



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

Título

Implementación de superficie inteligente reconfigurable (RIS) para experimentar con las comunicaciones inalámbricas Wi-Fi en el rango de 5GHz aplicado ambientes interiores

**Trabajo de Titulación para optar al título de:
Ingenieros en Electrónica y Telecomunicaciones**

Autores:

Bravo Tipanguano, Luis David
Collaguazo Cuenca, Verónica Vanesa

Tutor:

PhD. Daniel Antonio Santillán Haro

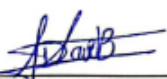
Riobamba, Ecuador. 2024

DERECHOS DE AUTORÍA


Nosotros, **Luis David Bravo Tipanguano**, con cédula de ciudadanía **175021111-0**, y **Verónica Vanesa Collaguazo Cuenca**, con cédula de ciudadanía **172499889-1**, autores del trabajo de investigación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE SUPERFICIE INTELIGENTE RECONFIGURABLE(RIS) PARA EXPERIMENTAR CON LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS WI-FI EN EL RANGO DE 5GHZ APLICADO AMBIENTES INTERIORES**, certificamos que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedemos a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida, será de nuestra entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 9 de mayo del 2024.



Luis David Bravo Tipanguano
C.I: 175021111-0



Verónica Vanesa Collaguazo Cuenca
C.I: 172499889-1

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **IMPLEMENTACIÓN DE SUPERFICIE INTELIGENTE RECONFIGURABLE(RIS) PARA EXPERIMENTAR CON LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS WI-FI EN EL RANGO DE 5GHZ APLICADO AMBIENTES INTERIORES**, por **Luis David Bravo Tipanguano** con cédula de ciudadanía **175021111-0**, emitimos el DICTAMEN FAVORABLE, conducente a la **APROBACIÓN** de la titulación. Certificamos haber revisado y evaluado el trabajo de investigación y cumplida la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 9 de mayo del 2024.

Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Manuel Antonio Meneses Freire, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Daniel Antonio Santillán Haro, PhD.
TUTOR

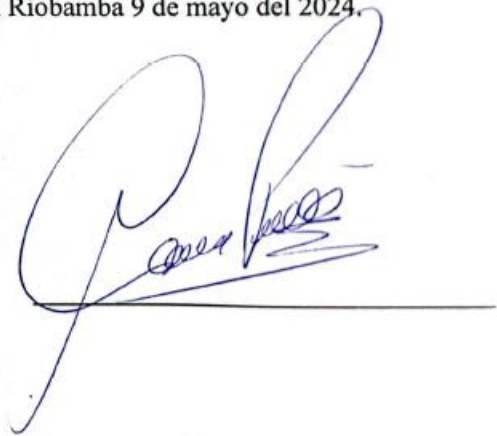


DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **IMPLEMENTACIÓN DE SUPERFICIE INTELIGENTE RECONFIGURABLE(RIS) PARA EXPERIMENTAR CON LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS WI-FI EN EL RANGO DE 5GHZ APLICADO AMBIENTES INTERIORES**, por Verónica Vanesa Collaguazo Cuenca con cédula de ciudadanía 172499889-1, emitimos el DICTAMEN FAVORABLE, conducente a la **APROBACIÓN** de la titulación. Certificamos haber revisado y evaluado el trabajo de investigación y cumplida la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 9 de mayo del 2024.

Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Manuel Antonio Meneses Freire, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Daniel Antonio Santillán Haro, PhD.
TUTOR



CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **IMPLEMENTACIÓN DE SUPERFICIE INTELIGENTE RECONFIGURABLE(RIS) PARA EXPERIMENTAR CON LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS WI-FI EN EL RANGO DE 5GHZ APLICADO AMBIENTES INTERIORES**, presentado por **Luis David Bravo Tipanguano** con cédula de identidad número **175021111-0**, bajo la tutoría de **PhD. Daniel Antonio Santillán Haro**; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 9 de mayo del 2024.

Presidente del Tribunal de Grado
Mgs. Edgar Giovanni Cuzco Silva



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Manuel Antonio Meneses Freire



Firma

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **IMPLEMENTACIÓN DE SUPERFICIE INTELIGENTE RECONFIGURABLE(RIS) PARA EXPERIMENTAR CON LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS WI-FI EN EL RANGO DE 5GHZ APLICADO AMBIENTES INTERIORES**, presentado por Verónica Vanesa Collaguazo Cuenca con cédula de identidad número 172499889-1, bajo la tutoría de **PhD. Daniel Antonio Santillán Haro**; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 9 de mayo del 2024.

Presidente del Tribunal de Grado
Mgs. Edgar Giovanni Cuzco Silva



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Manuel Antonio Meneses Freire



Firma



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **BRAVO TIPANGUANO LUIS DAVID** con CC: **175021111-0**, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **IMPLEMENTACIÓN DE SUPERFICIE INTELIGENTE RECONFIGURABLE (RIS) PARA EXPERIMENTAR CON LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS WI-FI EN EL RANGO DE 5GHz APLICADO AMBIENTES INTERIORES**", cumple con el **3%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 25 día de abril de 2024



Ph.D. Daniel Antonio Santillán Haro

PhD. Daniel Antonio Santillán Haro
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **COLLAGUAZO CUENCA VERÓNICA VANESA** con CC: **172499889-1**, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **IMPLEMENTACIÓN DE SUPERFICIE INTELIGENTE RECONFIGURABLE (RIS) PARA EXPERIMENTAR CON LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS WI-FI EN EL RANGO DE 5GHz APLICADO AMBIENTES INTERIORES**", cumple con el **3%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 25 día de abril de 2024



Escaneado y certificado digitalmente por
**DANIEL ANTONIO
SANTILLÁN HARO**

PhD. Daniel Antonio Santillán Haro
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

A mis seres queridos por siempre creer en mí cuando más lo necesitaba.

David Bravo

Este proyecto de investigación va dedicado primeramente a Dios, por brindarme fortaleza y sabiduría para poder culminar esta meta. A mis queridos padres, hermanos, tíos, cuñados y suegros por cada palabra de aliento a la distancia.

Verónica Collaguazo

AGRADECIMIENTO

A mi madre Jeanneth, por su amor infinito e incondicional, y por ser el ejemplo vivo que ha moldeado mi camino en la vida.

A mi padre Luis, por su constante apoyo, cariño y sabios consejos que han iluminado mi sendero cada día.

A mi hermano Andrés, por su fe en mí y por ser mi fuente inagotable de aliento y motivación.

A mis niñas Mizu y Chis, cuyas acciones cotidianas me recuerdan que el verdadero amor se expresa en gestos y no en palabras.

A mi familia y seres queridos, por estar siempre presentes y brindarme su apoyo incondicional en cada paso de este camino.

A Vanesa, la mujer de mi vida, por su amor inquebrantable, su respeto y su constante compañía en cada instante de esta travesía llamada vida.

David Bravo

A mi madre Marcia Cuenca por todo su amor, apoyo y consejos, por animarme día a día, por siempre inspirarme a luchar y no rendirme.

A mi padre Manuel Agila gracias por llegar a nuestras vidas, por brindarme su cariño, su esfuerzo y sacrificio de cada día me ha permitido culminar este proceso.

A mis hermanos Ariana, Andrés, Andrea y Fernando, ustedes fueron mi fuente de inspiración, sus palabras de aliento, sus llamadas y mensajes me motivaban a no decaer.

A mis tíos Cecilia y Gabriel, mis segundos padres gracias por estar siempre pendientes y brindándome su apoyo.

A mis suegros y mi cuñado gracias por brindarme su amor y apoyarme en cada momento.

Al amor de mi vida David Bravo siempre caminando de la mano, culminando este proceso juntos, gracias por tu amor, confianza y apoyo.

Verónica Collaguazo

A Marcelino, Gabriela, Cristian, Joss y Wilson por brindarnos su sincera amistad durante todo el camino recorrido en estos años y estar con nosotros en las buenas y en las malas.

A mis docentes, a nuestro tutor PhD. Daniel Santillán, por aportarnos aquellos conocimientos que hicieron de este proyecto una investigación de realce académico.

Al Ing. Leonardo Rentería por brindarnos su ayuda y amistad desinteresada y obrar más allá del deber de un docente y convertirse en un gran amigo durante tantos años.

A la Universidad Nacional de Chimborazo por convertirse en nuestro segundo hogar y alma mater de los profesionales que aspiramos ser en la vida.

David y Verónica

ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA.....	2
DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL	3
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL.....	5
CERTIFICADO ANTIPLAGIO.....	7
DEDICATORIA.....	9
AGRADECIMIENTO.....	10
ÍNDICE GENERAL.....	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
ÍNDICE DE FIGURAS	15
RESUMEN.....	18
ABSTRACT	19
1. INTRODUCCIÓN.....	20
1.1 Planteamiento del problema	21
1.2 Justificación.....	22
1.3 Objetivos	23
1.3.1 Objetivo General.....	23
1.3.2 Objetivos Específico.....	23
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1 Estado del Arte	24
2.2 Fundamentos teóricos.....	24
2.2.1 Comunicaciones Inalámbricas	24
2.2.1.1 Ventajas de las comunicaciones inalámbricas	25
2.2.1.2 Desventajas de las comunicaciones inalámbricas	25
2.2.2 Espectro Radioeléctrico.....	26
2.2.3 Teoría de la reflexión y refracción.....	26
2.2.4 Metamateriales	26
2.2.4.1 Metamateriales absorbentes	27
2.2.4.2 Metamateriales reflectantes	27
2.2.5 Antena de metasuperficie	27
2.2.6 Teoría de Floquet.....	28
2.2.7 Factor de Array.....	29
2.2.8 Características generales de la superficie inteligente reconfigurable.....	29
2.2.9 Tipos de superficies inteligentes reconfigurables	30
2.2.11 Parámetros de la superficie inteligente reconfigurable	32
2.2.11.1 Adaptación.....	32
2.2.11.2 Directividad	32
2.2.11.3 Absorción.....	33
2.2.11.4 Reflectividad.....	33
2.2.11.5 Ganancia	34

2.2.11.6	Ancho de Haz	34
2.2.11.7	Eficiencia	34
2.2.11.8	Rango de frecuencia.....	35
2.2.11.9	Tiempo de respuesta	35
2.2.11.10	Fase	35
2.2.12	Método de alimentación	35
2.2.12.1	Antena Bocina	35
2.2.12.2	Bocina rectangular con plano de masa (Alimentador Mixto)	36
2.2.12.3	Dipolo	36
2.2.13	VLC Reproductor multimedia gestor de envío de datos “audio y video”	37
2.2.14	Wireshark- Análisis y captura de paquetes de datos.....	37
2.2.15	Calidades de video.....	37
3.	METODOLOGÍA	38
3.1	Tipo de investigación.....	38
3.1.1	Investigación experimental	38
3.2	Métodos de investigación	38
3.2.1	Investigación cuantitativa	38
3.3	Técnicas de investigación.....	38
3.3.1	Estudio de documentos	38
3.3.2	Objetividad y generalización	38
3.3.3	Instrumentación	39
3.3.4	Resultados numéricos	39
3.4	Población y muestra.....	39
3.4.1	Población	39
3.4.2	Muestra.....	39
3.5	Operacionalización de las variables.....	40
3.5.1	Variables independientes	40
3.5.2	Variables dependientes	40
3.6	Procedimiento y análisis.....	40
3.6.1	Diseño de las antenas.....	42
3.6.1.1	Diseño de los alimentadores	42
3.6.1.1.1	Alimentador: Bocina para la banda de 5.2GHz a 5.8GHz	42
3.6.1.2	Diseño de la antena RIS.....	45
3.6.1.2.1	Diseño de la celda unitaria.....	45
3.6.2	Array de celda unitaria (RIS).....	51
3.6.2.1	Número de celdas unitarias.....	52
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1	Análisis e interpretación de resultados	54
4.1.1	Análisis de alimentadores	54
4.1.1.1	Antena Bocina	54

4.2	Análisis de la superficie RIS	57
4.2.1	Superficie RIS giro 15°	58
4.2.2	Superficie RIS giro 60°	60
4.3	Prueba de funcionamiento de la superficie RIS implementada	62
4.3.1	Escenario con un reflector perfecto	63
4.3.2	Escenario con la superficie RIS	64
4.4	Envío de datos de audio y video.	66
4.5	Análisis estadístico de la implementación y pruebas de la superficie RIS	67
4.5.1	Prueba de normalidad para la celda unitaria	67
4.5.1.1	Coeficiente de reflexión(S11)	67
4.5.1.1.1	Prueba de Kruskal-Wallis	68
4.5.1.2	Coeficiente de transmisión (S21)	68
4.5.1.2.1	Prueba de Kruskal-Wallis	68
4.5.2	Prueba de normalidad para la superficie RIS	69
4.5.2.1	Coeficiente de reflexión(S11)	69
4.5.2.1.1	Prueba de T-Student	69
4.5.2.2	Ganancia de la superficie RIS	69
4.5.2.2.1	Prueba de T-Student	70
4.5.2.3	Directividad en la superficie RIS	70
4.5.2.3.1	Prueba de T-Student	70
4.5.3	Prueba de normalidad en el envío de audio y video en pasillos	70
4.5.3.1	Prueba de Wilcoxon	71
4.5.3.2	Coeficiente de variación en el envío de datos de audio y video en pasillos	72
4.5.4	Prueba de normalidad en el envío de audio y video en un curso	73
4.5.4.1	Prueba de Wilcoxon	73
4.5.4.2	Coeficiente de variación en el envío de datos de audio y video en un curso	74
4.6	Prueba de normalidad entre el reflector perfecto y la superficie RIS (25cm)	75
4.6.1	Prueba de Wilcoxon	76
4.7	Prueba de normalidad entre el reflector perfecto y la superficie RIS (50cm)	76
4.7.1	Prueba de Wilcoxon	77
5.	CAPÍTULO V	78
5.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	78
5.1.1	Conclusiones	78
5.1.2	Recomendaciones	79
6.	BIBLIOGRAFÍA	80
7.	ANEXOS	85

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Variables independientes.....	40
Tabla 2: Variables independientes.....	40
Tabla 3:Guías de ondas metálicas empleadas en el rango de 2.6GHz a 15GHz.....	42
Tabla 4:Datos de la guía de onda WR-159.....	43
Tabla 5:Dimensiones de una bocina piramidal a 5GHz con 20 dB de ganancia.	44
Tabla 6:Dimensiones del grosor de los materiales de la celda unitaria.	47
Tabla 7:Dimensiones de la elipse de la celda unitaria	47
Tabla 8:Dimensiones de la elipse de la celda unitaria con ranura	49
Tabla 9:Dimensiones del grosor de los materiales de la celda unitaria con ranura	50
Tabla 10:Valores estadísticos con respecto al envío de audio y video (pasillos)	72
Tabla 11:Valores estadísticos con respecto al envío de audio y video (curso)	74
Tabla 12: Valores de los parámetros para el diseño del dipolo	85
Tabla 13: Combinaciones de los grosores de los materiales para la celda unitaria.	100
Tabla 14:Parámetros de directividad y ganancia de la antena RIS respecto a distancias y ángulos de giro. .	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Comunicaciones inalámbricas.....	25
Figura 2: Espectro radioeléctrico.....	26
Figura 3: Reflexión y Refracción	26
Figura 4: Metamateriales Pentamodal	27
Figura 5: Metasuperficie con resonadores elípticos.	28
Figura 6: Arrays.....	29
Figura 7: Sistema inalámbrico asistido por RIS	30
Figura 8: RIS en redes de comunicación inalámbrica	31
Figura 9: Antena de bocina piramidal	36
Figura 10: Alimentador mixto	36
Figura 11: Antena Dipolo.....	37
Figura 12: Descripción por etapas del proyecto de investigación	41
Figura 13: Parámetros de una antena de bocina piramidal	42
Figura 14: Medidas de la antena de bocina piramidal	44
Figura 15: Coeficiente de reflexión(S11)- Alimentador: Bocina	44
Figura 16: Celda unitaria primera versión.....	48
Figura 17: Condiciones de borde de la celda unitaria.....	48
Figura 18: Coeficiente de reflexión y transmisión de la celda unitaria base.	49
Figura 23: Celda unitaria con ranura	49
Figura 20: Coeficiente de reflexión y transmisión de la celda unitaria diseñada.....	50
Figura 21: Medidas de los grosores de la celda unitaria.....	51
Figura 22: Coeficiente de reflexión y transmisión en 5.5GHz	51
Figura 23: Propiedades para crear un array	53
Figura 24: Array de antenas simulado 40x40	53
Figura 25: Alimentador: Bocina Piramidal.....	54
Figura 26: Coeficiente de reflexión de la bocina piramidal en 5.5GHz	55
Figura 27: Diagrama de radiación de la Bocina piramidal	55
Figura 28: Diagrama polar de la Bocina piramidal.....	56
Figura 29: Diagrama de campo lejano de una bocina piramidal a 5.5GHz	56
Figura 30: Directividad de la bocina piramidal a 5.5GHz	57
Figura 31: Superficie RIS	57
Figura 32: Giro de 15° y 60° en la superficie RIS respecto al eje x	58
Figura 33: Coeficiente de reflexión de la superficie RIS con un giro de 15°	58
Figura 34: Diagrama de radiación y diagrama polar de la superficie RIS a 15°	59
Figura 35: Diagrama de campo lejano de la superficie RIS a 15° en 5.5GHz.....	59
Figura 36: Eficiencia de radiación de la superficie RIS a 15° en 5.5GHz.....	60
Figura 37: Coeficiente de reflexión de una superficie RIS a 60° en 5.5GHz	60
Figura 38: Diagrama de radiación 3D y diagrama polar reflejando la onda incidente.	61

Figura 39:Diagramas de campo lejano de una superficie RIS a 120° en 5.5GHz	61
Figura 40:Eficiencia de radiación de la superficie RIS a 60° en 5.5GHz	62
Figura 41:Pruebas de la antena RIS vs reflector perfecto a 25 cm de distancia	62
Figura 42:Coeficiente de reflexión (S11) medido de la antena de bocina.	63
Figura 43:Primer escenario: Antena de bocina y un reflector perfecto	63
Figura 44:Coeficiente de reflexión del reflector perfecto medido- Desacoplado	64
Figura 45:Coeficiente de reflexión del reflector perfecto simulado- Desacoplado	64
Figura 46:Segundo escenario: Antena de bocina con la superficie RIS	65
Figura 47:Coeficiente de reflexión(S11) medido de la superficie RIS	65
Figura 48:Coeficiente de reflexión(S11) simulado de la antena RIS a 25cm	65
Figura 49:Envío de datos de audio y video	66
Figura 50:Envío de datos de audio y video con la intervención de la superficie RIS.....	66
Figura 51: Envío de datos de audio y video sin la intervención de la superficie RIS	66
<i>Figura 52:Diagrama de dispersión entre el número de combinaciones y el coeficiente de reflexión.....</i>	<i>67</i>
Figura 53:Diagrama de dispersión entre el número de combinaciones y el coeficiente de transmisión.....	68
Figura 54:Histograma de parámetro S11 respecto al ángulo de giro de la superficie RIS	69
Figura 55:Histograma de la ganancia respecto al ángulo de giro de la superficie RIS	69
Figura 56:Histograma de la directividad respecto al ángulo de giro de la superficie RIS	70
<i>Figura 57:Comparativa del envío de datos de audio y video con RIS y sin RIS aplicado en pasillos</i>	<i>71</i>
<i>Figura 58:Diagrama de cajas de la comparación del envío de datos de audio y video en pasillos</i>	<i>71</i>
Figura 59:Coeficiente de variación del envío de datos de audio y video en pasillos (Con RIS - Sin RIS)	72
Figura 60:Comparación del coeficiente de variación para ambos casos (pasillos).....	72
Figura 61:Comparativa del envío de datos de audio y video con RIS y sin RIS aplicado en un curso (15m). 73	73
Figura 62:Diagrama de cajas de la comparación del envío de datos de audio y video de un curso.....	73
Figura 63:Coeficiente de variación del envío de datos de audio y video en un curso (Con RIS - Sin RIS)....	74
Figura 64:Comparación del coeficiente de variación para ambos casos (curso)	75
Figura 65:Comparativa de los parámetros (S11) entre un reflector y RIS a 25cm	75
Figura 66:Diagrama de cajas de la comparativa de los parámetros S11(reflector perfecto vs RIS) a 25cm ...	76
Figura 67:Comparativa de los parámetros (S11) entre un reflector y RIS a 50cm	76
Figura 68:Diagrama de cajas de la comparativa de los parámetros S11(reflector perfecto vs RIS) a 50cm ...	77
Figura 69:Arreglo de antenas dipolo	86
Figura 70:Coeficiente de reflexión(S11) – Alimentador: Arreglo de dipolos	86
Figura 71:Guía de onda rectangular con transición escalonada y apertura cuadrada	87
Figura 72:Coeficiente de reflexión (S11)- Alimentador: Mixto	87
Figura 73:Bocina rectangular acoplada a un plano de masa circular..... ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 74:Coeficiente de reflexión (S11) del alimentador mixto a 5.5GHz	88
Figura 75:a)Diagrama de radiación , b) Diagrama polar del alimentador mixto	88
Figura 76:Diagrama de campo lejano del alimentador mixto a 5.5GHz	89
Figura 77:Bocina rectangular acoplada a un plano de masa circular.....	89
Figura 78:Arreglo de Dipolos a $\lambda/4$	90

Figura 79:Coeficiente de reflexión de un arreglo de dipolos a 5.5GHz	90
Figura 80:a)Diagrama de radiación b) Diagrama polar del arreglo de dipolos.....	90
Figura 81:Comparación de directividades de un dipolo normal vs arreglo de dipolos.....	91
Figura 82:Diagramas de campo lejano de un arreglo de dipolos a 5.5GHz.....	91
Figura 83:Comparativa entre los coeficientes de reflexión de los alimentadores.....	92
Figura 84:Comparativa entre los coeficientes de reflexión de los alimentadores.....	92
Figura 85:Modelo de la superficie RIS exportado de CST Studio a AutoCAD	93
Figura 86:Celdas unitarias desmoldadas y mallado con medidas de diseño.....	93
Figura 87:Sustrato de fibra de vidrio de 1.60mm y base de aluminio de 2mm	94
Figura 88:Sustrato marcando la posición de cada celda unitaria con ayuda del mallado	94
Figura 89:Proceso de pegado de las celdas unitarias.....	94
Figura 90:Comparativa entre la gráfica de absorción y el coeficiente de reflexión de la RIS	95
Figura 91:Pruebas realizadas con la RIS sin obstáculos.....	96
Figura 92:Pruebas realizadas con la RIS con obstáculos.....	96
Figura 93: Pruebas realizadas sin la RIS	97
Figura 94:Pruebas realizadas con la RIS(curso).....	97
Figura 95:Pruebas realizadas sin RIS(curso).....	98
Figura 96:Envío de datos de audio y video con la intervención de la superficie RIS.....	98
Figura 97:Envío de datos de audio y video sin la intervención de la superficie RIS en un curso	99
Figura 98:Envío de datos de audio y video con la intervención de la superficie RIS en un pasillo	99
Figura 99:Envío de datos de audio y video sin la intervención de la superficie RIS en un pasillo	100
Figura 100:Ficha técnica del sustrato utilizado para la implementación de la RIS	102

RESUMEN

Las antenas RIS (Superficies Inteligentes Reconfigurables) pasivas representan una innovadora tecnología con el potencial de mejorar considerablemente el rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbrica.

Este estudio investiga el uso de antenas RIS pasivas en la banda Wi-Fi de 5GHz (5.192GHz - 5.8GHz) con una frecuencia central de 5.5GHz, empleando una configuración donde la antena de bocina actúa como alimentador enfocando la energía radiada hacia la antena RIS.

El objetivo principal es implementar una superficie inteligente reconfigurable mediante un diseño previo del modelo desarrollado en el Software CST Studio utilizando la teoría de Floquet para estructuras periódicas, con el fin de experimentar en las comunicaciones inalámbricas mediante la transmisión de datos de audio y video en ambientes interiores por medio de la propagación de las ondas electromagnéticas.

Se lleva a cabo un análisis exhaustivo de las características de las antenas RIS pasivas, enfocándose en aspectos como la ganancia, la directividad y el coeficiente de reflexión. Por otro lado, se analiza el impacto de la antena RIS en la calidad de la señal transmitida, mediante la evaluación de parámetros como el número de paquetes enviados y recibidos en un determinado periodo de tiempo, en dos escenarios propuestos, el primero se basa en una transmisión-recepción usando una antena RIS como medio para redirigir las señales electromagnéticas y el segundo en ausencia de la misma.

Los resultados obtenidos ofrecen valiosa información sobre el rendimiento y la eficacia de las antenas RIS pasivas en aplicaciones específicas de transmisión de datos de audio y video, lo que contribuye al avance en el diseño y la implementación de sistemas de comunicación inalámbrica más eficientes y confiables en ambientes interiores.

Palabras claves: Antenas RIS pasivas, Reconfigurable, Floquet, Reflexión, Ondas electromagnéticas, Audio y video.

ABSTRACT

Passive Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) antennas, a cutting-edge technology, hold the promise of revolutionizing the performance of wireless communication systems. This study investigates the use of passive RIS antennas in the 5GHz Wi-Fi band (5.192GHz—5.8GHz) with a central frequency of 5.5GHz. It employs a configuration where the horn antenna acts as a feeder, focusing the radiated energy toward the RIS antenna. The primary aim of this study is to implement a reconfigurable intelligent surface. This is achieved through a meticulous design of the model using the advanced CST Studio software and the application of the Floquet theory for periodic structures. The study then proceeds to experiment with wireless communications by transmitting audio and video data in indoor environments through the propagation of electromagnetic waves. A comprehensive analysis of the characteristics of passive RIS antennas is carried out, focusing on aspects such as gain, directivity, and reflection coefficient. Additionally, the impact of the RIS antenna on the quality of the transmitted signal is analyzed by evaluating parameters such as the number of packets sent and received within a certain period of time in two proposed scenarios: the first one uses an RIS antenna to redirect electromagnetic signals during transmission-reception, while the second one does not. The results obtained offer valuable information on the performance and effectiveness of passive RIS antennas in specific audio and video data transmission applications, contributing to the advancement in the design and implementation of more efficient and reliable wireless communication systems in indoor environments.

Keywords: Passive RIS antennas, reconfigurable, floquet, reflection, electromagnetic waves, audio and video.



Reviewed by:

Mgs. Kerly Cabezas

ENGLISH PROFESSOR

C.C 0604042382

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el lanzamiento de la primera red comercial del mundo, ha comenzado la carrera por explorar las tecnologías de comunicaciones de próxima generación más allá de las redes actuales para lograr comunicaciones inalámbricas más rápidas y confiables[1], logrando un rendimiento mayor debido al gran ancho de banda disponible.

Las superficies inteligentes reconfigurables (RIS) son parte de estas tecnologías prometedoras ya que constan de cientos a miles de celdas unitarias que brindan mejores prestaciones que los modelos convencionales de antenas y ha ganado recientemente mucha atención en la industria y en la academia [2].

Desde la primera generación de comunicaciones inalámbricas, el rango de frecuencia operativo se ha movido constantemente a frecuencias más altas [2], sin embargo, esta ventaja es difícil de utilizar en la práctica, debido a limitaciones como la cobertura inalámbrica y potencia limitada [3], además de la pérdida de trayectoria y el sombreado que se presenta en las últimas generaciones las cuales son significativamente mayores que su predecesor debido a las características de la onda electromagnética[3].

El problema de la pérdida de trayectoria y el efecto de sombra causa atenuación, lo que puede degradar fácilmente la calidad de transmisión de datos. Dado que la próxima generación de comunicaciones móviles está diseñada para funcionar en frecuencias milimétricas o incluso en frecuencia de Terahercios, se puede esperar que el problema de la atenuación se agrave. Un simple obstáculo como una pared, un mueble o incluso una persona entre el transmisor y el receptor, pueden deteriorar fácilmente la calidad de servicio [3], [4].

RIS es una de las tecnologías que se puede utilizar para superar este problema de atenuación, es capaz de reconfigurar adaptativamente el entorno inalámbrico de una manera inteligente al cambiar la frecuencia, fase, amplitud o polarización de la onda EM incidente[5]. En las comunicaciones inalámbricas RIS se puede emplear como un proveedor de ruta alternativo, cuando la ruta de comunicación directa entre el transmisor y el receptor no está disponible debido a un obstáculo entre ellos o para mejorar la calidad del canal entre el transmisor y el receptor cuando es demasiado baja[4].

El principal objetivo de este trabajo de investigación es implementar una superficie inteligente reconfigurable (RIS) para experimentar con las comunicaciones inalámbricas WiFi en el rango de 5GHz aplicado ambientes interiores[6], de esta manera se comprobará cual es el método más adecuado para la construcción de la RIS que nos ayude a mejorar la alta pérdida de penetración y la falta de rutas de dispersión que hacen que las señales sean vulnerables al bloqueo [3].

RIS podría ser la clave para resolver el problema frecuente de interrupción que ocurre en los sistemas de comunicación y así garantizar la calidad del enlace cuando la línea de vista (LOS) no está disponible. De esta manera, RIS nos proporciona una forma energéticamente eficiente de mejorar la cobertura y la calidad de transmisión de los sistemas de comunicación inalámbricas [3].

1.1 Planteamiento del problema

La tecnología inalámbrica se ha estandarizado y comercializado en gran medida, esto ha provocado que las redes tengan que mejorar día a día debido a un incesante crecimiento de usuarios, mientras se adaptan a un rápido aumento en el flujo de tráfico de datos y una amplia variedad de servicios y aplicaciones [3].

El uso masificado de las comunicaciones inalámbricas ha provocado que las redes se vuelvan más densas debido a una reutilización de frecuencias, sin embargo, el ancho de banda de una red todavía está limitado debido a la irregularidad de la transmisión inalámbrica y el espectro accesible [7].

La limitada disponibilidad de espectro para los sistemas de comunicaciones está fomentando a una migración gradual hacia bandas de frecuencias más altas que desempeñaran un importante papel en las redes futuras, sin embargo, las ondas de alta frecuencia son fácilmente obstruidas por objetos que las atenúan en largas distancias[8].

Para ayudar con este problema se ha intentado agregar repetidores y estaciones base para minimizar distancias y proporcionar mejor cobertura, pero el principal problema es el consumo de energía muy elevado [7]. Para hacer frente a la escasez de espectro de los sistemas de comunicación y a los elevados consumos energéticos[8], se plantea como solución a las superficies inteligentes reconfigurables (RIS).

En comparación con las tecnologías empleadas actualmente en las redes inalámbricas, RIS tiene muchas características y capacidades distinguibles[9]. Es casi pasivo, con un consumo de energía ultra bajo, un costo de hardware accesible y se ve como una superficie contigua[10]. Al reflejar las señales, no aumenta ni introduce ruido porque no utiliza convertidores y amplificadores de potencia de analógico a digital o de digital a analógico[8].

Al realizar el cambio de fase de las celdas unitarias de RIS [7], las señales reflejadas pueden superponerse en fase con las del camino directo para mejorar la potencia de la señal recibida, o superponerse inversamente para reducir la interferencia multiusuario.

Lo hace con propiedades antinaturales, como la refracción negativa, la absorción perfecta y la reflexión anómala [11]. Además, el mecanismo de alimentación espacial de los RIS evita la pérdida de potencia excesiva provocada por las voluminosas redes de alimentación de las matrices en fase[12], no obstante, para asegurar la ganancia puede ser necesario instalar una mayor cantidad de elementos en la RIS.

Otro problema muy frecuente en las comunicaciones inalámbricas son la mencionada pérdida de trayectoria debido a la distancia y el efecto de sombra u obstrucción del enlace[13].

La pérdida de trayectoria se debe a la disipación de la potencia radiada por el transmisor y por los efectos del canal de propagación[12], como el ruido y la interferencia, mientras que el sombreado es causado por obstáculos entre el transmisor y el receptor que atenúan la potencia de la señal a través de la absorción, la reflexión, la dispersión y la difracción[14].

Estos efectos pertenecen a los desvanecimientos a gran escala y corresponden a los cambios del valor medio de la señal cuando la distancia del enlace varía significativamente[14].

Para sobrellevar estos fenómenos se recurre al uso de modelos de propagación, en este caso modelos en interiores es importante mencionar que este tipo de ambientes tienden a ser menos regulares que los ambientes exteriores [13], ya que las características geométricas y dieléctricas cambian dramáticamente dependiendo de si el ambiente interior es una fábrica abierta, una oficina en cubículo o un taller mecánico[15].

Este tipo de modelos depende no solo de la precisión de las medidas, sino de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo y el entorno a analizar. Para estos entornos, las herramientas de modelado asistido por computadoras están disponibles para predecir las características de propagación de la señal [13].

Con el desarrollo de la tecnología RIS, se pretende convertir un entorno del día a día en un medio controlable, que permite modificar la cobertura, directividad y otros parámetros de las señales y, de esta manera, manipular la propagación de las ondas en los espacios donde se desarrollan las distintas actividades humanas, permitiendo notables mejoras en la transmisión y recepción[16].

1.2 Justificación

En este proyecto de investigación se propone la implementación de una superficie inteligente reconfigurable con el fin de experimentar con las comunicaciones inalámbricas Wifi en la banda de 5GHz para brindar soluciones a las problemáticas más comunes en este ámbito y que las señales sean menos vulnerables al bloqueo mediante la implementación de este tipo de tecnología[8], es importante mencionar que el tema de las superficies inteligentes reconfigurables (RIS) no tiene un estudio previo en la institución y el desarrollo del proyecto brinda apertura a nuevas líneas de investigación relacionadas con esta temática, cabe destacar que la implementación de las RIS conlleva un costo significativo debido a las múltiples pruebas de implementación que se deben realizar para garantizar un correcto funcionamiento a su vez también se va a realizar el análisis de modelos de propagación, por ello se optó por realizar el proyecto de investigación entre dos personas, con todo lo

mencionado se plantea la siguiente pregunta, ¿Es posible mejorar las comunicaciones inalámbricas Wifi en la banda de 5GHz con la implementación de superficie inteligente reconfigurable en ambientes interiores?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Implementar una superficie inteligente reconfigurable (RIS) para experimentar con las comunicaciones inalámbricas WI-FI en la banda de 5GHz para interiores, en la Facultad de Ingeniería Bloque A de la Universidad Nacional de Chimborazo.

1.3.2 Objetivos Específico

- Realizar un estudio del estado del arte con las especificaciones técnicas de radiación de las superficies inteligentes reconfigurables RIS.
- Simular una superficie inteligente reconfigurable RIS mediante el uso del software CST para experimentar con las comunicaciones inalámbricas Wi-Fi en la banda de 5GHz.
- Realizar la implementación de la superficie inteligente reconfigurable (RIS) y la validación de los resultados simulados mediante la experimentación.
- Evaluar los parámetros de adaptación y directividad de la superficie inteligente reconfigurable (RIS) propuesta.

CAPÍTULO II.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del Arte

Desde hace tiempo atrás, se ha evidenciado la importancia de las comunicaciones inalámbricas alrededor del mundo, lo cual ha enfrentado a los investigadores y expertos afines al campo de las telecomunicaciones a realizar la mejora continua de las características tanto en transmisión como en recepción de las antenas. El propósito es brindar nuevas características a las actuales generaciones de comunicaciones, y proveer mayores velocidades de transferencia de datos mejorando la calidad de servicio para los usuarios finales. Las antenas de ultra ancho de banda, han sido foco de estudio debido a la gran capacidad del ancho de banda que estas obtienen, considerando que el rango de frecuencias a las que operan se extiende desde 3.55 GHz hasta 12.16 GHz[17].

