



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Diseño de un sistema de seguridad contra ataques de espías pasivos que
trabaje en la banda de 5 GHz, implementando superficies reflectantes
inteligentes para una red doméstica

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

AUTOR:

Pasmay Lema Jhon Anderson

TUTOR:

PhD. Santillán Haro Daniel Antonio

Riobamba, Ecuador. 2025

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, **JHON ANDERSON PASMAY LEMA**, con cédula de ciudadanía **175349970-4**, autor del trabajo de investigación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD CONTRA ATAQUES DE ESPÍAS PASIVOS QUE TRABAJE EN LA BANDA DE 5 GHZ, IMPLEMENTANDO SUPERFICIES REFLECTANTES INTELIGENTES PARA UNA RED DOMÉSTICA**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo 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 (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, el 24 de enero del 2025.



Jhon Anderson Pasmay Lema

C.I: 1753499704

ACTA FAVORABLE-INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los 29 días del mes de NOVIEMBRE de 2024, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **JHON ANDERSON PASMAY LEMA** con CC: **175349970-4**, de la carrera de **INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado **"DISEÑO DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD CONTRA ATAQUES DE ESPÍAS PASIVOS QUE TRABAJE EN LA BANDA DE 5 GHZ, IMPLEMENTANDO SUPERFICIES REFLECTANTES INTELIGENTES PARA UNA RED DOMÉSTICA"**, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



Firmado electrónicamente por:
**DANIEL ANTONIO
SANTILLAN HARO**

PhD. Santillán Haro Daniel Antonio

TUTOR(A)

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

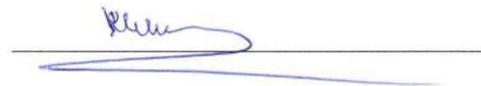
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**DISEÑO DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD CONTRA ATAQUES DE ESPÍAS PASIVOS QUE TRABAJE EN LA BANDA DE 5 GHz, IMPLEMENTANDO SUPERFICIES REFLECTANTES INTELIGENTES PARA UNA RED DOMESTICA**”, presentado por **JHON ANDERSON PASMAY LEMA**, con cédula de identidad número **175349970-4**, bajo la tutoría de Ph.D. 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 24 de enero de 2025.

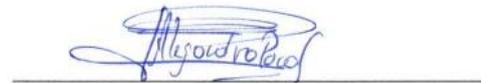
PhD. Carlos Peñafiel
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

A large, stylized handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

Dr. Klever Torres
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

Msc. Alejandra Pozo
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

CERTIFICADO ANTI PLAGIO

CERTIFICACIÓN

Que, **PASMAY LEMA JHON ANDERSON** con CC: **17534997904**, estudiante de la Carrera de **TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD CONTRA ATAQUES DE ESPIAS PASIVOS QUE TRABAJE EN LA BANDA DE 5 GHZ IMPLEMENTANDO SUPERFICIES REFLECTANTES INTELIGENTES PARA UNA RED DOMESTICA**", cumple con el **6%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO MAGISTER**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 15 de enero de 2025



Firmado electrónicamente por:
**DANIEL ANTONIO
SANTILLAN HARO**

PhD. Santillán Haro Daniel Antonio
TUTOR

DEDICATORIA

Este proyecto de tesis va dedicado a Dios por darme la fuerza para lograr todos mis propósitos que me planteé. A mis hermanos, a mi mamá y a mi novia que estuvieron para mí en todo momento. A mi padre que desde el cielo nunca me dejó solo en cada etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi madre Inés, cuyo amor incondicional y apoyo constante me han guiado en cada etapa de este proceso. Sus palabras de aliento y su fe en mí han sido fundamentales para lograr este objetivo. A mi novia Sofía, por estar siempre a mi lado, brindándome su compañía, paciencia y cariño, gracias por creer en mí por no dejarme solo en ningún momento, incluso en los momentos difíciles. A mis hermanos Omar y Patricia, por ser un ejemplo de perseverancia y superación. Su motivación, sus consejos y su fuerza me han impulsado a dar lo mejor de mí y seguir adelante. A mis padrinos Rosa e Isauro, quienes fueron esa segunda familia y de los cuales me siento profundamente agradecido. A mi tutor Dr. Daniel Santillán, quien con sus conocimientos y dedicación tuvo un papel fundamental para la realización de este proyecto de investigación.

A todos ustedes, que han sido mi fuente de inspiración y apoyo inquebrantable, les dedico este logro con todo mi corazón.

ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA

ACTA FAVORABLE-INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTI PLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ANEXOS

RESUMEN

ABSTRAC

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 21

1. INTRODUCCIÓN 21

1.1 ANTECEDENTES 21

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN 22

1.3 OBJETIVOS 24

1.3.1 Objetivo General 24

1.3.2 Objetivos Específicos 24

CAPÍTULO II. MARCO CONCEPTUAL 25

2. MARCO TEÓRICO 25

2.1 ESTADO DEL ARTE 25

2.2 COMUNICACIÓN INALÁMBRICA 27

2.2.2 Espectro Electromagnético 29

2.2.3 Ventajas y Desventajas de la Comunicación Inalámbrica. 30

2.3 SUPERFICIES REFLECTANTES INTELIGENTES (RIS) 31

2.3.1 Principio de funcionamiento 32

2.3.2 Beneficios de las RIS 32

2.3.3 Materiales utilizados en las RIS 33

2.3.4 Fundamentos Matemáticos y Estructurales en el Diseño de las RIS 35

2.3.5	Alimentación de la RIS	41
2.4	ANTENAS DIPOLO	42
2.4.1	Ventajas de la antena dipolo.....	44
2.4.2	Arreglo de antena dipolo	44
2.4.3	Características de un arreglo de dipolos.....	45
2.5	ANTENAS MICROSTRIP.....	45
2.5.1	Estructura	46
2.5.2	Funcionamiento.....	46
2.5.3	Parámetros importantes para el diseño de una antena microstrip	46
2.5.4	Estructura	49
2.5.5	Diseño de una RIS.....	49
2.6	INMERSIÓN DE LAS RIS EN EL CAMPO DE LA DE SEGURIDAD INFORMÁTICA	51
2.7	ESPIÁS PASIVOS.....	52
2.7.1	Técnicas y Mecanismos de Espionaje Pasivo en Redes Inalámbricas.....	52
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....		54
3.	METODOLOGÍA.....	54
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	54
3.1.1	Metodología Cuantitativa.....	54
3.1.2	Metodología exploratoria	54
3.1.3	Metodología experimental.....	54
3.2	TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN.....	55
3.3	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	55
3.3.1	Muestra.....	56
3.4	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	57
3.4.1	Variable independiente.....	57
3.4.2	Variable dependiente.....	57
3.5	PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS	57
3.6	DISEÑO DEL ALIMENTADOR.....	59
3.7	DISEÑO DEL RECEPTOR.....	64
3.8	DISEÑO DE LA RIS	67
3.8.1	Diagrama de Apertura de la Antena RIS 10x10.....	75
3.8.2	Cortes Copolares de la Antena RIS 10x10.....	76
3.8.3	Diagrama de apertura con la antena RIS 25x25	77

3.9	DISEÑO DEL AMBIENTE DE TRABAJO PARA LAS SIMULACIONES	78
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....		80
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80
4.1	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	80
4.1.1	Interpretación Comparativa de los Diagramas de Apertura de la Antena RIS 25x25 con la Antena RIS 10x10.	80
4.1.2	Proceso para la recolección de datos.....	81
4.2	CAMBIO DE POSICIÓN DEL TRANSMISOR	81
4.3	ANÁLISIS DEL AMBIENTE DE TRABAJO CON UN ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 90 GRADOS	84
4.3.1	Distancia de 1 metro.....	84
4.3.2	Distancia de 2 metro.....	85
4.3.3	Distancia de 3 metro.....	86
4.4	ANÁLISIS DEL AMBIENTE DE TRABAJO CON UN ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 100 GRADOS	87
4.4.1	Distancia de 1 metro.....	87
4.4.2	Distancia de 2 metro.....	88
4.4.3	Distancia de 3 metro.....	88
4.5	ANÁLISIS DEL AMBIENTE DE TRABAJO CON UN ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 110 GRADOS	89
4.5.1	Distancia de 1 metro.....	89
4.5.2	Distancia de 2 metro.....	90
4.5.3	Distancia de 3 metro.....	91
4.6	ANÁLISIS DEL AMBIENTE DE TRABAJO CON UN ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 120 GRADOS	91
4.6.1	Distancia de 1 metro.....	91
4.6.2	Distancia de 2 metros	92
4.6.3	Distancia de 3 metro.....	93
4.7	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	94
4.8	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO IMPLEMENTADO EN CST STUDIO.	99
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		102
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
5.1	CONCLUSIONES	102
5.2	RECOMENDACIONES.....	103

6. REFERENCIAS	104
7. ANEXOS	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variable Independiente	57
Tabla 2: Variable Dependiente.....	57
Tabla 3: Resultados del promedio de intensidad de radiación de las posiciones del transmisor de la Fig.60 con ángulo de inclinación de 90°	96
Tabla 4: Resultados del promedio de intensidad de radiación de las posiciones del transmisor de la Fig.60 con ángulo de inclinación de 100°	96
Tabla 5: Resultados del promedio de intensidad de radiación de las posiciones del transmisor de la Fig.60 con ángulo de inclinación de 110°	96
Tabla 6: Resultados del promedio de intensidad de radiación de las posiciones del transmisor de la Fig.60 con ángulo de inclinación de 120°	97
Tabla 7: Resultados cualitativos de la RIS con 90° de inclinación.	98
Tabla 8: Resultados cualitativos de la RIS con 100° de inclinación.	98
Tabla 9: Resultados cualitativos de la RIS con 110° de inclinación.	98
Tabla 10: Resultados cualitativos de la RIS con 120° de inclinación.	98
Tabla 11: Acceso del Espía Pasivo a la Red Inalámbrica	99
Tabla 12: Porcentaje de "Accesos Fallidos" y "Accesos Exitosos" de las simulaciones realizadas del ambiente de trabajo en el programa Cst Studio Versión Estudiantil	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diseño de la RIS de 168 celdas unitarias.....	26
Figura 2: Vista 3D de la reflexión de ondas en la banda de 1900 MHz.....	26
Figura 3: Diseño de la RIS propuesta.....	26
Figura 4: RIS analizada a 15° de inclinación	27
Figura 5: RIS analizada a 30° de inclinación	27
Figura 6: Dispositivos que utilizan comunicación inalámbrica.	28
Figura 7: Tipos de modulación de la señal.....	28
Figura 8: Espectro electromagnético.....	29
Figura 9: Diseño de la RIS propuesta.....	32
Figura 10: Frecuencia de una onda	37
Figura 11: Ancho de banda	38
Figura 12: Antena dipolo diseñada en CST Studio	42
Figura 13: Diseño en CST de un arreglo de antenas dipolo.....	45
Figura 14: Diseño en CST de una antena microstrip	46
Figura 15: Implementación de una RIS.....	51
Figura 16: Esquema de sniffer	53
Figura 17: Procedimiento del proyecto de investigación	59
Figura 18: Esquema radio del dipolo	60
Figura 19: Gap de la antena dipolo	61
Figura 20: Diseño de la antena dipolo en CST Studio	61
Figura 21: Valores del diseño de la antena dipolo aplicado la constante k.....	62
Figura 22: Parámetro S ₁₁ de la antena dipolo	62
Figura 23: Ganancia de la antena dipolo	62
Figura 24: Directividad de la antena dipolo	63
Figura 25: Diseño de un arreglo de antenas dipolo de 8 etapas	63
Figura 26: Ganancia del arreglo de antenas dipolo	63
Figura 27: Directividad del arreglo de antenas dipolo	63
Figura 28: Parámetro S ₁₁ del arreglo de antena dipolos.....	64
Figura 29: Antena microstrip simulada en CST	66
Figura 30: Arreglo de antenas microstrip de dos etapas simulada en CST	66
Figura 31: Parámetro S ₁₁ obtenido del arreglo de antenas microstrip de 2 etapas.....	66
Figura 32: Directividad del arreglo de antenas microstrip de 2 etapas	67

Figura 33: Ganancia del arreglo de antenas microstrip de 2 etapas.....	67
Figura 34: Diseño de la celda unitaria de la RIS en CST Studio).....	70
Figura 35: Absorción y reflexión de la energía de celda unitaria de la RIS en CST Studio	70
Figura 36: Propiedades del background de la celda unitaria.....	70
Figura 37: Propiedades del background de la celda unitaria.....	71
Figura 38: Parámetro S_{11} y parámetro S_{12} de la celda unitaria.....	71
Figura 39: Nivel de Absorción de la Celda Unitaria.....	72
Figura 40: Eficiencia de radiación de la Celda Unitaria.....	72
Figura 41: Array task en CST Studio.....	73
Figura 42: Array propierties.....	73
Figura 43: RIS de 25x25 celdas unitarias.....	73
Figura 44: RIS de 10X10 celdas unitarias.....	74
Figura 45: Parámetros S_{11} y S_{22} de la Antena RIS.....	74
Figura 46: Gráfica de absorción de la Antena RIS.....	74
Figura 47: Coeficiente de reflexión de la Antena RIS.....	75
Figura 48: Eficiencia de radiación de la antena RIS.....	75
Figura 49: Gráfica polar del diagrama de apertura de la antena RIS 10x10.....	75
Figura 50: Gráfica cartesiana del diagrama de apertura de la antena RIS 1.....	76
Figura 51: Plano “H” copolar 0°	76
Figura 52: Plano “H” copolar 45°	77
Figura 53: Plano “E” copolar 90°	77
Figura 54: Gráfica polar del diagrama de apertura de la antena RIS 25x25.....	77
Figura 55: Gráfica cartesiana del diagrama de apertura de la antena RIS 25x25.....	78
Figura 56: Ambiente de trabajo de la RIS 25 x 25 con un transmisor y un receptor.....	78
Figura 57: Ambiente de trabajo de la RIS 10 x 10 con un transmisor y un receptor).....	79
Figura 58: Comparación de los diagramas de radiación de la antena RIS 10x10 y la antena	80
Figura 59: Cambio de posición del transmisor.....	81
Figura 60: Posiciones del transmisor consideradas para las simulaciones.....	82
Figura 61: Distancia de 1 metro entre el transmisor y la antena RIS.....	82
Figura 62: Distancia de 2 metros entre el transmisor y la antena RIS.....	82
Figura 63: Distancia de 3 metros entre el transmisor y la antena RIS.....	82
Figura 64: Ángulo de inclinación igual a 90 grados de la RIS.....	83

