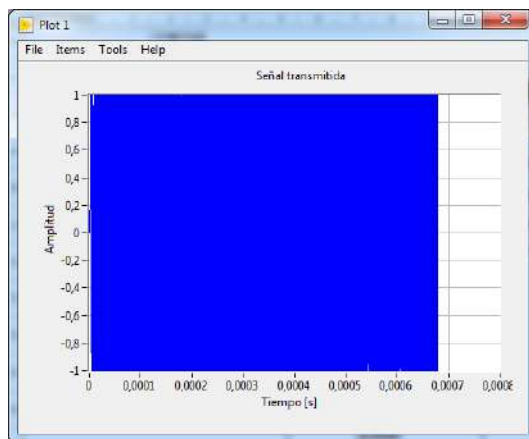


Figura 65. Señal transmitida en el dominio del tiempo.

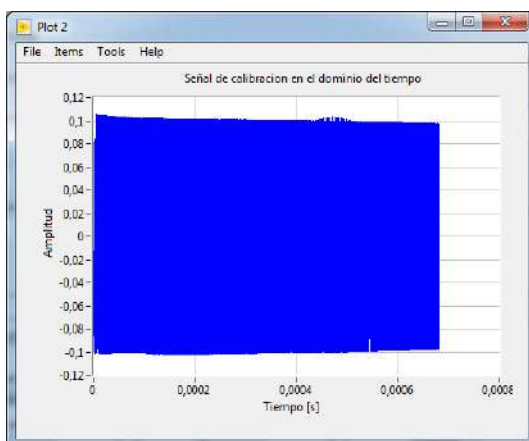


Figura 66. Señal de calibración en el dominio del tiempo.

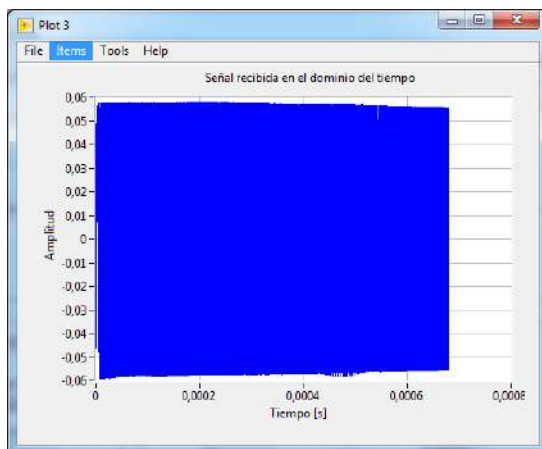


Figura 67. Señal de caracterización en el dominio del tiempo.

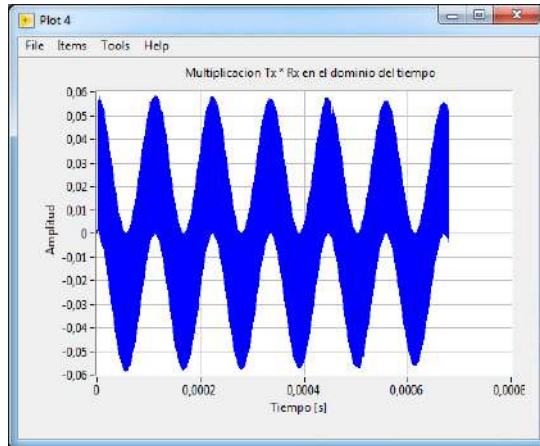


Figura 68. Multiplicación de la señal Tx y Rx en el dominio del tiempo.

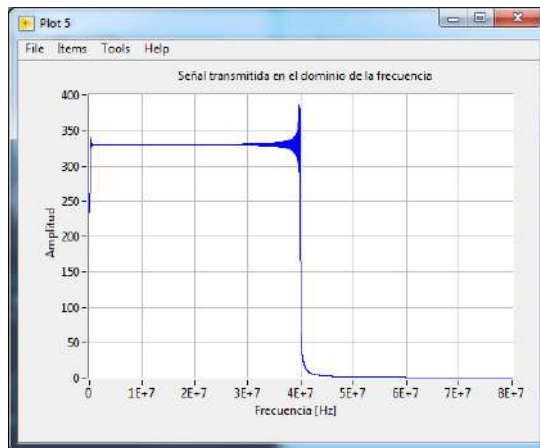


Figura 69. Señal transmitida en el dominio de la frecuencia.

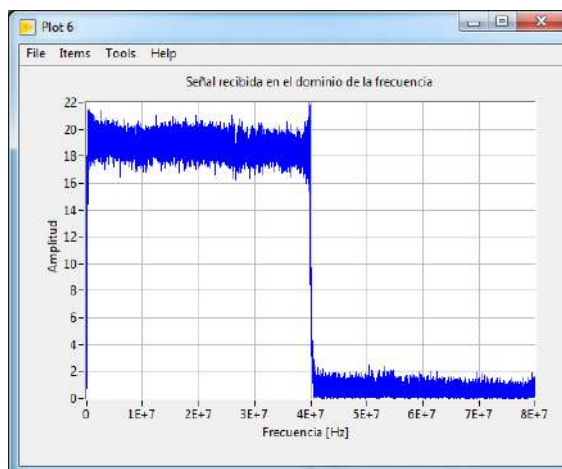


Figura 70. Señal recibida en el dominio de la frecuencia.

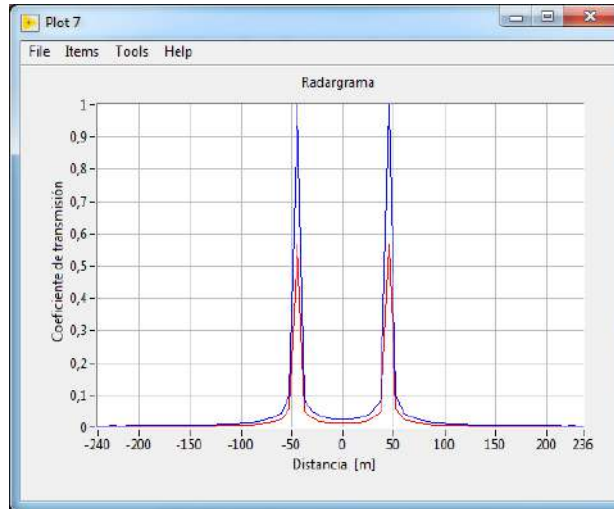


Figura 71. Radargrama normalizado.

Una vez obtenido el radargrama correspondiente, el algoritmo extrae el valor más alto de la gráfica en color rojo de la Figura 61, el cual corresponde al coeficiente de transmisión que permite calcular la permitividad relativa del dieléctrico. Los resultados se muestran en la Figura 62.

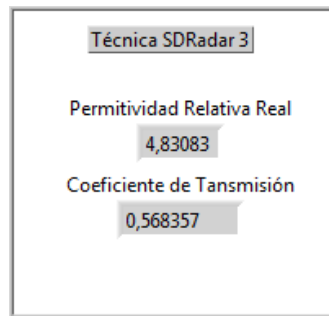


Figura 72. Resultados de la caracterización de la baquelita con la técnica SDRadar 3.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS PARA EL
APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 22/12/2020

INFORMACIÓN DEL AUTOR	
Nombres – Apellidos: ALEX RAMIRO MASAQUIZA CAIZA	
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL	
Facultad: INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA	
Carrera: INGENIERIA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES	
Título a optar: INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES	
f. Analista de Biblioteca responsable:	