Las superficies inteligentes reconfigurables, son una tecnología emergente en el campo de las comunicaciones inalámbricas y las antenas. Estas superficies están compuestas por una matriz de elementos reconfigurables que pueden modificar de manera dinámica las características de la propagación de las ondas electromagnéticas[14].

Las RIS se controlan con componentes electrónicos integrados y tienen capacidades únicas de comunicación inalámbrica. Las implementaciones actuales incluyen matrices reflectantes convencionales, superficies de cristal líquido y metasuperficies definidas por software [18].

Los RIS consisten en una gran cantidad de elementos pequeños, pasivos y de bajo costo, cada uno de los cuales puede reflejar la señal incidente con un cambio de fase ajustable, modificando así la onda de radio [9]. La optimización del frente de onda de las señales reflejadas nos permite dar forma a cómo interactúan las ondas de radio con los objetos circundantes y, por lo tanto, controlar sus características de dispersión y reflexión [14].

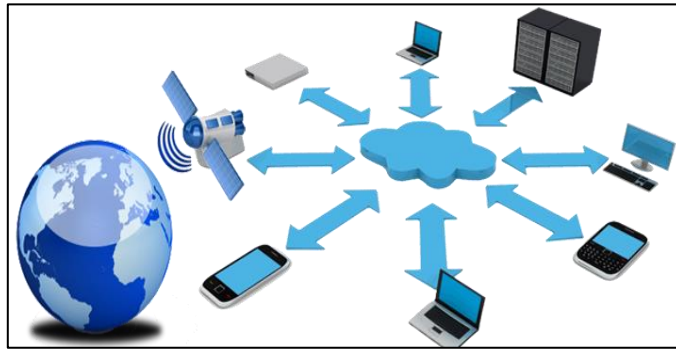
El objetivo principal de las superficies inteligentes reconfigurables es mejorar la calidad y el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas al manipular la propagación de las señales. A través del control de los elementos reconfigurables, estas superficies pueden adaptarse y optimizar las propiedades de la señal, incluyendo la dirección, la amplitud, la fase y el ángulo de llegada de las ondas [18].

2.2 Fundamentos teóricos

2.2.1 Comunicaciones Inalámbricas

Transferencia de información entre dispositivos sin la necesidad de cables físicos. Estas tecnologías permiten la transmisión y recepción de datos, voz y video a través del aire utilizando ondas electromagnéticas [5].

En la Fig.1, se observa cómo están ligadas las comunicaciones inalámbricas en los diferentes ámbitos cotidianos.



*Figura 1: Comunicaciones inalámbricas
(Diseño de un sistema) [19]*

2.2.1.1 Ventajas de las comunicaciones inalámbricas

Principales ventajas de las redes inalámbricas:

- **Movilidad:** Los dispositivos conectados a una red inalámbrica pueden moverse libremente dentro del área de cobertura sin estar limitados por cables [19].
- **Fácil instalación:** No se requiere la instalación de cables físicos, lo que reduce el tiempo y los costos asociados [19].
- **Acceso compartido:** Varios dispositivos pueden conectarse y compartir una conexión a Internet, impresoras, archivos y otros recursos sin necesidad de cables adicionales [20].
- **Escalabilidad:** Pueden soportar un mayor número de dispositivos conectados sin una gran inversión en infraestructura [20].
- **Conveniencia:** Las redes inalámbricas eliminan la necesidad de cables físicos, lo que reduce el desorden y la cantidad de cables en un entorno [20].
- **Conectividad remota:** Es posible establecer una conexión inalámbrica a través de largas distancias utilizando tecnologías como enlaces de punto a punto o redes celulares [20].
- **Flexibilidad y adaptabilidad:** Las redes inalámbricas son flexibles y se pueden adaptar a diferentes entornos y necesidades. Es posible implementar redes inalámbricas en áreas remotas, en lugares temporales o en entornos cambiantes sin restricciones físicas [21].

2.2.1.2 Desventajas de las comunicaciones inalámbricas

Principales desventajas de las redes inalámbricas:

- **Interferencias:** Las señales inalámbricas pueden ser susceptibles a interferencias de otros dispositivos electrónicos, como microondas, teléfonos inalámbricos y dispositivos Bluetooth [22].
- **Seguridad:** Las redes inalámbricas son más vulnerables a ataques de seguridad que las redes cableadas [22].
- **Limitaciones de velocidad y alcance:** Pueden verse afectados por la distancia entre el dispositivo y el punto de acceso, así como por los obstáculos físicos, como paredes y muebles [22].

2.2.2 Espectro Radioeléctrico

Frecuencia que va por debajo de 3.000 GHz, en la Fig.2, se propaga por el espacio sin guía artificial y se encuentra atribuido a diferentes servicios de radiocomunicaciones, permite transportar energía, enviar y recibir mensajes de distinta naturaleza, a distancia, a través de un mecanismo de propagación por el espacio sin el uso de una guía artificial[23].

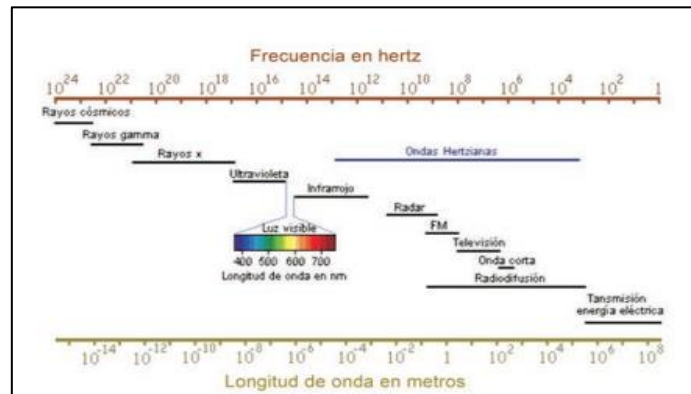


Figura 2: Espectro radioeléctrico
(Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico) [24]

2.2.3 Teoría de la reflexión y refracción

Esta teoría estudia el comportamiento de la luz al momento de interactuar con diversos medios [25]. En la Fig.3, se observa como la reflexión se establece cuando un rayo de luz reflejado rebota de la superficie en el mismo ángulo que incidió, mientras que la refracción se da cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro con diferente índice de refracción, su trayectoria se curva[26].

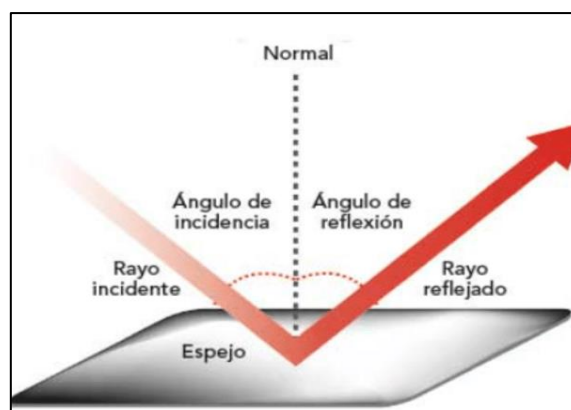
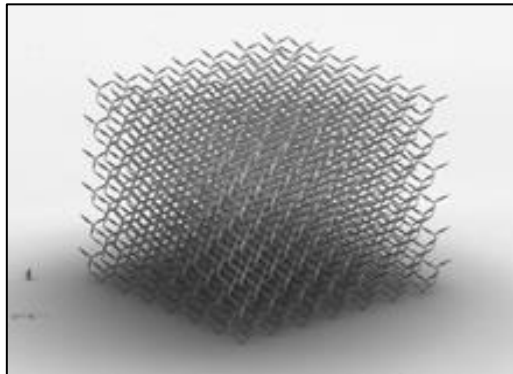


Figura 3: Reflexión y Refracción
(Ondas Electromagnéticas) [22]

2.2.4 Metamateriales

Materiales artificiales diseñados para tener propiedades electromagnéticas inusuales que no se encuentran en materiales naturales. Las propiedades de los metamateriales se derivan de la interacción entre la estructura de las unidades repetitivas y la luz incidente [27].

En la Fig.4, se observa como un metamaterial está compuesto por estructuras repetitivas a nivel microscópico, conocidas como células unitarias, que se diseñan para manipular las ondas electromagnéticas de maneras inusuales [4].



*Figura 4: Metamateriales Pentamodal
(Los Metamateriales) [26]*

Las aplicaciones [26] que se pueden considerar de los Metamateriales son:

- Encubrimiento o Invisibilidad
- Super resolución
- Mejoras de los dispositivos de radio frecuencia
- Incremento de nuevos dispositivos de Terahercios

2.2.4.1 Metamateriales absorbentes

Los metamateriales absorbentes están diseñados para absorber selectivamente la energía de las ondas electromagnéticas incidentes en un rango específico de frecuencias, son útiles en aplicaciones donde se desea reducir la reflexión de las ondas electromagnéticas[28], como en la fabricación de dispositivos de absorción de radar.

2.2.4.2 Metamateriales reflectantes

Los metamateriales reflectantes están diseñados para reflejar selectivamente las ondas electromagnéticas en un rango específico de frecuencias y son útiles en aplicaciones donde se necesita un control preciso sobre la reflexión de las ondas electromagnéticas[29], como en espejos direccionales y reflectores de antenas.

2.2.5 Antena de metasuperficie

La tecnología furtiva desde la Segunda Guerra Mundial ha sido uno de los temas más estudiados porque este tipo de tecnología permite reducir la observabilidad de estructuras radiantes mediante la reducción de la sección transversal del radar (RCS), que se ha integrado en aviones, submarinos, misiles.

Las primeras aplicaciones en aviones de combate más allá del ángulo del fuselaje se utiliza un tipo especial de pintura como absorbente, provocando que las ondas electromagnéticas que alcanzaron el objeto no se reflejen[30].

Sin embargo, en los últimos años los metamateriales se han convertido en una estructura de gran interés, debido a su versatilidad para integrarse con varios dispositivos entre ellos las antenas.

Una antena de metasuperficie es aquella que utiliza una superficie artificialmente estructurada, para controlar y manipular las propiedades de las ondas electromagnéticas[16]. Estas metasuperficies están compuestas por estructuras de sub longitud de onda, las cuales son estructuras con dimensiones mucho más pequeñas que la longitud de onda de la radiación electromagnética que están manipulando y pueden ser diseñadas para modificar características como la fase, amplitud y dirección de las ondas electromagnéticas[27].

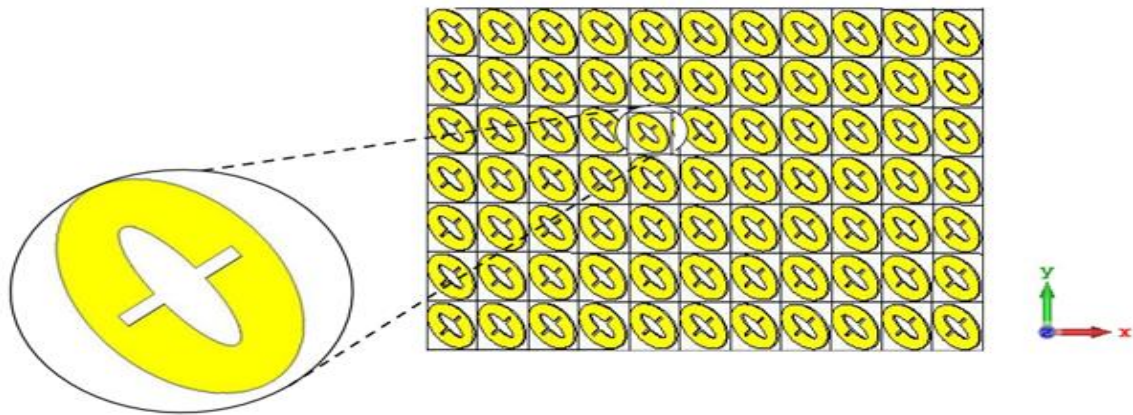


Figura 5: Metasuperficie con resonadores elípticos.
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

2.2.6 Teoría de Floquet

Se utiliza para analizar sistemas periódicos en el tiempo o en el espacio, para el análisis y optimización de antenas con estructuras periódicas, como los arrays[31].

Para el diseño de antenas la teoría de Floquet considera una antena array con elementos radiantes idénticos espaciados de manera uniforme a lo largo del campo E. Cada elemento puede representarse como un dipolo, un parche, o cualquier otro tipo de estructura radiante[32]. El campo eléctrico $E(x, t)$ producido se define mediante la ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + k^2 E = 0 \quad (1)$$

Donde k es el número de onda espacial y la solución general de dicha ecuación diferencial está dada por una combinación de exponenciales:

$$E(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{jknx} \quad (2)$$

Donde a_n son coeficientes que dependen de la distribución de corriente de los elementos de la antena, d es el espacio entre cada elemento y n el número de elemento[33].

La teoría de Floquet se aplica para determinar los coeficientes y el número de onda espacial que maximizan el rendimiento deseado de la antena. Esto puede implicar maximizar la ganancia, la directividad, la eficiencia o cualquier otro parámetro de rendimiento específico[31].

2.2.7 Factor de Array

En la Fig.6. se puede observar un factor de arreglo o factor de radiación de un arreglo de antenas que es una medida que describe el rendimiento o la directividad del arreglo en comparación con una antena individual. El factor de array depende de varias condiciones, incluyendo el número de elementos en el arreglo, la separación entre ellos, el patrón de radiación individual de cada elemento y la fase relativa de las señales que se aplican a cada elemento [34], descrito por la siguiente ecuación:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N A_n(\theta, \varphi) \quad (3)$$

Donde

- $F(\theta, \varphi)$ - es el factor de array en la dirección angular (θ, φ)
- N - número de elementos del array
- $A_n(\theta, \varphi)$ - patrón de radiación de cada elemento individual del array.

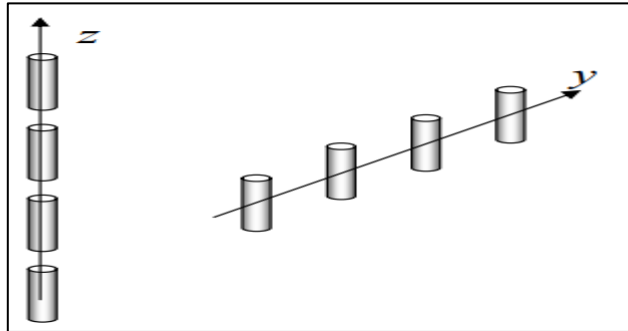


Figura 6: Arrays
(Agrupaciones de antenas) [34]

2.2.8 Características generales de la superficie inteligente reconfigurable

Debido a su capacidad de modificar proactivamente el entorno de comunicación inalámbrica, los RIS se han convertido en un punto focal de investigación en comunicaciones inalámbricas para mitigar una amplia gama de desafíos encontrados en diversas redes inalámbricas [18]. En la Fig.7 se puede observar cómo funcionaría un entorno relacionado a las superficies reconfigurables, a través de las comunicaciones inalámbricas.

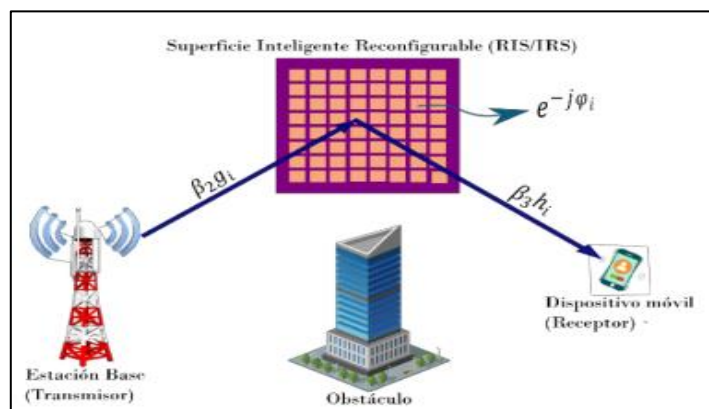


Figura 7: Sistema inalámbrico asistido por RIS
(Intelligent reflecting surface aided wireless communications) [15]

Presentan varias características generales:

- **Adaptabilidad:** Capacidad para adaptarse a diferentes condiciones de propagación de la señal[35].
- **Fácil implementación:** RIS son dispositivos casi pasivos, hechos de material electromagnético, se pueden implementar en varias estructuras, incluidas, entre otras, fachadas de edificios, paredes interiores, plataformas aéreas, vallas publicitarias al borde de la carretera, urnas en carreteras y ventanas de vehículos[12].
- **Mejora de la eficiencia espectral:** Capaces de reconfigurar el entorno de propagación inalámbrica al compensar la pérdida de energía en largas distancias [36].
- **Control y programabilidad:** Las superficies inteligentes reconfigurables pueden ser controladas mediante algoritmos y técnicas de programación. Esto permite ajustar y optimizar las propiedades de reflexión en función de los objetivos de comunicación o del entorno, lo que proporciona una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación [35].
- **Compatibilidad con sistemas existentes:** Estas superficies se pueden integrar con sistemas de comunicación inalámbrica o sistemas de antenas existentes. Pueden funcionar como una capa adicional que mejora el rendimiento de los sistemas existentes, sin requerir cambios significativos en la infraestructura [37].

2.2.9 Tipos de superficies inteligentes reconfigurables

Existen diferentes tipos de superficies inteligentes reconfigurables que se utilizan en diversas aplicaciones[7]. Algunos de los tipos más comunes son:

- **Metamateriales reconfigurables:** Estos son materiales artificiales diseñados para tener propiedades electromagnéticas únicas[26].
- **Superficies basadas en MEMS (Sistemas Micro electromecánicos):** Combinan componentes mecánicos y electrónicos en una sola estructura, utilizan elementos controlados por MEMS para modificar las propiedades de reflexión de las ondas electromagnéticas. Estos elementos pueden cambiar su posición, orientación o forma para ajustar la respuesta de la superficie [2].

- **Superficies basadas en diodos:** Utilizan diodos para controlar las propiedades de reflexión de las ondas electromagnéticas. Los diodos pueden cambiar su estado de conducción o no conducción, lo que permite activar o desactivar selectivamente los elementos de la superficie para lograr la reconfiguración [37].
- **Superficies basadas en líquidos y elastómeros reconfigurables:** Estas superficies utilizan líquidos o elastómeros que pueden cambiar sus propiedades ópticas o electromecánicas en respuesta a estímulos externos, como campos eléctricos o magnéticos. Estos materiales se pueden utilizar para ajustar las propiedades de reflexión de la superficie y lograr la reconfiguración [36].

2.2.10 Aplicaciones de la superficie inteligente reconfigurable

Algunas de las aplicaciones más destacadas son:

- **Comunicaciones inalámbricas:** Se utilizan para mejorar la calidad de la señal y aumentar la capacidad de los sistemas de comunicaciones inalámbricas. Pueden adaptarse a las condiciones cambiantes del canal y optimizar la propagación de las ondas electromagnéticas para reducir la interferencia, mejorar la cobertura y aumentar la eficiencia espectral [7]. En la Fig.8 se puede observar cómo las superficies inteligentes reconfigurables trabajan en diferentes ámbitos tanto interior como exterior.

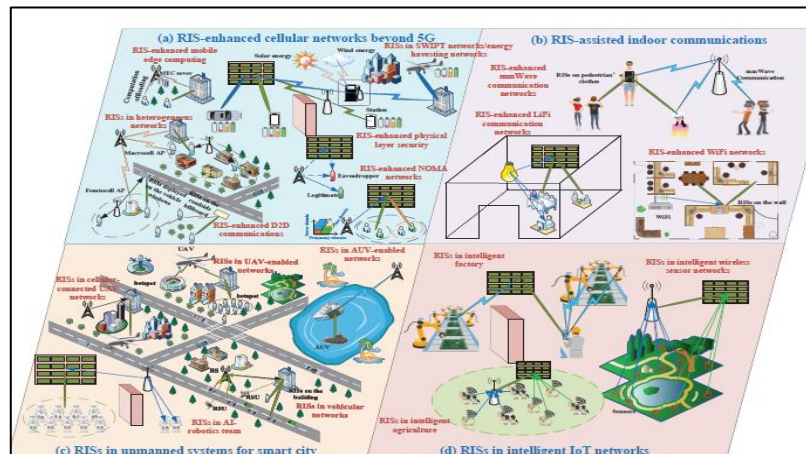


Figura 8: RIS en redes de comunicación inalámbrica (Reconfigurable Intelligent Surfaces) [35]

- **Antenas adaptativas:** Se pueden integrar con sistemas de antenas existentes para mejorar su rendimiento y adaptabilidad. Pueden ajustar las propiedades de radiación y directividad de las antenas para enfocar la energía en una dirección deseada, mejorar la cobertura y reducir la interferencia[14].
- **Imágenes médicas y terapia:** Pueden mejorar la calidad y resolución de las imágenes al ajustar la propagación de las ondas electromagnéticas en el cuerpo humano y reducir los efectos de la atenuación y la dispersión[37].
- **Comunicación satelital:** Se utilizan en antenas de comunicación satelital para mejorar la eficiencia y capacidad de los sistemas. Pueden adaptarse a diferentes

ángulos de llegada de la señal, optimizar la dirección de la radiación y reducir el ruido y la interferencia [18].

- **Energía inalámbrica:** Se utilizan en sistemas de carga inalámbrica y transferencia de energía. Pueden mejorar la eficiencia de la transferencia de energía al ajustar la propagación de las ondas electromagnéticas y concentrar la energía en la dirección deseada [35].
- **Edificios inteligentes:** Se utilizan en sistemas de control de iluminación y optimización energética en edificios inteligentes. Pueden ajustar la reflexión y transmisión de la luz solar para maximizar la eficiencia energética y el confort interior [35].

2.2.11 Parámetros de la superficie inteligente reconfigurable

Los parámetros de una superficie inteligente reconfigurable varían dependiendo de su diseño, configuración y aplicaciones específicas[38].

2.2.11.1 Adaptación

Proceso fundamental para lograr un rendimiento óptimo y una transferencia de energía eficiente. El objetivo principal de la adaptación es lograr una impedancia de entrada o salida que coincida con la impedancia característica de la línea de transmisión o el dispositivo al que está conectada la antena [39].

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (4)$$

Donde

- Γ - coeficiente de reflexión.
- Z_o - impedancia de entrada de la antena RIS.
- Z_L - impedancia característica de la fuente de alimentación.

Para lograr una adaptación de impedancia óptima en una antena RIS pasiva, se debe diseñar la superficie reflectante para que refleje la onda incidente de tal manera que minimice el coeficiente de reflexión Γ [23].

2.2.11.2 Directividad

La directividad de una antena es una medida de su capacidad para concentrar la radiación en una dirección específica. Es una medida de la relación entre la intensidad de radiación máxima en una dirección particular y la radiación promedio en todas las direcciones. La directividad depende del diseño y configuración de la antena, así como de la frecuencia de operación y el patrón de radiación [40].

$$D = \frac{4\pi}{\Omega} \frac{P_{max}}{P_{total}} \quad (5)$$

Donde

- P_{max} - potencia radiada en la dirección de interés.
- P_{total} - potencia radiada por la antena.
- Ω - ángulo sólido en la dirección de interés.

La directividad se puede modificar y controlar ajustando la fase y la amplitud de la onda electromagnética reflejada por la superficie reflectante. Esto se logra manipulando los elementos reflectantes de la antena RIS para dirigir la radiación hacia la dirección deseada[41].

2.2.11.3 Absorción

Capacidad para captar y convertir la energía electromagnética incidente en señales eléctricas utilizables. La absorción depende de factores como el área efectiva de la antena, la impedancia de entrada, la directividad y la ganancia, y la coincidencia de polarización. Es un proceso esencial para la recepción eficiente de señales en antenas receptoras[34].

$$A = 1 - |\Gamma|^2 \quad (6)$$

Donde

- A - coeficiente de reflexión.
- Γ - coeficiente de reflexión entre la onda reflejada e incidente en un punto de la RIS.

La absorción puede variar dependiendo el tipo de aplicación, en el caso de las comunicaciones inalámbricas se desea que la absorción sea la menor posible ya que se requiere que la energía que incide sea reflejada en gran parte para ello la selección de los materiales adecuados es fundamental para contribuir en la reflexión de la onda[42].

2.2.11.4 Reflectividad

Es la capacidad de la superficie para reflejar la energía de las ondas electromagnéticas. Puede expresarse como un coeficiente de reflectividad que indica la fracción de energía reflejada en comparación con la energía incidente [41].

$$\Gamma = \sum_{i=1}^N \alpha_i e^{j\varphi_i} \quad (7)$$

Donde

- α_i - es el coeficiente de reflexión del i-ésimo elemento de la superficie.
- φ_i - es la fase introducida por el i-ésimo elemento de la superficie.
- N - es el número total de elementos en la superficie reflectante.

La reflectividad de la superficie inteligente reflectante permite optimizar el rendimiento de la antena en términos de directividad, ganancia, absorción o cualquier otro parámetro de interés, dependiendo la aplicación[41].

2.2.11.5 Ganancia

Medida de cuánta energía se concentra o amplifica en una dirección específica. Se utiliza para describir la capacidad de la superficie para enfocar la energía en una dirección deseada y reducir la radiación en otras direcciones[39].

$$G = 4\pi \frac{P_{max}}{P_{total}} \quad (8)$$

Donde

- G - ganancia de la antena.
- P_{max} - potencia máxima radiada en la dirección de interés.
- P_{total} - potencia total radiada de la antena.

La optimización de estos parámetros puede permitir maximizar la ganancia de la antena en la dirección de interés, lo que resulta en un mejor rendimiento en términos de alcance, cobertura y capacidad de comunicación [39].

2.2.11.6 Ancho de Haz

Angulo dentro del cual la radiación de la superficie es significativa. Un ancho de haz estrecho indica una concentración de energía en una dirección específica, mientras que un ancho de haz amplio implica una distribución más amplia de la energía [39].

Una manera común de describir el ancho del haz en antenas RIS pasivas es a través del ancho de haz principal (θ_{3dB}), que es el ángulo entre los puntos en los cuales la intensidad de radiación cae a la mitad (-3 dB) del máximo en el haz principal [40].

2.2.11.7 Eficiencia

Es la relación entre la energía radiada por la superficie y la energía total suministrada a la superficie. Mide la capacidad de la superficie para convertir la energía incidente en energía radiada útil [23].

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (9)$$

Donde:

- P_{rad} es la potencia radiada por la antena.
- P_{in} es la potencia total suministrada a la antena.

Sin embargo, en el caso de las antenas RIS pasivas, es importante tener en cuenta la reflexión de la onda electromagnética por la superficie reflectante. Por lo tanto, la eficiencia de una antena RIS pasiva también puede depender de la eficacia con la que la superficie reflectante dirige la energía radiada en la dirección deseada [40].

2.2.11.8 Rango de frecuencia

Indica el rango de frecuencias en el cual la superficie puede operar y reconfigurarse de manera efectiva. Algunas superficies pueden estar diseñadas para trabajar en una banda de frecuencia específica, mientras que otras pueden tener un rango más amplio de operación [39].

2.2.11.9 Tiempo de respuesta

Es el tiempo que tarda la superficie en reconfigurarse y ajustar sus propiedades de reflexión. Depende de los elementos reconfigurables utilizados y del control aplicado a la superficie [33].

2.2.11.10 Fase

La relación de fase (ϕ) entre la onda incidente y la onda reflejada es crucial para controlar la dirección del haz. Esta relación de fase se puede ajustar al modificar la geometría o las propiedades de los elementos de la antena RIS[39]. Puede expresarse como:

$$\phi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \quad (10)$$

Donde

- d es la distancia entre los elementos de la antena RIS y
- λ es la longitud de onda de la onda electromagnética.

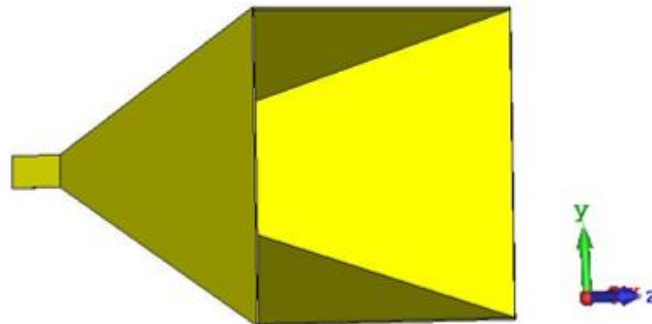
2.2.12 Método de alimentación

Los alimentadores de antenas son componentes esenciales para la transferencia de energía entre la antena y el sistema de transmisión o recepción. Existen diferentes tipos de alimentadores, como líneas coaxiales, líneas de transmisión de cinta plana, guías de onda y alimentaciones directas[12].

2.2.12.1 Antena Bocina

Las bocinas principalmente se usan para alimentar lentes y reflectores, se alimenta a partir de una guía de onda rectangular, que consiste en una estructura la cual permite aumentar el tamaño de la apertura, estrechar el haz y aumentar los valores de la guía de onda obteniendo

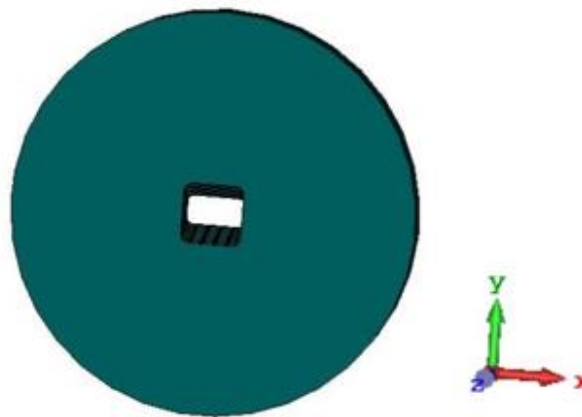
así más directividad[43]. Su diseño y características las hacen adecuadas para diversas aplicaciones en telecomunicaciones, radares, transmisión de microondas y más.



*Figura 9:Antena de bocina piramidal
(Autores-CST Studio-Versión estudiantil)*

2.2.12.2 Bocina rectangular con plano de masa (Alimentador Mixto)

Estructura compleja en desarrollo e implementación, con un plano de masa circular que puede actuar como una referencia de tierra y ayuda a reducir interferencias electromagnéticas no deseadas y posee un ancho de banda considerablemente alto [23], [40]. En la Fig.10 se puede observar un modelo de diseño de un alimentador de bocina rectangular con plano de masa realizado en el software de CST Studio.



*Figura 10:Alimentador mixto
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)*

2.2.12.3 Dipolo

Es una estructura simple que consiste en un conductor dividido en dos partes iguales y alimentado en el centro. Los dipolos son versátiles, tienen un ancho de banda aceptable y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones de comunicación inalámbrica y transmisión de señales [44]. En la Fig.11 se puede observar un modelo de diseño de una antena dipolo realizado en el software de CST Studio.



*Figura 11:Antena Dipolo
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)*

2.2.13 VLC Reproductor multimedia gestor de envío de datos “audio y video”

VLC es un reproductor multimedia altamente versátil y ampliamente utilizado que ofrece una gama de características y funcionalidades para reproducir y gestionar archivos multimedia en una variedad de plataformas[19].

2.2.14 Wireshark- Análisis y captura de paquetes de datos

Wireshark es un inspector de datos de tráfico de red en tiempo real que analiza datos de capturas de tráfico almacenados[5], brinda la posibilidad de exportar los datos de captura en otros formatos para su posterior análisis o comparación.

2.2.15 Calidades de video

La resolución, definición y calidad visual de un video, se tornan como factores a tener en cuenta para el envío de datos en las comunicaciones inalámbricas, este concepto se utiliza para clasificar los videos en función de la cantidad de detalles que contienen y la claridad de la imagen[45]:

- **Baja calidad:** Los videos tiene una menor claridad visual y suelen tener una resolución de menos de 480p además de una tasa de bits más baja. Son comunes en videos en línea de baja resolución, videos de baja velocidad de bits o grabaciones de baja calidad[46].
- **Calidad estándar (SD):** Los videos tienen una mayor claridad visual y más detalles visibles. La resolución típica de estos videos es de 480p a 720p, aunque la definición exacta puede variar, son comunes en la televisión estándar, DVD y algunos servicios de transmisión en línea[45].
- **Alta definición (HD):** Los videos tienen una resolución de al menos 720p hasta 1080p, son comunes en la televisión de alta definición, Blu-ray y la mayoría de los servicios de transmisión en línea[45].
- **Ultra alta definición (UHD):** Los videos tienen una resolución de al menos 2160p también conocida como 4K y ofrecen una claridad visual extraordinaria, son comunes en televisores de última generación, películas 4K y servicios de transmisión premium[46].

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGÍA

La metodología consta de una serie de procedimientos o procesos estratégicos con el fin de realizar una investigación de manera precisa y ordenada. Es una guía que hace referencia a una serie de actividades en la cual se establecen pasos a seguir, además, del uso de las herramientas y criterios de evaluación [47]. La metodología debe estar estructurada y debe adaptarse a las necesidades de la investigación y los objetivos planteados, esto involucra el uso de recurso mediante técnicas específicas para la recopilación de muestras y su posterior análisis de resultados, para la construcción de informes basados en los datos obtenidos [38].

3.1 Tipo de investigación

3.1.1 Investigación experimental

La metodología experimental ayuda al investigador a manipular las variables, es decir cambiar el valor de una variable (independiente) y poder observar que efecto causa en otra variable (dependiente)[48].

3.2 Métodos de investigación

3.2.1 Investigación cuantitativa

La investigación cuantitativa se enfoca en la recopilación de evidencia y en el análisis de datos numéricos estableciendo relaciones causales entre variables. Este tipo de investigación se basa en el uso de diversas técnicas y métodos que permiten medir y cuantificar fenómenos logrando realizar análisis estadísticos y obtener conclusiones basadas en los objetivos planteados [47].

En este tipo de investigación se logrará recopilar información esencial para obtener un buen rendimiento de la superficie inteligente reconfigurable en sus parámetros de rendimiento como la ganancia, ancho de banda y eficiencia de radiación[49].

3.3 Técnicas de investigación

3.3.1 Estudio de documentos

Para la presente investigación se ha realizado una recolección de información reciente de varias sociedades y publicaciones científicas como: IEEE Xplorer, Scopus, ProQuest, Google Scholar, revistas, tesis, dedicadas al diseño y aplicaciones de las superficies inteligentes reconfigurables (RIS).

3.3.2 Objetividad y generalización

Se utiliza el razonamiento lógico y el análisis estadístico para establecer relaciones causales y hacer inferencias sobre la población objetivo, esto nos permite sustentar el desarrollo del proyecto y cumplir los objetivos propuestos en el proyecto de investigación.

3.3.3 Instrumentación

Se utiliza instrumentos de medición estandarizados y estructurados, para recopilar datos cuantificables de manera consistente y sistemática en este caso en específico nos permiten obtener datos que provienen del alimentador (Bocina) y la superficie RIS, además del entorno donde se emplean.

3.3.4 Resultados numéricos

Los resultados de la investigación cuantitativa que en el proyecto de investigación pertenecen a los parámetros de adaptación, directividad y envío de datos, los cuales se presentan en forma de números, tablas y estadísticas que permiten resumir y visualizar los hallazgos entre los valores del rendimiento de la superficie RIS.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

En el proyecto de investigación la población corresponde a los datos obtenidos respecto a las variables como la eficiencia de radiación y directividad y ganancia mediante las simulaciones realizadas con la ayuda del software CST, así como el alcance de la superficie RIS implementada y medida en un entorno real mediante el uso de equipos especializados. En vista de que no se puede definir el número exacto de simulaciones para lograr una adecuada optimización del dispositivo, se considera que la población será infinita.