Figura 65: Ángulo de inclinación igual a 100 grados de la RIS	83
Figura 66: Ángulo de inclinación igual a 110 grados de la RIS	83
Figura 67: Ángulo de inclinación igual a 120 grados de la RIS	83
Figura 68: Barra de colores del diagrama de radiación.....	84
Figura 69: Coeficiente de Reflexión y absorción de la RIS con alimentador	84
Figura 70: Diagrama de radiación posición 5 a 1 metro con 90° de inclinación.....	85
Figura 71: Diagrama de radiación posición 1 a 1 metro con 90° de inclinación.....	85
Figura 72: Diagrama de radiación posición 5 a 2 metros con 90° de inclinación	85
Figura 73: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 90° de inclinación	86
Figura 74: Diagrama de radiación posición 5 a 3 metros con 90° de inclinación	86
Figura 75: Diagrama de radiación posición 1 a 3 metros con 90° de inclinación	86
Figura 76: Diagrama de polar posición 5 a 1 metros con 100° de inclinación.....	87
Figura 77: Diagrama de radiación posición 5 a 1 metro con 100° de inclinación.....	87
Figura 78: Diagrama de radiación posición 1 a 1 metro con 100° de inclinación.....	87
Figura 79: Diagrama de radiación posición 5 a 2 metros con 100° de inclinación	88
Figura 80: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 100° de inclinación	88
Figura 81: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 100° de inclinación	88
Figura 82: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 100° de inclinación	89
Figura 83: Diagrama polar posición 1 a 1 metro con 110° de inclinación	89
Figura 84: Diagrama de radiación posición 5 a 1 metro con 110° de inclinación.....	89
Figura 85: Diagrama de radiación posición 1 a 1 metro con 110° de inclinación.....	90
Figura 86: Diagrama de radiación posición 5 a 2 metros con 110° de inclinación	90
Figura 87: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 110° de inclinación	90
Figura 88: Diagrama de radiación posición 5 a 3 metros con 110° de inclinación	91
Figura 89: Diagrama de radiación posición 1 a 3 metros con 110° de inclinación	91
Figura 90: Diagrama de radiación posición 5 a 1 metro con 120° de inclinación.....	91
Figura 91: Diagrama de radiación posición 5 a 1 metros con 120° de inclinación	92
Figura 92: Diagrama de radiación posición 1 a 1 metros con 120° de inclinación	92
Figura 93: Diagrama de radiación posición 5 a 2 metros con 120° de inclinación	92
Figura 94: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 120° de inclinación	93
Figura 95: Diagrama de radiación posición 5 a 3 metros con 120° de inclinación).....	93
Figura 96: Diagrama de radiación posición 1 a 3 metros con 120° de inclinación.	93
Figura 97: Separación de los diagramas de radiación encontrados en la simulación.	94
Figura 98: Punto máximo de conexión	95

Figura 99: Accesos del Espía Pasivo a la Red Inalámbrica	100
Figura 100: Accesos del Espía Pasivo a la Red Inalámbrica	101

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Proyectos creados en CST Studio/Versión Estudiantil	106
Anexo 2: Diseño del arreglo de antenas dipolo de 8 etapa	106
Anexo 3: Diseño del arreglo de antena microstrip de 2 etapas	107
Anexo 4: Diseño de la Celda Unitaria para la antena RIS	107
Anexo 5: Diseño de la Antena RIS 10x10	108
Anexo 6: Figura 103: Diseño del espacio de trabajo con la RIS 10x10	108
Anexo 7: Diseño de la Antena RIS 25x25	109
Anexo 8: Diseño del espacio de trabajo con la RIS 25x25	109
Anexo 9: Ficha técnica del sustrato ROGERS RO 3000	110
Anexo 10: Datos cualitativos de las simulaciones realizadas en el programa CST	111
Anexo 11: Especificaciones Computacionales	112

RESUMEN

Este proyecto plantea la implementación de superficies inteligentes reflectantes (RIS, según sus siglas en inglés) como una propuesta innovadora destinada a optimizar la seguridad de las redes inalámbricas domésticas 5G. El objetivo principal es identificar la posición, ángulo y distancia óptimas de la RIS para que funcione como bloqueador de señal y prevengan la entrada de espías pasivos no autorizados. Este enfoque aprovecha las propiedades de reflectividad de las superficies inteligentes para manipular de manera precisa la propagación de ondas electromagnéticas en el entorno, redirigiendo o atenuando la señal.

Esta investigación aborda un análisis exhaustivo del comportamiento de la señal en un entorno doméstico convencional. Para ello, se desarrolla un modelo experimental que integra simulaciones de un transmisor Wi-Fi (configurado con un arreglo de antena dipolo de 8 etapas), un receptor (basado en un arreglo de antena microstrip de 2 etapas) y la antena RIS, evaluando diversos escenarios posibles. Entre las variables analizadas se encuentran la distancia entre el transmisor y la antena RIS, los ángulos de inclinación de la RIS y la ubicación del transmisor. Asimismo, se examina cómo la reflectividad de las RIS afecta su capacidad para bloquear señales destinadas a dispositivos espías pasivos que no forman parte de la red autorizada. Los resultados obtenidos destacan que, al colocar estratégicamente las superficies reflectantes en puntos críticos del entorno, es posible reducir significativamente el alcance de las señales no deseadas sin afectar la calidad del servicio dentro de la red autorizada.

Palabras claves: RIS pasivas, Seguridad Inalámbrica 5G, Bloqueo de Señal, Espías Pasivos, Banda de 5 GHz.

ABSTRAC

The current study explores the use of intelligent reflective surfaces (IRS) as an innovative solution to enhance the security of 5G home wireless networks. The primary goal is to determine the optimal positioning, angle, and distance of IRS to effectively function as a signal blocker, preventing unauthorized passive eavesdroppers from accessing the network. Intelligent reflective surfaces leverage the reflective properties of intelligent surfaces to accurately manipulate the propagation of electromagnetic waves in the environment by redirecting or attenuating the signal.

The research involves a comprehensive analysis of signal behavior in a typical home environment, utilizing an experimental model that integrates simulations of a Wi-Fi transmitter (8-stage dipole antenna array), a receiver (2-stage microstrip antenna array), and IRS antennas in various configurations. Key variables examined include the distance between the transmitter and IRS antenna, IRS tilt angles, and transmitter positioning. Furthermore, the study evaluates how variations in IRS reflectivity influence its ability to block signals directed toward devices from passive eavesdroppers located outside the authorized network.

The results demonstrate that strategically positioning IRS at key locations within the environment can significantly reduce the range of unauthorized signals while maintaining the quality of service within the authorized network.

Keywords: Passive IRS, 5G Wireless Security, Signal Blocking, Passive Eavesdroppers, 5 GHz Band.

Reviewed by



MsC. Adriana Cundar Ruano, Ph.D.
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 1709268534

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo analiza los antecedentes que motivaron la realización de este proyecto de titulación. Se describe el problema relacionado con la seguridad informática y protección de datos en una red inalámbrica. También se analiza porque la RIS (Superficie Reflectante Inteligente) es una buena opción para evitar la extracción de datos personales de una red Wi-Fi. Asimismo, se definen el objetivo general y los objetivos específicos que guían el desarrollo de este estudio.

1.1 ANTECEDENTES

En un mundo cada vez más digital e interconectado, la seguridad de las comunicaciones inalámbricas se ha convertido en una preocupación constante. Ante el incremento de las amenazas de espionaje, resulta crucial implementar soluciones innovadoras que garanticen la privacidad y protección de los datos transmitidos. En este contexto, las superficies inteligentes reflectantes (RIS, por sus siglas en inglés Reflecting Intelligent Surfaces) se presentan como una opción prometedora para reducir el riesgo de espionaje y fortalecer la seguridad de las redes inalámbricas, particularmente en la banda de 5 GHz, donde la transmisión de datos es frecuente y susceptible a interceptaciones.

Las RIS, también conocidas como espejos inteligentes, Desempeñan un rol fundamental en el ámbito de las telecomunicaciones, destacándose entre sus aplicaciones más relevantes la mejora de la cobertura de señal en áreas con recepción deficiente o zonas de muertas, concentrar las señales en direcciones específicas y también mejora la seguridad de las comunicaciones al bloquear o limitar la propagación de señales que emite un router Wi-Fi haciéndolas inalcanzables a terceras personas [7], siendo la seguridad el enfoque principal de este proyecto de investigación. Las RIS gracias a sus propiedades de reflexión de ondas electromagnéticas son perfectas para dirigir y gestionar la propagación de señales inalámbricas de forma eficiente y segura haciéndolas inalcanzables para terceros que no tengan permiso de acceso a la red, protegiendo así la privacidad y la integridad de las comunicaciones inalámbricas.

Gracias al avance de la tecnología existen varios simuladores para poder representar un escenario real de propagación de ondas y analizarlas sin la necesidad de desperdiciar recursos a causa de pruebas y errores al implementar en un caso real, uno de esos simuladores que permite estudiar el comportamiento de la antena de un router Wi-Fi 5G y la reacción que provocan las ondas del router en la RIS es CST Studio (Computer Simulation Technology), el cual es un software de simulación electromagnética para analizar y diseñar los componentes, dispositivos y sistemas electrónicos y su comportamiento [7].

El propósito de este proyecto de investigación es desarrollar el diseño de una RIS en el simulador CST Studio y colocarla en el entorno de un router Wi-Fi doméstico que opere en la banda de 5 GHz., este procedimiento se realizara como una medida de seguridad adicional para las redes domésticas, al ocultar y proteger el canal inalámbrico contra accesos no autorizados. Al hacerlo, se espera contribuir al desarrollo de soluciones prácticas y eficaces para enfrentar los retos de seguridad en las comunicaciones inalámbricas en la era digital.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En el entorno actual de la sociedad, la información, la privacidad y la seguridad son aspectos cada vez más importantes para individuos y organizaciones. Uno de los riesgos a los que se enfrentan día a día es el espionaje pasivo, que consiste en la captura de información a través de dispositivos imperceptibles para los dueños de la red [2], con estos dispositivos no se altera la comunicación original y se recopila una gran cantidad de información. En lo que respecta a la comunicación inalámbrica, las señales pueden ser capturadas por dispositivos de receptores y analizadas para obtener información confidencial, como contraseñas, datos personales o información empresarial [2].

Al existir tecnologías en la actualidad que combaten contra conexiones no autorizadas a una red inalámbrica como los inhibidores de señal, las RIS representan una tecnología de gran potencial en el ámbito de la seguridad inalámbrica, ofreciendo ventajas significativas frente a los inhibidores de señal en la gestión de conexiones no deseadas. En primer lugar, las RIS funcionan manipulando y redirigiendo las señales inalámbricas mediante tecnología de metamateriales, lo que permite bloquear o limitar las conexiones en áreas específicas sin interferir con otras zonas [18], ofreciendo así un control preciso y no disruptivo que afecte

indiscriminadamente a todos los dispositivos incluso más allá del objetivo como lo hacen los inhibidores de señal. Además, desde una perspectiva legal y de cumplimiento normativo, las RIS no generan interferencias activas, lo que las hace compatibles con las regulaciones sobre el espectro electromagnético [18], a diferencia de los inhibidores, que suelen estar restringidos o prohibidos en muchas regiones por su interferencia con comunicaciones esenciales como llamadas de emergencia o servicios críticos. Por último, las RIS son una solución eficiente y sostenible, ya que no consumen grandes cantidades de energía, por sus configuraciones basadas en dispositivos pasivos o de muy baja potencia [18], mientras que los inhibidores requieren potencia continua para emitir señales de interferencia activas.

La solución seleccionada para abordar este problema de seguridad frente a los ataques de espías pasivos es el uso de las RIS. Estas superficies aprovechan sus propiedades de reflexión de ondas electromagnéticas, emitidas por el router Wi-Fi 5G, para mantenerlas confinadas exclusivamente dentro del espacio de trabajo donde son necesarias. De esta manera, las ondas quedan fuera del alcance de los espías pasivos que se encuentren fuera de dicho espacio, garantizando una mayor protección de la información.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar un sistema de seguridad que utilice superficies reflectantes inteligentes para mitigar los ataques de espionaje pasivo en redes domésticas operando en la banda de 5 GHz.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estado del arte para identificar y comprender las amenazas específicas del espionaje pasivo que afectan a las redes domésticas de la actualidad.
- Investigar las tecnologías disponibles para la implementación de superficies reflectantes inteligentes y su viabilidad en la aplicación de protección de redes domésticas en la banda de 5 GHz.
- Emplear el software CST Studio Suite de diseño electromagnético para simular una configuración que incluya una antena dipolo de router Wi-Fi de 5 GHz junto con la superficie reflectante inteligente en un entorno de prueba.
- Interpretar y discutir los hallazgos obtenidos de la simulación identificando las fortalezas y limitaciones de la configuración simulada y proporcionando recomendaciones para su mejora y optimización en la protección contra amenazas de espionaje pasivo en redes domésticas.

CAPÍTULO II.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el marco teórico que respalda la tesis, abarcando aspectos esenciales que se relacionan con la seguridad contra ataques de espías pasivos y la importancia de las superficies reflectantes inteligentes en este medio, así mismo los materiales utilizados para su fabricación. Además, se incluye un análisis del estado actual de diversas investigaciones previas relacionadas con el tema de la investigación.

2.1 ESTADO DEL ARTE

En [17] se realizó el diseño de una antena con tecnología RIS compuesta por 168 celdas unitarias que consta de 90 parches circulares con 78 Split-ring resonador, esta antena funciona en la banda de 1900 MHz, que en Ecuador esta banda es utilizada por las operadoras CONCEL conocida como claro, OTECEL utilizada por las operadoras Movistar y Tuenti y por ultimo CNT, siendo un instrumento importante para la comunicación diaria de los ecuatorianos, El diseño propuesto es una RIS pasiva que trata de una estructura que difracta, refracta y refleja una onda incidente sin la necesidad de utilizar componentes pasivo. La antena RIS presentada en este proyecto de investigación mencionado en este párrafo que posee una confiable reflexión de la onda incidente que se encuentra en la banda de 1900 MHz, las ondas que están fuera del ancho de banda que es de 1900 MHz a 1990 MHz serán ignoradas por la antena RIS y permitiendo su circulación libre por el medio sin reflectarlas difractarlas o refractarlas. Mediante la tecnología Split-ring resonators permite dirigir la onda incidente a diversos ángulos. El número de celdas permite que la señal tenga una inclinación mayor en comparación con la estructura de 168 celdas, también al girar las celdas, el lóbulo principal de la señal se puede desviar hasta -17 grados hacia la derecha siempre y cuando el ángulo de rotación oscile entre 5 a 45 grados. El diseño presentado se presenta en la Fig.1.

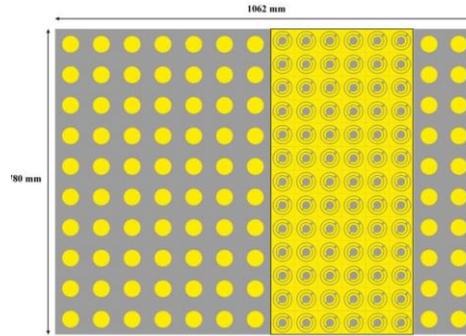


Figura 1: Diseño de la RIS de 168 celdas unitarias
(Diseño de una tecnología de superficie reconfigurable (RIS) en la banda de 1900 MHz) [17]

La Fig.2 muestra la reflexión que produce la antena RIS para una onda incidente producida por una antena de bocina que funciona en la banda de 1900 MHz.

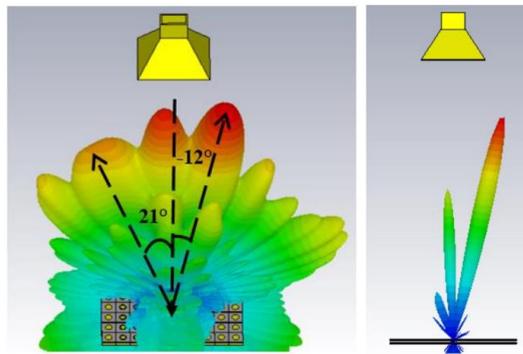


Figura 2: Vista 3D de la reflexión de ondas en la banda de 1900 MHz
(Diseño de una tecnología de superficie reconfigurable (RIS) en la banda de 1900 MHz) [17]

En [18] la propuesta es la implementación de una RIS para las comunicaciones inalámbricas en la banda de 5 GHz. Para ello, se implementa 40x4 celdas unitarias es decir 160 como muestra la Fig.3.

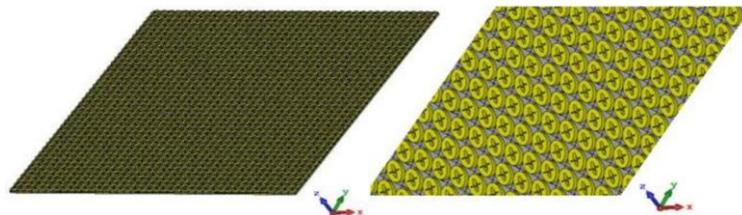


Figura 3: Diseño de la RIS propuesta.
(Implementación de Superficies Inteligente Reconfigurable (RIS) para realizar experimentos con las comunicaciones inalámbricas Wi-Fi en el rango de 5 GHz aplicadas a entornos interiores) [18]

En este trabajo, se considera de manera relevante la teoría de Floquet, que se emplea para analizar sistemas con periodicidad en el tiempo o en el espacio, así como para el estudio y

la optimización de antenas con estructuras periódicas. En otras palabras, se utiliza "para determinar los coeficientes y el número de onda espacial que optimizan el rendimiento deseado de la antena" [18]. Esta estructura se la analizo en 2 ángulos de rotación que son 15° para ángulos estrechos y 60° grados para ángulos de cobertura más amplia.

Al analizar en un ángulo de 15° grados como se presenta en la Fig.4, se obtiene una eficiencia de 0.839, es decir un 84% de energía se convierte en radiación útil. La onda reflejada se proyecta a un ángulo de 30°.



Figura 4: RIS analizada a 15° de inclinación
(Implementación de Superficies Inteligente Reconfigurable (RIS) para realizar experimentos con las comunicaciones inalámbricas Wi-Fi en el rango de 5 GHz aplicadas entornos interiores) [18]

En el ángulo de 60% se mantiene la misma eficiencia y su onda reflejada se proyecta a un ángulo de 120° como muestra la Fig.5.



Figura 5: RIS analizada a 30° de inclinación.
(Implementación de Superficies Inteligente Reconfigurable (RIS) para realizar experimentos con las comunicaciones inalámbricas Wi-Fi en el rango de 5 GHz aplicadas entornos interiores) [18]

Para probar el funcionamiento de la RIS se enviaron datos y videos mediante una antena bocina de 5 GHz la RIS y un receptor.

2.2 COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

La comunicación inalámbrica es una tecnología que facilita la transmisión de datos, voz y video sin requerir cables físicos, esto es posible porque utiliza las ondas electromagnéticas como radiofrecuencia, microondas, infrarrojas o incluso luz visible, para transmitir información de un dispositivo a otro [11].

Este tipo de comunicación es fundamental en la era moderna, ya que es la base de las tecnologías como Wi-Fi, bluetooth, redes celulares y sistemas de comunicación por satélite. Los antecedentes de la comunicación inalámbrica data de los experimentos realizados por James Clerk Maxwell y Heinrich Hertz en el siglo XIX, quienes demostraron la existencia de ondas electromagnéticas. A principios del siglo XX Guglielmo Marconi y Nikola Tesla desarrollaron y perfeccionaron la transmisión de señales de radio dando paso más tarde a la invención de la televisión y la comunicación móvil [15]. La Fig.6 muestra los dispositivos que utilizan una señal inalámbrica para su comunicación en la actualidad.



Figura 6: Dispositivos que utilizan comunicación inalámbrica
(Simulación de comunicaciones inalámbricas apoyadas por superficies inteligentes reconfigurables asumiendo la presencia de un enlace directo” escuela politécnica nacional) [11].

2.2.1.1 Modulación

Se define como el proceso de alterar una o más propiedades de una onda portadora para transmitir información [6]. Los principales tipos de modulación son:

- **AM (Modulación de Amplitud):** Se ajusta la amplitud de la onda portadora.
- **FM (Modulación por Frecuencia):** Se cambia la frecuencia de la portadora.
- **PM (Modulación de Fase):** Se modifica la fase de la onda portadora.

En la Fig.7 se ilustran los tipos de modulación de señal utilizados para transmitir información de manera inalámbrica.

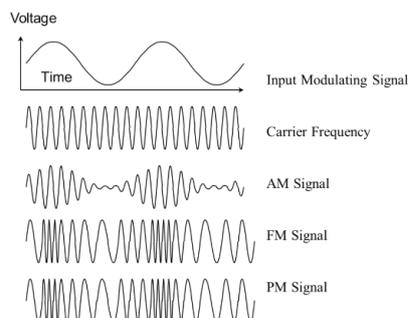


Figura 7: Tipos de modulación de la señal
(Comunicaciones inalámbricas asistidas por RIS: Prototipado, formación adaptativa de haces y pruebas de campo en interiores y exteriores.) [15]

2.2.2 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es la gama de todas las frecuencias posibles de ondas electromagnéticas. La comunicación inalámbrica utiliza diferentes partes del espectro según la aplicación y la tecnología [11].

El espectro electromagnético se organiza por la longitud de onda y la frecuencia. La longitud de onda es la distancia entre dos picos consecutivos de una onda, mientras que la frecuencia es el número de ondas que pasan por un punto en un segundo, medida en hertzios (Hz) [2].

2.2.2.1 Regiones del espectro electromagnético

La banda de trabajo va desde pocos KHz a varios GHz, una propiedad distintiva de la radiofrecuencia es su capacidad para atravesar obstáculos, lo que la hace ideal para comunicaciones de largo alcance [4].

La radio frecuencia es aplicada en la radio AM/FM, televisión, Wi-Fi, Bluetooth y comunicaciones móviles (3G, 4G y 5G) [4].

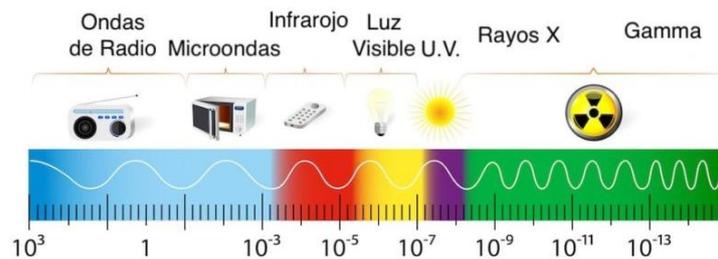


Figura 8: Espectro electromagnético

(Generación de clave secreta asistida por Superficies Reflectantes Inteligentes con fase discreta en un entorno estático) [4]

Microondas

Las redes microondas generalmente su rango de operación es desde los 1 GHz a 300 GHz, su característica especial es la alta capacidad de transmisión de datos, pero puede verse afectada por condiciones meteorológicas, generalmente este tipo de comunicación necesita una línea de visión clara entre los transmisores y receptores. Sus aplicaciones son muy diversas como las redes de telecomunicaciones, radares, enlaces punto a punto hasta un horno de microondas de que tiene en cualquier hogar [3].

Infrarrojo (IR)

Su banda de operación va desde los 300 GHz a 400 THz. Este tipo de comunicación es utilizada para comunicaciones corto alcance; no atraviesa objetos sólidos, reduciendo así la

interferencia, pero sacrificando su alcance de transmisión [15]. Sus aplicaciones principales son en controles remotos, comunicaciones de dispositivos electrónicos cercanos y sensores. Los dispositivos que utilizan este tipo de comunicación deben utilizar diodos emisores de infrarrojo (IR LED) el cual emite una señal de luz que incluya la información que se quiere transmitir a otro dispositivo.

Luz Visible y Laser

La luz visible forma parte del espectro electromagnético entre 400 THz y 800 THz, posee una alta velocidad de transmisión y una gran capacidad de datos, pero requiere una línea de visión directa y es sensible a las condiciones ambientales. Es utilizada en un espacio libre (FSO), Li-Fi (Tecnología de red óptica inalámbrica que utiliza luz LED o infrarroja para transmitir datos) [15].

2.2.3 Ventajas y Desventajas de la Comunicación Inalámbrica.

2.2.3.1 Ventajas

- **Movilidad:** Permite la conectividad sin restricciones de cables, facilitando el acceso a servicios y redes desde cualquier lugar
- **Instalación y mantenimiento:** Evita el despliegue de infraestructura física, lo que reduce costos y simplifica la instalación.
- **Escalabilidad:** Fácil de expandir, especialmente en entornos donde agregar cableado sería complicado o costoso.
- **Conectividad Global:** Facilita la comunicación a nivel mundial como en el caso de las redes celulares y los sistemas satelitales.

2.2.3.2 Desventajas

- **Interferencia y Ruido:** Las señales inalámbricas pueden ser interferidas por otros dispositivos, condiciones climáticas y barreras falsas.
- **Seguridad:** Las redes inalámbricas son más vulnerables a los ataques cibernéticos, como el espionaje pasivo, el “Sniffing” (captura de datos de la red mediante dispositivos llamados sniffers) y ataques de denegación de servicios (DoS).
- **Capacidad Limitada:** El ancho de banda disponible en las comunicaciones inalámbricas puede ser limitado en comparación con las conexiones por cable.

- **Latencia:** En algunos casos, como en la comunicación satelital puede haber una latencia significativa que afecta la calidad de comunicación.

2.2.3.3 Relación entre longitud de onda, frecuencia y energía

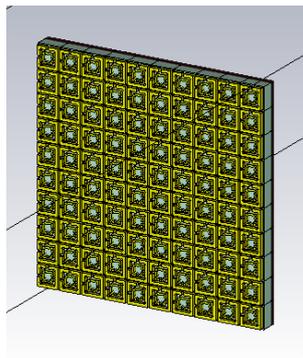
La frecuencia y la longitud de onda son inversamente proporcionales: a mayor frecuencia, menor longitud de onda, y viceversa [18].

A medida que aumenta la frecuencia de una onda electromagnética, también lo hace su energía. Por eso, las ondas de radio tienen menos energía que los rayos gamma, que son altamente energéticos.