3.4.2 Muestra

Para calcular la muestra con una población infinita, se hace uso de la siguiente fórmula

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * p * q}{\alpha^2} \quad (11)$$

Donde:

- n = Tamaño de la muestra
- $\alpha = 0,05$; Nivel de significancia (5%)
- $Z_{\alpha}^2 = 1,96$; Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza.
- p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado.
- $q = 1 - p$; Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado.

El parámetro de nivel de confianza en su mayoría suele ser del 95%, ($\alpha = 0,05$), en términos de desviaciones típicas, lo que define ambos extremos del intervalo es la semi distancia estandarizada.

Cálculo del Tamaño de la muestra

Datos:

- $\alpha = 0,05$;
- $Z_{\alpha}^2 = 1,96$;
- $p = 0,95$ (95%)

- $q = 1 - 0,95 = 0,05$

$$n = \frac{1,96^2 * 0,95 * 0,05}{0,05^2} \quad (12)$$

$$n = 72,99 \approx 73 \quad (13)$$

El tamaño necesario de la muestra para una probabilidad de que ocurra el evento del 95% es de **73** simulaciones.

Para p=95% obtenemos una muestra de 73 que equivalen al número de simulaciones necesarias para lograr optimizar el dispositivo.

3.5 Operacionalización de las variables

3.5.1 Variables independientes

Tabla 1: Variables independientes

Variables	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Estructura geométrica de la superficie inteligente reconfigurable (RIS)	Forma que va adoptar las antenas, mediante variaciones de los tamaños de los parámetros.	Superficie inteligente reconfigurable (RIS)	Software CST Studio

3.5.2 Variables dependientes

Tabla 2: Variables dependientes

Variables	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Parámetros de antena	Características y comportamiento de la antena	Parámetros S Directividad Ganancia Eficiencia de radiación	VNA
		Absorción	CST Studio

3.6 Procedimiento y análisis

El proceso de diseño consta de dos partes, una de ellas enfocada en el alimentador, se utiliza varios modelos para definir el más adecuado respecto a la necesidad del caso, el cual requiere que se encuentre acoplado en la banda de 5GHz como condición inicial mientras que la segunda parte se enfoca en la antena RIS y al igual que su homónimo se diseñará en la misma

frecuencia, por ello se utiliza el software de CST Studio, ambos regidas al siguiente procedimiento:

1. Diseñar el alimentador considerando la frecuencia de operación en la que se requiere que trabaje.
2. Discernir qué modelo de alimentador es el adecuado entre los simulados de acuerdo a los parámetros que se pretende alcanzar.
3. Analizar el estado del arte de las antenas RIS considerando los métodos de diseño y las técnicas utilizadas para la banda de 5GHz
4. Analizar los parámetros que tienen las antenas RIS mediante la teoría de Floquet y comparar con otras formas de estructuras periódicas, utilizando CST Studio.
5. Diseñar la Antena RIS en distintas medidas utilizando la teoría de Floquet.
6. Simular escenarios entre el alimentador y la RIS variando la distancia entre ambos, además de los grados de inclinación de la RIS respecto al ángulo de Azimuth.
7. Implementar el alimentador y la antena RIS conservando de manera eficiente las medidas simuladas, teniendo en cuenta la tolerancia debido al error humano.
8. Comprobar mediante el uso del VNA los parámetros medidos vs los simulados del alimentador y de la antena RIS.
9. Utilizar el alimentador y la antena RIS en un enlace para el envío de datos de audio y video en distintos escenarios en la facultad de Ingeniería Bloque A.

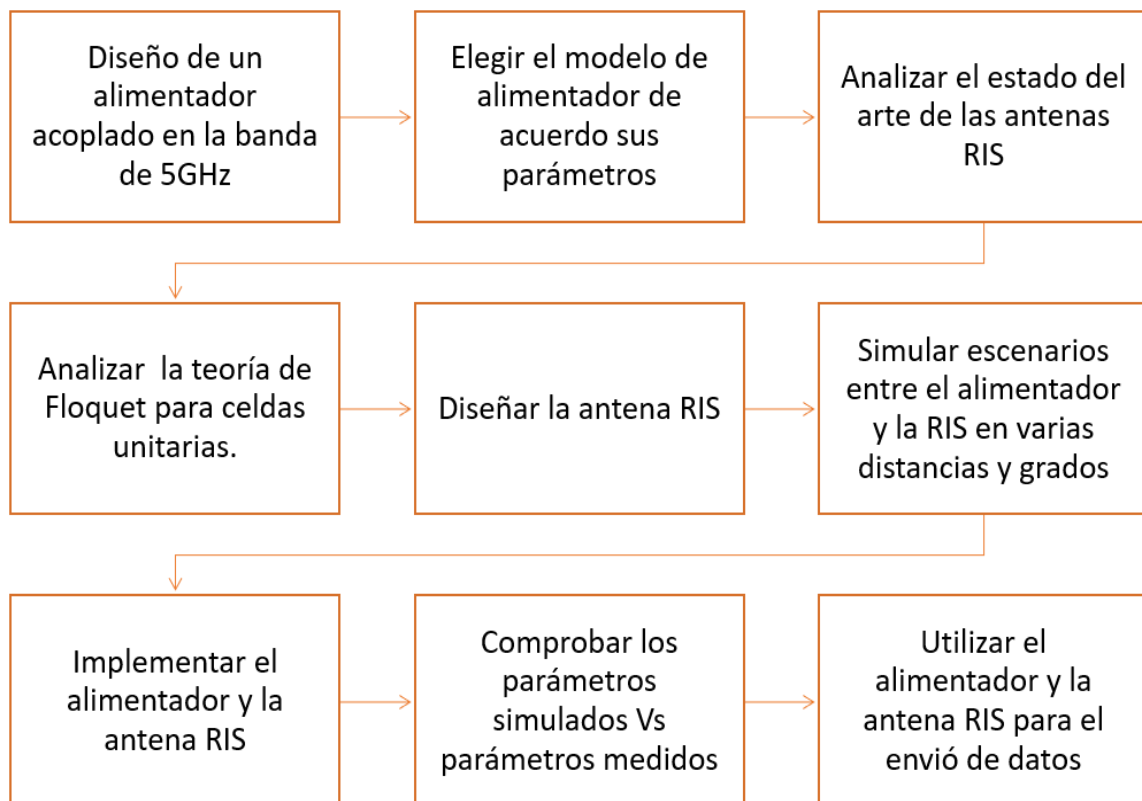


Figura 12: Descripción por etapas del proyecto de investigación (Autores)

3.6.1 Diseño de las antenas

3.6.1.1 Diseño de los alimentadores

Para los alimentadores se escoge tres modelos basados en nivel de complejidad en cuanto al diseño y costo de implementación posterior, además, de los parámetros que brindan y cuál es el adecuado de acuerdo a la necesidad del caso.

3.6.1.1.1 Alimentador: Bocina para la banda de 5.2GHz a 5.8GHz

En este apartado se muestra el diseño una bocina piramidal la cual debe funcionar como alimentador de la superficie RIS a 5.5GHz. Como primer paso se procede a seleccionar la guía de onda comercial que se ajuste a dicha frecuencia y a los lineamientos del proyecto de investigación. La Tabla.3 proporciona la información respecto a las especificaciones técnicas de las guías de ondas comerciales. Para cumplimiento del objetivo del proyecto se trabaja con una guía WR159, con dimensiones 40.386 X 20.194 mm cuyo rango de frecuencia va de 4.9 a 7.05 GHz.

Tabla 3: Guías de ondas metálicas empleadas en el rango de 2.6GHz a 15GHz.

Estándar	Rango de frecuencias (GHz)	$fcTE_{10}$ (GHz)	a(mm)	b(mm)
WR-284	2.6-3.95	2.07	72.136	34.036
WR-187	3.95-5.85	3.156	47.5488	22.148
WR-159	4.9-7.05	3.705	40.386	20.193
WR-137	5.85-8.2	4.285	34.848	15.789
WR-112	7.05-10	5.26	28.498	12.62
WR-90	8.2-12.4	6.56	22.86	10.16
WR-75	10-15	7.847	19.95	9.525

El alimentador debe estar acoplado en la banda de 5GHz para ello se recurre a las ecuaciones que rigen este tipo de antena, basándose en los parámetros de la Fig.13 del método de diseño usado por Lo&Lee [50].

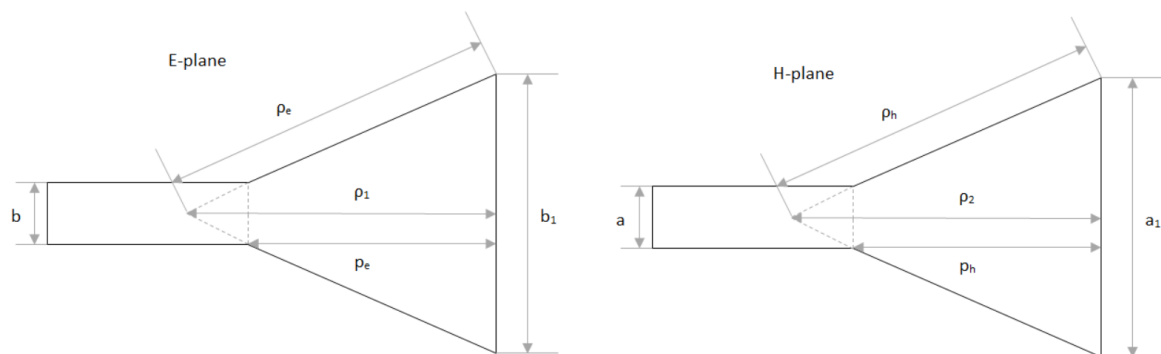


Figura 13: Parámetros de una antena de bocina piramidal

(Maple-Diseño de bocinas) [50]

Tabla 4: Datos de la guía de onda WR-159

Parámetro	Valor
Ganancia deseada	20dB
a (Dimensión horizontal de la guía de onda)	4.0386mm
b (Dimensión vertical de la guía de onda)	2.0193mm
Frecuencia de trabajo	5.5GHz
Rango de frecuencias Wifi en 5GHz	5.180GHz < f < 5.825 GHz
Lambda	0.0545454m

El diseño comienza con algunos de los valores físicos conocidos y los valores que se desea obtener, reflejados en la Tabla 4.

Partiendo del modelo de diseño establecido, se toma en cuenta el concepto de la eficiencia, el cual dicta que debe ser del 50% en antenas de bocina, por ello [50]:

$$G_o = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{\lambda} (a_1 b_1) = \frac{2\pi}{\lambda^2} \sqrt{3\lambda P_h} \sqrt{2\lambda \rho_e} \quad (14)$$

Algo importante para resaltar es que las antenas piramidales deben cumplir el concepto $P_h = P_e$ para que se puedan implementar, esto se traduce en:

$$\left(\sqrt{2x} - \frac{b}{\lambda}\right) (2x - 1) = \left(\frac{G_o}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x}} - \frac{a}{\lambda}}\right)^2 \left(\frac{G_o^2}{6\pi^3} \frac{1}{x} - 1\right) \quad (15)$$

Donde:

$$\rho_e = x\lambda \quad (16)$$

$$\rho_h = \frac{\lambda G_o^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{x}\right) \quad (17)$$

Igualando las anteriores ecuaciones en función de x se obtiene que:

$$x_1 = \frac{G_o}{2\pi\sqrt{2\pi}} \quad (18)$$

Para obtener el valor de x se utiliza un método iterativo en el software de Maple hasta encontrar un valor que logre satisfacer la igualdad establecida. En este caso es: **10.6591**

A partir de este dato se pueden calcular el resto de valores como se ve en la Tabla.5.

Tabla 5: Dimensiones de una bocina piramidal a 5GHz con 20 dB de ganancia.

Sigla	Dimensión
a_1 (Apertura del plano E)	0.1880192436m
b_1 (Apertura del plano H)	0.2518459439m
ρ_e (Longitud radial del plano E)	0.5814084781m
ρ_h (Longitud radial del plano H)	0.2160353310m

En la Fig.14 se observa el parámetro de reflexión del alimentador planteado, del cual se destaca el acoplamiento en todo el rango de frecuencias establecido, alcanzando su mejor adaptación ($S_{11} < -27.66\text{dB}$) a 5.5GHz

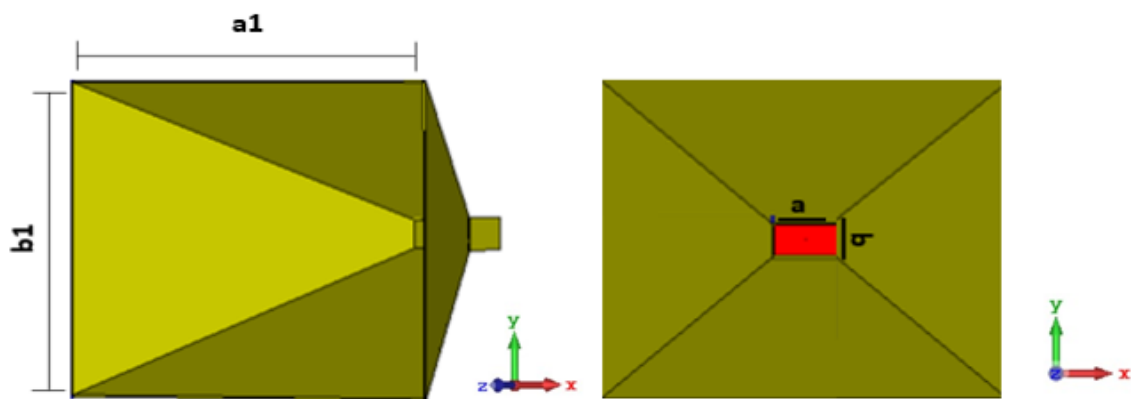


Figura 14: Medidas de la antena de bocina piramidal
(Autores – CST Studio/Versión estudiantil)

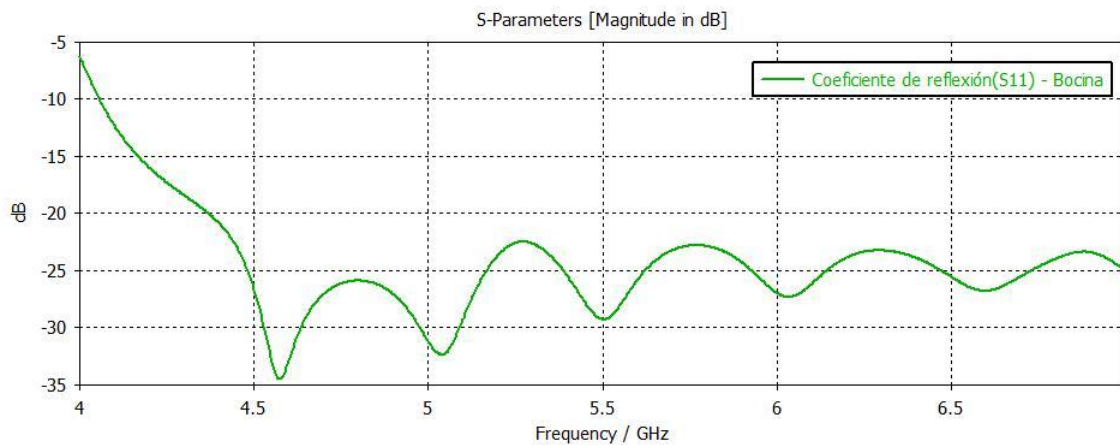


Figura 15: Coeficiente de reflexión(S_{11})- Alimentador: Bocina
(Autores – CST Studio/Versión estudiantil)

Además del diseño de la bocina se realiza dos diseños extras de alimentadores: Mixto y Dipolo, que se encuentran en el Anexo 1 y Anexo 2.

3.6.1.2 Diseño de la antena RIS

3.6.1.2.1 Diseño de la celda unitaria

Para el desarrollo del diseño de la antena RIS, se propone la construcción de una celda unitaria que tenga prestaciones adecuadas, como la frecuencia de operación en 5GHz, el coeficiente de reflexión ($S_{11} < -10\text{dB}$) para estar acoplada y un coeficiente de transmisión cercano a cero ($S_{21} \sim 0\text{dB}$).

Para lograr acercarse a los valores de los parámetros es necesario tomar en cuenta la geometría de la celda, fase entre otros puntos para llegar a un patrón de radiación aceptable, por ello para su análisis procede de la siguiente manera:

Fase de la celda unitaria

La fase de cada elemento reflectante en la celda unitaria[41] debe ajustarse para dirigir el haz de radiación en la dirección deseada.

$$\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \quad (19)$$

$$\varphi = 2\pi \frac{12\text{mm}}{54.54\text{mm}} \quad (20)$$

$$\varphi = 1.4930 * \frac{180}{\pi} \quad (21)$$

$$\varphi = 85.54^\circ \quad (22)$$

La fase requerida que debe aplicarse a cada elemento de la antena RIS para dirigir el haz hacia un ángulo de dirección deseado θ se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} (\sin(\theta_i) - \sin(\theta_r)) \quad (23)$$

Donde podemos decir que si llamamos φ_i a la fase inicial de la onda incidente y φ_r a la fase de onda reflejada, entonces el cambio de fase es:

$$\Delta\varphi = \varphi_r - \varphi_i = \pi \quad (24)$$

En este caso se considera un rayo de luz que incide en una superficie, parte de ella se refleja y otra se transmite a través de la antena o se absorbe.

Geometría y tamaño de resonador

La geometría que tiene cada elemento de la antena RIS afecta directamente en su rendimiento, esto varía dependiendo el tipo de elementos por el que está conformada la antena[38], en este caso la celda unitaria tiene como base un resonador.

La frecuencia de resonancia f_r de un resonador elíptico se calcula obteniendo λ_r la longitud de resonancia mediante la fórmula [30]:

$$\lambda_r = \frac{4a^2}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (25)$$

$$\lambda_r = \frac{4 \times 16.72^2 \text{ mm}}{\sqrt{4}} \quad (26)$$

$$\lambda_r = \frac{4 \times 0.2802 \text{ mm}}{\sqrt{4}} \quad (27)$$

$$\lambda_r = 56.04 \text{ mm} \quad (28)$$

Con el valor de la longitud de resonancia se calcula la frecuencia de resonancia:

$$f_r = \frac{c}{\lambda_r} \quad (29)$$

$$f_r = \frac{3 \times 10^8}{56.04 \text{ mm}} \quad (30)$$

$$f_r = 5.45 \text{ GHz} \quad (31)$$

La distancia entre los resonadores de la antena RIS pueden influir en el patrón de radiación, así como en la directividad, es importante mencionar que los resonadores a una distancia adecuada permiten un control más preciso del cambio de fase y el patrón de radiación[42], aunque esta distancia casi siempre se ajusta de manera experimental mediante simulaciones en software para optimizar el rendimiento de la antena.

Elección del sustrato

Para la selección del sustrato se toma en cuenta las propiedades dieléctricas del material garantizando un rendimiento óptimo, en este caso la resina epoxi reforzada con fibra de vidrio, este tipo de materiales tiene una constante dieléctrica moderada $\varepsilon_r \sim (4 - 8)$, son fáciles de manipular y accesibles económicamente.

Elección del material conductor

El material elegido para la fabricación de los resonadores es aluminio, debido a las múltiples ventajas respecto a otros materiales, teniendo en cuenta factores como:

- Presenta una buena conductividad eléctrica, que lo hace eficiente para reflejar y manipular las ondas electromagnéticas.
- Es ligero y resistente, además, brinda una buena resistencia a la estructura.
- Es un material que se puede mecanizar, cortar y dar forma fácilmente.
- Tiene un bajo costo en comparación a otros metales, sobre todo en antenas RIS que requieran un gran número de resonadores.

Simulación de la primera celda unitaria.

Con los datos obtenidos se diseña un primer modelo de resonador elíptico, además, de los datos calculados, se opta por darle de forma empírica datos a los grosores de los materiales que conforman el resonador a partir de una base Tabla.6.

Tabla 6: Dimensiones del grosor de los materiales de la celda unitaria.

Material	Descripción	Valor
Aluminio	tb (Grosor de la base)	0.45mm
Aluminio	tf (Grosor de la figura)	0.45mm
FR-4	h (Grosor del dieléctrico)	4mm

Tabla 7: Dimensiones de la elipse de la celda unitaria

Elemento	Variable	Valor
Eje mayor	X1	11.8mm
Eje menor	Y1	7.8mm
Base	L	12mm

El diseño de la celda unitaria se realiza en software de CST Studio Fig.16, el mismo que presenta 3 capas: una figura a manera de resonador en forma elíptica como capa superior, un sustrato FR-4 como capa media y una base de aluminio como capa inferior, estas tres capas permiten capturar adecuadamente la interacción entre la estructura periódica y el medio circundante, para el análisis del comportamiento electromagnético de la antena.

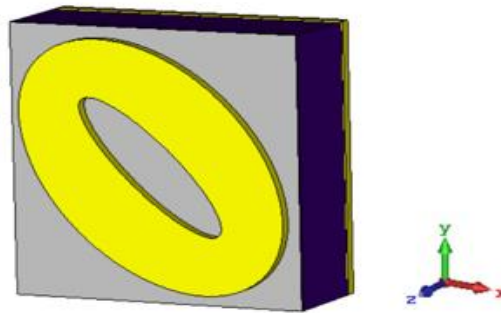


Figura 16: Celda unitaria primera versión
(Autores – CST Studio/Versión estudiantil)

Para la simulación de la celda unitaria se usa la teoría de Floquet para estructuras periódicas Fig.17, esta herramienta provee el software, la cual se utiliza estableciendo las condiciones de borde, permitiendo simular un número infinito de la estructura periódica utilizando una sola celda unitaria, de esta manera se describe cómo se comportan la onda electromagnética en la RIS.

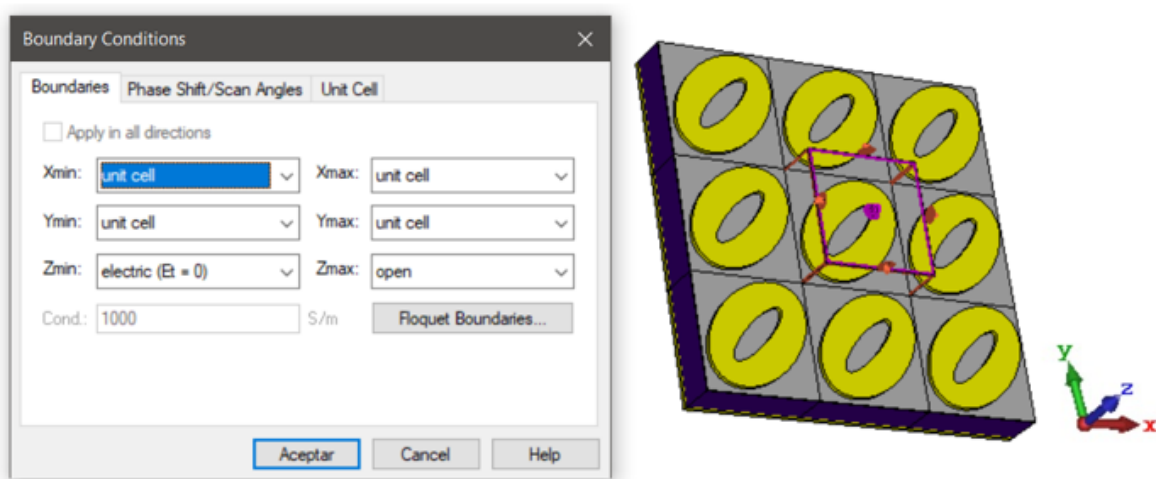


Figura 17: Condiciones de borde de la celda unitaria.
(Autores – CST Studio/Versión estudiantil)

La Fig.18 muestra la simulación del coeficiente de reflexión (S_{11}) y el coeficiente de reflexión (S_{21}) de la celda unitaria, en el cual se observa que la estructura se encuentra desacoplada ya que ($S_{11} > -0.82\text{dB}$), cuando lo que se espera es que supere los -10dB y a su vez no es óptima debido a ($S_{21} = -10.11\text{dB}$), mientras más negativo sea el valor del parámetro S_{21} , mayor será la atenuación y las pérdidas de transmisión.

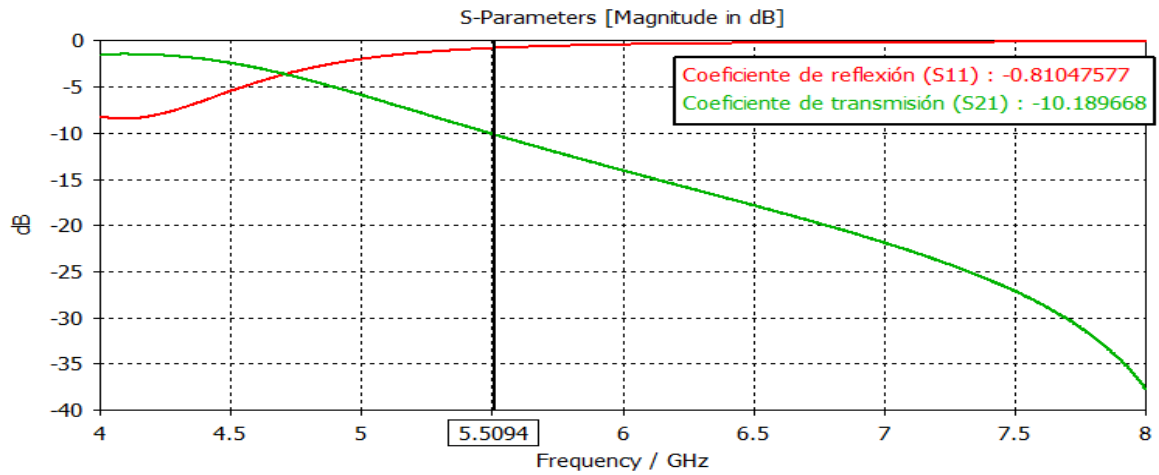


Figura 18: Coeficiente de reflexión y transmisión de la celda unitaria base.
(Autores- CST Studio/Versión estudiantil)

Con el resultado anterior se procede a generar una ranura en el modelo planteado Fig.18, debido a que se conoce que las ranuras pueden contribuir en la adaptación de la antenna, generando la capacidad de igualar la impedancia de la antenna con la impedancia de la fuente de alimentación, lo que resulta en una mejor adaptación.

Tabla 8: Dimensiones de la elipse de la celda unitaria con ranura

Elemento	Variable	Valor
Eje mayor	X1	11.8mm
Eje menor	Y1	7.8mm
Base	L	12mm
Ancho Ranura	R1	4mm
Alto Ranura	R2	2.2mm

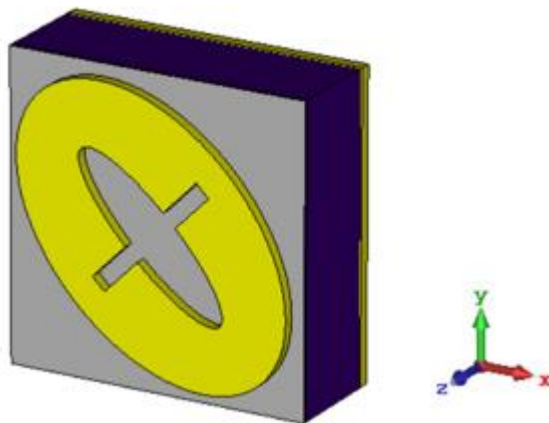


Figura 19: Celda unitaria con ranura
(Autores – CST Studio/Versión estudiantil)

Al igual que en la Fig.17 se establece las condiciones de borde de Floquet y se procede con la simulación, la cual refleja una mejor adaptación de la antena ($S_{11} < -10\text{dB}$) y a su vez un parámetro de transmisión más cercano a los valores esperados ($0\text{dB} < S_{21} < -1\text{dB}$) Fig.20 gracias a la incorporación de la ranura en la celda unitaria propuesta, sin embargo, no se encuentra trabajando en la banda adecuada, es por esta razón que se propone realizar múltiples simulaciones de forma empírica, alternado los valores de los materiales ya que se sabe que al cambiar los grosores de los materiales de una celda unitaria en una estructura periódica, afecta la frecuencia de resonancia.

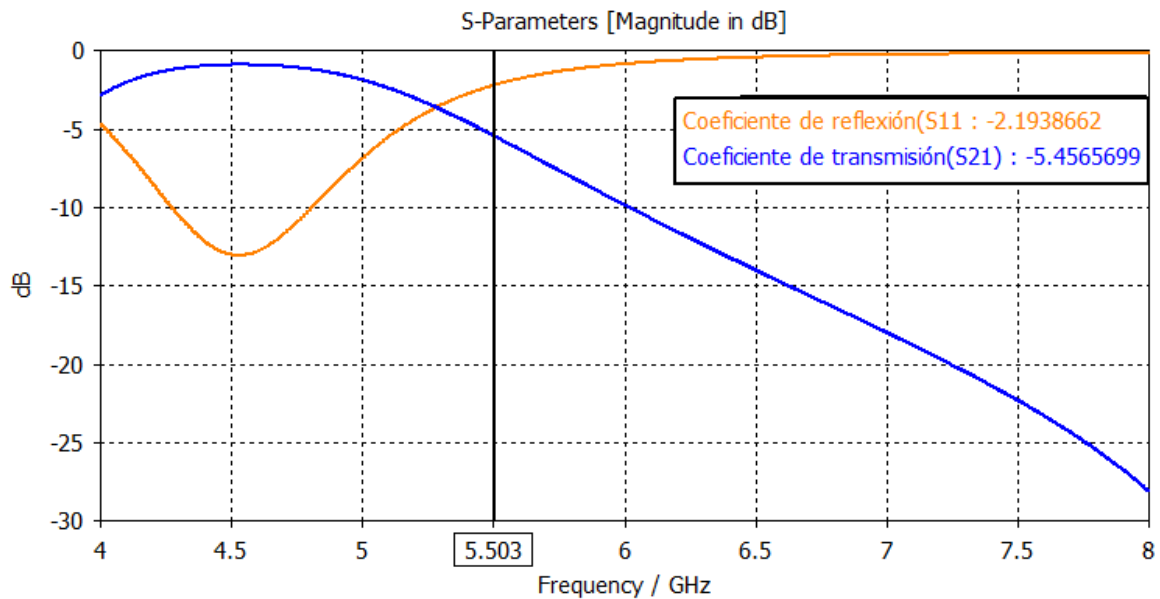


Figura 20: Coeficiente de reflexión y transmisión de la celda unitaria diseñada.
(Autores – CST Studio/Versión estudiantil)

Para la consecución de las pruebas se determina que las medidas del resonador elíptico no se van a mover más y se trabajara en la medida del grosor, las pruebas realizadas con sus respectivos resultados se muestran en el Anexo.11, posterior a los resultados obtenidos se define que grosor de los materiales se ajusta más a los valores deseados en el coeficiente de reflexión y el coeficiente de transmisión, dichos valores se reflejan en la Tabla.9

Tabla 9: Dimensiones del grosor de los materiales de la celda unitaria con ranura

Material	Descripción	Valor
Aluminio	tb (Grosor de la base)	2.11mm
Aluminio	tf (Grosor de la figura)	2.11mm
FR-4	h (Grosor del dieléctrico)	1.59mm

En la Fig.22 se observa que el coeficiente de reflexión (S_{11}) se encuentra acoplado ($S_{11} < -10\text{dB}$) con un valor de $-30,17\text{dB}$ y el coeficiente de transmisión (S_{21}) alcanza el punto más alto obtenido tras varias pruebas con un valor de -0.64dB encontrándose dentro del rango

diseño ($0\text{dB} < S_{21} < -1\text{dB}$), por ello se define que esta celda unitaria cumple con los requisitos planteados inicialmente y va a ser la base con la que se defina la periodicidad que tiene la RIS.

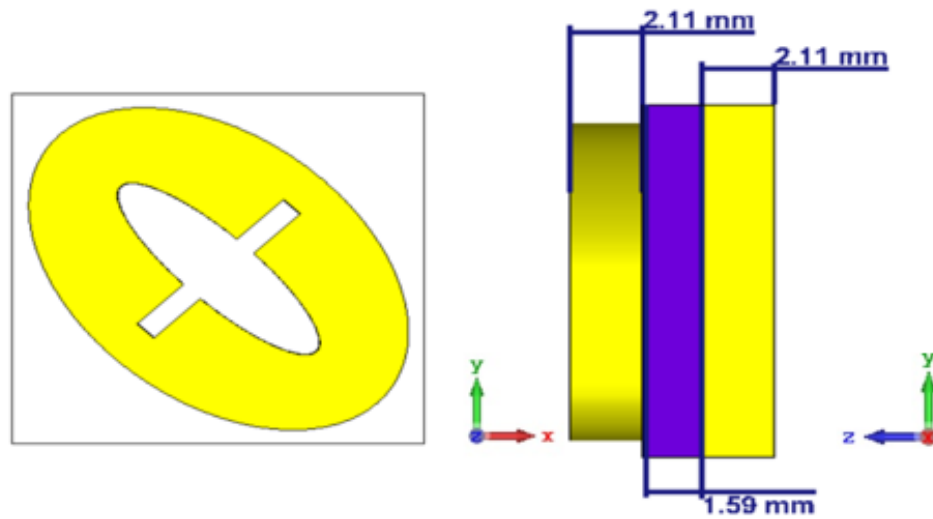


Figura 21: Medidas de los grosores de la celda unitaria (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

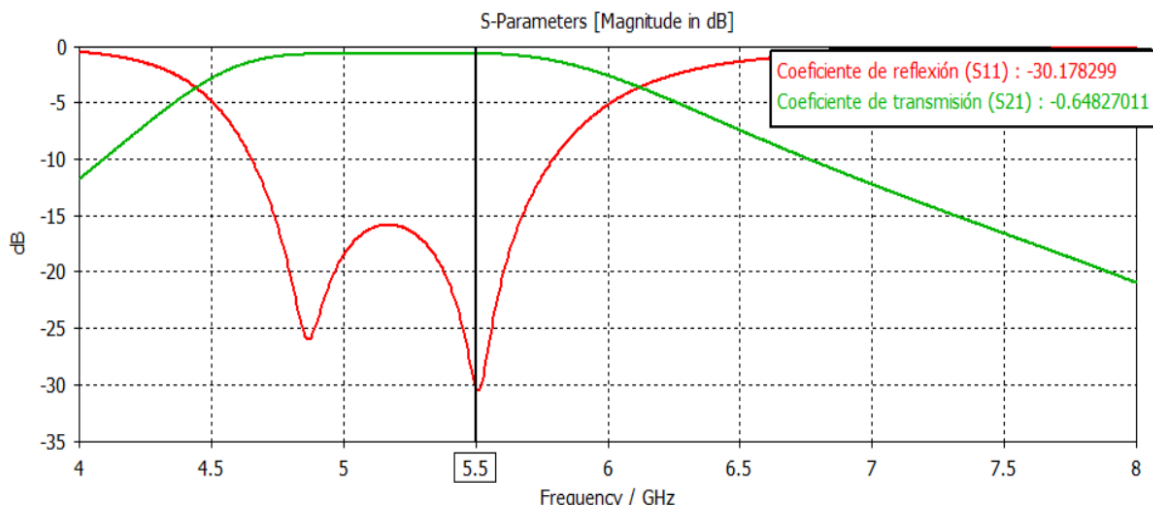


Figura 22: Coeficiente de reflexión y transmisión en 5.5GHz (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

3.6.2 Array de celda unitaria (RIS)

Una vez diseñada la celda unitaria y comprobado que los valores que refleja se asemejan a los valores requeridos para trabajar en la banda de 5GHz, se procede a crear un array de antenas considerando dos factores: el tamaño físico de la antena enfocado en costos de fabricación y el espacio donde va a ser utilizada y mediante un análisis del patrón de radiación y la directividad en la frecuencia de operación.