2.3 SUPERFICIES REFLECTANTES INTELIGENTES (RIS)

Las RIS son superficies de material conductor que son capaces de reflejar las ondas electromagnéticas incidentes de manera controlada y modificada de manera inteligente según su aplicación, con el fin de optimizar la propagación de la señal y reflejarla a puntos específicos [7], están diseñadas también para controlar y ajustar la cantidad de onda reflejada en función de las condiciones ambientales [19]. Estas características de las RIS la hacen una perfecta candidata para la transmisión de información inalámbricamente en el campo de las telecomunicaciones.

Una superficie reflectante inteligente está formada por un conjunto de elementos pasivos o reflectores que son capaces de manipular “las ondas electromagnéticas (como las ondas de radio, microondas, o incluso la luz)” [19] al modificar la fase, amplitud y polarización de las señales que actúan sobre ella. Estos componentes suelen ser materiales metasuperficies [19], es decir, materiales artificiales diseñados para interactuar con las ondas electromagnéticas de manera específica [19]. La Fig.9 muestra un ejemplo de una RIS de 10x10 simulada en CST Studio.



*Figura 9: Diseño de la RIS propuesta.
(Autor – CST Studio/Versión Estudiantil)*

2.3.1 Principio de funcionamiento

Las superficies reflectantes inteligentes funcionan mediante una programación dinámica de cada uno de sus elementos, conocida como "meta-átomos". Estos elementos ajustan las propiedades de las ondas que los impactan (como la fase, amplitud y dirección), lo que permite reflejar, refractar o dispersar las señales en direcciones controladas [1].

- **Recepción de la señal incidente:** La señal de radiofrecuencia (RF) o microondas que proviene de una fuente, como una torre celular, impacta en la superficie reflectante inteligente.
- **Modificación de la señal:** Los elementos de la RIS manipulan la señal, ajustando sus propiedades. Por ejemplo, pueden cambiar la fase de la señal para que todas las señales reflejadas se sumen constructivamente y mejoren la potencia en un punto específico.
- **Reflexión hacia el destino:** La RIS redirige la señal hacia un receptor específico, como un dispositivo móvil, optimizando la señal recibida.

2.3.2 Beneficios de las RIS

Las RIS por sus propiedades mejora la calidad de la señal en entornos donde hay obstáculos que bloquean la señal, como en edificios o áreas urbanas densas. Al ajustar dinámicamente la dirección de las señales reflejadas, se puede superar la interferencia y mejorar la cobertura [19].

A diferencia de las tecnologías tradicionales que requieren amplificadores para mejorar la señal, las RIS son pasivas o consumen muy poca energía. Solo requieren energía para cambiar el estado de los meta-átomos, lo que las convierte en una opción eficiente desde el punto de vista energético [7].

Las superficies reflectantes inteligentes permiten un control preciso del patrón de radiación. Esto significa que pueden dirigir las señales exactamente donde se necesitan, lo que es especialmente útil en ambientes de alta densidad de usuarios, como estadios o centros urbanos [7].

Al controlar cómo se refleja la señal, las RIS pueden minimizar las interferencias entre diferentes señales y dispositivos, mejorando la capacidad general de la red y reduciendo las colisiones de datos.

Optimizando el trayecto de la señal, las RIS pueden reducir los tiempos de transmisión y mejorar el rendimiento general de la red, lo que es vital para aplicaciones de baja latencia como las comunicaciones en tiempo real y el Internet de las Cosas (IoT) [18].

2.3.3 Materiales utilizados en las RIS

Las RIS están compuestas por materiales y tecnologías avanzadas que les permiten modificar y controlar las propiedades de las ondas electromagnéticas de manera activa. Estos materiales son fundamentales para el funcionamiento de las RIS, puesto que permiten ajustar la dirección, fase, amplitud y polarización de las señales [10].

2.3.3.1 Meta superficies

Las metasuperficies son la base de las superficies reflectantes inteligentes. Son materiales artificiales compuestos por arreglos de estructuras pequeñas y repetitivas llamadas meta-átomos o meta-elementos, que están diseñadas para interactuar con las ondas electromagnéticas de formas específicas [15].

Una de sus propiedades es la manipulación electromagnética al cambiar la manera en que las ondas electromagnéticas se reflejan, refractan o difractan. Esto permite que las RIS controlen cómo se propaga una señal. Otra propiedad importante es su reconfigurabilidad lo que significa que sus propiedades pueden ajustarse dinámicamente en respuesta a señales de control externas, esto les permite modificar el comportamiento de las señales en tiempo real [17].

Los materiales Típicos para las RIS son:

- **Metales como el oro o el cobre:** Estos materiales se utilizan comúnmente en los meta-átomos debido a sus propiedades conductoras. Permiten la reflexión y

redireccionamiento de ondas electromagnéticas, especialmente en el rango de microondas y radiofrecuencias [17].

- **Materiales dieléctricos:** Son materiales que no conducen electricidad, pero pueden influir en los campos electromagnéticos. Los dieléctricos, como el silicio o ciertos polímeros, se utilizan para controlar la refracción de las señales a través de las metasuperficies [17].
- **Materiales plasmónicos:** En frecuencias más altas, como la luz visible o el infrarrojo, se emplean materiales plasmónicos que poseen la capacidad de concentrar y manipular las ondas electromagnéticas a escala nano, como el grafeno [17].

2.3.3.2 Diodos PIN

Los diodos PIN son componentes semiconductores ampliamente utilizados en las RIS reconfigurables. Son clave para gestionar la reflexión de las ondas electromagnéticas a través de las metasuperficies [18].

Funcionamiento:

- Un diodo PIN está formado de tres capas: una capa de semiconductor tipo P, una capa intrínseca (no dopada) en el medio y una capa de semiconductor tipo N.
- Cuando se aplica una tensión externa al diodo PIN, puede funcionar como un interruptor que controla la reflexión o transmisión de las ondas electromagnéticas [17].
- Al integrar diodos PIN en cada meta-átomo, se puede ajustar la fase y la dirección de la señal de forma activa, lo que hace que la RIS sea reconfigurable en tiempo real [17].

2.3.3.3 Varactores

Los varactores son diodos que actúan como capacitores variables y se utilizan en las RIS para ajustar la fase de las ondas electromagnéticas [18].

Características:

Cuando se aplica un voltaje, la capacitancia del varactor cambia, lo que a su vez altera la fase de la onda electromagnética reflejada [16]. Son utilizados en cada elemento de las metasuperficies para ajustar las propiedades de la onda con una alta precisión, mejorando la capacidad de manipular la señal en tiempo real [18].

2.3.4 Fundamentos Matemáticos y Estructurales en el Diseño de las RIS

2.3.4.1 Teoría de Floquet

Las superficies reflectantes inteligentes están diseñadas con matrices de elementos controlables, llamados metasuperficies o células reflectoras, que permiten modificar las propiedades de las ondas electromagnéticas, tales como la polarización, fase, y amplitud. Al ser superficies periódicas, los elementos de la RIS pueden modelarse usando principios de periodicidad, y la teoría de Floquet se vuelve útil para estudiar cómo estas ondas interactúan con la estructura [18].

En el análisis de una RIS, se pueden modelar las interacciones de las ondas incidentes con la estructura periódica (en este caso la RIS) usando la teoría de Floquet-Bloch. Según este principio, las respuestas de la ecuación de onda en una estructura periódica pueden descomponerse en modos de Floquet o modos de Bloch, que representan el comportamiento de las ondas a lo largo de la superficie [6].

Las ondas incidentes en una superficie periódica generan modos de difracción que dependen de la periodicidad de los elementos y de la longitud de onda. Cada elemento de la RIS puede diseñarse para producir una respuesta específica, y la periodicidad de estos elementos permite que se genere una descomposición en modos de Floquet [4].

Las constantes de Floquet se obtienen de la periodicidad de la superficie y proporcionan información sobre cómo la onda reflejada o transmitida se modifica al interactuar con la estructura. Para una onda incidente que incide sobre una superficie RIS periódica con un periodo “ d ”, la teoría de Floquet sugiere que la onda reflejada se descompondrá en una serie de modos difractados que se propagan con diferentes direcciones y fases. Cada uno de estos modos corresponde a un múltiplo de la constante de Floquet “ K ”, lo cual permite ajustar la dirección y fase de la onda reflejada [18].

Si una onda plana incide en la superficie RIS, la respuesta reflejada se describe en la ecuación 1.

$$E_r(x, y) = \sum_n C_n e^{j(k_x + 2\pi n/d)x} e^{jk_y y} \quad (1)$$

Donde:

- $E_r(x, y)$ es el campo reflejado
- C_n son los coeficientes de los modos de Floquet.
- k_x y k_y constituyen las partes del vector de onda incidente.
- d es el periodo de la RIS.

Los términos $2\pi n/d$ representan los modos de Floquet, y controlan las direcciones adicionales en las que puede reflejarse la onda.

2.3.4.2 Factor Array

El factor de array describe cómo una configuración de múltiples elementos radiantes (como antenas individuales en una matriz) “influye en el patrón de radiación de toda la antena” [16]. Este concepto es fundamental en el diseño de sistemas de antenas de array, como los arrays en fase, ya que permite ajustar la dirección y la forma del haz radiado o recibido, mejorando la ganancia y reduciendo la interferencia en direcciones no deseadas [20].

El factor de array es una función que depende de la disposición y la fase de los elementos de una matriz de antenas. Matemáticamente, para una matriz de n elementos, el factor de array $AF(\theta, \phi)$ se puede expresar como:

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j(\vec{k} \cdot \vec{r}_n)} \quad (2)$$

Donde:

- I_n es la amplitud y fase de la corriente en el n -ésimo elemento.
- \vec{k} representa el vector de onda de la señal (que depende de la dirección de la radiación (θ, ϕ)).
- \vec{r}_n es la posición del n -ésimo elemento de la matriz en coordenadas espaciales.

El factor de array determina cómo las ondas emitidas por los diferentes elementos de la matriz se combinan, dependiendo de las posiciones relativas y las fases de las antenas individuales [18].

Es importante tener en cuenta cada uno de estos parámetros para garantizar la eficiencia, fiabilidad y calidad de transmisión de datos [20].

2.3.4.3 Frecuencia

La frecuencia se define como la cantidad de ciclos de una onda que ocurren en un segundo y su unidad de medida es el hertz (Hz), en comunicaciones inalámbricas las frecuencias utilizadas van desde pocos MHz (megahercios) hasta GHz (gigahercios) [6].

La frecuencia es importante en el mundo de las telecomunicaciones debido a que determina el comportamiento de la señal, como su alcance y capacidad de penetración a través de obstáculos. Las frecuencias bajas como las que se usan en radio AM pueden viajar a una larga distancia y atravesar barreras físicas como paredes. Las frecuencias más altas, como las usadas en Wi-Fi o microondas, tienen mayor capacidad para transmitir datos, pero suelen tener menos alcance y penetración [10]. En la Fig.10 se muestra gráficamente la longitud de onda y el periodo.

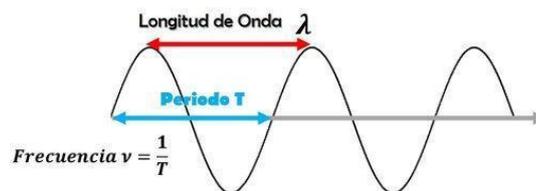


Figura 10: Frecuencia de una onda
(Implementación de superficie inteligente reconfigurable (RIS) para realizar experimentos con comunicaciones inalámbricas Wi-Fi en el rango de 5 GHz aplicadas a entornos interiores) [10]

2.3.4.4 Ancho de Banda

Es la cantidad de datos que pueden transmitirse a través de una conexión en un determinado periodo de tiempo, normalmente medida en bits por segundo (bps), en términos de frecuencia es la diferencia entre la frecuencia más alta y la más baja que puede ser empleada para la señal [10].

Un mayor ancho de banda permite transmitir más datos simultáneamente, lo que se traduce en una mayor tasa de transferencia. Sin embargo, un mayor ancho de banda también puede hacer que la señal sea más susceptible a interferencias [11]. Los tipos más comunes de anchos de banda incluyen:

- **Ancho de Banda Estrecho:** Se refiere a conexiones de baja velocidad generalmente por debajo de 64 kbps, esta velocidad se encuentra en antiguos routers de marcación telefónica [11].
- **Ancho de Banda Medio:** Rango de velocidad intermedia, típicamente desde 100 kbps hasta algunos Mbps. Las conexiones ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), es asimétrico porque la velocidad de descarga es superior a la velocidad de carga utilizada por las líneas telefónicas de cobre tradicionales [11].
- **Ancho de Banda Ultra-Alto:** Conexiones superiores a 100 Mbps, comúnmente disponibles en redes de fibra óptica o en algunas conexiones de 5G [11].

En la Fig.11 se muestra gráficamente la definición del ancho de banda.

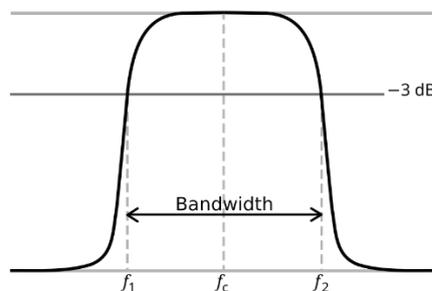


Figura 11: Ancho de banda

(Simulación de comunicaciones inalámbricas soportadas por superficies inteligentes reconfigurables asumiendo la presencia de un enlace directo) [11]

2.3.4.5 Potencia de Transmisión

Se refiere a la cantidad de energía emitida por el transmisor en una señal de radiofrecuencia medida en vatios (W) o milivatios (mV). A mayor potencia de transmisión puede aumentar el alcance de la señal. Permitiendo que viaje a distancias más largas. Sin embargo, esto también puede aumentar la interferencia con otras señales y el consumo de energía, además de estar regulado por las autoridades para evitar interferencias por otros dispositivos [20].

2.3.4.6 Sensibilidad de Receptor

La capacidad de sensibilidad del receptor es la mínima potencia de señal que un receptor es capaz de detectar y procesar adecuadamente, medida en decibelios milivatios (dBm). Una mayor sensibilidad significa que el receptor puede captar señales más débiles, lo que es crucial en ambientes donde la señal puede atenuarse o debilitarse. Esto mejora el alcance y confiabilidad de la comunicación, comúnmente en lugares con obstáculos o a largas distancias [20].

2.3.4.7 Adaptación

Es una característica importante para lograr una eficiente transferencia de energía. El objetivo principal de la adaptación es modificar la impedancia de entrada o salida para que sea igual con la impedancia característica de la línea de transmisión o del dispositivo al cual se quiera adherir la antena. [20]

$$r = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3)$$

2.3.4.8 Directividad

La directividad de una antena es una medida de cómo está enfocada la radiación de la antena en una dirección particular, en comparación con una antena ideal que emite uniforme en todas las direcciones (una antena isotrópica) [18].

La antena que tiene una alta directividad concentra la mayor parte de su energía en una dirección específica, lo que permite que la señal alcance distancias mayores en esa dirección, esto es útil en aplicaciones donde se necesita enfocar la señal como enlaces punto a punto y radares [17].

Para analizar la directividad de una antena se utiliza el patrón de radiación el cual describe como se distribuye la potencia radiada en el espacio. La directividad se relaciona con el “lóbulo principal” de este patrón, que es la región donde se concentra la mayor parte de la energía [17].

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

Donde:

- P_{max} Es la potencia radiada en la dirección deseada.
- P_{total} Es la potencia que irradia la antena.
- Ω Es el ángulo sólido en la dirección deseada.

2.3.4.9 Ganancia

Es la habilidad de la antena para focalizar la energía en una dirección particular en lugar de distribuirla uniformemente en todas las direcciones, la ganancia de una antena se compara con la de una antena de referencia (isotrópica) (dBi) o con una antena dipolo (dBd) [20].

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

Donde:

- G Es la ganancia de la antena.
- P_{max} Es la potencia máxima que irradia en la dirección deseada.
- P_{total} Es la potencia total que irradia de la antena.

2.3.4.10 Eficiencia

En una antena la eficiencia se refiere a la relación entre la potencia radiada por una antena y la potencia total que se le suministra. Esta relación indica cuanta de la energía que se introduce en la antena se convierte efectivamente en radiación electromagnética y cuanta se pierde en forma de calor o por otras causas [20]. Los tipos de eficiencia son:

- **Eficiencia de radiación:** Proporción de la potencia radiada en relación con la potencia total, considerando las pérdidas por resistencia y otros factores internos de la antena.

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (6)$$

Donde:

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

Eficiencia total: Incluye la eficiencia de radiación más cualquier pérdida adicional, como las pérdidas por mal acoplamiento con el transmisor [11].

Al hablar de RIS pasivas, influye la reflexión de la onda electromagnética en la superficie reflectante de la RIS. Así, la eficiencia de una antena RIS pasiva también puede ser

dependiente de cuan eficaz la superficie reflectante dirige la energía radiada en la dirección deseada [18].

2.3.4.11 Fase

La fase Φ entre la onda incidente y la onda reflejada es crucial para controlar la dirección del haz. Este ajuste de fase se puede lograr modificando la forma o las características específicas de los elementos de la antena RIS. [18]

$$\phi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \quad (7)$$

Donde:

- d Se considera la distancia entre los elementos de la antena RIS.
- λ Se refiere a la longitud de onda electromagnética.

2.3.4.12 Interferencia y Ruido

La calidad de la comunicación inalámbrica puede verse afectada por la interferencia de otras señales y el ruido ambiental. Las técnicas de filtrado, la elección adecuada del canal de frecuencia y el uso de tecnología de espectro ensanchado ayudan a mitigar estos problemas [6].

2.3.4.13 Capacidad de canal y Ancho de banda

El ancho de banda disponible en un canal establece la cantidad de datos que es posible transmitir. A mayor ancho de banda es mayor la capacidad de transmisión de datos [8].

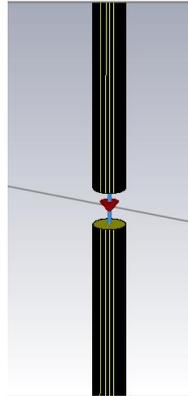
2.3.5 Alimentación de la RIS

Las RIS están diseñadas para redirigir, amplificar, y controlar las señales electromagnéticas que inciden sobre ellas sin necesitar alimentación directa en cada elemento de la superficie. Esto contrasta con las antenas convencionales, donde cada elemento radiante suele estar alimentado directamente para emitir o recibir señales [18].

En una RIS, cada elemento (o meta-átomo) está diseñado para ajustar la fase, la amplitud o la polarización de la onda electromagnética incidente mediante componentes pasivos o de baja potencia, en lugar de alimentarse directamente para transmitir o recibir [15].

2.4 ANTENAS DIPOLO

La antena dipolo es un dispositivo que transforma las señales eléctricas que recibe en ondas electromagnéticas y de igual manera para transmitir. La eficiencia y alcance de la comunicación inalámbrica dependen en gran medida de diseño y la ubicación de la antena, se ha seleccionado la antena dipolo como alimentador de la RIS por su uso comercial en los hogares donde poseen Wi-Fi [22].



*Figura 12: Antena dipolo diseñada en CST Studio
(Autor – CST Studio/Versión Estudiantil [22])*

La antena dipolo es una de las antenas más simples y consta de dos elementos conductores de igual longitud de manera lineal, su nombre proviene del hecho de que consta de dos polos o elementos conductores generalmente de igual longitud que son responsables de la emisión y recepción de ondas electromagnéticas [22].

La longitud total de un dipolo resonante es, en general, “la mitad de la longitud de onda de la señal que se quiere transmitir o recibir” [15]. Por ejemplo, una antena dipolo para una frecuencia de 100 MHz (frecuencia de radio FM) tendría una longitud total cercana a 1.5 metros (1/2 de la longitud de onda de 3 metros) [14].

Las antenas dipolo generalmente están polarizadas linealmente, lo que significa que las ondas electromagnéticas que transmite contienen campos magnéticos y eléctricos que vibran en un solo plano. La polarización puede ser vertical u horizontal, dependiendo de la orientación de la antena [23].

La antena dipolo irradia en un patrón de forma de "donut" o toroide, con la radiación máxima perpendicular a los elementos del dipolo y mínima en las direcciones a lo largo de los extremos de los elementos [22].

Para conocer el radio de una antena dipolo se utiliza la siguiente ecuación.

$$R = \frac{D}{2} \quad (8)$$

Donde:

- D es el diámetro de los elementos conductores de la antena dipolo
- El radio también se puede calcular de la siguiente forma:

$$R = 0.001\lambda \quad (9)$$

Donde:

- λ Se considera la longitud de onda.

La ecuación (10) expone la longitud de onda.

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (10)$$

Donde:

- C se refiere a la velocidad de la luz
- f Es la frecuencia en la que va a trabajar la antena dipolo.

La longitud del dipolo será expresada mediante la ecuación (11).

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (11)$$

Cabe recalcar que de acuerdo con la aplicación y del diseño que se realice se utiliza $\frac{\lambda}{2}$ o $\frac{\lambda}{4}$.

Para el cálculo del Gap que representa el espacio que hay entre los elementos conductores de la antena dipolo se obtiene con la ecuación (12):

$$Gap = \frac{L}{200} \quad (12)$$

El cálculo de k es un parámetro de ajuste que se le proporciona la longitud para condiciones reales de la antena y esta descrita en la ecuación (13).

$$k = 0.9787011 + \frac{-10.88627 - 0.9787011}{\left[1 + \left(\frac{R_L/d}{0.0004490702}\right)^{1.792529}\right]^{0.3004597}} \quad (13)$$

2.4.1 Ventajas de la antena dipolo

Es fácil de construir ya que solo necesita dos conductores rectos. Su versatilidad y eficiencia lo hacen adecuado para una gran cantidad de aplicaciones en telecomunicaciones dependiendo de su implementación se podría ocupar también arreglo de antenas. [22]

Al observar el patrón de radiación del dipolo cuando esta en el plano horizontal tiene un patrón de radiación casi omnidireccional. Es decir, la antena irradia o recibe señales en todas las direcciones alrededor de su eje, pero solo en un plano perpendicular a los elementos del dipolo [23].

La energía radiada es uniforme en todas las direcciones en ese plano, formando un patrón de radiación circular. Por otro lado, en el plano vertical el dipolo tiene poca o ninguna radiación. Esto significa que la antena no irradia energía en las direcciones a lo largo de los extremos del dipolo. El patrón de radiación es similar a la forma de un "donut" o toroide, con la máxima radiación en ángulos perpendiculares al eje de la antena y mínimos (nulos) a lo largo del eje del dipolo [16].

2.4.2 Arreglo de antena dipolo

Un arreglo de antenas se refiere a un conjunto de antenas individuales (en este caso, dipolos) que están dispuestas y alimentadas de manera tal que sus señales se combinan para producir un patrón de radiación deseado. Las principales razones para usar arreglos de antenas son mejorar la ganancia (la habilidad de la antena para concentrar la energía en una dirección específica) y la direccionalidad (mejorar la cobertura en una zona específica o reducir interferencias de otras direcciones) [22]. La Fig.13 muestra un arreglo de antena dipolo de 8 etapas diseñado en el programa CST Studio.

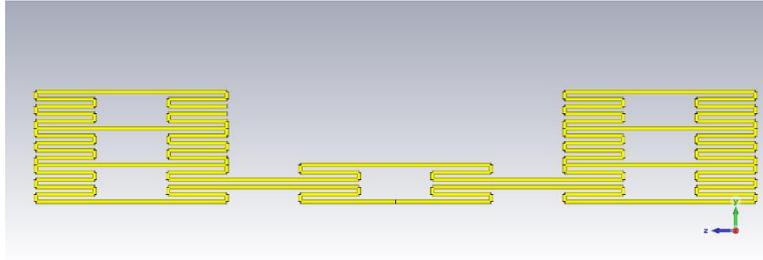


Figura 13: Diseño en CST de un arreglo de antenas dipolo
(Autor – Software electromagnético- Versión Estudiantil)

2.4.3 Características de un arreglo de dipolos

Un arreglo de dipolos puede proporcionar una ganancia mucho mayor que una antena dipolo individual. Esto se debe a la superposición constructiva de las ondas electromagnéticas generadas por cada dipolo [21].

La configuración de un arreglo puede hacerse de manera que la energía se concentre en una dirección específica, mejorando la eficiencia de transmisión y recepción en esa área. Al modificar la amplitud y la fase de las señales que alimentan cada dipolo, se puede controlar hacia dónde se enfoca el haz [22].

Los arreglos de dipolos pueden ser diseñados para ajustar la impedancia total del sistema, lo que mejora la eficiencia de acoplamiento con el transmisor o receptor, reduciendo pérdidas [20].

Al cambiar la distancia entre los dipolos y la fase con la que se alimentan, se puede ajustar el patrón de radiación, haciéndolo más direccional u omnidireccional según lo requerido.

2.5 ANTENAS MICROSTRIP

Son conocidas también como antenas de parche o antenas de microcinta, son un tipo de antena ampliamente utilizada en aplicaciones de telecomunicaciones debido a su bajo perfil, facilidad de fabricación y capacidad de integrarse con otros circuitos en una misma placa [23]. La Fig.14 muestra un ejemplo de antena microstrip diseñado en el programa CST Studio.

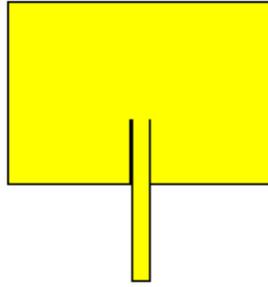


Figura 14: *Diseño en CST de una antena microstrip
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)*

2.5.1 Estructura

Consisten en un parche conductor (usualmente de cobre) sobre un sustrato dieléctrico, con un plano de tierra en la parte inferior [23]. El parche conductor puede adoptar diversas formas, siendo las más frecuentes la rectangular, circular y triangular.

Este tipo de antenas por su facilidad de diseño puede trabajar en bandas de frecuencia desde pocos MHz hasta varios GHz, pero especialmente se utiliza para microondas (1- 100 GHz) [5].

2.5.2 Funcionamiento

El parche conductor actúa como un resonador que irradia energía electromagnética cuando se le aplica un voltaje de alimentación. El campo electromagnético se extiende tanto hacia el sustrato como hacia el aire, creando una radiación que se aprovecha para la transmisión de señales. [21]

El diseño de una antena microstrip depende de factores como la frecuencia de operación, el tipo de sustrato dieléctrico y el grosor del sustrato, que influye en la impedancia y el ancho de banda de la antena. [21]

2.5.3 Parámetros importantes para el diseño de una antena microstrip

La antena microstrip tiene parámetros importantes importante para su diseño que son los siguientes:

2.5.3.1 Frecuencia de Resonancia.

La frecuencia de resonancia es la frecuencia específica a la cual la antena irradia o recibe energía electromagnética de manera más eficiente.

Para una antena microstrip de tipo rectangular la frecuencia de resonancia se encuentra con la ecuación (14).

$$f_0 = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (14)$$

Donde:

- c Se considera la velocidad de la luz en el vacío.
- L Se refiere a la longitud del parche.
- ϵ_{eff} es la permitividad efectiva del sustrato.

2.5.3.2 Permitividad efectiva

Es el valor que representa cómo el campo electromagnético se propaga en un sustrato dieléctrico y el aire adyacente. Es una combinación de la permitividad del sustrato y la del aire. La permitividad efectiva se calcula con la ecuación (15).