3.6.2.1 Número de celdas unitarias

Para determinar el número de celdas unitarias que se necesitan de acuerdo a la frecuencia de operación[42], se procede de la siguiente manera:

Con la longitud de onda previamente obtenida $\lambda = 0.05454m$ se determina cual debería ser el tamaño de la celda unitaria, que aproximadamente es la mitad de la longitud de onda, sin embargo, se decide generar el diseño a un cuarto de la longitud de onda debido a dos factores, el diseño en $\frac{\lambda}{4}$ proporciona una buena resolución angular para controlar de mejor manera la fase y amplitud de la onda reflejada y ajustar con mayor precisión el patrón de radiación de la RIS, a su vez un buen rendimiento en un amplio rango de frecuencias lo cual es esencial si se quiere cubrir la banda de Wifi a 5Ghz (5.128GHz – 5.8GHz)

El tamaño de la celda unitaria es:

$$T = \frac{\lambda}{4} \quad (32)$$

$$T = \frac{0.05454m}{4} \quad (33)$$

$$T = 0.013635m \quad (34)$$

Una vez obtenida el tamaño de la celda unitaria, se determina el número de celda en las direcciones x e y , esto dependerá de ciertas condiciones, como el tamaño de la celda unitaria, el tamaño físico establecido para la antena o de algún requisito específico de diseño. En este caso las proporciones de acuerdo a la aplicación se establecen en 50cm x 50cm, ya que no se necesita una antena de grandes dimensiones porque la aplicación está pensada para el envío de datos en ambientes interiores y se descarta una antena muy pequeña debido a que el alimentador puede irradiar una cantidad significativa de energía, pero la antena RIS tiene una superficie reflectante mucho más pequeña para interactuar con estas ondas electromagnéticas.

Para el cálculo del número de la celda unitaria por lado se establece la relación entre la dimensión preestablecida por lado de la antena respecto al tamaño de la celda unitaria:

$$\#Celdasxy = \frac{0.50m}{0.013635} \quad (35)$$

$$\#Celdasxy = 36.7 \quad (36)$$

Se concluye que el array debe tener 37 celdas unitarias, sin embargo, en la optimización se decide dejar el número de celdas en 40 por lado dando un total de 1600 de forma general.

Para el diseño del array se procede a utilizar la herramienta “Array Task” de CST Studio el cual, permite definir el número de elementos en “x” y “y”, a su vez el espaciado entre cada celda y definir si el array es pasivo o activo, como se muestra en la Fig.23.

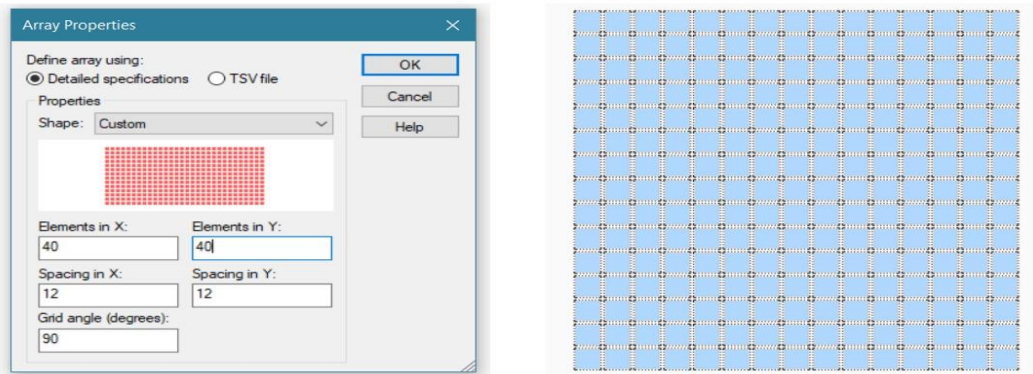


Figura 23: Propiedades para crear un array
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

Una vez creado el array Fig.24, se observa las celdas unitarias distribuidas a lo largo y ancho de la superficie, perfectamente espaciadas y alineadas por el software, así como las medidas que posee, correspondiendo a todos los datos previamente calculados.

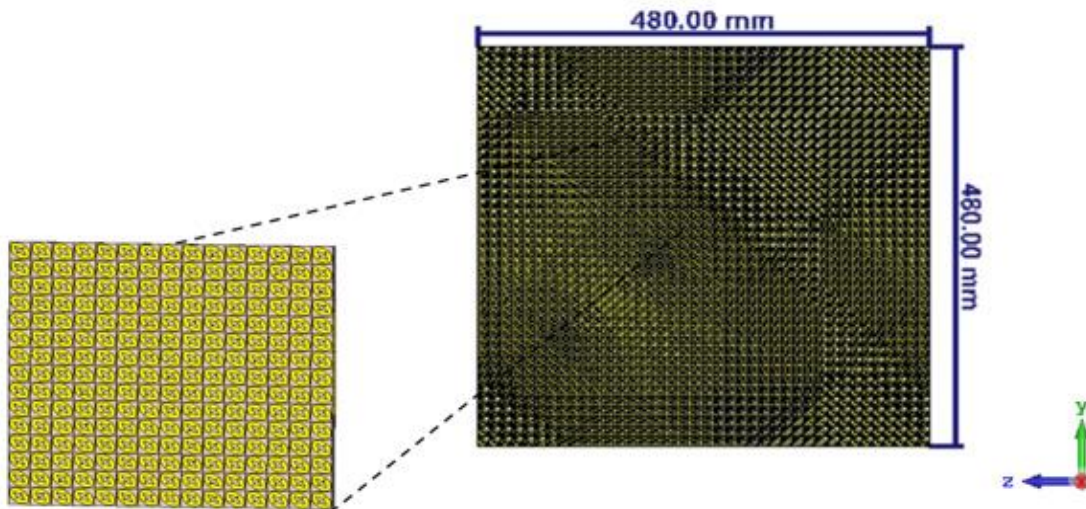


Figura 24: Array de antenas simulado 40x40
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis e interpretación de resultados

Se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones de los alimentadores y se define que alimentador es el adecuado en conjunto con la superficie RIS para comprobar si se cumplen los objetivos propuestos en el proyecto de investigación los cuales dictan la evaluación de los parámetros de directividad, frecuencia de operación y absorción de la superficie propuesta.

4.1.1 Análisis de alimentadores

Se propone el diseño de tres alimentadores para evaluar cuál de ellos reúne características óptimas para funcionar como aquel que transfiere la energía de alta frecuencia hacia la superficie RIS, la cual redirigirá dicha energía hacia un receptor, el alimentador debe contar con una alta directividad, una frecuencia de trabajo en 5.5GHz y un ancho de banda que cubra el rango de frecuencia de 5.192GHz a 5.8 GHz, como condiciones iniciales, esta comparativa se desarrolla en el Anexo 3 y 4.

4.1.1.1 Antena Bocina

El diseño de la antena de bocina piramidal, se realiza teniendo en cuenta como antecedente que poseen una alta directividad, un amplio ancho de banda y bajas pérdidas, lo cual, lo hace un alimentador ideal para el trabajo propuesto, se modeló la antena en el software de CST Studio, Fig.25, con dimensiones propuestas en la Tabla.5.

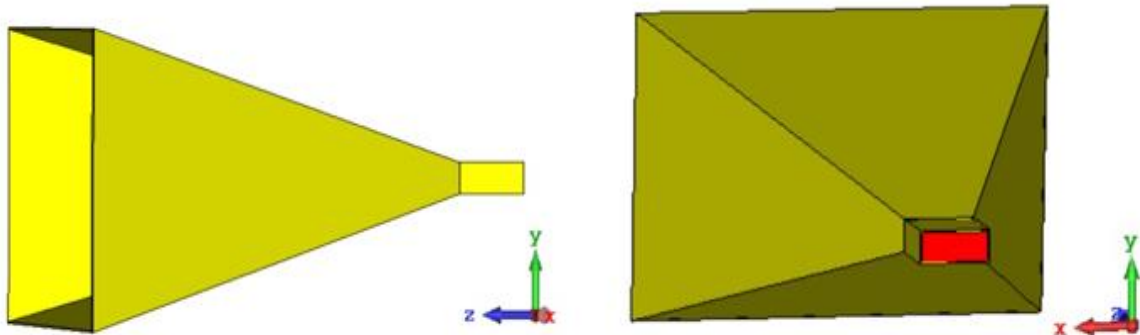


Figura 25:Alimentador: Bocina Piramidal
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

La Fig. 26, muestra el parámetro S_{11} de una bocina piramidal, la antena se encuentra acoplada en toda la banda de interés (5.198GHz – 5.8GHz) bajo los -10dB ($S_{11} < -10\text{dB}$), esto indica que la cantidad de energía reflejada de vuelta a la fuente es menor al 10% y la reflexión es

mínima en toda la banda, destacando que la antena está diseñada para operar eficientemente sin generar grandes pérdidas debido a la reflexión.

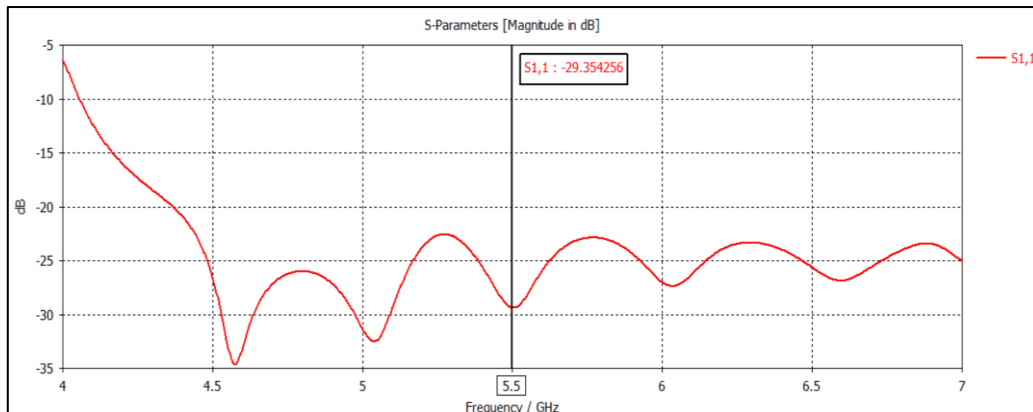


Figura 26: Coeficiente de reflexión de la bocina piramidal en 5.5GHz
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

El diagrama de radiación 3D Fig.27, muestra una directividad de 19.59dBi indicando que la antena tiene una alta capacidad de enfocar la energía en una dirección específica, en comparación a una antena isotrópica, destacando que este tipo de antena se puede usar en aplicaciones donde se necesita un largo alcance en una dirección en particular, mientras que el diagrama de radiación polar Fig.28, denota que el lóbulo principal -19.59dBi de directividad y un ancho angular de 18° marcando la región donde la energía irradiada se concentra, a su vez se muestra varios lóbulos secundarios donde la energía es significativamente menor que en la dirección principal.

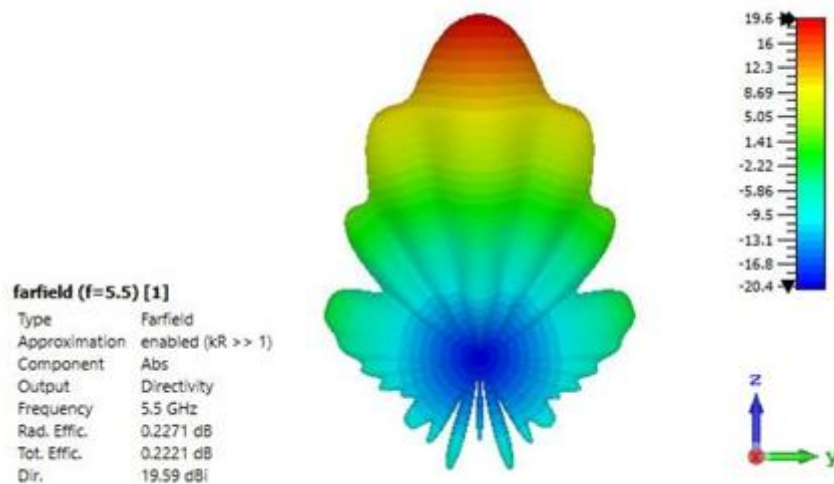


Figura 27: Diagrama de radiación de la Bocina piramidal
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

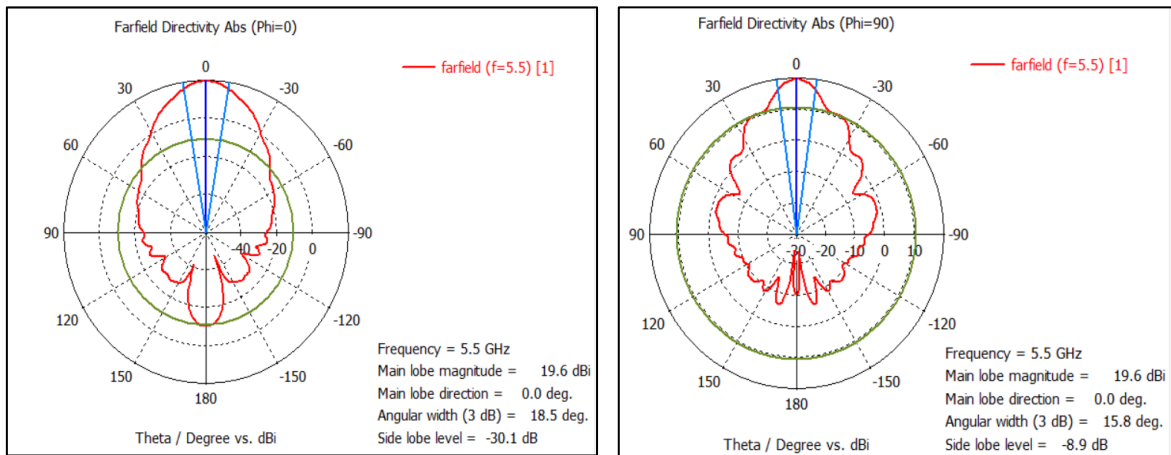


Figura 28.: Diagrama polar de la Bocina piramidal (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

En la Fig.29, se muestra la distribución angular de la radiación emitida dependiendo su ángulo de observación, en la cual los cortes copolar en los planos E y H tienen 19dBi lo que indica que la intensidad del campo en esta polarización es elevada, por lo tanto se puede establecer que ese alimentador está diseñado para irradiar energía en esta dirección de mejor manera, por otro lado, el corte crosspolar denota intensidad de campo muy baja alcanzando -70dBi en dirección perpendicular a la polarización de la antena minimizando la radiación en esta dirección.

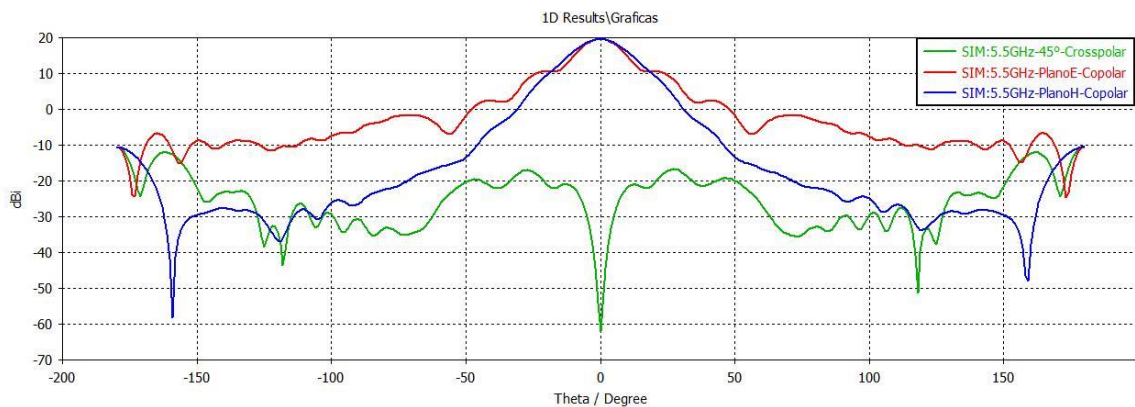


Figura 29:Diagrama de campo lejano de una bocina piramidal a 5.5GHz (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

La directividad de la bocina piramidal es bastante alta Fig. 30, debido a la naturaleza de este tipo de antena, en este caso se mantiene bastante uniforme para el rango de frecuencias de interés (5.198GHz – 5.8GHz) siendo (19.2dBi-19.4dBi), logrando que tenga una capacidad direccional bastante alta en este rango, esto es importante para la aplicación propuesta.

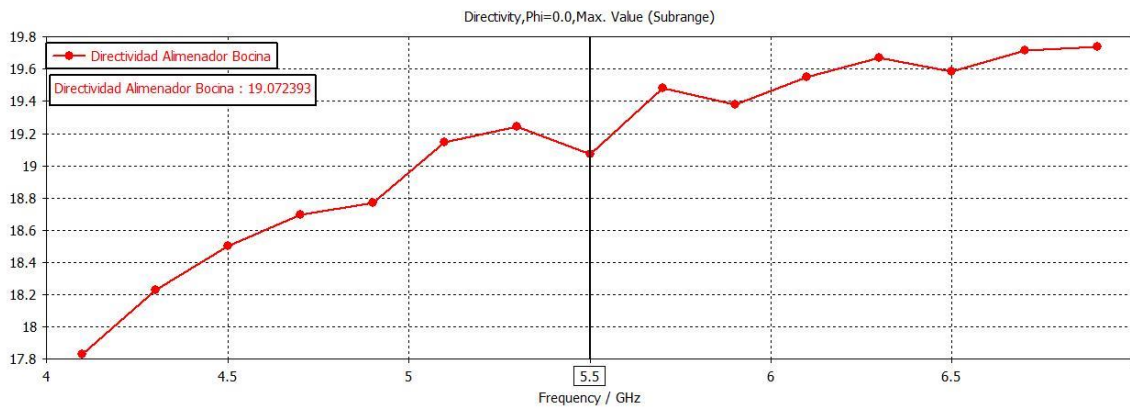


Figura 30: Directividad de la bocina piramidal a 5.5GHz
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

4.2 Análisis de la superficie RIS

Se realizó la comparativa entre los alimentadores para definir cuál es el adecuado de acuerdo a los parámetros analizados y se llegó a la conclusión que la antena de bocina piramidal es óptima para cumplir el objetivo planteado, por ello se realizan pruebas en un escenario simulado entre el alimentador y la antena RIS Fig.31, a diferentes giros para corroborar si la superficie es capaz de reflejar la energía incidente y redirigirla, se va a tomar en cuenta principalmente la simulación de 15° y 60° Fig.32, ya que ambos ángulos proporcionan una cobertura angular buena para analizar el rendimiento de la antena RIS, el giro de 15° permite evaluar el rendimiento en ángulos estrechos mientras que el giro de 60° proporciona una cobertura más amplia.

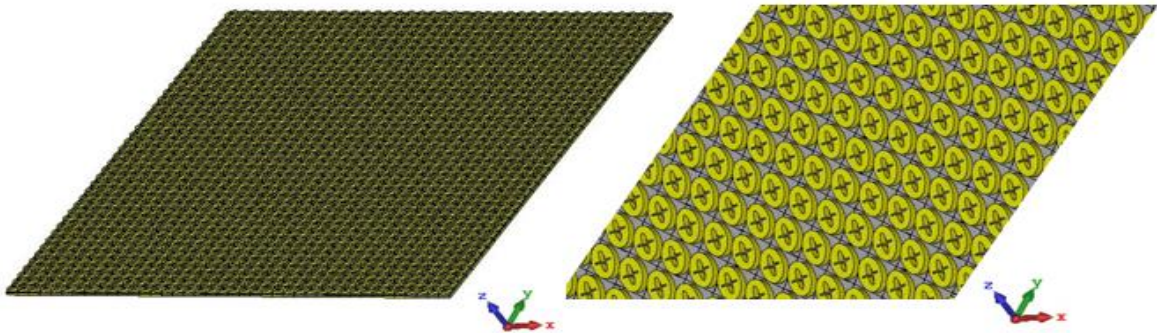


Figura 31: Superficie RIS
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

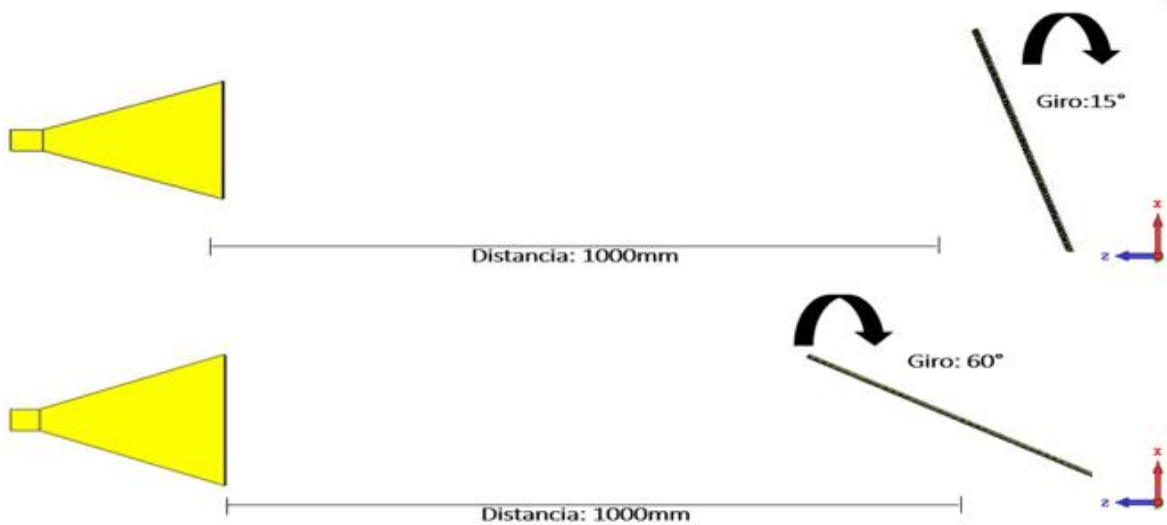


Figura 32: Giro de 15° y 60° en la superficie RIS respecto al eje x
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

4.2.1 Superficie RIS giro 15°

Como respuesta a la simulación de la antena RIS a 15° se tiene el coeficiente de reflexión (S11) Fig.33, el cual describe un acoplamiento, en todo el rango de frecuencias de interés (5.192GHz – 5.8GHz), alcanzando un acoplamiento ($S_{11} < -10\text{dB}$) de -23dB en 5.5GHz como frecuencia central, mientras que en el resto de frecuencias los niveles de adaptación varían y esto se debe a las resonancias generadas por el diseño de la celda unitaria, esto da como resultado un comportamiento de reflexión diferente en esas frecuencias en particular.

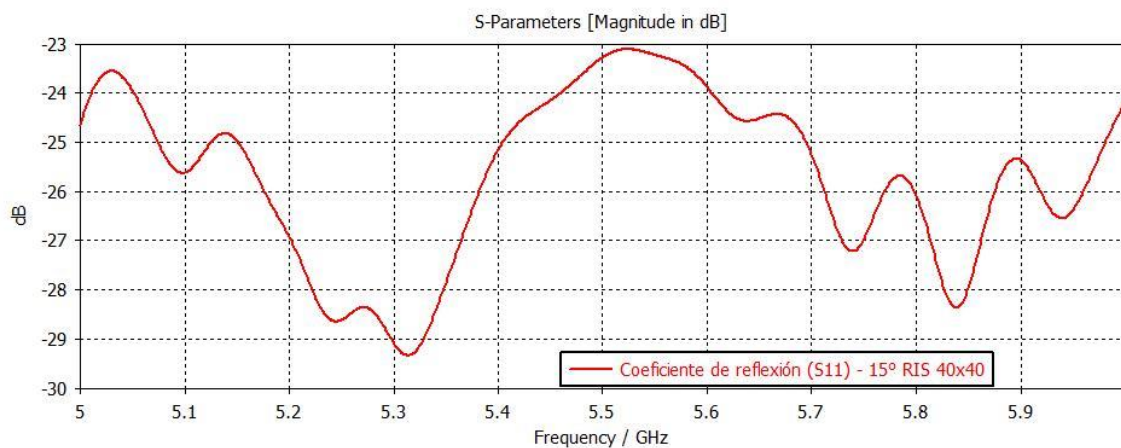


Figura 33: Coeficiente de reflexión de la superficie RIS con un giro de 15°
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

El diagrama de radiación y el diagrama polar Fig. 34, muestra una clara reflexión de la energía incidente emitida por el alimentador hacia la RIS, con un ángulo de 39.8°, esto significa que la antena RIS está orientada en un ángulo que conlleva un relación con el eje de referencia, esta característica en la antena permite el control del haz y la focalización de

la energía en una dirección específica, por otra parte el nivel de directividad que alcanza la onda electromagnética reflejada conserva una alta directividad en relación a la emitida por la bocina, con un valor de 20.59dBi, lo que da la posibilidad de alcanzar mayores distancias de forma más precisa.

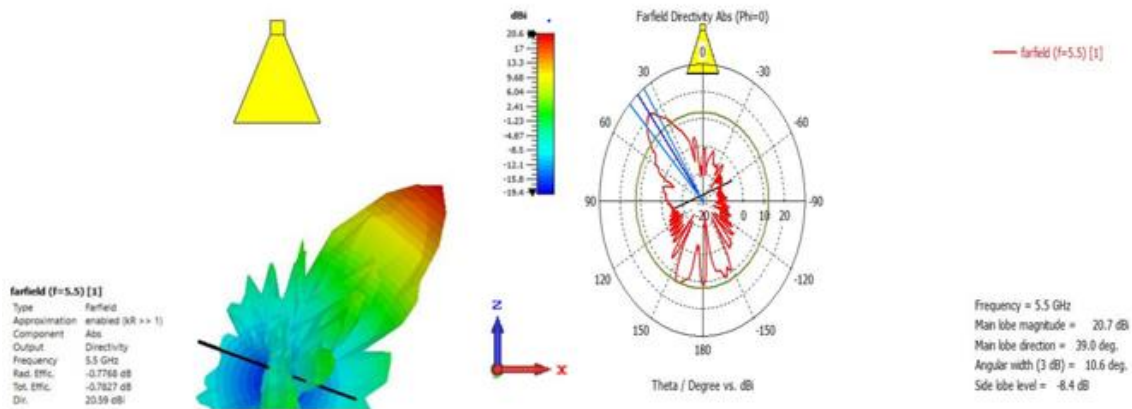


Figura 34: Diagrama de radiación y diagrama polar de la superficie RIS a 15° (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

La Fig. 35, muestra los cortes copolar en el plano H del cual se nota una clara distribución de potencia en dirección horizontal 20dBi, esto indica que la antena RIS tiene la capacidad de redirigir la energía en cualquier dirección horizontal de mejor manera y el corte copolar en el plano E, en el cual se destaca un valor de -12dBi lo que sugiere una menor potencia y una radiación más débil en esta dirección. Por otro lado, en el corte crosspolar se observa una radiación baja en comparación con la polarización principal -7dBi, sin embargo, todavía es significativa lo que dicta que aún existe un componente de polarización cruzada presente.

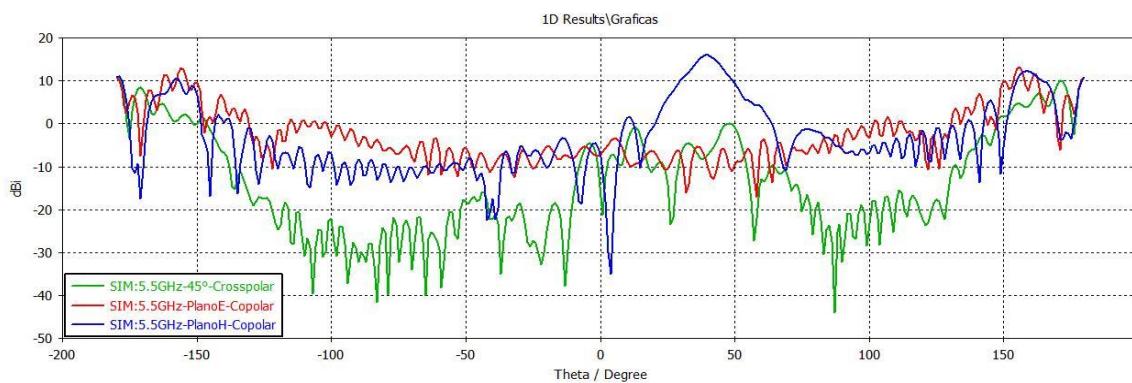


Figura 35:Diagrama de campo lejano de la superficie RIS a 15°en 5.5GHz (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

La RIS diseñada tiene una eficiencia de radiación alta con una variación de 15° Fig.36 esto es imprescindible en este tipo de antenas ya que se está aprovechando eficazmente la energía en el rango de frecuencias de interés, al alcanzar una eficiencia de 0.839 en la frecuencia central de 5.5GHz indica aproximadamente un 84% de la energía suministrada se convierte en radiación útil.

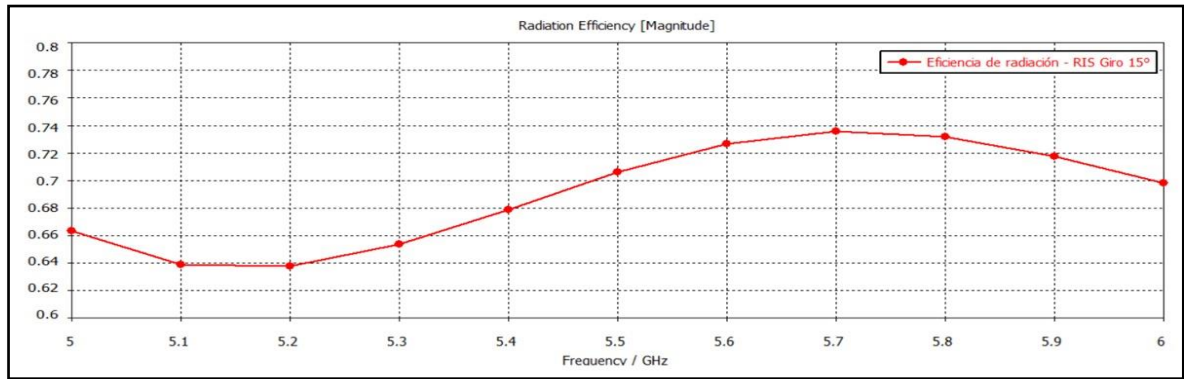


Figura 36: Eficiencia de radiación de la superficie RIS a 15° en 5.5GHz
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

4.2.2 Superficie RIS giro 60°

La Fig.37, muestra el parámetro de reflexión(S11) acoplado en toda la banda de interés (5.198GHz – 5.8GHz), al igual que en el caso anterior, el ángulo de giro de la antena RIS (60°), no influye en el acoplamiento, lo que es un buen indicio de funcionamiento, a su vez se observa que la frecuencia central 5.5GHz, alcanza -28dB lo que indica una adaptación muy buena logrando reflejar la mayor cantidad de energía incidente con la menor pérdida posible.

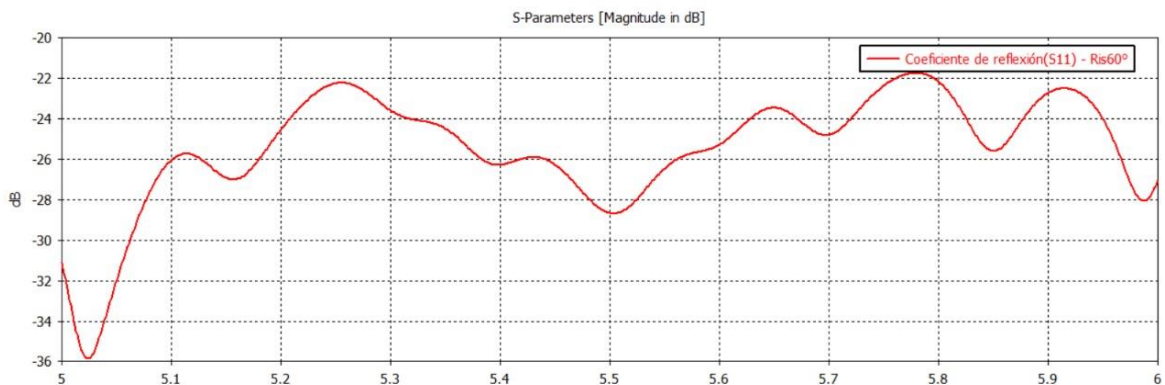


Figura 37: Coeficiente de reflexión de una superficie RIS a 60° en 5.5GHz
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

La reflexión aplicada en las antenas RIS depende de la geometría y de ciertas configuraciones específicas, en este caso se observa el diagrama de radiación polar en la Fig.38, el cual muestra un pico de radiación principal en un ángulo de 120° cuando su incidencia es de 60° y a medida que se aleja de 120° las radiaciones tienen una menor intensidad.

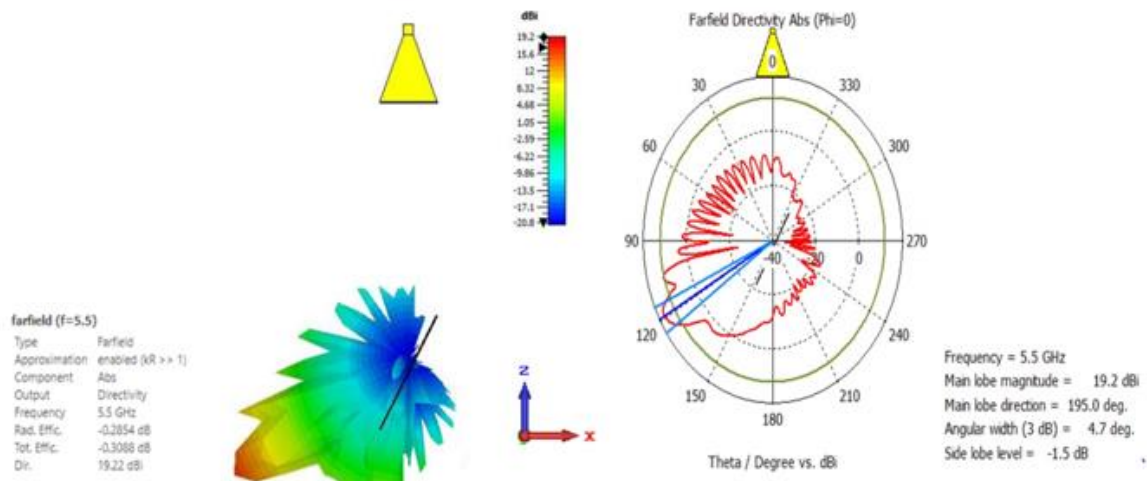


Figura 38: Diagrama de radiación 3D y diagrama polar reflejando la onda incidente. (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

La Fig. 39, detalla la gráfica de campo lejano a 120°, el cual es el punto de análisis, donde se observa que los cortes copolares en el campo E y H presentan una polarización vertical débil (-10dBi) y una polarización horizontal fuerte (10dBi) respectivamente, mientras que el corte crosspolar indica que la radiación es muy baja en comparación a la radiación principal emitida por la antena, lo que sugiere que la RIS en este ángulo específicamente emite la polarización deseada y minimiza la radiación de otras polarizaciones.