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \right) \quad (15)$$

Donde:

- ϵ_r es la permitividad relativa del sustrato.
- h Se considera como el grosor del sustrato.
- W Es considerado ancho del parche.

2.5.3.3 Ancho del parche

El ancho del parche se determina mediante la ecuación (16).

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (16)$$

Donde:

- f_0 es la frecuencia de trabajo.
- ϵ_r es la permitividad relativa del sustrato.

2.5.3.4 Longitud del parche

Para determinar la longitud efectiva (L_{eff}), primero se necesita calcular el incremento de longitud (ΔL) como muestra la ecuación (17)

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} + 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (17)$$

Donde:

- ϵ_{eff} es la permitividad efectiva del sustrato.
- h es la altura del parche.

Luego, “la longitud real del parche” [19] se obtiene con la ecuación (18).

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (18)$$

Donde:

- L_{eff} es la longitud efectiva
- ΔL es el incremento de longitud

Finalmente, con los parámetros anteriormente encontrados y al utilizar la ecuación (19), se calcula la longitud efectiva.

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (19)$$

2.5.3.5 Impedancia de entrada

Es la resistencia eléctrica que la antena presenta en su punto de alimentación. Es un parámetro que determina cómo se adapta la antena a la línea de transmisión para maximizar la transferencia de energía y minimizar las pérdidas por desadaptación [23].

La impedancia de entrada de la antena microstrip está relacionada con el método de alimentación utilizado y la ubicación de la alimentación. Para alimentación por sonda o línea de microstrip, la impedancia se puede aproximar con modelos de circuitos equivalentes y simulaciones de campo [21].

2.5.3.6 Ganancia de Antena

La ganancia de una antena microstrip mide la eficacia con la que la antena convierte la energía eléctrica de entrada en energía radiada en una dirección de preferencia. Refleja la capacidad de la antena para concentrarse en una dirección deseada a diferencia que con la antena isotrópica ideal [22].

$$G = \frac{10 \log_{10}(\eta \cdot D)}{dBi} \quad (20)$$

Donde:

- η Se considera la eficiencia de la antena (generalmente menor que 1 debido a pérdidas).
- D es la directividad de la antena.

2.5.4 Estructura

Las antenas microstrip pueden ser alimentadas mediante distintos métodos, como la alimentación por línea de microstrip que se conecta el parche al circuito [21]. También se puede realizar mediante un conector coaxial que atraviesa el sustrato y alimenta el parche [21], y finalmente utilizando técnicas como acoplamiento por ranura o acoplamiento electromagnético [21].

2.5.5 Diseño de una RIS

Para un correcto diseño de una RIS se debe tener en cuenta primero el diseño de una celda unitaria para una RIS pasiva, que opere a la frecuencia deseada.

2.5.5.1 Longitud de onda en el vacío

La longitud de onda en el vacío (λ_0) es la distancia que recorre una señal electromagnética en un segundo. Este parámetro es inversamente proporcional a la frecuencia: frecuencias más altas resultan en longitudes de onda más cortas [23]. La ecuación de la longitud de onda en el vacío esta representada por la ecuación (21).

$$\lambda_0 = \frac{C}{f} \quad (21)$$

Donde:

- f es la frecuencia de operación de la RIS

2.5.5.2 Longitud de onda del material dieléctrico

La longitud de onda en el dieléctrico (λ_d) es menor que en el vacío debido a la mayor permitividad del material [21]. Este ajuste es necesario porque el dieléctrico afecta como se propagan las ondas electromagnéticas sobre el.

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (22)$$

Donde:

- ϵ_r es la permitividad relativa del material dieléctrico

2.5.5.3 Tamaño del resonador cuadrado

El tamaño del resonador cuadrado (a) debe ser adecuado para resonar a la frecuencia de diseño. Un tamaño es aproximadamente la un medio de la longitud de onda, esto asegura una buena resonancia y adaptación [23]. El tamaño del resonador cuadrado esta descrito en la ecuación (23).

$$a = \frac{\lambda_d}{2} \quad (23)$$

2.5.5.4 Fase de la celda unitaria

La fase (ϕ) determina como se alinea la señal reflejada. Ajustar la fase permite dirigir el haz reflejado en la dirección deseada. La ecuación (24) toma en cuenta la influencia del grosor dieléctrico y la longitud de onda en el dieléctrico [21].

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda_d} \quad (24)$$

Donde:

- d es el grosor del dieléctrico.

2.5.5.5 Cálculo del número de celdas en el Array

El número de celdas en el array afecta el tamaño y la resolución del RIS. Un mayor número de celdas mejora la precisión en la dirección del haz y la cobertura. El tamaño del array determina la cantidad total de celdas necesarias [23], como lo expone la ecuación (25).

$$\text{numero de celdas por lado} = \frac{\text{tamaño del array}}{\text{tamaño de celdas}} \quad (25)$$

2.6 INMERSIÓN DE LAS RIS EN EL CAMPO DE LA DE SEGURIDAD INFORMÁTICA

En el contexto actual de la sociedad, la información, la privacidad y la seguridad son aspectos cada vez más importantes para individuos y organizaciones. Uno de los riesgos a los que se enfrentan día a día es el espionaje pasivo, capturando y recopila una gran cantidad de información [19]. Como es descrito en la comunicación inalámbrica, las señales pueden ser capturadas por dispositivos de receptores y analizadas para extraer información secreta, como: datos personales, contraseñas o información de importante de empresas [2].

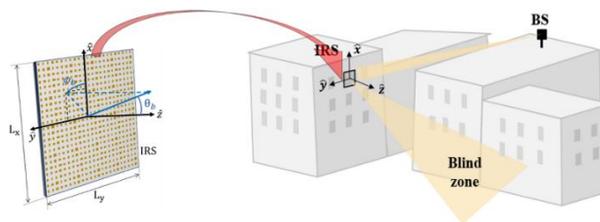


Figura 15: Implementación de una RIS
(Diseño de una tecnología de superficie reconfigurable (RIS) en la banda de 1900 MHz) [17]

La opción elegida para combatir este problema de seguridad contra los ataques de espías pasivos es el uso de las RIS por la capacidad de reflejar las ondas electromagnéticas que emite el router Wi-Fi 5G, manteniendo así la señal solo dentro del espacio de trabajo donde se necesita, de manera que la señal emitida por el router Wi-Fi resulte inalcanzable para los espías pasivos que se encuentran al exterior del espacio de trabajo.

La característica de reflectividad de las RIS la transforma en una herramienta privilegiada para la seguridad de las comunicaciones inalámbricas actuando como barreras de bloqueo o limitando la propagación de las señales que emite el router Wi-Fi, al realizar este proceso estas ondas serán imperceptibles para los espías pasivos que se encuentren en el entorno en que se aplicara esta tecnología [3].

2.7 ESPÍAS PASIVOS

En el contexto de telecomunicaciones y redes los espías pasivos son aquellos espías que perciben la señal desde la distancia con dispositivos o sistemas para recopilar información o datos sin alterar o interferir con la comunicación original a diferencia de un atacante activo, que podría alterar los datos o enviar su propio tráfico [1]. Los espías pasivos logran así violentar la privacidad de personas o empresas escuchando y copiando la información que circula en la red sin modificarla [8].

2.7.1 Técnicas y Mecanismos de Espionaje Pasivo en Redes Inalámbricas.

En redes inalámbricas, las señales se transmiten en el aire, lo cual facilita la posibilidad de interceptarlas sin necesidad de conexión física. Un espía pasivo aprovecha esta característica para capturar datos, como mensajes, contraseñas o información sensible, sin que el emisor o el receptor lo detecten. Esto se logra mediante herramientas y técnicas específicas de interceptación de señales [13].

2.7.1.1 Sniffing de Paquetes

Es la técnica de captura de datos que transitan en la red. Utilizando programas de captura de paquetes, como Wireshark, el espía puede observar los datos transmitidos entre dispositivos. En redes no cifradas o con cifrado débil, el espía puede acceder a la información sin necesidad de descifrarla [8]. En la Fig.16 muestra un esquema como un espía pasivo se

conecta a una red inalámbrica mediante un receptor sin que el dueño de la red tenga conocimiento de esta conexión.



Figura 16: Esquema de sniffer.

(Transmisión segura aprovechando múltiples superficies reflectantes inteligentes en sistemas MIMO) [3]

2.7.1.2 Antenas y amplificadores

Utilizar antenas o receptores que permite a un espía pasivo interceptar señales desde distancias considerables, lo cual facilita el espionaje sin necesidad de estar en el mismo ambiente de los dueños de la red [8].

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGÍA.

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para llevar a cabo una investigación acertada en el diseño de RIS, es esencial seguir una metodología estructurada. En este estudio de investigación, se plantea una metodología mixta que se compone de la siguiente manera.

3.1.1 Metodología Cuantitativa

La metodología cuantitativa se utiliza para ecuaciones matemáticas y para el diseño estructural apropiado que tendrá la RIS, logrando así que la simulación trabaje en la banda de 5 GHz, cumpliendo adecuadamente con el objetivo principal planteado en este tema de investigación.

3.1.2 Metodología exploratoria

La investigación exploratoria aportando una revisión de la literatura disponible sobre RIS como artículos científicos, libros, tesis u otros documentos que contengan información relevante, con el fin de comprender la tecnología, los materiales y los procedimientos adecuados que se pueden utilizar al momento de simular la RIS, eligiendo así el mejor método y material para lograr el objetivo de este proyecto de investigación.

3.1.3 Metodología experimental

La metodología experimental es una forma de investigar y obtener datos empíricos para probar hipótesis científicas. En este enfoque, se manipulan variables independientes como distancia que existe entre el transmisor y la antena RIS, ángulo de inclinación de la antena RIS y posición del transmisor, con el objetivo de observar cómo afectan a las variables dependientes en este caso los parámetros de la RIS. El objetivo de un experimento es determinar si existe una vinculación que afecta desde la modificación de la variable independiente a la variable dependiente.

3.2 TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

Para el estudio de esta relación existente en este proyecto de investigación se realiza las simulaciones respectivas en el programa CST Studio Versión Estudiantil de una antena Wi-Fi de 5 GHz comúnmente utilizada en un hogar, y el comportamiento que sufre cuando interactúa con una RIS que se coloca en el entorno de trabajo de la antena Wi-Fi. La posición correcta de la RIS en el entorno de la antena Wi-Fi impide que la señal que emite la antena Wi-Fi llegue al receptor. La señal es dependiente del tamaño del entorno en el que se simula y las dimensiones del hogar donde se coloca la antena. Estos resultados se obtienen con cada simulación que se realice hasta conseguir un resultado de una baja señal recibida del receptor del espía pasivo proveniente de la antena Wifi.

Una vez recopilados los datos experimentales, se procede al estudio y el análisis de los resultados obtenidos para evaluar si hay una relación importante entre las variables y, además, de ser así, se pueden hacer conclusiones de la efectividad de la RIS al lograr ocultar una red doméstica a espías pasivos.

Su evaluación será considerada en dos aspectos importantes que son, cuando el receptor del espía pasivo reciba una buena señal proveniente de la antena Wi-Fi se considera como un “Acceso Exitoso”, por otro lado, cuando el receptor del espía pasivo reciba una baja señal o no reciba señal proveniente de la antena Wi-Fi se considera un “Acceso Fallido”.

Mediante la aplicación de esta metodología, se espera lograr una buena simulación de un sistema de seguridad contra ataques de espías pasivos que actúe en la banda de 5 GHz, implementando superficies reflectante inteligentes (RIS) para una red doméstica.

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

En esta investigación se toma como población los datos de los resultados obtenidos en las simulaciones del ambiente de trabajo que consiste en un transmisor Wi-Fi (arreglo de antena dipolo de 8 etapas), la antena RIS como bloqueador de señal y el receptor del espía pasivo (arreglo de antena microstrip de dos etapas). En este ambiente de trabajo se modifica la posición del transmisor, la distancia entre el transmisor y la antena RIS y así como el ángulo de inclinación de la antena RIS. Se recopila datos de tipo binomial enfocados en el “Acceso Exitoso” o “Acceso Fallido” de los espías pasivos a la red doméstica.

3.3.1 Muestra

Para trabajar con proporciones (la fracción de veces que un evento ocurre en las simulaciones), la ecuación (26) calcula el tamaño de muestra para este proyecto de investigación.

$$\eta = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{E^2} \quad (26)$$

Donde:

- Z Representa el valor crítico del nivel de confianza.
- p Es considerada la proporción estimada.
- E Representa el margen de error deseado.

En este proyecto para el cálculo de la muestra se toman los siguientes datos:

- Z Es el nivel de confianza 95% =1.96
- p Representa la proporción estimada 0.5
- E Es el margen de error 13% (0.13)

Al utilizar la ecuación (26), con los datos anteriormente propuestos se puede encontrar el tamaño de la muestra de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{E^2}$$

$$\eta = \frac{(1.96)^2 \cdot 0.5 \cdot (1 - 0.5)}{(0.13)^2}$$

$$\eta = 56.82$$

Como tamaño de la muestra se obtiene aproximadamente 57, es decir se debe realizar por lo menos 57 simulaciones del ambiente de trabajo en el programa CST Studio.