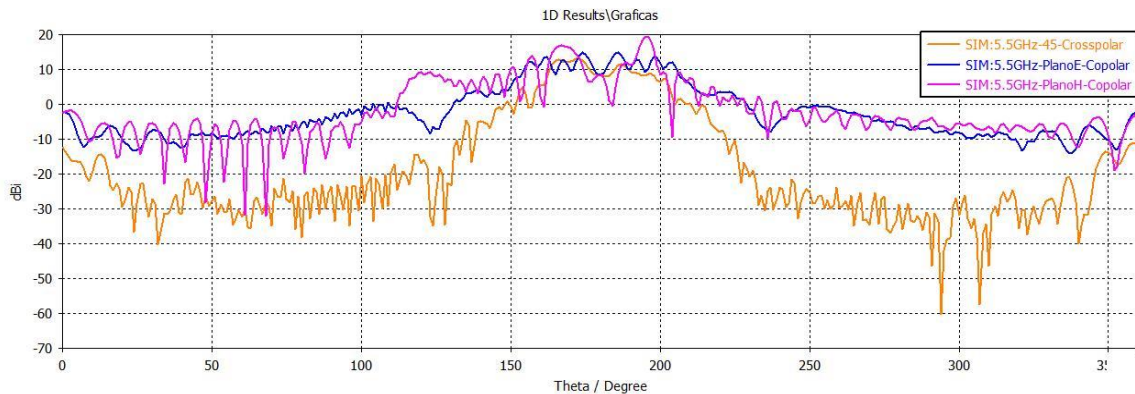


Figura 39: Diagramas de campo lejano de una superficie RIS a 120° en 5.5GHz (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

La eficiencia de radiación mostrada en la Fig.40, no es constante en toda la banda de interés, sin embargo, se mantiene sobre el 85% lo que se consideraría un buen rendimiento de la antena RIS para reflejar la energía incidente de manera efectiva, en otras palabras, una gran cantidad de la potencia suministrada se refleja en lugar de ser absorbida, cumpliendo con las condiciones propuestas inicialmente.

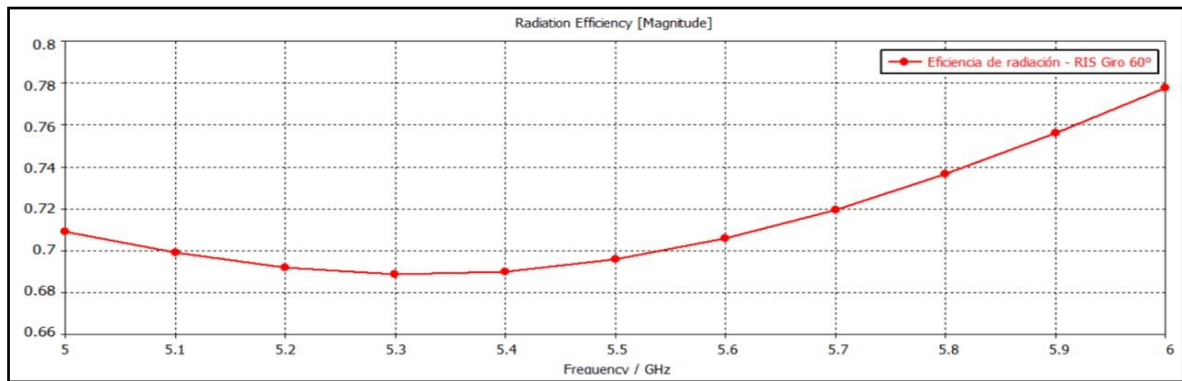


Figura 40:Eficiencia de radiación de la superficie RIS a 60° en 5.5GHz
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

Una vez realizadas varias pruebas en el simulador, se verifica que el funcionamiento de la superficie RIS, es óptimo en un entorno controlado, por lo tanto, se procede a implementar un modelo lo más idéntico posible al simulado para las pruebas posteriores que se observa en el Anexo.6.

4.3 Prueba de funcionamiento de la superficie RIS implementada

La forma más adecuada de probar una antena, en este caso una superficie RIS es una cámara anecoica, debido al aislamiento electromagnético donde no hay interferencia externa, además, de la ausencia de reflexiones lo que garantiza mediciones precisas, sin embargo, en ausencia de una cámara anecoica se recurre a realizar pruebas de forma empírica para comprobar que la antena RIS refleja señales en el rango de frecuencias de interés(5.192GHz-5.8GHz) tomando las siguientes consideraciones:

1. Una antena de bocina conectada al VNA en el puerto de análisis (S11) puede funcionar como transmisor y receptor.
2. El puerto (S11) se utiliza para medir la reflexión de la señal incidente y permite caracterizar algunas propiedades
3. Para las pruebas a realizar se analizará la capacidad de la antena de bocina en recepción.
4. El VNA por sí mismo no es un receptor de señales, sin embargo, al analizar la reflexión del parámetro S11 se obtiene algunos indicios de su capacidad para recibir señales a la frecuencia de diseño



Figura 41:Pruebas de la antena RIS vs reflector perfecto a 25 cm de distancia
(Autores)

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas, se procede a experimentar con dos escenarios Fig.41, en los cuales se debe conectar la antena de bocina diseñada a 5GHz al VNA y apuntarla hacia el reflector o a la antena RIS a una corta distancia, uno a la vez, de esta manera se podrá observar a que frecuencia están reflejando las señales, Para comprobar si se están reflejando señales en el VNA se visualiza el aporte de potencia que genera el reflector y la RIS sumado a la señal original de la bocina la cual es de -17.9dB en 5.5GHz Fig.42.

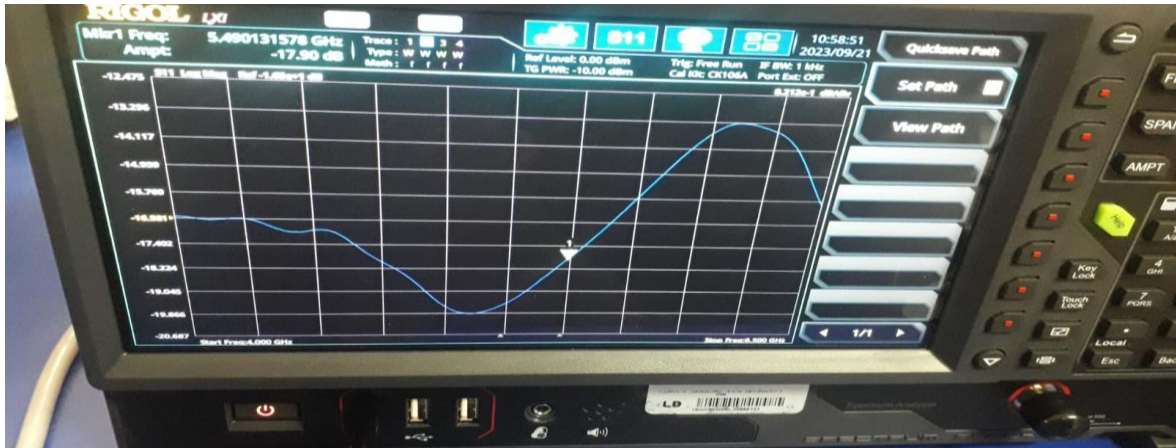


Figura 42: Coeficiente de reflexión (S_{11}) medido de la antena de bocina.
Fuente: (Autores)

4.3.1 Escenario con un reflector perfecto

El escenario consiste en un reflector de aluminio de 2mm colocado a 25 cm de distancia de la bocina Fig.43, da como resultado la Fig.44, en la cual se aprecia que la antena se encuentra desacoplada en varios puntos de rango de frecuencia de interés (5.198GHz-5.8GHz) lo que sugiere que parte de la energía transmitida no está siendo aprovechada y está siendo reflejada de vuelta a la fuente.

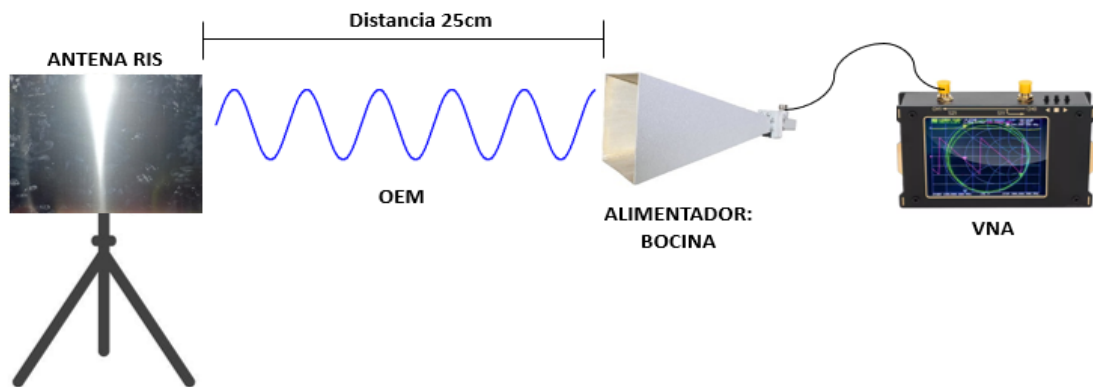


Figura 43: Primer escenario: Antena de bocina y un reflector perfecto
(Autores)



Figura 44: Coeficiente de reflexión del reflector perfecto medido- Desacoplado (Autores-VNA)

La Fig.45 muestra el coeficiente de reflexión simulado de un reflector perfecto en el cual se puede ver un desacoplamiento en su totalidad en la banda de 4GHz y en varios puntos del rango de frecuencias de interés (5.192GHz – 5.8GHz), el resultado simulado es muy similar al resultado medido en la Fig.44 lo que podemos corroborar que el reflector perfecto no está diseñado para reflejar frecuencias específicas, por el contrario, refleja la onda incidente fuera del rango de diseño y de forma mínima.

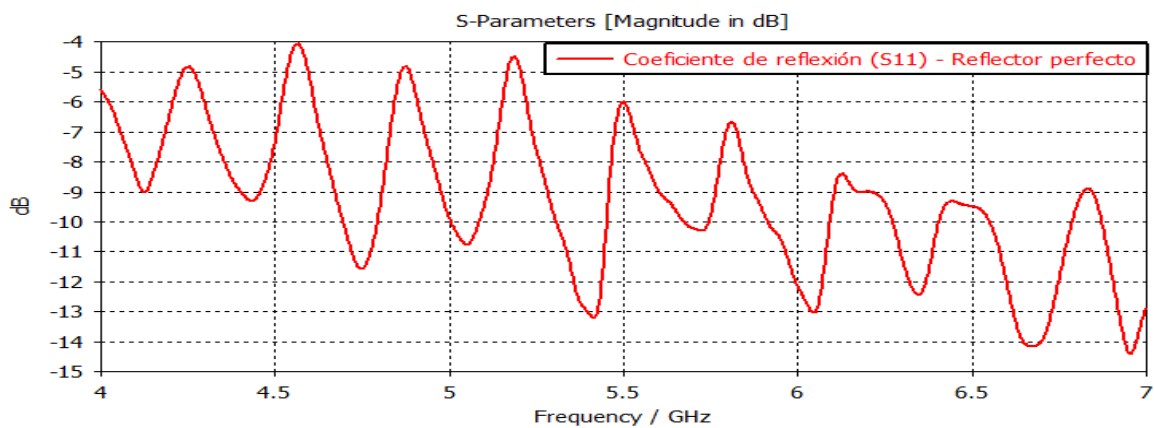


Figura 45: Coeficiente de reflexión del reflector perfecto simulado- Desacoplado (Autores)

4.3.2 Escenario con la superficie RIS

El escenario consiste en la superficie RIS previamente diseñada y colocada a 25 cm de distancia de la bocina Fig.46, la cual da como resultado la Fig.47, donde se puede apreciar que la antena RIS aportó potencia mediante la señal reflejada y ahora se encuentra acoplada en toda la banda de interés (5.198GHz – 5.9GHz), a su vez se observa que las banda

adyacente 4GHz y 6GHz no se les sumo potencia lo que sugiere que la antena RIS está reflejando la potencia únicamente al rango de frecuencias para la cual fue diseñada.

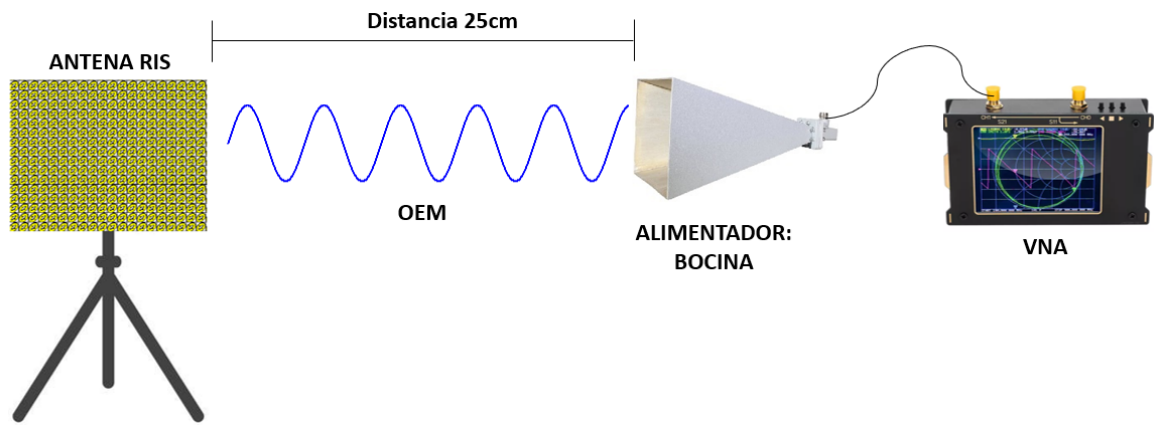


Figura 46: Segundo escenario: Antena de bocina con la superficie RIS (Autores)



Figura 47: Coeficiente de reflexión (S11) medido de la superficie RIS (Autores-VNA)

En la Fig.48, se observa el parámetro de reflexión (S11) simulado en CST Studio del segundo escenario y se nota similitud en el rango de frecuencia de interés con el coeficiente de reflexión medido.

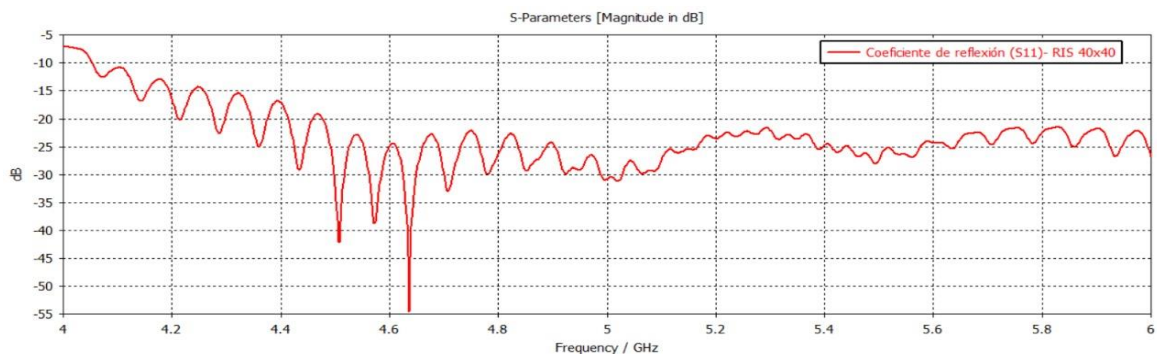


Figura 48: Coeficiente de reflexión (S11) simulado de la antena RIS a 25cm (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

Realizada la comparación de entre los valores del coeficiente de reflexión y siendo estos favorables al proyecto, se establece que la superficie RIS refleja las señales dentro de la banda de frecuencias del rango de interés (5.198GHz – 5.8GHz), se procede a realizar una segunda prueba de forma empírica para comprobar la absorción que presenta la antenna apoyados en el resultado obtenido, el cual se muestra en el Anexo.7.

4.4 Envío de datos de audio y video.

Comprobado el funcionamiento de la RIS mediante la prueba realizada de forma empírica, se procede a experimentar cual es el desempeño de la antenna mediante el envío de datos de audio y video Fig.49.

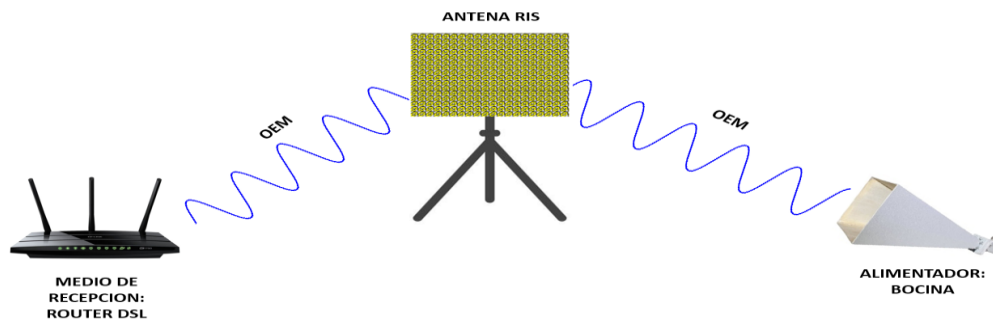


Figura 49: Envío de datos de audio y video
(Autores)

- Para el primer caso se utiliza un alimentador como transmisor y se envía un video en una calidad de 720p mediante un computador por el software de VLC hacia la antenna RIS, la cual reflejará dicha señal hacia un receptor, el mismo reproducirá los datos en otra computadora Fig.50.

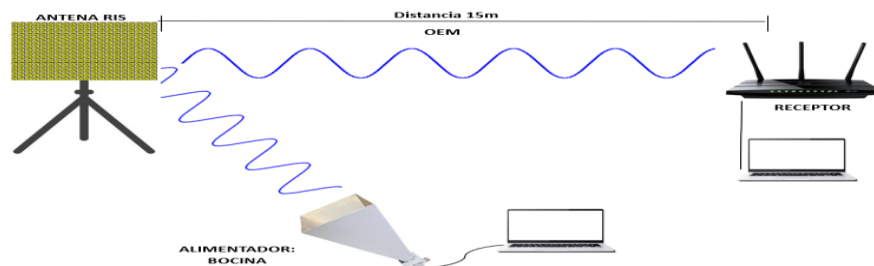


Figura 50: Envío de datos de audio y video con la intervención de la superficie RIS
(Autores)

- Para un segundo caso se repetirá el proceso anterior sin la asistencia de la superficie RIS Fig.51.



Figura 51: Envío de datos de audio y video sin la intervención de la superficie RIS
(Autores)

Este proceso se repite en dos escenarios distintos ambos con una distancia de 15m de separación, el primero dentro de un curso y el segundo en un pasillo ambos en la facultad de ingeniería bloque A.

Para el análisis del comportamiento de la comunicación entre dos dispositivos “con y sin superficie RIS” se recurre a la obtención de datos por medio de programa Wireshark el cual nos muestra el tráfico de red proveniente de la IP del transmisor y receptor.

De esta manera de acuerdo a los datos capturados se evalúa que efecto tiene la superficie RIS en la comunicación. Para la obtención de datos se envió el video un total de 10 veces en ambos ejemplos y bajo las mismas condiciones en cuanto a intervalos de tiempo, tal y como se ve en el Anexo 8 y Anexo 9.

4.5 Análisis estadístico de la implementación y pruebas de la superficie RIS

Los datos estadísticos del proyecto de investigación, se obtienen con la ayuda del Software RStudio, ya que permite realizar análisis a partir de una base de datos obtenidos en las pruebas generadas el software CST Studio para la celda unitaria, así como los datos obtenidos en las pruebas de campo respecto al funcionamiento de la antena RIS, mediante Wireshark.

Las hipótesis de este proyecto de investigación son las siguientes:

$$H_0 = \text{Los datos siguen una distribución normal}$$

$$H_1 = \text{Los datos no siguen una distribución normal}$$

4.5.1 Prueba de normalidad para la celda unitaria

4.5.1.1 Coeficiente de reflexión(S11)

Se aplicó el test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, utilizado para valores mayores a 50 datos[51], la respuesta del mismo arroja un p-valor = 0.00035 lo que significa que $p < 0.05$, donde se rechaza la hipótesis nula ya que los datos no siguen una distribución normal. En la Fig.52, un diagrama de dispersión en el cual cada punto representa una combinación particular de grosores de material en las capas y el coeficiente de reflexión resultante, esto muestra una tendencia clara en los datos y una disminución o aumento general del parámetro S11 a medida que cambian los grosores de los materiales.

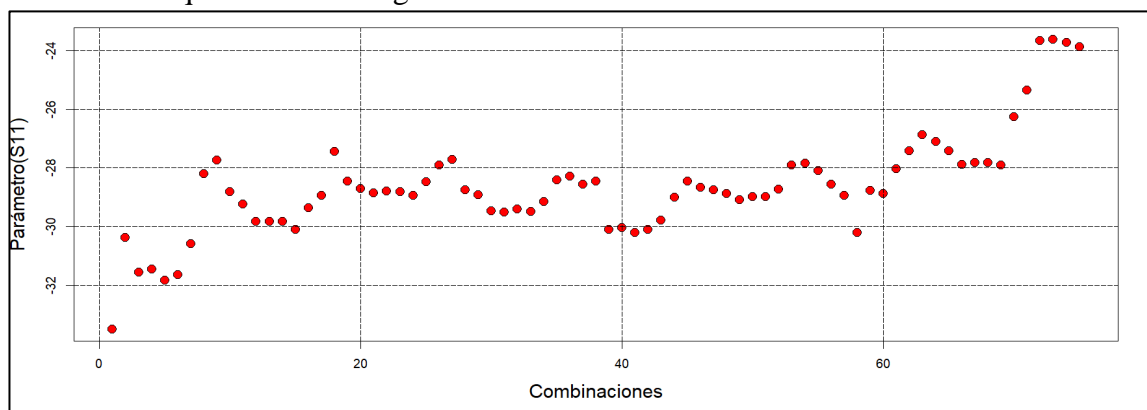


Figura 52: Diagrama de dispersión entre el número de combinaciones y el coeficiente de reflexión (Autores-RStudio)

4.5.1.1.1 Prueba de Kruskal-Wallis

Luego de obtener el resultado de la prueba de normalidad, se aplica la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, esta prueba es útil cuando tres o más grupos son independientes y no se encuentran distribuidos correctamente[52], donde el $p\text{-value} = 0.2264$ siendo este valor mayor a 0.05, entonces se acepta la hipótesis nula, por ello se entiende que cualquier combinación sería óptima ya que los valores obtenidos del coeficiente de reflexión se encuentran adaptados.

4.5.1.2 Coeficiente de transmisión (S21)

El resultado del test de Kolmogorov-Smirnov se aplicó para 75 muestras, dando un resultado de $p\text{-valor} = 0.0001242$, lo que significa que $p < 0.05$, donde se rechaza la hipótesis nula, ya que en este caso no sigue una distribución normal, como se observa en la Fig.53.

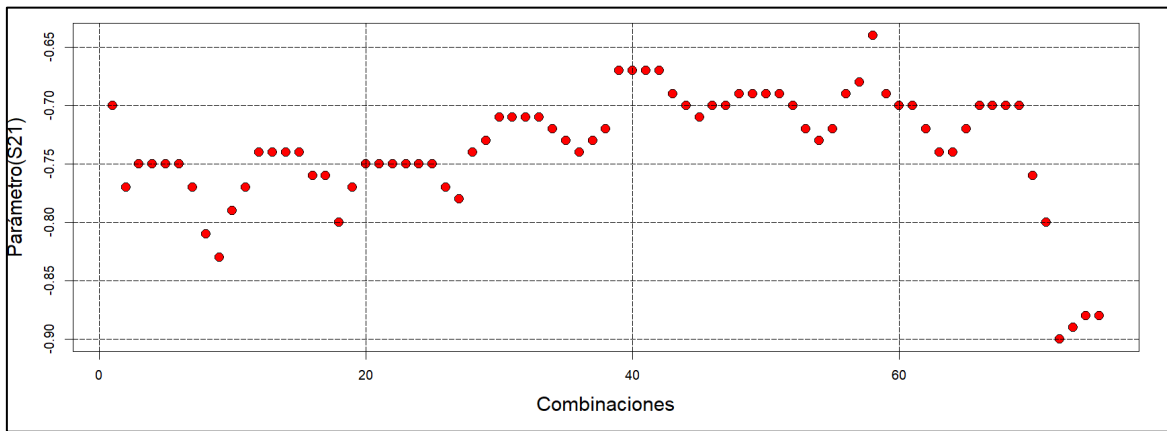


Figura 53: Diagrama de dispersión entre el número de combinaciones y el coeficiente de transmisión (Autores-RStudio)

4.5.1.2.1 Prueba de Kruskal-Wallis

Se aplica la prueba de Kruskal-Wallis luego de comprobar que no se sigue una distribución normal, el resultado es un $p\text{-value} = 0.01162$, siendo menor a 0.05 por lo que se mantiene la hipótesis alternativa, ya que existe diferencia significativa en el parámetro de transmisión y el número de combinaciones.

Discusión: Hay que tener en cuenta que el coeficiente de transmisión(S21) deberá tener un valor bajo cercano a cero, ya que se considera que cuanto más negativo sea el valor de S21, mayor será la atenuación y las pérdidas en la transmisión, y en este caso se busca lo contrario, logrando así un buen funcionamiento para la antena RIS. Cabe recalcar que luego de tener varias combinaciones se tomaron en cuenta 3, ya que estas son las que más se aproximan a cero en el coeficiente de transmisión. Con dichas combinaciones se optó por la averiguación de algunos sustratos comerciales, con el fin de saber cuál se aproxima al valor requerido. Se encontró un sustrato comercial de 1.60mm de grosor, el cual se aproxima a la combinación #58, la misma que al momento de la simulación se trabajó con 1.59mm de grosor, con este valor comercial se realizó una nueva simulación en la cual no se notó ningún cambio significativo.

4.5.2 Prueba de normalidad para la superficie RIS

4.5.2.1 Coeficiente de reflexión(S11)

En el caso de la RIS, se empleó el test de Shapiro-Wilk[53], el test trabaja con $n \leq 50$, del cual las muestras obtenidas fueron 5, donde el p-value = 0.2553, lo que demuestra que $p \geq 0.05$, por ello se acepta la hipótesis nula ya que los datos siguen una distribución normal, cómo se visualiza en la Fig.54. el cual detalla un histograma que muestra el valor obtenido del parámetro S11.

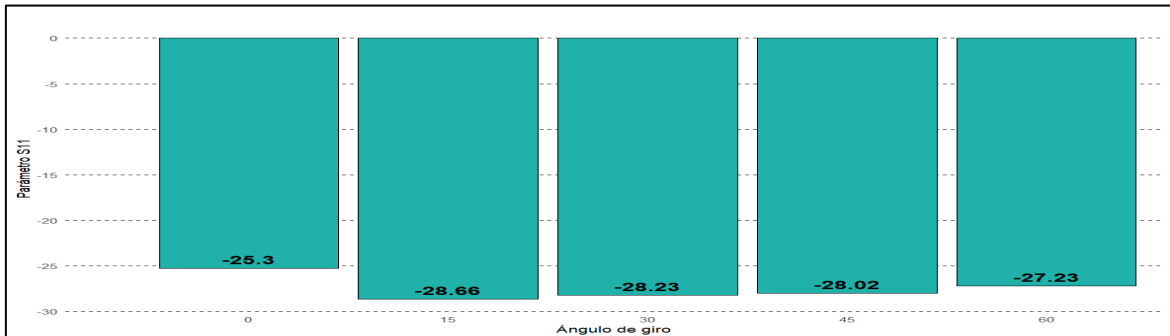


Figura 54: Histograma de parámetro S11 respecto al ángulo de giro de la superficie RIS (Autores-RStudio)

4.5.2.1.1 Prueba de T-Student

Se comprueba la prueba de normalidad y se aplica una prueba paramétrica, esta ayuda a examinar si las muestras pequeñas tienen una distribución normal[54], la cual arroja un p-value = 0.455, este valor es mayor a 0.05, por lo que se mantiene la hipótesis nula, es decir que, ángulo de giro no infiere de manera drástica en el acoplamiento y la antena RIS está funcionando adecuadamente y proporciona el efecto deseado.

4.5.2.2 Ganancia de la superficie RIS

En este caso se aplica el test de Shapiro-Wilk, en donde se obtiene un p-value = 0.2665 y se conoce que $p \geq 0.05$, considerando que sigue una distribución normal. En la Fig.55, se visualiza un histograma del valor de la ganancia con respecto al ángulo de giro.

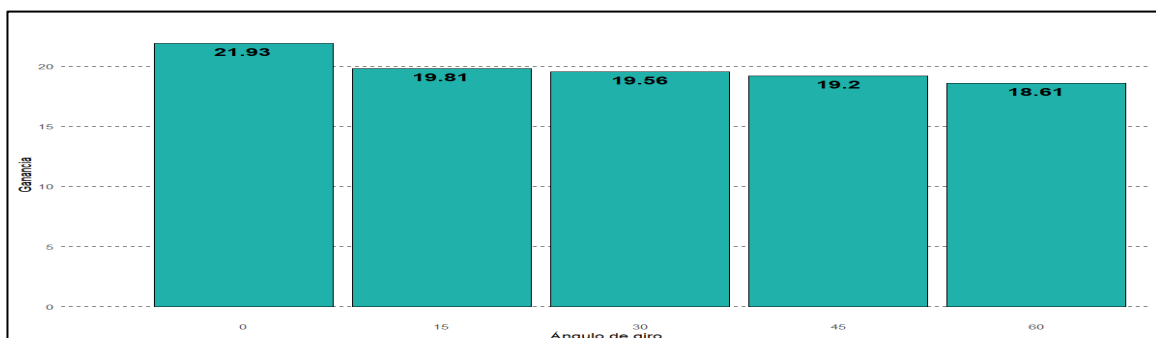


Figura 55: Histograma de la ganancia respecto al ángulo de giro de la superficie RIS (Autores-RStudio)

4.5.2.2.1 Prueba de T-Student

Se aplica la prueba de T-Student, el cual da un valor de p-value = 0.0005 menor 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula, y se mantiene la hipótesis alternativa, ya que el ángulo de giro si influye en la variación de la ganancia esto garantiza una mejor capacidad de direccionamiento de la señal y un rendimiento óptimo.

4.5.2.3 Directividad en la superficie RIS

Se aplica el test de Shapiro-Wilk, dando un p-value = 0.5632, del cual se comprende que $p \geq 0.05$, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula ya que mantiene una distribución normal. En la Figura 56. se representa un histograma con los valores de la directividad.

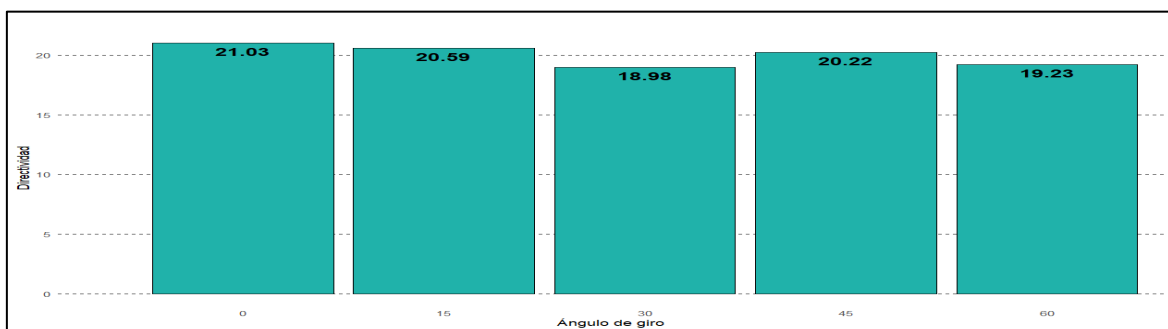


Figura 56: Histograma de la directividad respecto al ángulo de giro de la superficie RIS (Autores-RStudio)

4.5.2.3.1 Prueba de T-Student

El resultado en esta prueba nos da un p-value = 0.00052 menor a 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula, es decir, que para obtener una directividad adecuada es fundamental el ángulo de giro para radiar de manera eficiente la energía de la señal en una dirección deseada, debido a las características de la RIS y el alimentador usado lo que resulta en una mejor capacidad de comunicación.

4.5.3 Prueba de normalidad en el envío de audio y video en pasillos

En la Fig.57, se observa dos curvas las cuales representan el tráfico de envío de datos de audio y video a lo largo del tiempo, utilizando una conexión entre dos routers con una antena RIS como reflector. Los picos en la curva indican los momentos de mayor actividad en la transmisión de datos, posiblemente debido a eventos específicos o condiciones de la red.

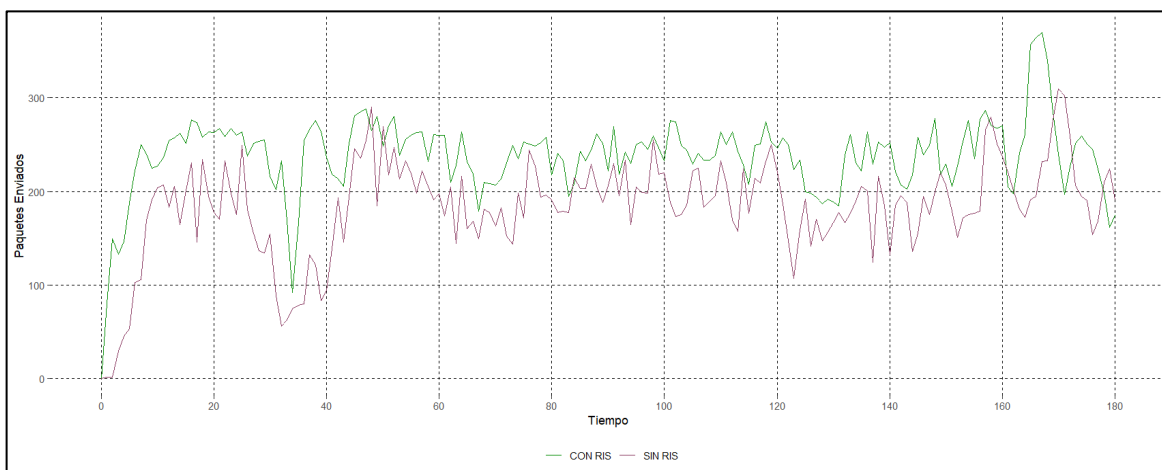


Figura 57: Comparativa del envío de datos de audio y video con RIS y sin RIS aplicado en pasillos (Autores-RStudio)

Para el análisis del envío de audio y video, se utilizó el test de Kolmogorov-Smirnov, ya que se trabaja con 180 datos para ambos casos, los cuales dan como resultado un p-value = 0.00001314 lo que significa que $p < 0.05$ por lo que se rechaza la hipótesis nula ya que no sigue una distribución normal con RIS, por otra parte, para la prueba sin RIS se obtiene un valor de p-value= 0.0000003642 en donde se rechaza la hipótesis nula ya que no sigue una distribución normal. Por ello se aplica una prueba no paramétrica.

4.5.3.1 Prueba de Wilcoxon

Se aplica la prueba para comprobar si existe diferencia entre las distribuciones de los datos[55], con RIS y Sin RIS, dando un valor de p-value = 0.000, por lo que se mantiene la hipótesis alternativa, se asume que los datos obtenidos no son los mismos para ambas, la antena RIS tiene un impacto significativo en la transmisión de datos de audio y video en comparación con no usar la antena RIS.