3.4 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.4.1 Variable independiente

Tabla 1: Variable Independiente

Variable	Descripción	Indicador	Instrumentos
Dimensiones de la RIS	Las medidas adecuadas para que la RIS funcione en la banda de 5 GHz.	<ul style="list-style-type: none">• Altura• Grosor• Largo• Ancho	Software CST Studio Suite
Posición de la RIS	Cuál es la mejor posición de la RIS para evitar que los espías pasivos se conecten a la red.	<ul style="list-style-type: none">• Angulo de inclinación	
Posición del transmisor	Lugar adecuado para que la RIS logre reflejar la mayor cantidad de señal proveniente del transmisor	<ul style="list-style-type: none">• Posición• Distancia de separación entre el transmisor y la RIS	

3.4.2 Variable dependiente

Tabla 2: Variable Dependiente

Variable	Descripción	Indicador	Instrumentos
Zona de Trabajo de la RIS	Banda de frecuencia en la que trabaje la RIS	<ul style="list-style-type: none">• Banda de 5 GHz	Software CST Studio Suite
Acceso de los espías pasivos en la red doméstica	Tipo binomial	<ul style="list-style-type: none">• Acceso exitoso• Acceso fallido	Software CST Studio Suite

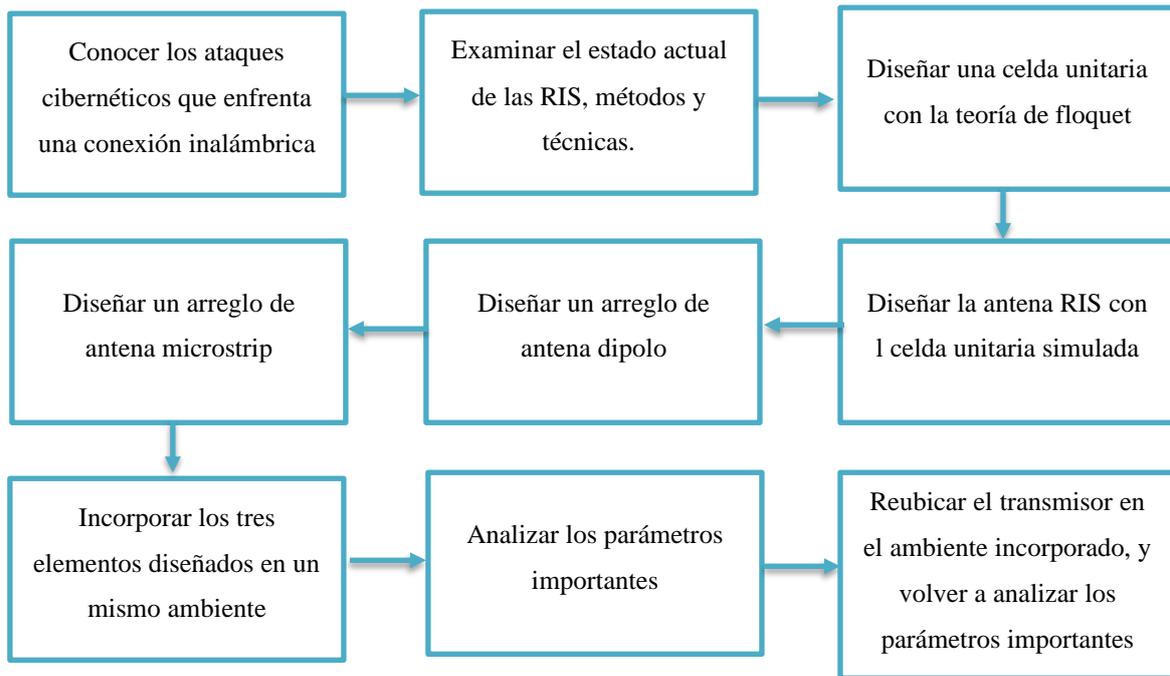
3.5 PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS

Para realizar este proyecto se debe diseñar una antena transmisora representada por un arreglo de antenas dipolo de 8 etapas, por lo general utilizadas en los routers de los hogares,

un receptor de señal del espía pasivo representado por un arreglo de antenas tipo microstrip de 2 etapas, utilizados por receptores comunes por su tamaño y bajo costo y finalmente una antena RIS, la cual se encuentra en medio de la antena transmisora y la antena transmisora siendo el bloqueo para la conexión del espía pasivo a la red de 5 GHz proveniente de la antena Wi-Fi. Esto se realiza en el programa CST Studio Versión Estudiantil.

Para un correcto diseño se debe realizar el siguiente procedimiento:

- 1) Diseñar en el programa CST Studio un arreglo de antenas dipolo de 8 etapas que actúe como antena transmisora de un router Wi-Fi 5G.
- 2) Examinar el estado actual de las RIS, teniendo en cuenta las formas de diseño y las técnicas empleadas para la banda de 5 GHz.
- 3) Diseñar la antena RIS con la teoría de Floquet en el programa CST Studio.
- 4) Diseñar un arreglo de antena microstrip de 2 etapas en el programa CST Studio, esta antena actúa como receptor de señal del espía pasivo que intenta conectarse a una red 5 GHz.
- 5) Incorporar los tres elementos anteriormente diseñados en un mismo ambiente de trabajo en el programa CST Studio.
- 6) Analizar los parámetros importantes como el coeficiente de reflexión, eficiencia radiada, sensibilidad del receptor, ángulo de apertura y el “Acceso Exitoso” o “Acceso Fallido” del receptor del espía pasivo a la red Wi-Fi.
- 7) Reubicar el transmisor en el ambiente de trabajo, y volver a analizar los parámetros anteriormente expuestos.



*Figura 17: Procedimiento del proyecto de investigación.
(Autor)*

3.6 DISEÑO DEL ALIMENTADOR

Para el diseño del alimentador se considera una antena dipolo muy utilizada comercialmente en los routers de 5 GHz de los hogares.

Para poder diseñar una antena dipolo se debe tener en cuenta los siguientes parámetros importantes:

- D . será el diámetro del dipolo.
- f frecuencia de trabajo.
- Gap es la distancia que existe entre los dos polos de la antena.
- L Longitud de la antena dipolo.
- R Radio de los polos de la antena.

Teniendo en cuenta que la frecuencia de trabajo (f) de la antena dipolo es de 5 GHz, el material utilizado es aluminio se puede realizar los cálculos respectivos para el diseño de la antena dipolo que trabaje en esa banda de frecuencia. Con la ecuación (10) se calcula la longitud de onda.

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

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{5 \cdot 10^9 \text{ 1/s}}$$

$$\lambda = 0.06 \text{ m}$$

$$\lambda = 60 \text{ mm}$$

Al utilizar la ecuación (9) se calcula el radio del dipolo.

$$R = 0.001\lambda$$

$$R = 0.001(60)$$

$$R = 0.06 \text{ mm}$$

La Fig.18 muestra el radio simulado en el programa CST Studio.

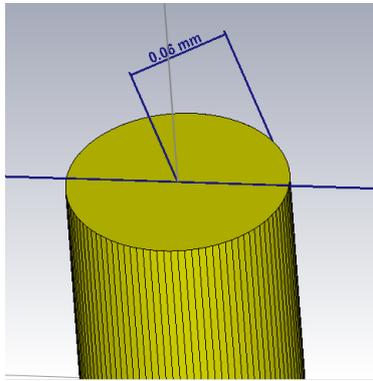


Figura 18: Esquema radio del dipolo.
(Autor)

Teniendo los dos resultados anteriores se calcula la longitud del dipolo con la ecuación (11).

$$L = \frac{\lambda}{2}$$

$$L = \frac{60\text{mm}}{2}$$

$$L = 30\text{mm}$$

Para el cálculo del Gap se utiliza la ecuación (12).

$$Gap = \frac{L}{200}$$

$$Gap = \frac{30}{200}$$

$$Gap = 0.15$$

La Fig.19 representa el GAP simulado en el programa CST Studio.

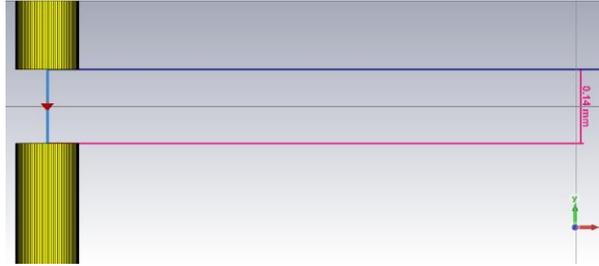


Figura 19: Gap de la antena dipolo.
(Autor - CST Studio/Versión Estudiantil)

Con todos los valores obtenidos anteriormente de los parámetros de la antena dipolo el siguiente paso es simular en el programa CST Studio representados en la Fig.20.



Figura 20: Diseño de la antena dipolo en CST Studio.
(Autor - CST Studio/Versión Estudiantil)

Para la constante k de condiciones reales de longitud de la antena dipolo se utiliza la ecuación (13).

$$k = 0.9787011 + \frac{-10.88627 - 0.9787011}{\left[1 + \left(\frac{R_L/d}{0.0004490702}\right)^{1.792529}\right]^{0.3004597}}$$

$$k = 0.9787011 + \frac{-10.88627 - 0.9787011}{\left[1 + \left(\frac{0.06_{30/0.12}}{0.0004490702}\right)^{1.792529}\right]^{0.3004597}}$$

$$\mathbf{k = 0.969}$$

La Fig.21 describe las medidas utilizadas para diseñar la antena dipolo en el programa CST Studio.

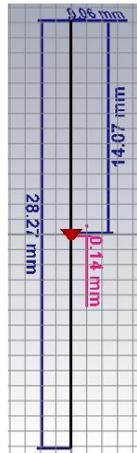


Figura 21: Valores del diseño de la antena dipolo aplicado la constante k .
(Autor - Software electromagnético - Versión Estudiantil)

La Fig.22 expone el parámetro S_{11} de la antena dipolo demostrando que está funcionando en la banda de frecuencia de 5 GHz como se desea en este proyecto de investigación.

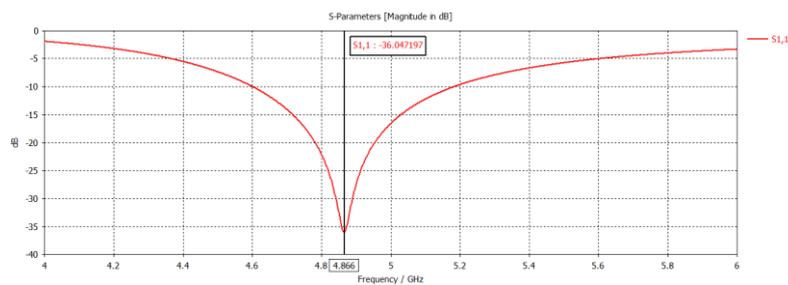


Figura 22: Parámetro S_{11} de la antena dipolo.
(Autor - CST Studio/Versión Estudiantil)

Al simular la antena dipolo el resultado de ganancia es de 1.669 como muestra la Fig.23 siendo un resultado muy pequeño para utilizar como alimentador de la RIS.

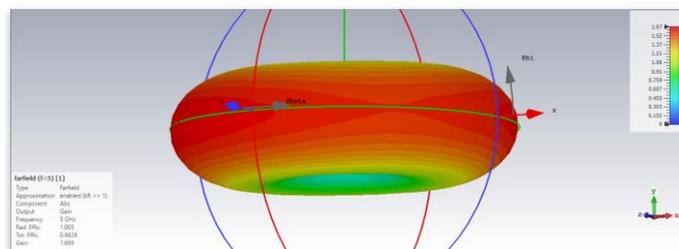


Figura 23: Ganancia de la antena dipolo.
(Autor)

De igual manera la directividad es un valor muy bajo siendo de 2.203 dBi como muestra la Fig.24, teniendo el mismo problema que se obtuvo con la ganancia.

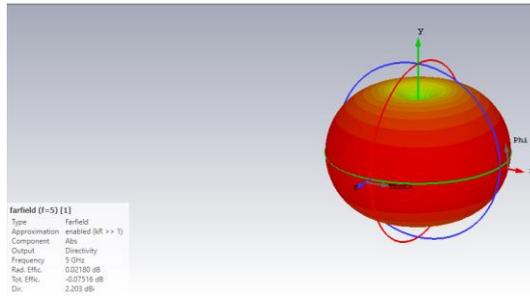


Figura 24: Directividad de la antena dipolo.
(Autor)

Para solucionar el problema de baja ganancia y directividad se diseña un arreglo de antenas dipolo de 8 etapas como muestra la Fig.25, aumentado así la ganancia y la directividad.

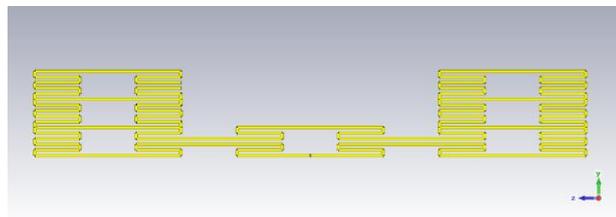


Figura 25: Diseño de un arreglo de antenas dipolo de 8 etapas.
(Autor)

La ganancia obtenida con el arreglo de antena fue de 5.914 dBi como muestra la Fig.26

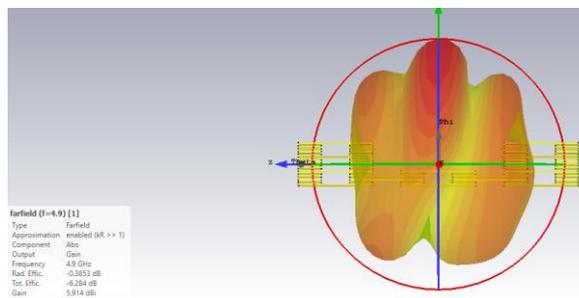


Figura 26: Ganancia del arreglo de antenas dipolo.
(Autor)

La directividad que se obtuvo con el arreglo de antena fue de 6.299 dBi como muestra la Fig.27.

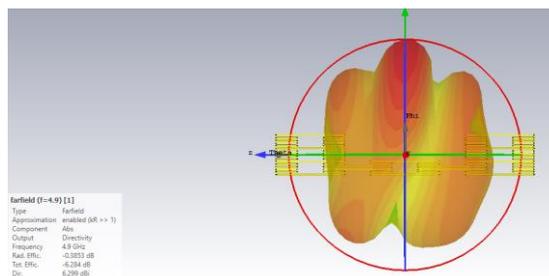


Figura 27: Directividad del arreglo de antenas dipolo.
(Autor)

En la Fig.28 se expone el parámetro S_{11} del arreglo de antenas dipolo de 8 etapas, este parámetro indica que la antenna trabaja en la banda de 5 GHz necesario para este proyecto de investigación.