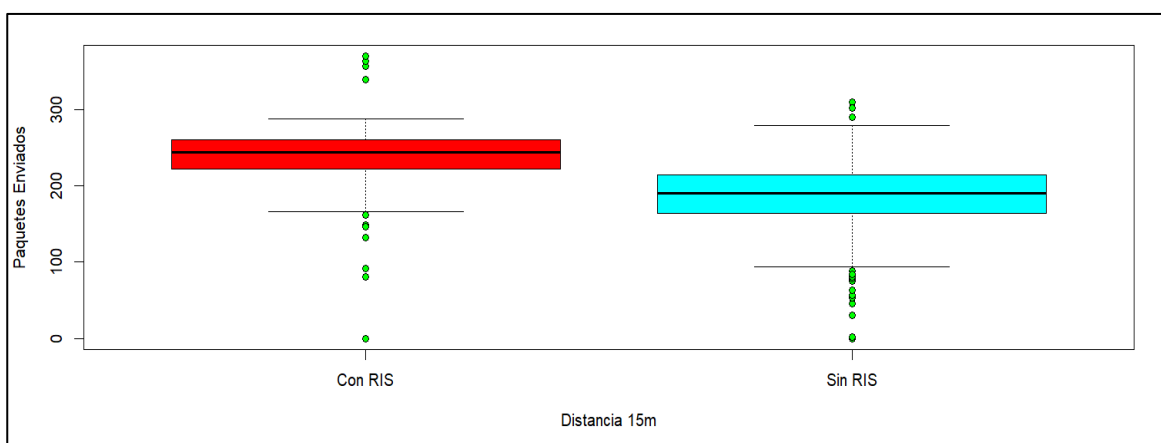


Figura 58: Diagrama de cajas de la comparación del envío de datos de audio y video en pasillos (Autores-RStudio)

La Fig.58. corresponde a diagramas de cajas donde se observa que existen ciertos valores atípicos para ambas, representando ciertas caídas al momento del envío de datos, la dispersión de los datos parece ser menor cuando se utiliza la antena RIS en comparación con los datos obtenidos sin la antena RIS.

4.5.3.2 Coeficiente de variación en el envío de datos de audio y video en pasillos

En la Tabla 10. se detallan los diferentes valores tanto de la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación para ambos casos.

Tabla 10: Valores estadísticos con respecto al envío de audio y video (pasillos)

	Tiempo de envío (s)	Media Aritmética	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Con RIS	180	237.75	44.46	19,47%
Sin RIS	180	183,15	74,26	45,74%

En la Fig.59. se muestra dos histogramas los cuales representan el coeficiente de variación:

- El color rasado representa el envío de datos con la antena RIS, tiene una media general de 237.75, una desviación estándar de 44.46 y un coeficiente de variación del 19.47%.
- El color celeste representa el envío de datos sin la antena RIS, la cual tiene una media general de 183.15, una desviación estándar de 74.26 y un coeficiente de variación del 45.74%.

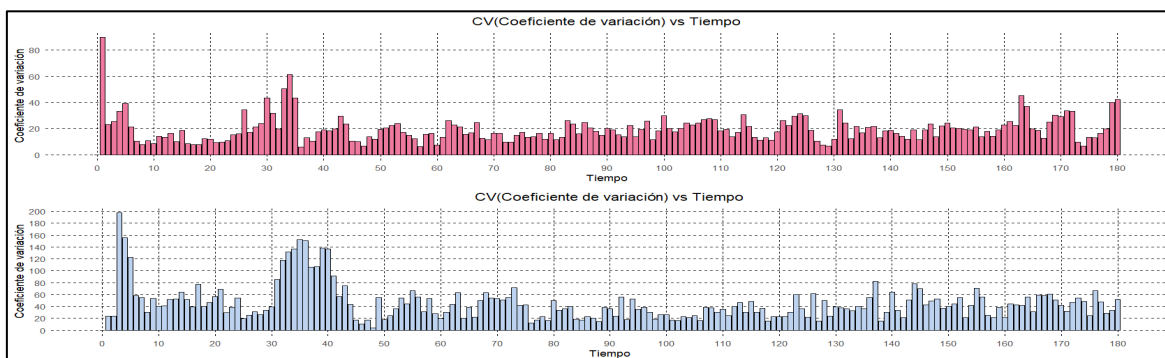


Figura 59: Coeficiente de variación del envío de datos de audio y video en pasillos (Con RIS - Sin RIS) (Autores-RStudio)

En la Fig.60, se visualiza la comparativa de ambos casos con respecto al coeficiente de variación, el grupo de la antena RIS tiene un coeficiente de variación relativamente bajo lo que indica una mayor homogeneidad en los datos, mientras que el coeficiente de variación del grupo de datos sin RIS es alto lo que indica una mayor variabilidad o dispersión de los datos.

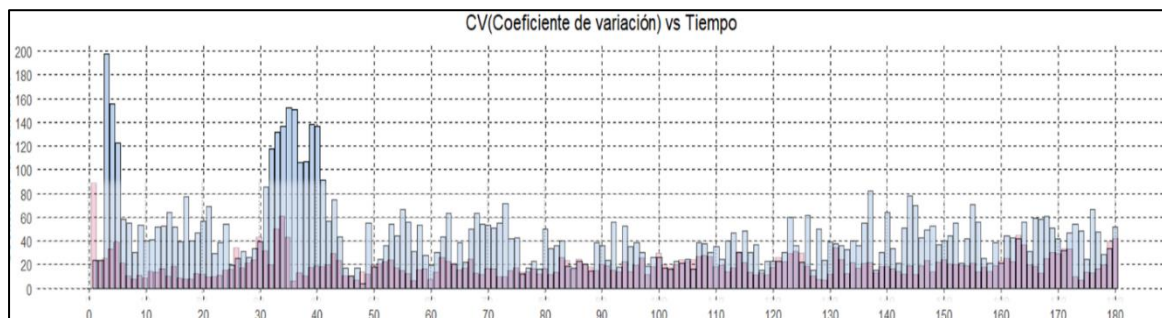


Figura 60: Comparación del coeficiente de variación para ambos casos (pasillos) (Autores-RStudio)

4.5.4 Prueba de normalidad en el envío de audio y video en un curso

La Fig.61. muestra el envío de datos de audio y video en un curso, los picos de las curvas reflejan los cambios dinámicos en la transmisión de datos durante el tiempo registrado. La comparación entre ambas, revela la eficiencia de la transmisión de datos, con picos potencialmente más altos o más regulares en una configuración en comparación con la otra. La prueba de normalidad para este caso aplicado en un curso, se realizó el test de Kolmogorov-Smirnov, dando un valor de $p\text{-value} = 0.018$ lo que significa que $p < 0.05$, provocando que se rechace la hipótesis nula ya que la distribución no es normal para prueba con la antena RIS, por otro lado, para la prueba sin la antena RIS, se realizó el test anterior en el cual el $p\text{-value} = 0.00032$ menor a 0.05 rechazando la hipótesis nula ya que no sigue una distribución normal. Como ambos casos no siguen una distribución normal se debe aplicar una prueba no paramétrica.

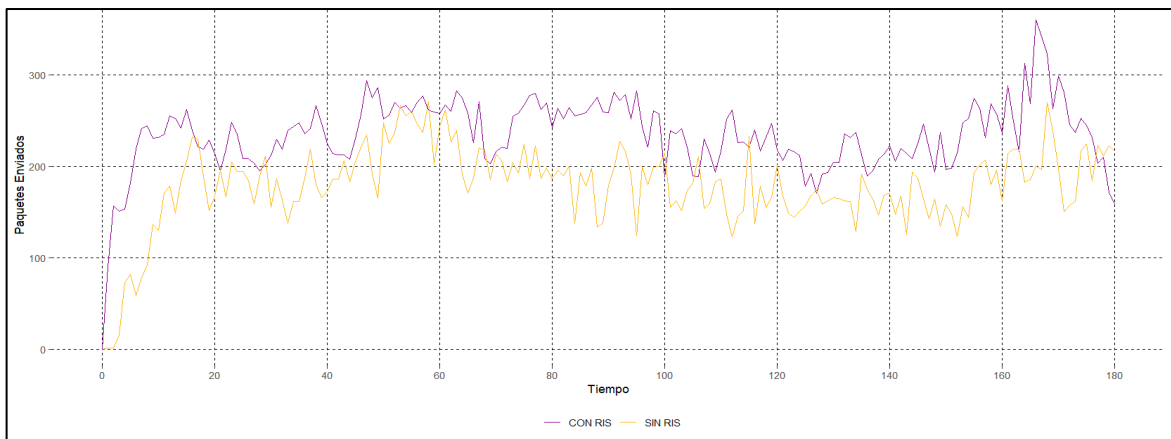


Figura 61: Comparativa del envío de datos de audio y video con RIS y sin RIS aplicado en un curso (15m)
(Autores-RStudio)

4.5.4.1 Prueba de Wilcoxon

El resultado del valor de $p\text{-value} = 0.000$, siendo este menor a 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se mantiene la hipótesis alternativa, ya que las distribuciones son diferentes.

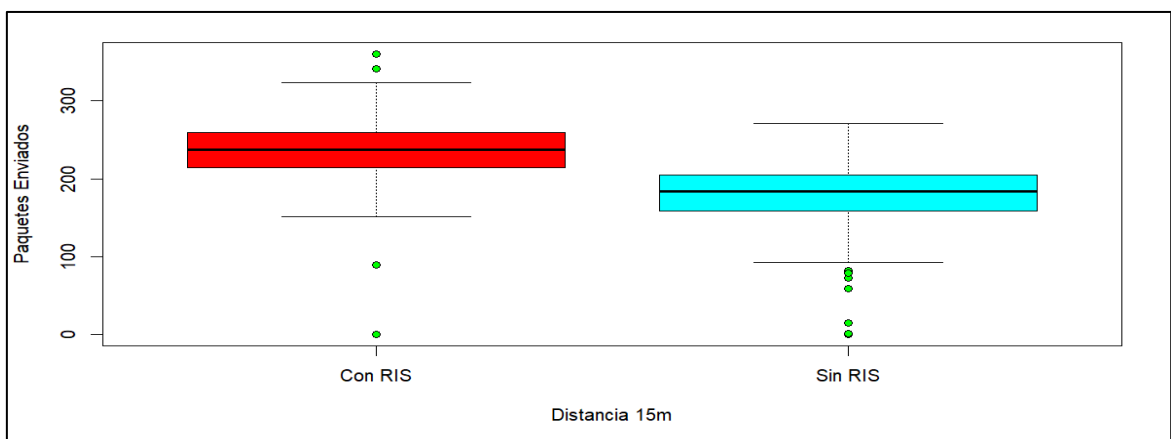


Figura 62: Diagrama de cajas de la comparación del envío de datos de audio y video de un curso
(Autores-RStudio)

En la Fig. 62, Se observa en ambos casos que existen valores atípicos, los cuales representan una variabilidad, en el caso de los datos con la antena RIS existen pocos valores atípicos, eso quiere decir que no tuvo muchas interrupciones en el envío de datos de audio y video, en comparación con los datos obtenidos en las pruebas sin la antena RIS en la cual existen más valores atípicos por lo que se asume que existió más interrupciones.

4.5.4.2 Coeficiente de variación en el envío de datos de audio y video en un curso

En la Tabla 11. se detallan los diferentes valores tanto de la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación para ambos casos.

Tabla 11:Valores estadísticos con respecto al envío de audio y video (curso)

	Tiempo de envío (s)	Media Aritmética	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Con RIS	180	234.76	48.00	20.86%
Sin RIS	180	179.07	84.63	50.33%

En la Fig.63. se muestra dos histogramas los cuales representan el coeficiente de variación:

- El color celeste representa el envío de datos con la antena RIS, tiene una media general de 234.76, una desviación estándar de 48 y un coeficiente de variación del 20.86%.
- El color rojo representa el envío de datos sin la antena RIS, la cual tiene una media general de 179.07, una desviación estándar de 84.63 y un coeficiente de variación del 50.33%.

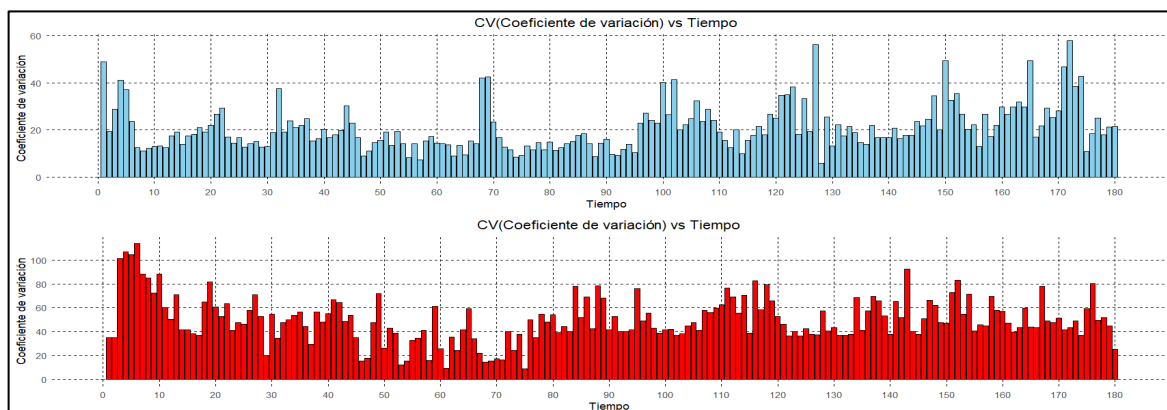


Figura 63:Coeficiente de variación del envío de datos de audio y video en un curso (Con RIS - Sin RIS) (Autores-RStudio)

En la Fig.64, se presenta la comparativa de ambos casos con respecto al coeficiente de variación, con la superficie RIS (celeste) es notablemente menor que el coeficiente de

variación sin la superficie RIS (rojo), por lo que se concluye que los datos con la antena RIS son más consistentes y tienen menos variabilidad en comparación con los datos sin la antena RIS.

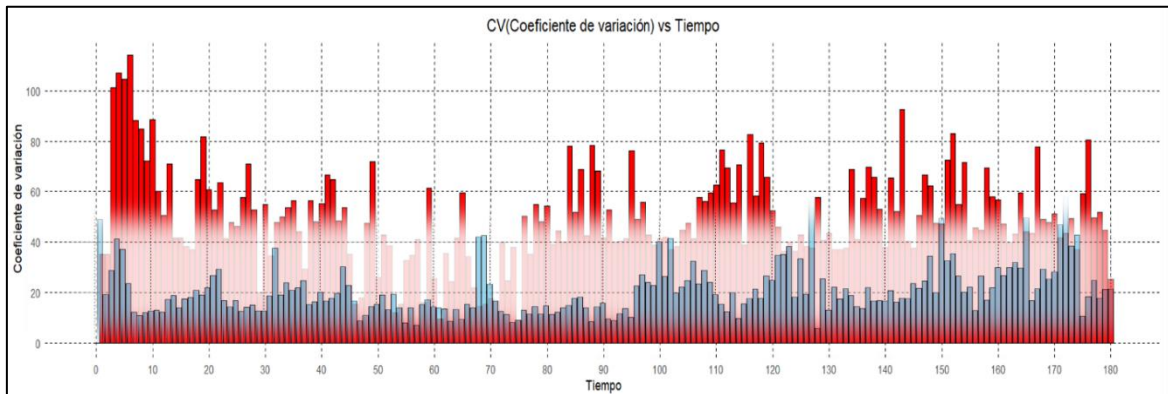


Figura 64: Comparación del coeficiente de variación para ambos casos (curso)
(Autores-RStudio)

4.6 Prueba de normalidad entre el reflector perfecto y la superficie RIS (25cm)

En la Fig. 65. Se observan los valores obtenidos con el reflector perfecto (rojo) y con la antena RIS (azul), el reflector perfecto presenta unos picos más pronunciados por encima de los -10dB, lo cual significa que no se encuentra acoplada y esto se debe a que la energía se está reflejando de vuelta a la fuente, mientras que con RIS esta energía se mantiene por debajo de los -10dB por lo que se encuentra acoplada y su energía está siendo radiada.

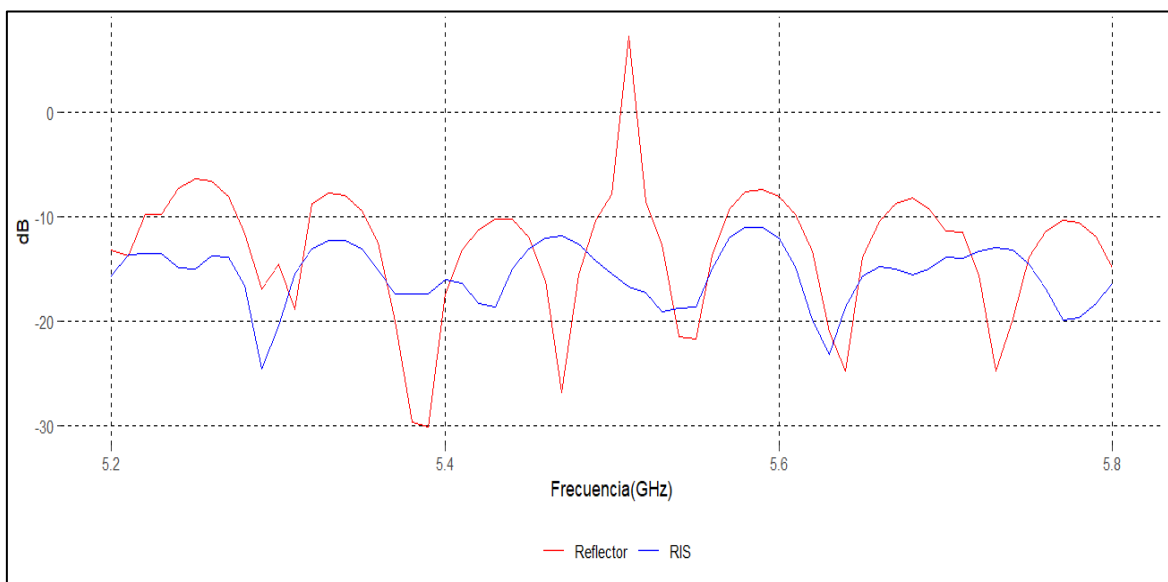


Figura 65: Comparativa de los parámetros (S11) entre un reflector y RIS a 25cm
(Autores-RStudio)

Se realiza una prueba de normalidad con el test de Kolmogorov-Smirnov, para lo cual se utilizaron 61 datos, dando un valor de p-value = 0.001 para el reflector perfecto, menor a 0.05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y un p-value = 0.092 para la antena RIS mayor a 0.05 por lo que se acepta la hipótesis nula ya que sigue una distribución normal. Con los

valores obtenidos, se debe aplicar una prueba no paramétrica para comparar las medias de ambos casos.

4.6.1 Prueba de Wilcoxon

La obtención del resultado del valor de $p\text{-value} = 0.000$, siendo este menor a 0.05 , se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, ya que existe una diferencia significativa entre los datos obtenidos con el reflector perfecto y los obtenidos con la RIS.

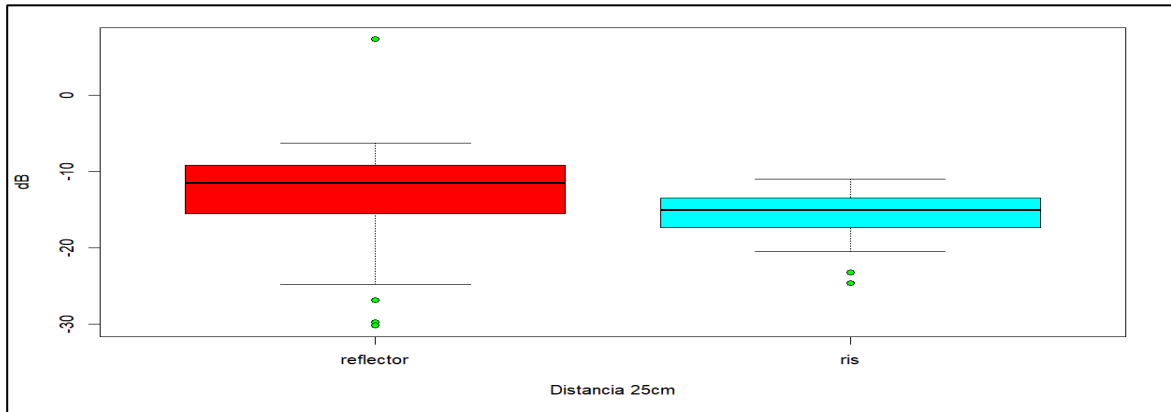


Figura 66: Diagrama de cajas de la comparativa de los parámetros S_{11} (reflector perfecto vs RIS) a 25cm (Autores-RStudio)

La Fig.66. Presenta un diagrama de cajas, se observa que sus medias son diferentes, en donde también existen valores atípicos, de los cuales se nota más presencia en el reflector concluyendo que es más sensible a ciertos factores externos, por otro lado, los valores atípicos de la RIS son menores indicando que tiene una mejor distribución de datos y estabilidad.

4.7 Prueba de normalidad entre el reflector perfecto y la superficie RIS (50cm)

La Fig.67. muestra una similitud respecto a la Fig.65, destacando presencia de picos por encima de los -10dB en el reflector perfecto dando a entender que se encuentra desacoplada, mientras que la RIS mantiene su acoplamiento ofreciendo un mejor rendimiento y eficiencia de la antena.

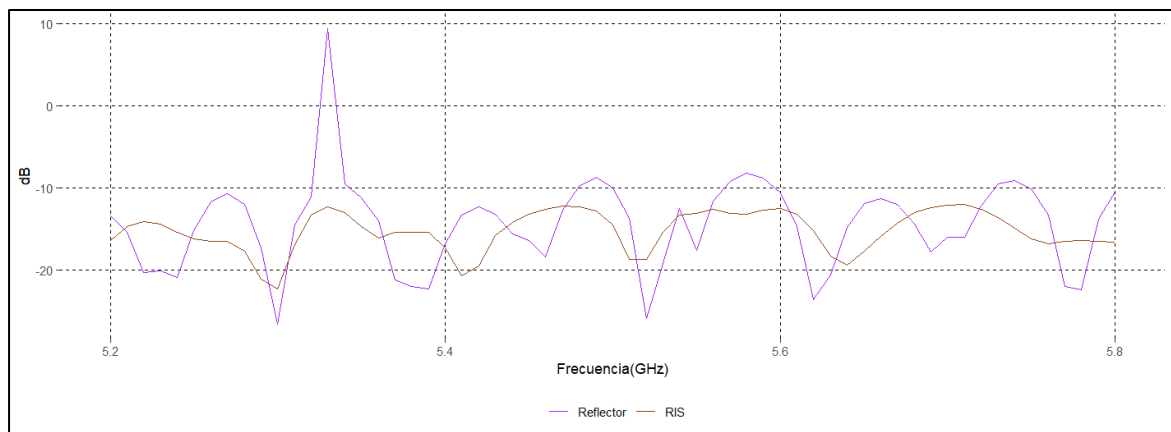


Figura 67: Comparativa de los parámetros (S_{11}) entre un reflector y RIS a 50cm (Autores-RStudio)

La prueba de normalidad que se realizó fue la de Kolmogorov-Smirnov, la cual nos da un valor de $p\text{-value} = 0.030$ para el reflector perfecto menor a 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula, y un $p\text{-value} = 0.017$ para la antena RIS donde así mismo se rechaza la hipótesis nula. Por ello se debe aplicar una prueba no paramétrica ya que ambas no siguen una distribución normal.

4.7.1 Prueba de Wilcoxon

El resultado es de $p\text{-value} = 0.083$, siendo este mayor a 0.05, por lo que se acepta hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, esto debido a que no existe una diferencia significativa entre los datos obtenidos con el reflector perfecto y la RIS.

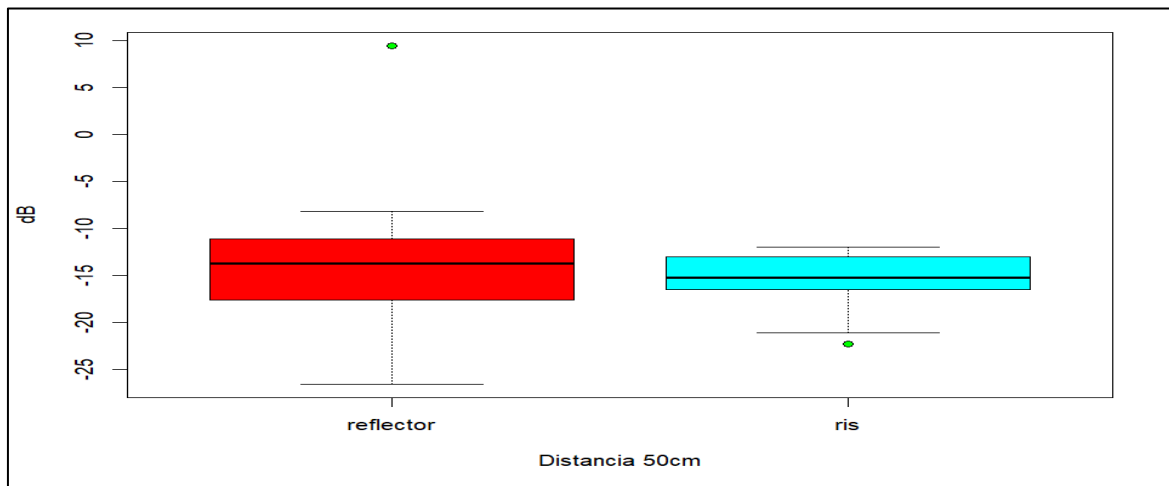


Figura 68: Diagrama de cajas de la comparativa de los parámetros S11 (reflector perfecto vs RIS) a 50cm (Autores-RStudio)

La Fig.68, muestra un diagrama de cajas, en donde se observa que la mayoría de los datos se encuentran dentro de los límites normales, mientras que solo hay un punto que se aleja significativamente de la tendencia general del conjunto de datos en ambos casos. En el caso del reflector ese valor atípico representa un pequeño desacople y para la RIS ese valor atípico no se encuentra dentro de la distribución obtenida.

5. CAPÍTULO V

5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1.1 Conclusiones

- En el presente trabajo de investigación se exploró de manera efectiva el estado del arte de las superficies inteligentes reconfigurables (RIS) pasivas en ambientes interiores, a través de la revisión detallada de la literatura y la investigación empírica, enfocadas a estructuras que ofrezcan ventajas en términos de rendimiento, proporcionando una guía valiosa para el diseño y la implementación eficaz de la RIS.
- Se ha logrado la simulación de una superficie RIS en la banda de 5GHz, mediante el uso de la teoría de Floquet y condiciones de borde periódicas, puesto que permiten prever y analizar el comportamiento de la antena, identificando las características de propagación y radiación de la estructura, sumado al uso de un alimentador de bocina con alta directividad (19dBi), el cual dirige de manera eficaz la energía radiada en un entorno simulado y contribuye de manera significativa la capacidad de la antena RIS para manipular las ondas electromagnéticas respecto a las diferentes distancias y ángulos de giros.
- Se ha implementado de manera favorable el alimentador de bocina y la superficie RIS que consta de 1600 celdas unitarias con forma de resonadores elípticos, mediante técnicas de ingeniería (corte láser). Para corroborar los resultados simulados frente a los resultados medidos se realizaron pruebas de forma empírica, las cuales muestran una correspondencia cercana, proponiendo que el modelo simulado es una representación próxima del comportamiento real de la RIS en varios parámetros que describen su capacidad y rendimiento.
- Se ha validado el funcionamiento de la superficie RIS mediante el envío de datos de audio y video, ya que se observó una mejora significativa en la potencia de la señal recibida al apuntar primero la bocina hacia la RIS en comparación con apuntarla hacia el espacio libre. Esto confirma la capacidad de la RIS para reflejar y redirigir la señal hacia el destino deseado, sin embargo, el impacto en el rendimiento del envío de paquetes, como se observó a través del análisis de tráfico de red con Wireshark, fue moderado. Esto sugiere que otros factores, como la interferencia o el ruido, pueden afectar la calidad y la consistencia de la comunicación inalámbrica.

5.1.2 Recomendaciones

Basándose en los hallazgos del proyecto de investigación se recomienda:

- Considerar el número de celdas unitaria empleadas en la superficie RIS para su optimización, ya que esto afecta al rendimiento y funcionamiento, debido a que si se propone una RIS con un número excesivo de celdas se aumenta la complejidad del sistema incluso generando interferencias entre ellas y aumentando los costos de producción, por otra parte, un número limitado de celdas provoca una cobertura restringida en todas las direcciones disminuyendo la eficacia y el rendimiento de la antena.
- Para elegir los materiales en el diseño de la antena RIS, es importante realizar simulaciones y pruebas para evaluar cómo afectan en condiciones reales de operación, ya que, se debe procurar minimizar las pérdidas y maximizar la eficiencia en el caso del sustrato, además de, garantizar una buena transmisión y recepción de señales en el caso de estructuras metálicas, considerando factores como el costo y los requisitos de fabricación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. M. Amri, N. M. Tran, and K. W. Choi, “Reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications: Adaptive beamforming and experimental validations,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 147442–147457, 2021.
- [2] X. Pei *et al.*, “RIS-Aided Wireless Communications: Prototyping, Adaptive Beamforming, and Indoor/Outdoor Field Trials,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 12, pp. 8627–8640, Dec. 2021.
- [3] B. Gao *et al.*, “Propagation Characteristics of RIS-assisted Wireless Channels in Corridors: Measurements and Analysis,” *2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China, ICCIC 2022*, pp. 550–554, 2022.
- [4] W. Tang *et al.*, “Wireless Communications with Reconfigurable Intelligent Surface: Path Loss Modeling and Experimental Measurement,” *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 20, no. 1, pp. 421–439, Jan. 2021.
- [5] M. P. Herrera Herrera, “Redes 6G empoderadas por superficies inteligentes reconfigurables : simulación de comunicaciones inalámbricas asistidas por superficies inteligentes reconfigurables con errores de fase.,” 2022.
- [6] J. A. Guajardo Ibarra, “Modelado del desvanecimiento espacial de pequeña escala en entornos interiores a 28 GHz,” 2021.
- [7] M. A. Elmoallamy, H. Zhang, L. Song, K. G. Seddik, Z. Han, and G. Y. Li, “Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities,” *IEEE Trans Cogn Commun Netw*, vol. 6, no. 3, pp. 990–1002, Sep. 2020.
- [8] K. M. Faisal and W. Choi, “Machine Learning Approaches for Reconfigurable Intelligent Surfaces: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 27343–27367, 2022.
- [9] M. Jian *et al.*, “Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Overview of hardware designs, channel models, and estimation techniques,” *Intelligent and Converged Networks*, vol. 3, no. 1, pp. 1–32, Mar. 2022.
- [10] J. Gutiérrez Rodríguez, “SUPERFICIES INTELIGENTES REFLECTORAS PASIVAS PARA COBERTURA DE SERVICIOS MULTICAST EN ONDAS MILIMÉTRICAS,” Mar. 2024.
- [11] K. Stylianopoulos and G. C. Alexandropoulos, “Online RIS Configuration Learning for Arbitrary Large Numbers of 1-Bit Phase Resolution Elements,” *IEEE Workshop*

- on *Signal Processing Advances in Wireless Communications, SPAWC*, vol. 2022-July, 2022.
- [12] K. Zhi, C. Pan, H. Ren, K. K. Chai, and M. ElKashlan, “Active RIS Versus Passive RIS: Which is Superior With the Same Power Budget?,” *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 5, pp. 1150–1154, May 2022.
- [13] J. M. Torres, Á. Pinto-Mangones, M. R. Macea A, N. A. Pérez-García, and L. M. Rujano, “Modelo para la estimación de las pérdidas de propagación en redes WLAN operando en 2,4 ghz y 5,8 ghz, para ambientes interiores de edificios comerciales,” *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 20, no. 78, pp. 42–53, 2016.
- [14] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. S. Alouini, and R. Zhang, “Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753–116773, 2019.
- [15] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You, and R. Zhang, “Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 5, pp. 3313–3351, May 2021.
- [16] R. A. Tasci, F. Kilinc, E. Basar, and G. C. Alexandropoulos, “A New RIS Architecture With a Single Power Amplifier: Energy Efficiency and Error Performance Analysis,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 44804–44815, 2022.
- [17] C. DE Electrónica Y Telecomunicaciones, J. Carlos González Cevallos, and C. Ramiro Peñafiel Ojeda Riobamba -Ecuador, “Diseño de una metasuperficie usando la teoría de modos característicos para reducir el radar Cross Section,” Apr. 2022.
- [18] N. S. Perovic, M. Di Renzo, and M. F. Flanagan, “Channel Capacity Optimization Using Reconfigurable Intelligent Surfaces in Indoor mmWave Environments,” *IEEE International Conference on Communications*, vol. 2020-June, Jun. 2020.
- [19] I. E. Electrónica Y Redes De Información José Luis Monteros Mejía, “Diseño de un sistema de video-vigilancia inalámbrico para la ciudad de Cayambe,” May 2015.
- [20] Y. Zhao, J. Zhao, W. Zhai, S. Sun, D. Niyato, and K. Y. Lam, “A Survey of 6G Wireless Communications: Emerging Technologies,” *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1363 AISC, pp. 150–170, 2021.
- [21] S. A. Llanos Yáñez, “Gestión del espectro radioeléctrico en Ecuador: nueva modalidad para radiodifusión y televisión abierta,” 2013.
- [22] O. Ur-Rehman and N. Zivic, “Signals and Communication Technology,” *Signals and Communication*, pp. 7–21, 2019.

- [23] Varios Autores., “Antenas.”.
- [24] J. Luque Ordóñez, “Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico,” *Manual formativo de ACTA*, ISSN 1888-6051, N^o. 62, 2012, págs. 17-31, no. 62, pp. 17–31, 2012.
- [25] G. M. Callejas, “Teoría de comunicaciones: La reflexión y refracción de ondas,” *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan*, vol. 5, no. 9, Feb. 2017.
- [26] G. A. Tama Franco, “Los Metamateriales,” 2014.
- [27] J. M. González Arbesú, E. Úbeda Farré, and J. Romeu Robert, “Metamateriales en microondas y antenas,” *Buran*, no. 20, pp. 32–38, 2019.
- [28] D. De Electrónica, Y. Electromagnetismo, T. Doctoral Presentada Por José, M. Algarín, and G. Sevilla, “UNIVERSIDAD DE SEVILLA FACULTAD DE FÍSICA POR RESONANCIA MAGNÉTICA,” 2014.
- [29] J. Bonastre Muñoz, “Propagación de ondas electromagnéticas”.
- [30] C. R. Peñafiel Ojeda, “Design of Multi-feed UWB Antennas using the Theory of Characteristic Modes,” Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2021.
- [31] S. R. Barone, M. A. Narcowich, and F. J. Narcowich, “Floquet theory and applications,” *Phys Rev A (Coll Park)*, vol. 15, no. 3, p. 1109, Mar. 1977.
- [32] J. Jiménez and M. José, “Teoría de Floquet para ecuaciones en diferencias lineales de segundo orden y homogéas,” 2018.
- [33] C. Mateo de la Fuente, “Sistemas diferenciales lineales con coeficientes periódicos y estabilidad de soluciones periódicas,” 2022.
- [34] P. por and E. L. Luis Rafae Torres Flórez, “Aproximación a la teoría de antenas y síntesis de Arrays.” Universidad Tecnológica de Pereira, 2019.
- [35] M. Di Renzo *et al.*, “Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 798–807, 2020.
- [36] R. Xiong, X. Dong, T. Mi, and R. caiming Qiu, “RIS-aided Wireless Communication with 1-bit Discrete Optimization for Signal Enhancement,” Sep. 2022.
- [37] Y. Liu *et al.*, “Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577, Jul. 2021.

- [38] H. Mosallaei and K. Sarabandi, "Antenna miniaturization and bandwidth enhancement using a reactive impedance substrate," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 52, no. 9, pp. 2403–2414, Sep. 2004.
- [39] J. M. Huidobro, "Antenas de telecomunicaciones," 2013.
- [40] A. A. Kishk, "Fundamentals of Antennas".
- [41] S. K. Budarapu, M. S. Sunder, and B. Ramakrishna, "Performance Enhancement of Patch Antenna Using RIS and Metamaterial Superstrate for Wireless Applications," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 130, pp. 95–105, 2023.
- [42] K. Buell, D. Cruickshank, H. Mosallaei, and K. Sarabandi, "Patch antenna over RIS substrate: A novel miniaturized wideband planar antenna design," *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, vol. 4, pp. 269–272, 2003.
- [43] D. Antonio and S. Haro, "Diseño de antenas directivas de banda ancha a frecuencias de microondas," May 2017.
- [44] D. Y. Análisis De Arreglo Lineal De Antenas Dipolo, A. Carolina Ramírez Cleves, and E. Javier Mantilla Bautista, "I+D Revista de Investigaciones ISSN 22561676 Volumen X Número X Año XX mes-mes 2014 p.p Artículo de Investigación Design and Analysis of Linear Dipole Antenna Arrangement".
- [45] S. C. Pérez *et al.*, "Estudio Experimental del Comportamiento de Métricas de QoS y QoE de Streamings de Video Multicast IPTV," *Evento: XXVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC)*, pp. 568–577, 2022.
- [46] F. J. Suárez, A. Universidad, and D. E. Oviedo, "Tecnologías de Streaming," 2010.
- [47] E. Especial Profesor *et al.*, "MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN DE ENFOQUE EXPERIMENTAL Asignatura: Métodos de investigación en Curso: 3º Educación Especial".
- [48] M. E. Cortés, C. Miriam, and I. León, "UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARMEN Colección Material Didáctico 10 Generalidades sobre Metodología de la Investigación".
- [49] J. Cárdenas, "Investigación cuantitativa," 2018.
- [50] I. Daryl Ortega González *et al.*, "Diseño de antena de bocina corrugada a 3 GHz para uso en cámaras anecoicas.," *Telemática*, vol. 16, no. 3, pp. 1–14, 2017.
- [51] V. W. Berger and Y. Zhou, "Kolmogorov–Smirnov Test: Overview," *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, Sep. 2014, doi: 10.1002/9781118445112.STAT06558.

- [52] P. E. McKight and J. Najab, “Kruskal-Wallis Test,” *The Corsini Encyclopedia of Psychology*, pp. 1–1, Jan. 2010, doi: 10.1002/9780470479216.CORPSY0491.
- [53] Z. Hanusz, J. Tarasinska, and W. Zielinski, “Shapiro–Wilk Test with Known Mean,” *REVSTAT-Statistical Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 89-100–89–100, Feb. 2016, doi: 10.57805/REVSTAT.V14I1.180.
- [54] T. K. Kim, “T test as a parametric statistic,” *Korean J Anesthesiol*, vol. 68, no. 6, p. 540, Dec. 2015, doi: 10.4097/KJAE.2015.68.6.540.
- [55] J. Cuzick, “A wilcoxon-type test for trend,” vol. 4, no. 1, pp. 87–90, Jan. 2010.
- [56] D. A. Santillán Haro, “Diseño de lentes metálicas usando la teoría de modos característicos,” p. 1, 2020.

7. ANEXOS

Anexo 1: Alimentador - Dipolo para la banda de 5.2GHz a 5.8GHz

En este apartado se detalla el diseño de una antena dipolo que servirá como alimentador para una antena RIS, en este caso se toma un dipolo de $\frac{\lambda}{2}$, es importante destacar que a esa longitud de onda el uso de las expresiones trigonométricas que rigen la construcción de este tipo de antena se simplifican y además ofrece un diagrama de radiación que se nota más uniforme que otras longitudes en las cuales se diseñan los dipolos, de forma teórica se puede encontrar el valor de sus dimensiones de la siguiente manera:

- **Tipo de dipolo:**

$$Dipolo = \frac{\lambda}{2} \quad (37)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{5.5 \times 10^9} = 54.54 \times 10^{-3} \quad (38)$$

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{54.54 \times 10^{-3}}{2} = 27.27 \times 10^{-3} \quad (39)$$

- **Frecuencia de trabajo:**

$$f = \frac{V_c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{54.54 \times 10^{-3}} = 5.5 \times 10^9 \quad (40)$$

- **Distancia entre ambas:**

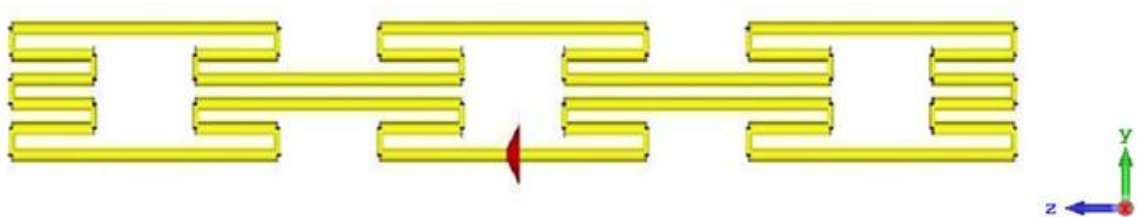
$$d = \frac{L}{200} = \frac{27.27 \times 10^{-3}}{200} = 1.3635 \times 10^{-4} = 0.13635 \times 10^{-3} \quad (41)$$

Tabla 12: Valores de los parámetros para el diseño del dipolo

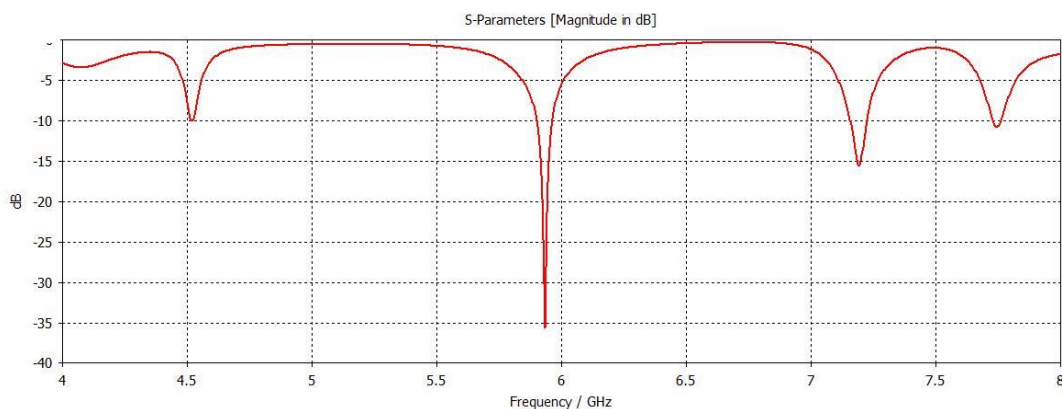
Parámetro	Valor
Longitud de onda	27.27mm
Frecuencia de trabajo	5.5GHz
d(Distancia)	0.13mm
Rango de frecuencias Wifi en 5GHz	5.180GHz < f < 5.825 GHz
Gap	1mm
Radio	0.54

Una vez que se obtienen los valores básicos para la construcción del dipolo Tabla.12 se observa el principio de la ley de Faraday respecto a la inducción electromagnética, con lo cual se realiza un arreglo de dipolos, como se puede ver en la Fig.69 con los valores calculados, de esta manera cuando una corriente eléctrica pase por una de las mitades del arreglo de dipolos crea un campo magnético a su alrededor generando un diagrama de radiación similar a un anillo de ambos lados[44].

En la Fig.70 se puede observar el parámetro de reflexión alimentador en cuestión, del cual se puede observar que la estructura planteada se encuentra acoplada únicamente en un rango limitado de las frecuencias del rango establecido ($S_{11} < -35\text{dB}$) en 5.76GHz.



*Figura 69:Arreglo de antenas dipolo
(Autores-CST Studio/ Versión estudiantil)*



*Figura 70:Coeficiente de reflexión(S_{11}) – Alimentador: Arreglo de dipolos
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)*

Anexo 2: Alimentador-Mixto para la banda de 5.2GHz a 5.8GHz

En este apartado se mostrará un alimentador conformado por una guía de onda rectangular WR159 utilizada anteriormente acompañada de una transición escalonada que termina en un plano de masa circular, el cual se utiliza con la finalidad de aumentar la ganancia de la apertura de la antena cuyo radio es 150mm tal como se observa en la Fig.71 El uso de los escalones entre el plano de masa y la guía de onda rectangular permite que las reflexiones sean las menos posibles, en el uso de escalones la geometría y las dimensiones influyen ya que van cambiando progresivamente a lo largo de la transición y a mayor número de escalones se va aumentando el ancho de banda, lo cual, pero a la vez se hace más difícil su implementación[56].

El tamaño que presenta la apertura ampliada una vez acoplada a la transición es de 29.37mm x 29.37mm (L x L).

La Fig.72 muestra el parámetro S11 simulado del alimentador en cuestión del cual se puede observar que la estructura planteada se encuentra acoplada en el rango de frecuencias planteado ($S_{11} < -17\text{dB}$).

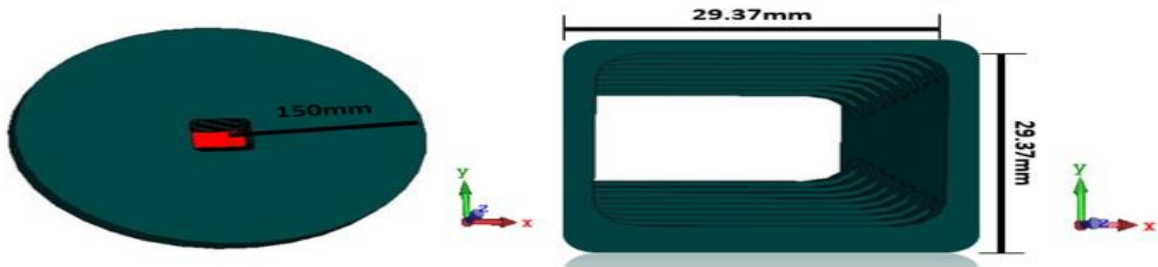


Figura 71:Guía de onda rectangular con transición escalonada y apertura cuadrada (Autores – CST Studio / Versión estudiantil)

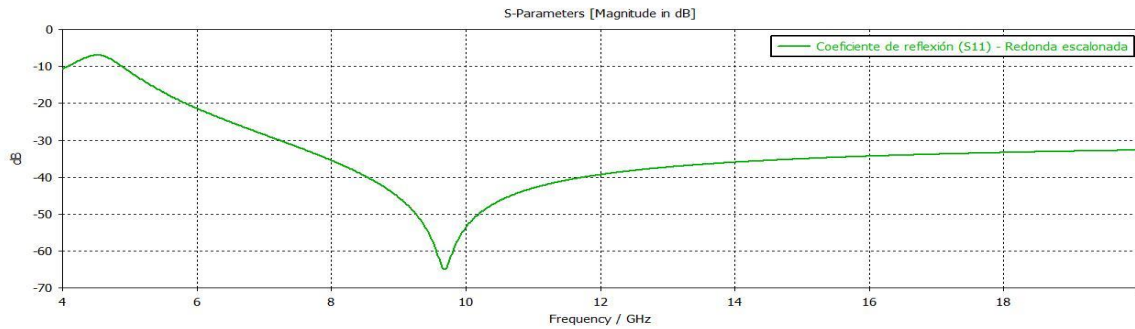


Figura 72:Coeficiente de reflexión (S11)- Alimentador: Mixto Fuente: (Autores CST Studio-Versión estudiantil)

Anexo 4: Análisis del alimentador- Mixto

El diseño del alimentador Mixto(Guía de onda rectangular WR-159 con una transición de guía escalonada que conduce a una apertura cuadrada con plano de masa circular de aluminio) Fig.73, se analiza debido a los aportes que puede generar al proyecto, entre ellos la reducción de las pérdidas de reflexión ya que al conectar secciones con diferentes dimensiones se asegura una muy buena transferencia de energía y una mejora el rendimiento de la antena en términos de directividad y eficiencia de radiación.

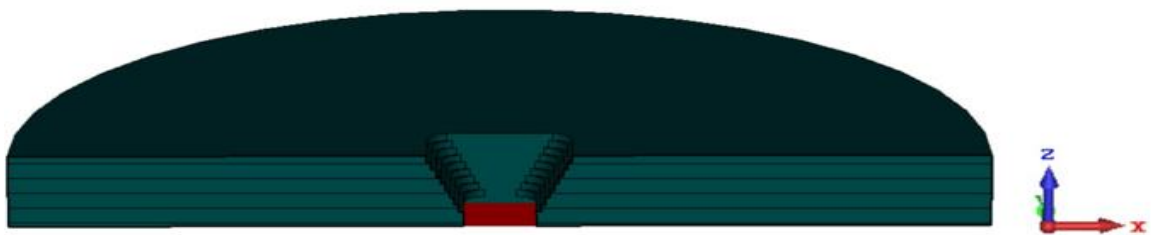


Figura 73:Bocina rectangular acoplada a un plano de masa circular (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

En la Fig.74, se muestra el coeficiente de reflexión (S11) del alimentador mixto, la cual se encuentra adaptada ($S_{11} < -10$ dB) en el rango de frecuencias de interés (5.198GHz – 5.8GHz), aunque la adaptación es ligeramente superior a -10dB puede considerarse aceptable debido a que la desviación es pequeña y está dentro de un rango aceptable para los requisitos específicos planteados.

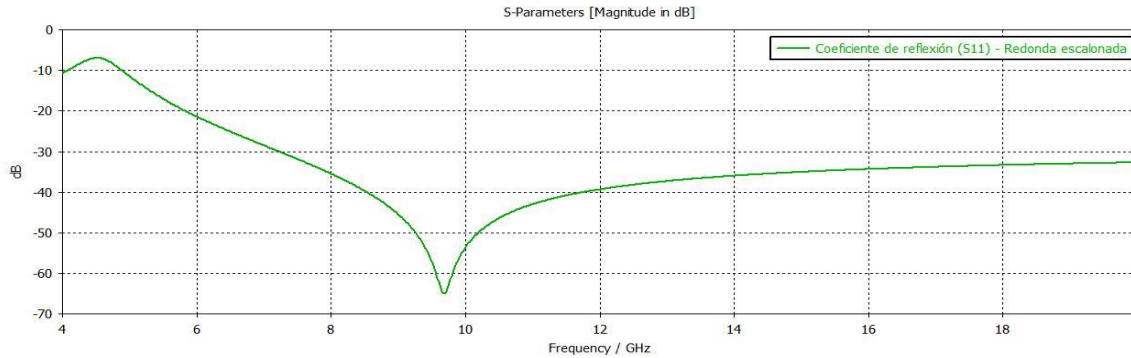


Figura 74: Coeficiente de reflexión (S11) del alimentador mixto a 5.5GHz (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

En la Fig.75, se muestra el diagrama de radiación 3D y el diagrama de radiación Polar, de a) resalta la directividad con un valor 8.521 dBi y una ganancia de 8.526 dBi a la frecuencia de 5.5 GHz. Tomando las consideraciones necesarias en este tipo de antenna se puede decir que, aunque 8.52dB sea una directividad razonable puede no ser suficiente para aplicaciones donde se requieran distancias de transmisión largas. b) Se observa que el ancho angular en esa antenna es amplio con una apertura de 61° lo que usualmente se asocia con una menor directividad, entonces el alimentador radiara más energía en un área más amplia más en lugar de enfocarla sobre una dirección.

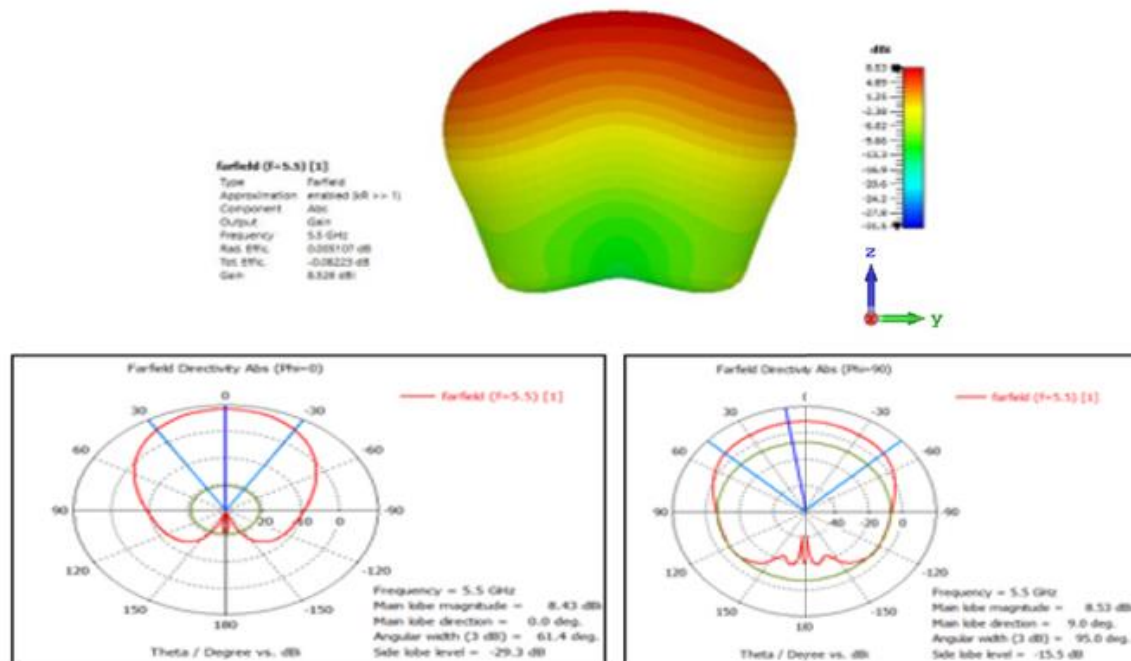


Figura 75: a) Diagrama de radiación, b) Diagrama polar del alimentador mixto (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

La Fig.76, muestra los cortes copolar en el plano E y H, al igual que el corte crosspolar en 45° , en el primer corte la antena irradia la energía de manera más eficiente en la dirección de polarización deseada, a su vez muestra la similitud de los cortes en ambos campos dando a entender que la antena presenta un rendimiento constante, mientras que en el corte de polarización cruzada se observa que suprime de forma eficiente la energía y a su vez presenta direcciones secundarias de radiación, pero con intensidades menores.

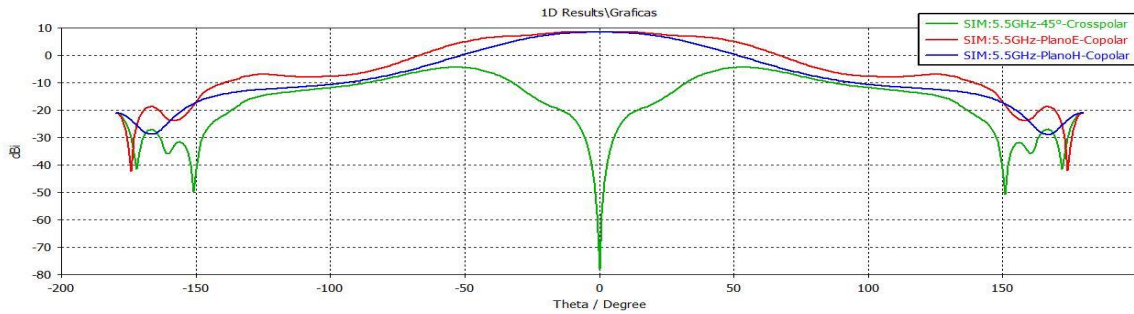


Figura 76: Diagrama de campo lejano del alimentador mixto a 5.5GHz
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

El alimentador mixto presenta una directividad de 8.4dBi a una frecuencia de 5.5GHz Fig.77, lo que indica que la antena tiene cierta capacidad para enfocar la radiación en una dirección específica, además es importante resaltar que el alimentador presenta un alto control de la radiación debido a la transición escalonada y el plano de masa circular elaborados en el diseño.

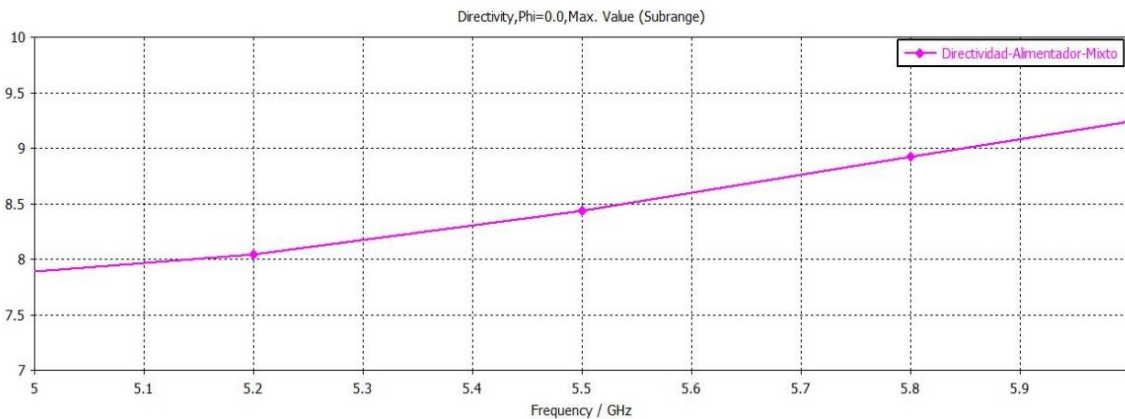


Figura 77: Bocina rectangular acoplada a un plano de masa circular
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

Anexo 5: Análisis del alimentador-Arreglo de dipolos.

El diseño del alimentador en forma de un arreglo de dipolos basado en un el dipolo básico a $\lambda/4$, se elaboró teniendo en cuenta que al ajustar la dirección de los dipolos en un arreglo es posible controlar la directividad del alimentador, para su diseño se realizaron ciertos ajustes en la estructura original, añadiendo múltiples antenas plegadas alrededor del dipolo, generando de esta manera un arreglo de antenas dipolo de tipo rectangular Fig.78, la cual consta de 3 niveles de dipolo colocados verticalmente y separadas por un dipolo extra. En la

Tabla.12 se detallan los valores que se utilizaron para realizar este tipo de antena, considerando que cada sección de la antena corresponde a un valor calculado.

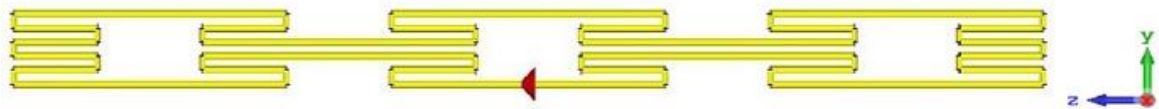


Figura 78:Arreglo de Dipolos a $\lambda/4$
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

La Fig.79, muestra el coeficiente de reflexión de la antena dipolo, de la cual se puede destacar que la frecuencia de resonancia no corresponde al rango de frecuencias establecido (5.192 GHz – 5.8 GHz) ya que únicamente esta acoplada ($S_{11} < -10\text{dB}$) en 5.9 GHz, a su vez el ancho de banda es muy limitado en comparación a otros alimentadores.

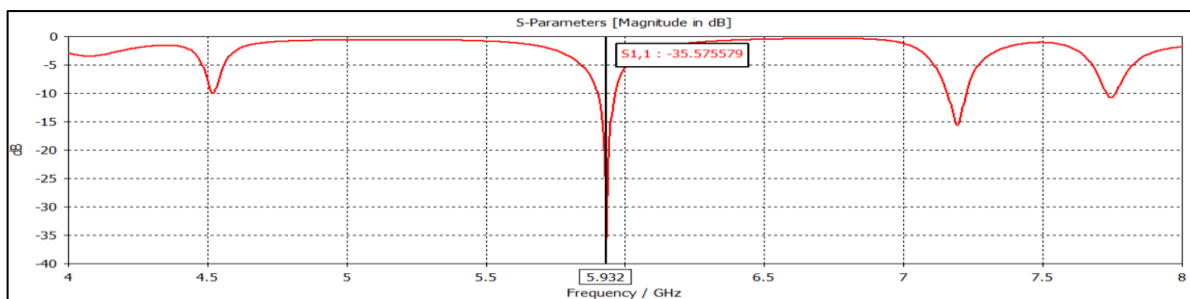


Figura 79:Coeficiente de reflexión de un arreglo de dipolos a 5.5GHz
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

En la Fig.80, a) se observa el diagrama de radiación del cual destaca una formación de anillos en tres hileras generado por la distribución del campo electromagnético del dipolo y el arreglo generado. b) Muestra el diagrama polar el cual tiene un valor de directividad de 3.55 dBi a la frecuencia de 5.5 GHz dando a notar que la antena alcanza una directividad notable considerando que es un dipolo, sin embargo, no cumple con los requisitos planteados.

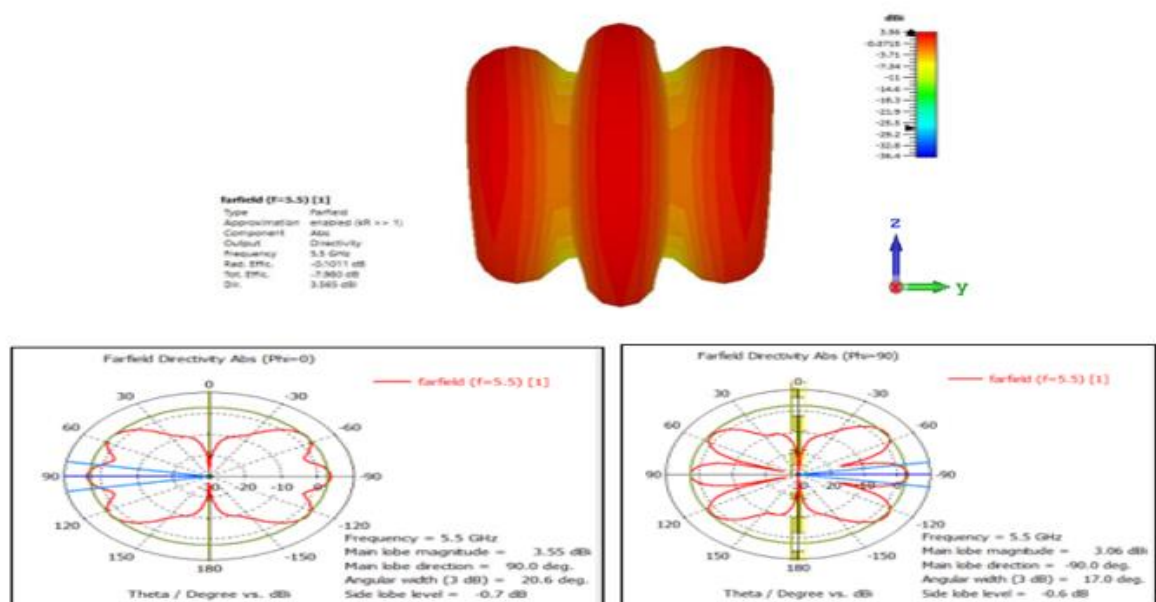


Figura 80:a)Diagrama de radiación b) Diagrama polar del arreglo de dipolos
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

En la Fig. 81, se observa una comparación entre la directividad que ofrece de un dipolo básico vs un arreglo de dipolos generado, del cual se nota una mejora teniendo en cuenta el rango de frecuencia de interés, es importante mencionar que el diseño del arreglo de dipolo se penso en el acoplamiento de elementos ya que esto genera una respuesta mas direccional.

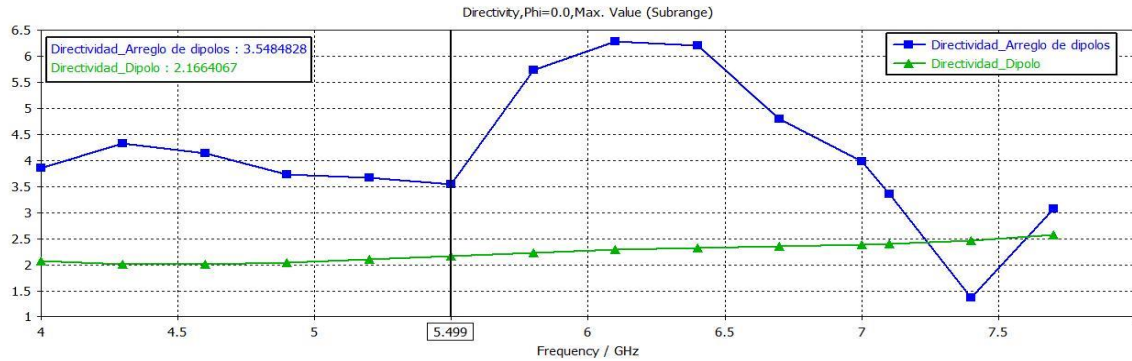


Figura 81: Comparación de directividades de un dipolo normal vs arreglo de dipolos (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

En la Fig.82, se puede observar que la antena tiene una radiación predominante hacia abajo en las polarizaciones del campo E y el campo H con una intensidad baja en sus cortes copolares y a su vez muestra una supresión efectiva de la radiación de la polarización cruzada.

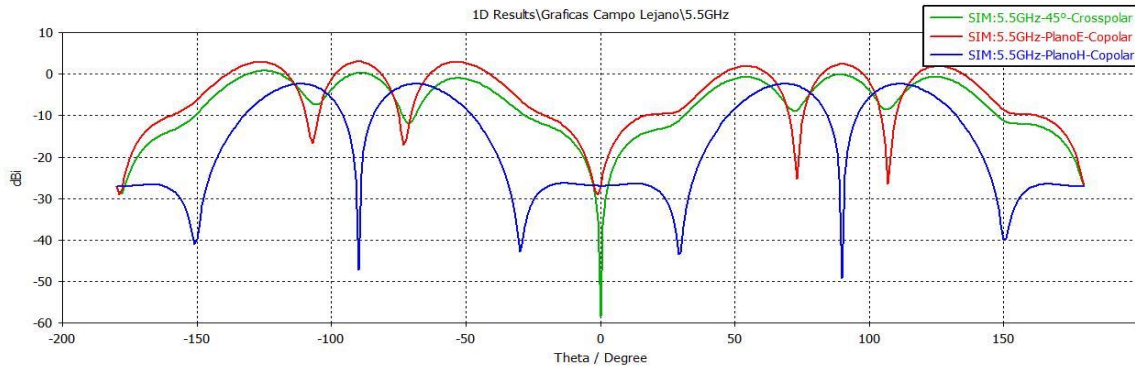


Figura 82: Diagramas de campo lejano de un arreglo de dipolos a 5.5GHz (Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

Anexo 5: Comparativa entre los tres alimentadores

Una vez diseñados los alimentadores en los cuales se tuvo en cuenta las condiciones establecidas previamente, se procede a comparar los resultados obtenidos para definir que alimentador es el adecuado para cumplir el objetivo planteado y pensando en una posterior implementación, en la Fig. 83, se observa una comparativa entre las directividades en el rango de frecuencia de interés (5.192GHz - 5.8GHz) de los 3 alimentadores en simulados, de ellos la antena cuyo valor cumple con uno de los parámetros establecidos en el diseño, es la antena de bocina piramidal debido que su valor de directividad para el rango de frecuencias definidas esta sobre los 18dBi, lo que proporciona un mayor alcance en una dirección específica que los otros alimentadores.

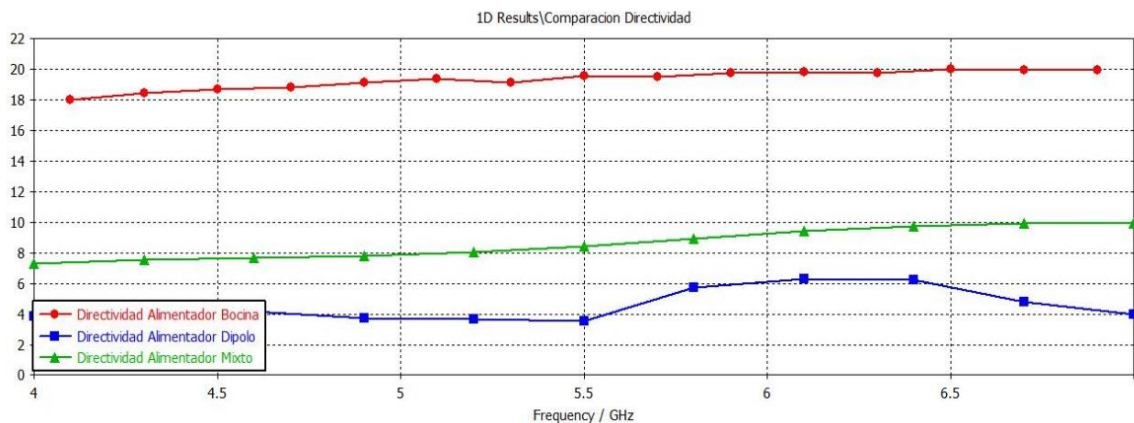


Figura 83: Comparativa entre los coeficientes de reflexión de los alimentadores.
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

Sin embargo, para corroborar que es la adecuada, se procede a analizar el coeficiente de reflexión de los tres alimentadores Fig.84 en el cual, se descarta de contado al alimentador dipolo ya que la frecuencia de resonancia se encuentra fuera del rango de frecuencias de interés (5.192 GHz -5.8GHz) además, presenta un ancho de banda muy estrecho específico para diferentes aplicaciones, sin embargo, los dos alimentadores restantes (Bocina, Mixto) presentan un acoplamiento adecuado ($S_{11} < -10\text{dB}$) y un ancho de banda aceptable del 10%.

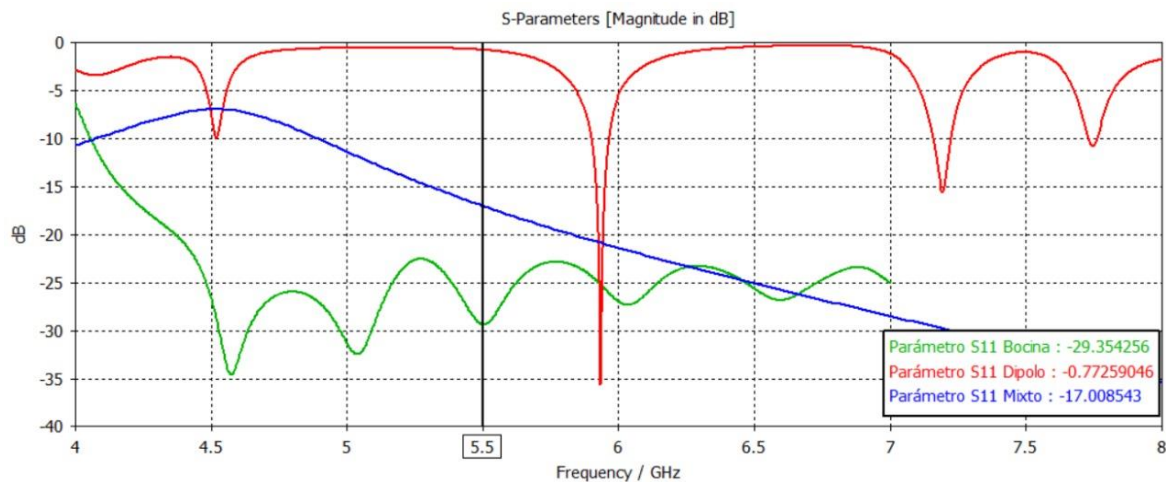


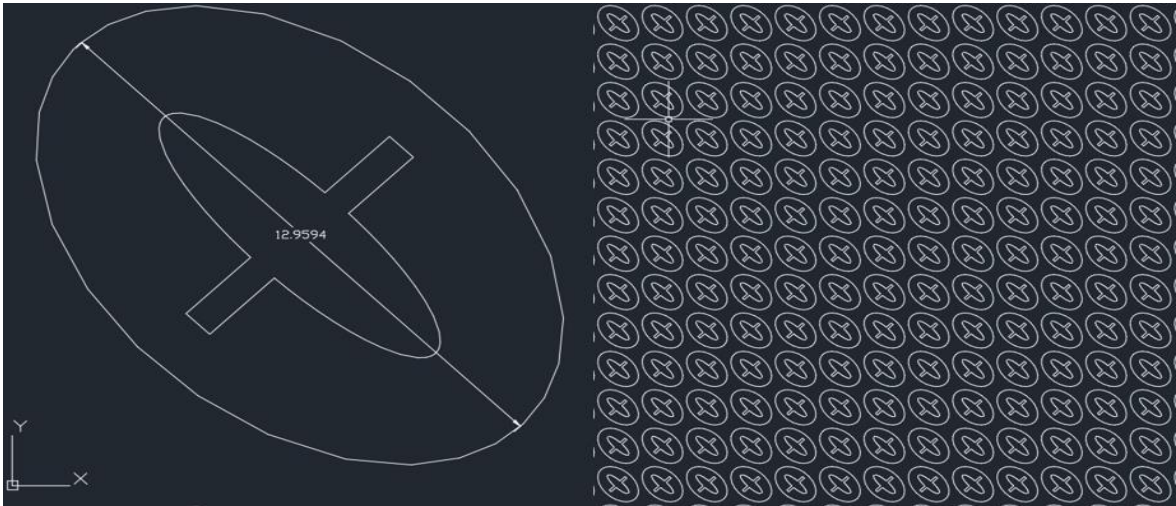
Figura 84: Comparativa entre los coeficientes de reflexión de los alimentadores.
(Autores-CST Studio/Versión estudiantil)

En este caso se decide utilizar la antena de bocina como alimentador por dos razones: la primera debido a que el valor de adaptación de la antena bocina es más bajo que el del alimentador Mixto lo que indica que menos energía se refleja y se transfiere más a la antena y como segunda razón se establece el parámetro de directividad ya que una antena más directiva puede influir más en enfocar la energía en direcciones específicas que este caso es muy útil ya que se requiere un mayor control en la dirección de la radiación.

Anexo 6: Implementación de la antena RIS

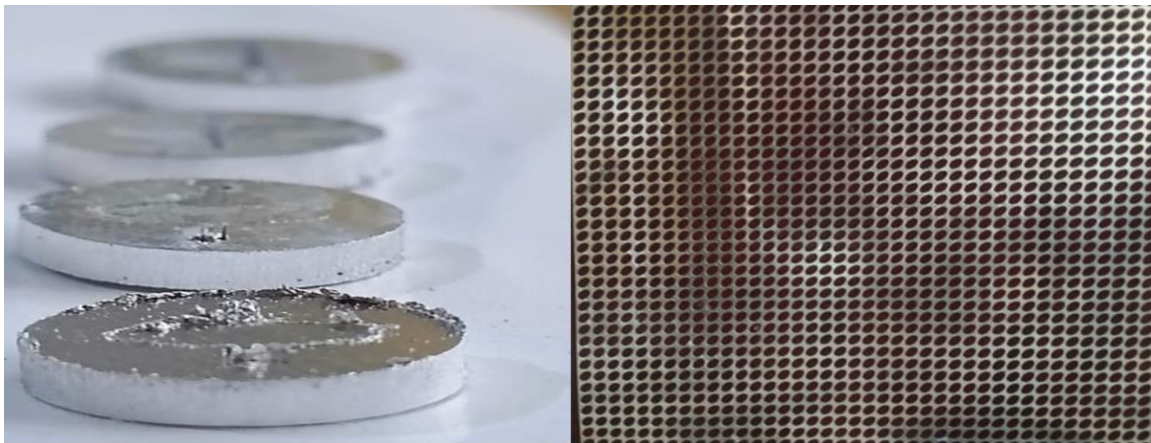
Una vez realizadas las simulaciones que aseguran el funcionamiento de la superficie RIS, se procede a su implementación para realizar pruebas físicas que comprueben su funcionamiento, mediante el siguiente proceso:

1. Exportar el archivo creado en CST Studio al software de AUTOCAD, para ingresarlo en una máquina cortadora laser CNC y generar las celdas unitarias.



*Figura 85: Modelo de la superficie RIS exportado de CST Studio a AutoCAD
(Autores- AutoCAD)*

2. Desmoldar las celdas unitarias del mallado base producto del corte laser para su posterior uso.



*Figura 86: Celdas unitarias desmoldadas y mallado con medidas de diseño
(Autores- AutoCAD)*

3. Cortar el sustrato (FR4) y el plano de masa (Aluminio) según las medidas propuestas.



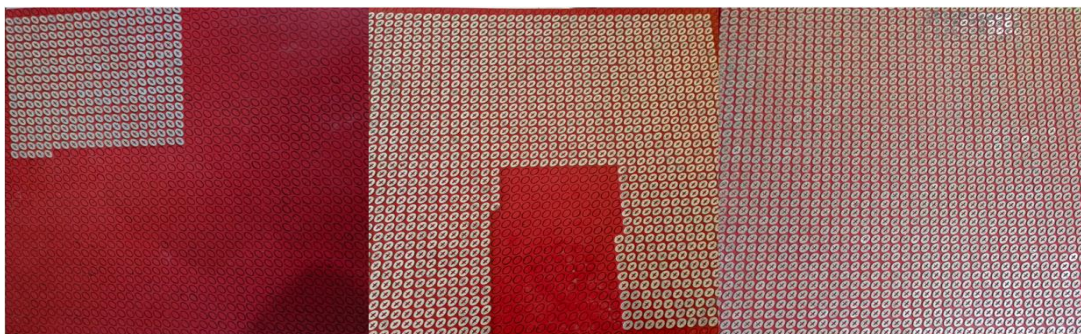
*Figura 87: Sustrato de fibra de vidrio de 1.60mm y base de aluminio de 2mm
(Autores)*

4. Marcar la posición de cada celda unitaria con la ayuda del mallado en el sustrato, teniendo en cuenta los bordes de cada capa, de esta manera aseguramos que la posición de la celda respecto al modelo diseñado conserve sus medidas de espaciado.



*Figura 88: Sustrato marcando la posición de cada celda unitaria con ayuda del mallado
(Autores)*

5. Pulir y pegar cada celda unitaria en lugar marcado, conservando su espaciado y ángulo de inclinación, según el diseño propuesto.



*Figura 89: Proceso de pegado de las celdas unitarias.
(Autores)*

Anexo 7. Gráfica de absorción vs gráfica de coeficiente de reflexión en una RIS implementada.

En la Fig.90 se observa el coeficiente de reflexión de la antena RIS (negro) y el coeficiente de reflexión de la bocina (azul) medidos en el VNA e introducidos al software de Matlab, con estos datos es posible obtener la gráfica de absorción de la superficie RIS de una forma interpretativa, se puede obtener la variación del coeficiente de reflexión, mediante la ecuación;

$$\Delta\Gamma = \Gamma_{Con\ RIS} - \Gamma_{Bocina} \quad (42)$$

La variación es la diferencia de reflexión en cada punto del rango de frecuencias de interés, con estos valores se realiza el cálculo de la absorción en las diferentes frecuencias, mediante la fórmula:

$$Absorción(dB) = -20 * \text{Log}(\Gamma) \quad (43)$$

Cada valor obtenido se construye una gráfica empírica y para verificar si describe la absorción de la superficie RIS se analizan en comparación con el coeficiente de reflexión de la superficie y se nota como se relacionan los cambios que sufren ambas, indicando que los picos de la absorción coinciden con los mínimos en el coeficiente de reflexión, estos picos representa frecuencias donde la superficie RIS absorbe energía de manera más eficiente y coincide con los mínimos ya que es donde la antena refleja menos energía y viceversa.

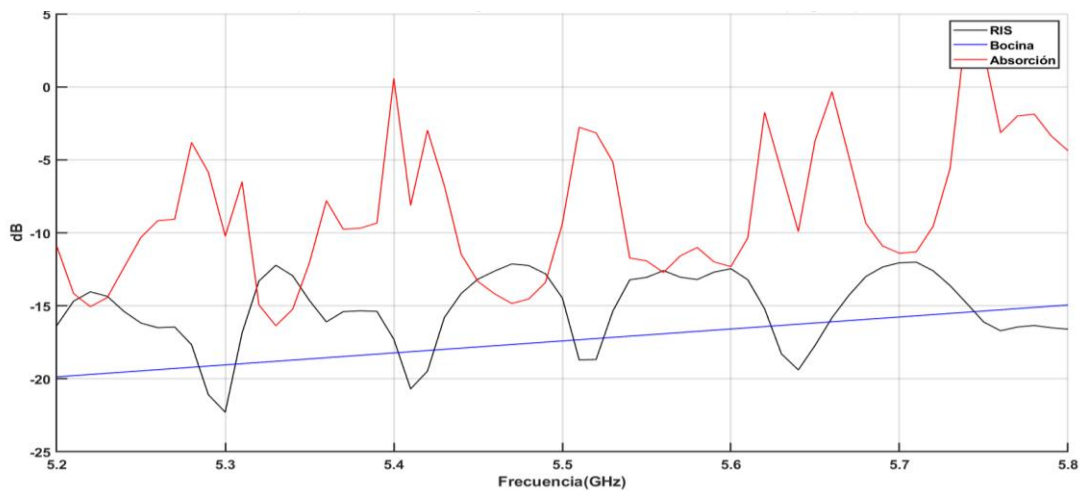
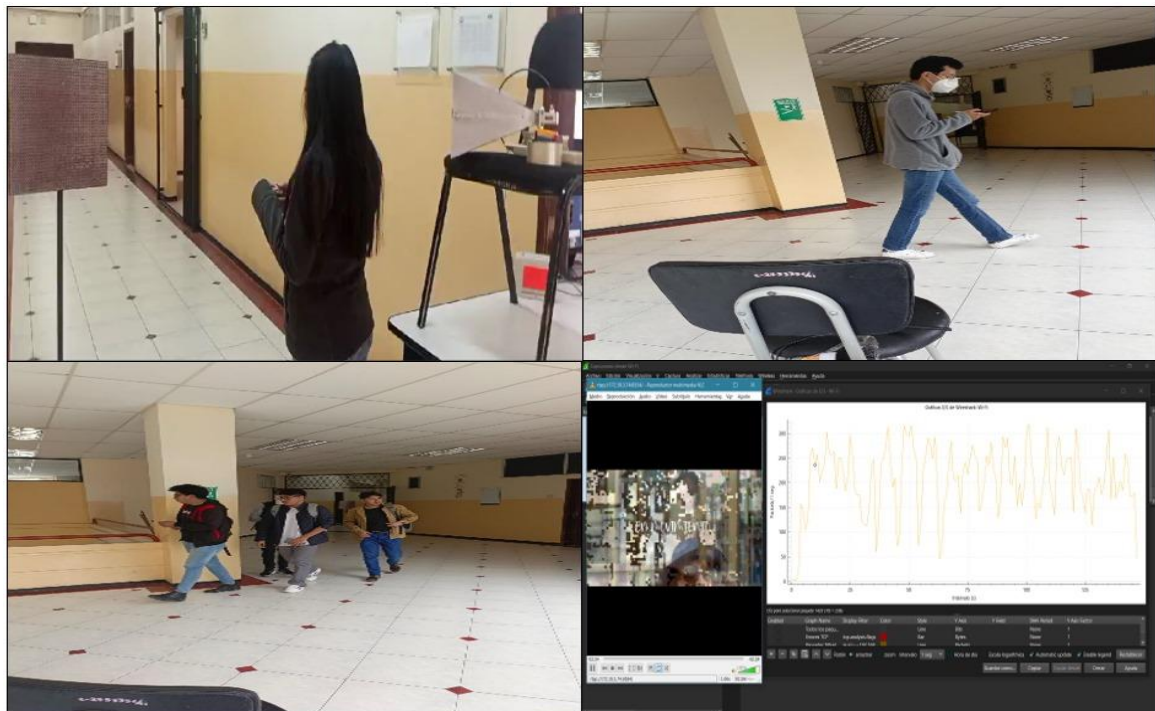


Figura 90: Comparativa entre la gráfica de absorción y el coeficiente de reflexión de la RIS (Autores-Matlab)

Anexo 8. Pruebas realizadas en el pasillo.



Figura 91: Pruebas realizadas con la RIS sin obstáculos
(Autores)



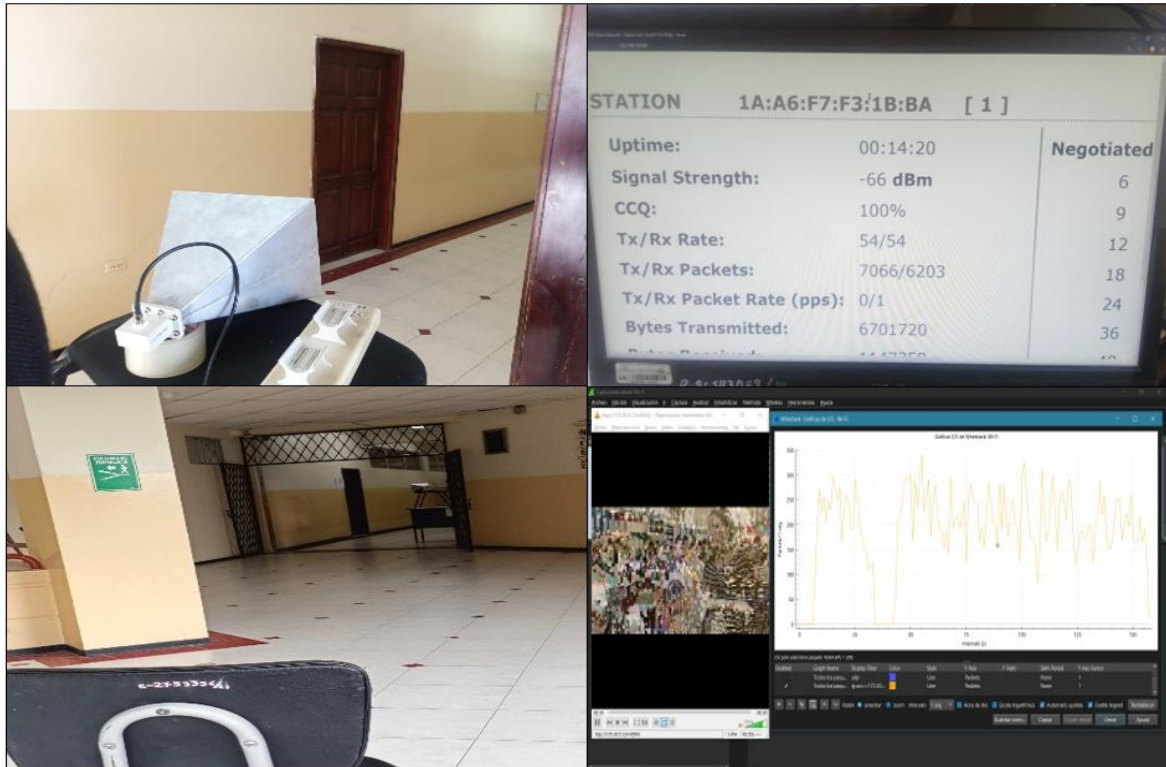


Figura 93: Pruebas realizadas sin la RIS (Autores)

Anexo 9. Pruebas realizadas en el curso.

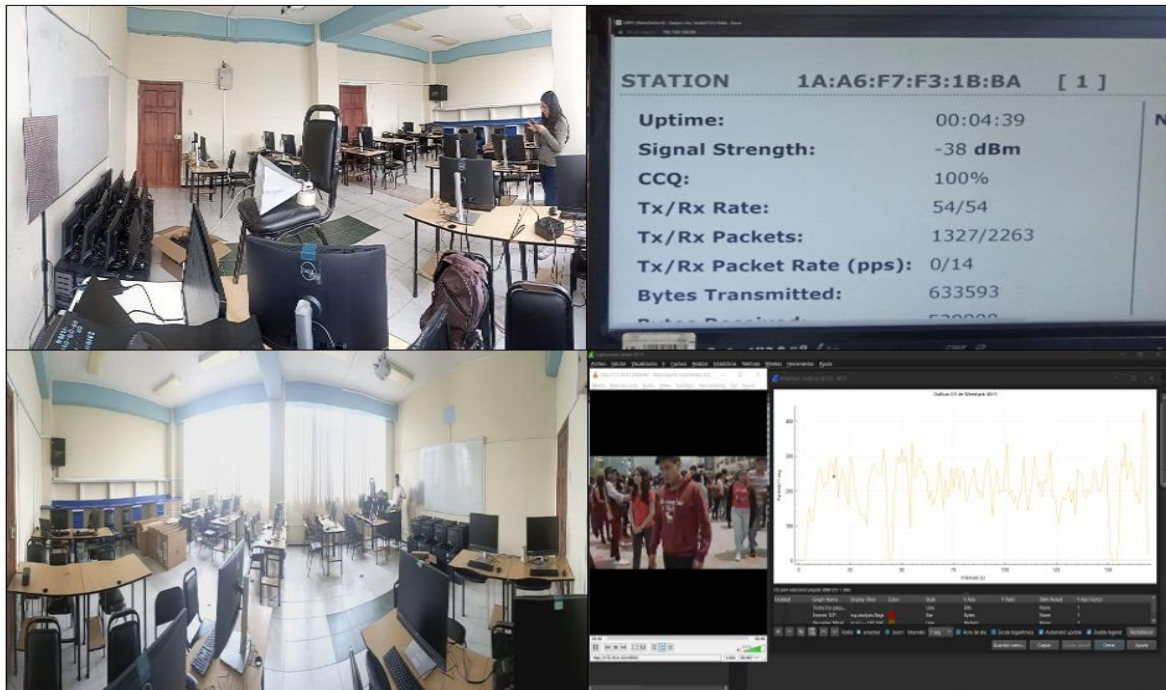


Figura 94: Pruebas realizadas con la RIS (curso) (Autores)

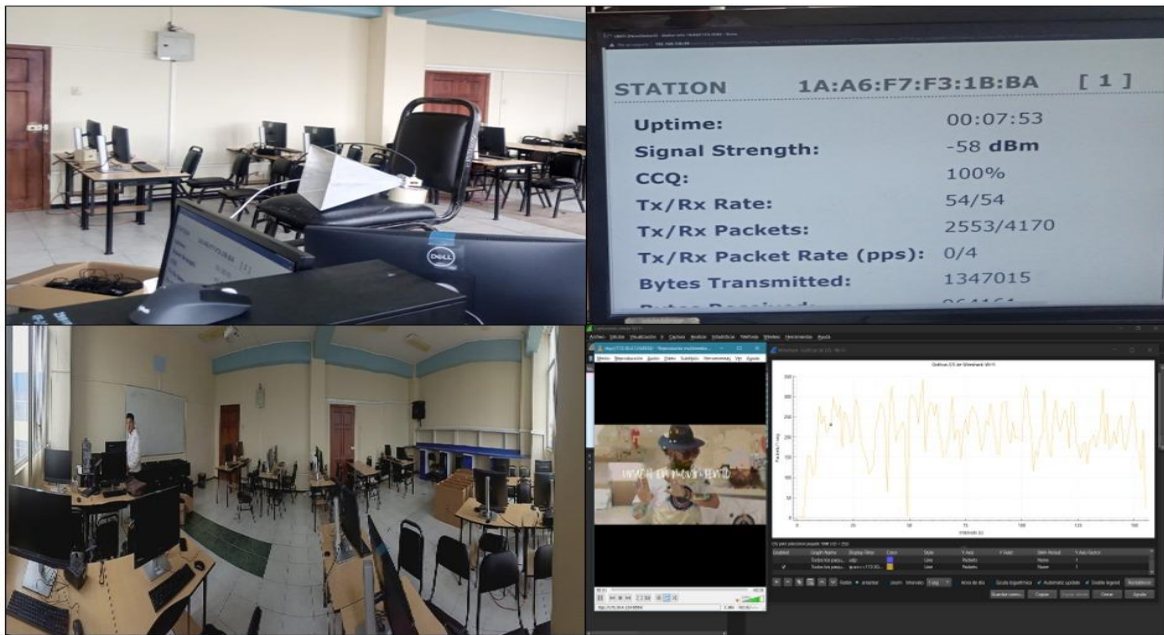


Figura 95: Pruebas realizadas sin RIS (curso)
(Autores)

Anexos 10: Escenarios de pruebas de la antena RIS mediante el envío de datos

Escenario 1: Curso de la facultad de Ingeniería

Se observa cómo se comporta la señal que se envía en el entorno en cuestión, en este caso en particular la Fig.96, muestra las rutas que puede tomar la señal incidente una vez es reflejada en la superficie RIS antes de alcanzar el receptor, el color de las líneas indica que la potencia de la señal recibida es lo suficientemente fuerte para establecer una conexión en la comunicación inalámbrica, mientras que la Fig.97 muestra la potencia de la señal relativamente baja debido a la ausencia de línea de vista lo que genera atenuación y pérdidas de la señal.

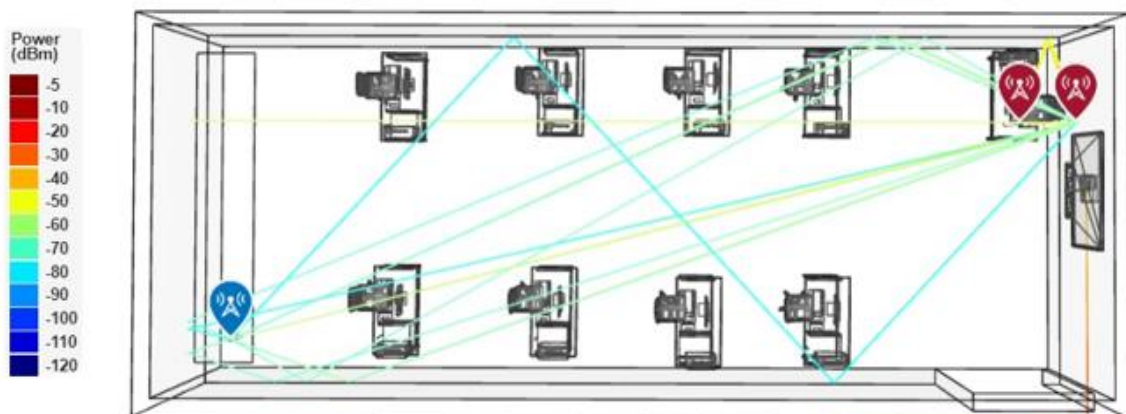


Figura 96: Envío de datos de audio y video con la intervención de la superficie RIS
(Autores-Matlab)

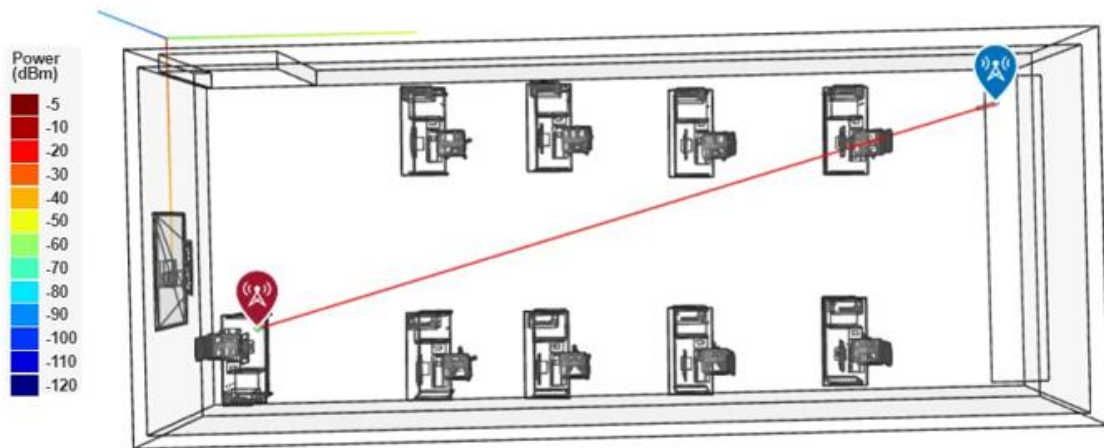


Figura 97: Envío de datos de audio y video sin la intervención de la superficie RIS en un curso
(Autores-Matlab)

Escenario 2: Pasillo de la facultad de Ingeniería

En la Fig.98, se observa que la señal incidente sobre la superficie RIS es reflejada de manera exitosa y conserva con una buena potencia, mostrada por el color de las rutas que superan el umbral de -50dBm a su vez se distinguen múltiples rutas en las cuales su potencia se ha alcanza un umbral de -60dBm llegando al receptor con un mejor nivel de señal ya que cada rebote contribuye con una cantidad de energía a la señal toral recibida, en este escenario las condiciones del entorno son favorables para la comunicación inalámbrica, por otro lado, en la Fig.99, se nota una clara pérdida de potencia debido a la ausencia de línea de vista y de un medio donde reflejarse por lo que buscara una ruta que permita llegar al receptor generando atenuación de la señal en comparación a la señal incidente, lo que genera retardo en la comunicación.

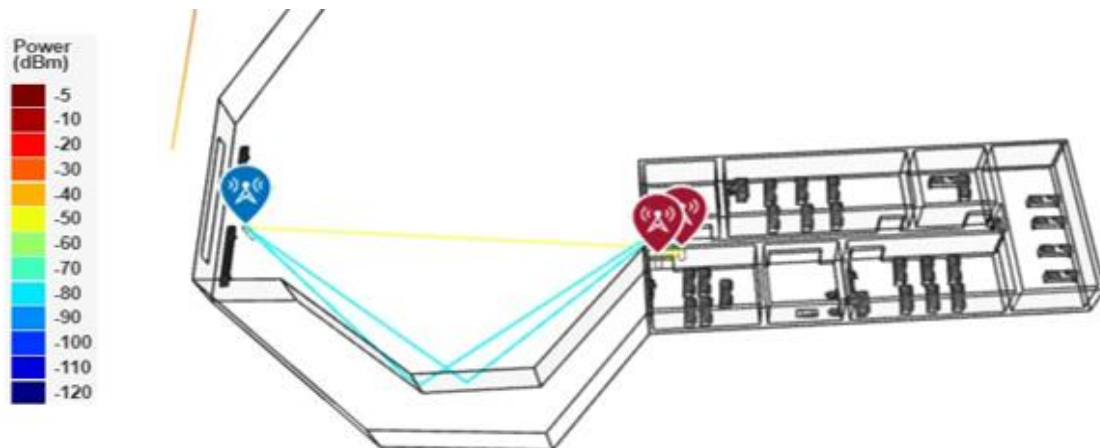


Figura 98: Envío de datos de audio y video con la intervención de la superficie RIS en un pasillo
(Autores-Matlab)

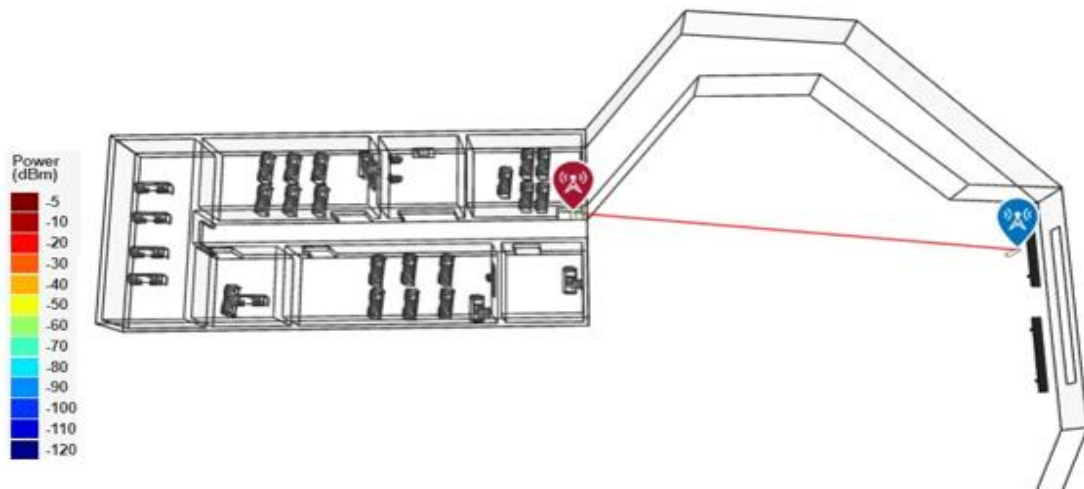


Figura 99: Envío de datos de audio y video sin la intervención de la superficie RIS en un pasillo (Autores-Matlab)

Anexo 11. Valores de la celda unitaria.

Tabla 13: Combinaciones de los grosores de los materiales para la celda unitaria.

Simulación	h(mm)	tb(mm)	tf(mm)	f Max	S11(dB)	S21(dB)
1	2.25	0.07	0.07	5.296	-33.51	-0.70
2	2.25	0.07	0.4	5.385	-30.37	-0.77
3	2.25	0.07	0.5	5.36	-31.56	-0.75
4	2.25	0.38	0.5	5.352	-31.46	-0.75
5	2.25	0.60	0.5	5.365	-31.83	-0.75
6	2.25	0.65	0.5	5.352	-31.64	-0.75
7	2.20	0.65	0.5	5.412	-30.59	-0.77
8	2.10	0.65	0.5	5.524	-28.20	-0.81
9	2.05	0.65	0.5	5.572	-27.74	-0.83
10	2.05	0.65	0.65	5.54	-28.82	-0.79
11	2.05	0.65	0.70	5.528	-29.23	-0.77
12	2.05	0.65	0.85	5.484	-29.82	-0.74
13	2.05	0.80	0.85	5.484	-29.82	-0.74
14	2.05	0.85	0.85	5.484	-29.82	-0.74
15	2.05	0.95	0.85	5.485	-30.10	-0.74
16	2	0.95	0.85	5.544	-29.37	-0.76
17	1.98	0.95	0.85	5.56	-28.94	-0.76
18	1.90	0.95	0.85	5.648	-27.45	-0.80
19	1.90	0.95	1	5.612	-28.45	-0.77
20	1.90	0.95	1.05	5.596	-28.70	-0.75
21	1.90	0.95	1.08	5.592	-28.85	-0.75
22	1.90	1	1.08	5.588	-28.79	-0.75
23	1.90	1.12	1.08	5.592	-28.82	-0.75

24	1.90	1.20	1.08	5.588	-28.95	-0.75
25	1.88	1.20	1.08	5.608	-28.47	-0.75
26	1.85	1.20	1.08	5.644	-27.90	-0.77
27	1.83	1.20	1.08	5.668	-27.72	-0.78
28	1.83	1.20	1.25	5.62	-28.75	-0.74
29	1.83	1.20	1.30	5.608	-28.92	-0.73
30	1.83	1.20	1.40	5.572	-29.46	-0.71
31	1.83	1.25	1.40	5.572	-29.51	-0.71
32	1.83	1.30	1.40	5.576	-29.40	-0.71
33	1.83	1.35	1.40	5.576	-29.48	-0.71
34	1.80	1.35	1.40	5.608	-29.16	-0.72
35	1.78	1.35	1.40	5.632	-28.41	-0.73
36	1.76	1.35	1.40	5.656	-28.28	-0.74
37	1.76	1.35	1.47	5.632	-28.57	-0.73
38	1.76	1.35	1.5	5.624	-28.46	-0.72
39	1.76	1.35	1.79	5.54	-30.10	-0.67
40	1.76	1.40	1.79	5.54	-30.04	-0.67
41	1.76	1.66	1.79	5.54	-30.20	-0.67
42	1.76	1.75	1.79	5.54	-30.11	-0.67
43	1.72	1.75	1.79	5.588	-29.78	-0.69
44	1.69	1.75	1.79	5.624	-29.00	-0.70
45	1.67	1.75	1.79	5.644	-28.46	-0.71
46	1.67	1.75	1.81	5.636	-28.67	-0.70
47	1.67	1.75	1.85	5.624	-28.76	-0.70
48	1.67	1.75	1.89	5.616	-28.88	-0.69
49	1.67	1.85	1.89	5.616	-29.08	-0.69
50	1.67	1.95	1.89	5.616	-28.99	-0.69
51	1.67	2.07	1.89	5.616	-28.99	-0.69
52	1.65	2.07	1.89	5.636	-28.73	-0.70
53	1.60	2.07	1.89	5.696	-27.91	-0.72
54	1.59	2.07	1.89	5.708	-27.84	-0.73
55	1.59	2.07	1.95	5.688	-28.09	-0.72
56	1.59	2.07	2.10	5.644	-28.55	-0.69
57	1.59	2.07	2.15	5.628	-28.93	-0.68
58	1.59	2.11	2.15	5.52	-30.20	-0.64
59	1.59	2.15	2.15	5.632	-28.78	-0.69
60	1.59	2.25	2.15	5.632	-28.88	-0.70
61	1.55	2.25	2.15	5.676	-28.03	-0.70
62	1.50	2.25	2.15	5.732	-27.41	-0.72
63	1.46	2.25	2.15	5.78	-26.87	-0.74
64	1.46	2.25	2.20	5.768	-27.11	-0.74
65	1.46	2.25	2.30	5.74	-27.42	-0.72
66	1.46	2.25	2.40	5.712	-27.89	-0.70
67	1.46	2.30	2.40	5.712	-27.82	-0.70
68	1.46	2.35	2.40	5.712	-27.82	-0.70
69	1.46	2.5	2.40	5.708	-27.91	-0.70

70	1.35	2.5	2.40	5.836	-26.26	-0.76
71	1.28	2.5	2.40	5.908	-25.36	-0.80
72	1.15	2.5	2.40	6.052	-23.66	-0.90
73	1.15	2.5	2.43	6.04	-23.61	-0.89
74	1.15	2.5	2.47	6.036	-23.73	-0.88
75	1.15	2.5	2.5	6.028	-23.88	-0.88

Anexo 12. Valores de la RIS.

Tabla 14: Parámetros de directividad y ganancia de la antena RIS respecto a distancias y ángulos de giro.

Ángulo de giro	Parámetro S11	Ganancia	Directividad
0	-25.3	21.93	21.03
15	-28.66	19.81	20.59
30	-28.23	19.56	18.98
45	-28.02	19.20	20.22
60	-27.23	18.61	19.23

Anexo 13. Ficha técnica del sustrato.

Información Técnica

Gpo3 Rojo.doc



Estratificados Rígidos

GPO3

2/2

Datos Técnicos:

Propiedades	Método de test	Unidad	Valor
Densidad	-	g/cm ³	1.85
Contenido en vidrio	-	%	30
Propiedades Mecánicas			
Resistencia a flexión	DIN 53452	N/mm ²	130
Módulo de elasticidad a flexión	DIN 7735	N/mm ²	10000
Resistencia al impacto	DIN 53453	KJ/m ²	80
Resistencia a la tracción	DIN 53455	N/mm ²	60
Resistencia a compresión	DIN 53454	N/mm ²	230
Resistencia a la deslaminación	DIN 53483	N	2200
Propiedades Térmicas			
Coficiente de expansión lineal en la dirección de las fibras	DIN 7735	10 ⁻⁵ K ⁻¹	15 - 30
Conductividad térmica	DIN 52612	W/mK	0.3
Temperatura límite	VDE 0304 T.2	°C	155
Clase térmica	IEC 85	-	F
Combustibilidad	UL 94 DIN 4102	Clase	V0 B1≥6mm.
Propiedades eléctricas			
Resistencia volumétrica	DIN 53482	Ω x cm	10 ¹³
Resistencia superficial	IEC 93 / VDE 0303 T.30 / 31	Ω	10 ¹³
Rigidez dieléctrica perpendicular a las capas 1 min. a 90°C en aceite	VDE 0303 T.21	kV/3mm	36
Constante dieléctrica	DIN 53483	-	5
Resistencia al Tracking	IEC 112 / VDE 0303 T.1	periodo	CTI 600 300 min
Resistencia al arco	VDE 0303 T.5	periodo	L2 180 seg.
Resistencia a la incandescencia	DIN 53459	-	2a

Figura 100: Ficha técnica del sustrato utilizado para la implementación de la RIS Teiners, S.A.