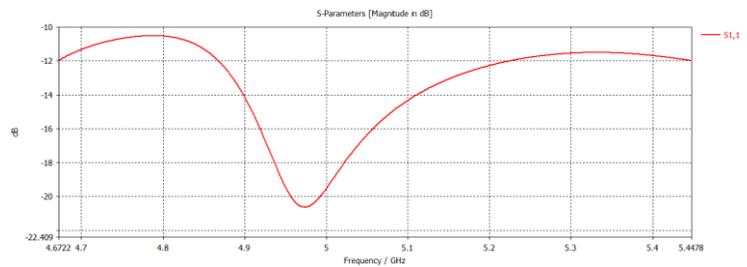


Figura 28: Parámetro S_{11} del arreglo de antena dipolos
(Autor)

3.7 DISEÑO DEL RECEPTOR

La antena elegida para simulación de un receptor es una antena microstrip por sus beneficios de simulación, tamaño y comercialización.

Para diseñar esta antena microstrip se utiliza las fórmulas para una antena microstrip descritas en el capítulo II de este proyecto de investigación de la siguiente forma:

Conociendo que la antena trabaja en la frecuencia de 5 GHz, la altura de la antena es de 1.6 mm y la permitividad del dieléctrico del FR-4 es de 4.3 se calcula el ancho de la antena con la ecuación (16).

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 (5 \times 10^9)} \sqrt{\frac{2}{4.3 + 1}}$$

$$W = 18.42 \text{ mm}$$

Con el resultado del ancho del parche se procede a encontrar la permitividad efectiva con la ecuación (15).

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \right)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.3 + 1}{2} + \frac{4.3 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{1.6mm}{18.42mm}}} \right)$$

$$\epsilon_{eff} = \mathbf{3.13}$$

Con en ancho del parche y la permitividad efectiva se encuentra la longitud del parche con la ecuación (19).

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (19)$$

$$L_{eff} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 5 \times 10^9 \sqrt{3.13}}$$

$$L_{eff} = \mathbf{16.95}$$

Para el incremento de longitud se utiliza la ecuación (17).

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} + 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = 0.412(1.6mm) \frac{(3.13 + 0.3) \left(\frac{18.42mm}{1.6mm} + 0.264 \right)}{(3.13 + 0.258) \left(\frac{18.42mm}{1.6mm} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = \mathbf{0.6383mm}$$

Finalmente, con la ecuación (18) se encuentra la longitud que se utiliza para la antena parche de este proyecto de investigación.

$$L = L_{eff} - 2\Delta L$$

$$L = 16.95mm - 2(0.6383mm)$$

$$L = 15.67 \text{ mm}$$

Con los datos obtenidos anteriormente se procede a diseñar la antena microstrip en el programa CST Studio como se observa en la Fig.29.

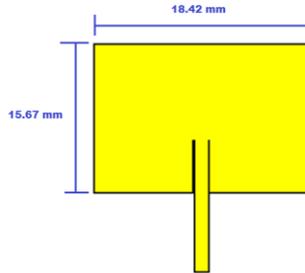


Figura 29: Antena microstrip simulada en CST.
(Autor- Software electromagnético - Versión Estudiantil)

De igual manera, el diseño de la antena dipolo con baja ganancia y directividad, esta antena posee de igual manera una baja directividad y ganancia, por lo que se procede a diseñar un arreglo de antenas de 2 etapas como muestra la Fig.30.

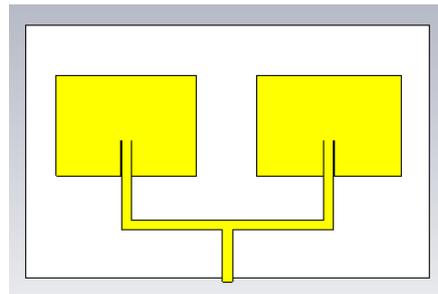


Figura 30: Arreglo de antenas microstrip de dos etapas simulada en CST.
(Autor- Software electromagnético - Versión Estudiantil)

En la Fig.31 se expone el parámetro S_{11} del arreglo de antena microstrip de dos etapas, la cual indica que la antena está trabajando en la banda de 5 GHz como se espera en este proyecto de investigación.

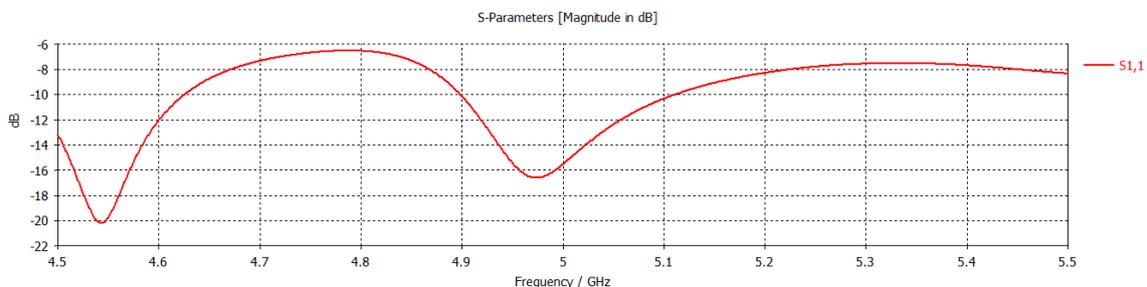


Figura 31: Parámetro S_{11} obtenido del arreglo de antenas microstrip de 2 etapas.
(Autor- Software electromagnético - Versión Estudiantil)

La Fig.32 muestra una directividad de 9.652 dBi resolviendo así el problema de baja directividad que se tenía cuando se simuló la antena microstrip, sin realizar un arreglo de antenas.

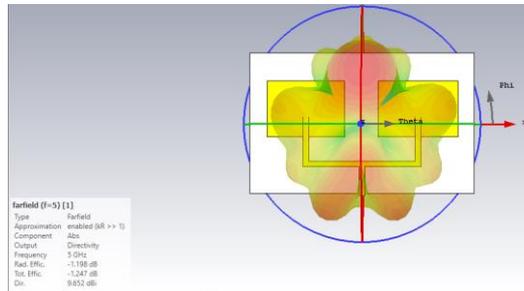


Figura 32: Directividad del arreglo de antenas microstrip de 2 etapas.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Por otro lado, en la Fig.33 se muestra una ganancia de 8.454 dB que de igual manera resuelve el problema de baja ganancia que se obtuvo cuando se simuló la antena microstrip aun sin realizar un arreglo de antenas.

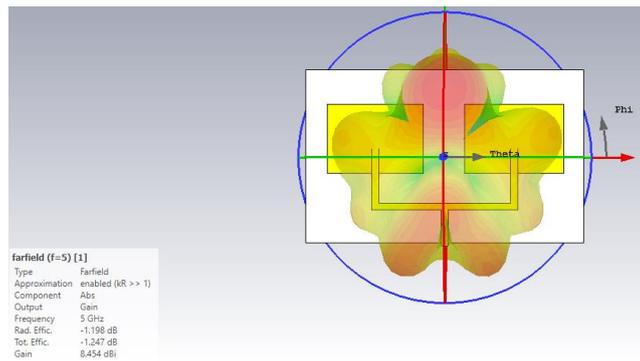


Figura 33: Ganancia del arreglo de antenas microstrip de 2 etapas.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

3.8 DISEÑO DE LA RIS

Para poder diseñar una RIS, primero se diseña una celda unitaria para una RIS pasiva que opere a una frecuencia de 5 GHz, parámetro fundamental para definir la longitud de onda de la señal.

Con la frecuencia y la ecuación (21) se calcula la longitud de onda en el vacío (λ_0).

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}$$

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^9}$$

$$\lambda_0 = 0.06 \text{ m}$$

$$\lambda_0 = \mathbf{60 \text{ mm}}$$

El próximo parámetro para encontrar es la longitud de onda del material dieléctrico (λ_d) este parámetro se ajusta con la permitividad relativa del material (ϵ_r) que tiene un valor de 6.8 perteneciente al material dieléctrico Rogers 3010. La longitud de onda del material dieléctrico se calcula con la ecuación (22).

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$\lambda_d = \frac{60 \text{ mm}}{\sqrt{6.8}}$$

$$\lambda_d = \mathbf{22.92 \text{ mm}}$$

Para el tamaño del resonador cuadrado (a) se determina en función de la longitud de onda del material dieléctrico. Para resonar eficientemente, el tamaño del lado del resonador debe ser aproximadamente la mitad de la longitud de onda en el dieléctrico.

Con la ecuación (23) se calcula el tamaño del resonador cuadrado.

$$a = \frac{\lambda_d}{2}$$

$$a = \frac{22.92 \text{ mm}}{2}$$

$$a = \mathbf{11.46 \text{ mm}}$$

La fase (ϕ) de la celda unitaria se ajusta con el grosor del dieléctrico que en este caso será de 7 mm y la longitud de onda en el dieléctrico. Primero, la fase se calcula con la ecuación (24).

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda_d}$$

$$\phi = \frac{2\pi(7 \text{ mm})}{22.92 \text{ mm}}$$

El valor de π se transforma a grados.

$$\pi \approx 180^\circ$$

$$\phi = \frac{2(180^\circ)(7 \text{ mm})}{22.92 \text{ mm}}$$

$$\phi \approx 113.38$$

Para determinar el número de celdas en el array, se utiliza el tamaño total del array y el tamaño de cada celda.

- Tamaño del array: 30 cm x 30 cm
- Tamaño de la celda: 11.46 mm = 1.146 cm

El número de celdas por lado se calcula con la ecuación (25).

$$\text{numero de celdas por lado} = \frac{\text{tamaño del array}}{\text{tamaño de celdas}}$$

$$\text{numero de celdas por lado} = \frac{30 \text{ cm}}{1.146 \text{ cm}}$$

$$\text{numero de celdas por lado} = 25.2$$

Los materiales y las dimensiones utilizados fueron los siguientes:

- Grosor del dieléctrico: 7 mm
- Permitividad relativa: 6.8 (Rogers RO 3010)
- Grosor del material metálico: 2 mm (aluminio)

Estos parámetros son cruciales para el rendimiento de la celda unitaria. El grosor del dieléctrico y del material metálico influyen en la adaptación de impedancia y la eficiencia general del RIS.

Con los parámetros anteriormente encontrados se procede a simular la celda unitaria, obteniendo el siguiente resultado de diseño representado en la Fig.34.

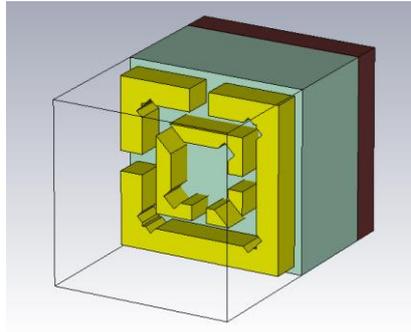


Figura 34: Diseño de la celda unitaria de la RIS en CST Studio.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Los elementos de color amarillo de la Fig.34 son resonadores y actúan reflejando la energía cuando choque en ellos, por otra parte, cuando la energía golpee en alguna de las muescas de los resonadores de color blanco la energía se absorbe y no permite su reflexión como muestra la Fig.35. Siendo las flechas azules cuando la energía es absorbida y las flechas rojas cuando la energía es reflejada.

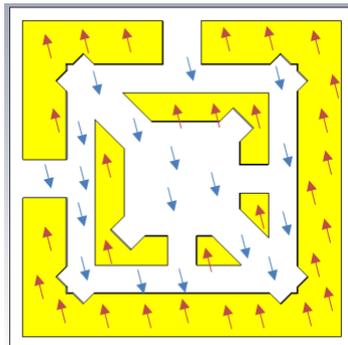


Figura 35: Absorción y reflexión de la energía de celda unitaria de la RIS en CST Studio.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Para las propiedades del background se debe tener en cuenta que será de área del dieléctrico, y por encima del material metálico de la RIS en este caso aluminio. Como muestra la Fig.36.

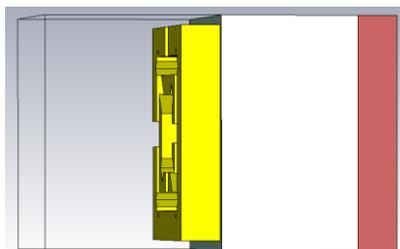


Figura 36: Propiedades del background de la celda unitaria
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Las líneas negras representan las propiedades de background

Las medias que se utilizaron para la celda unitaria esta descrita en la Fig.37.

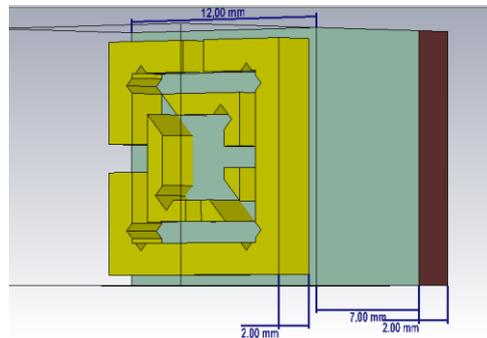


Figura 37: Propiedades del background de la celda unitaria
(Autor)

Mediante los parámetros S se puede ver el coeficiente reflexión y coeficiente de transmisión de la celda unitaria simulada, siendo el parámetro S_{11} el coeficiente reflexión con un valor de -49.56 dB y S_{12} el coeficiente transmisión con un valor de 0.030 dB en una frecuencia de 4.942 GHz como muestra la Fig.38.

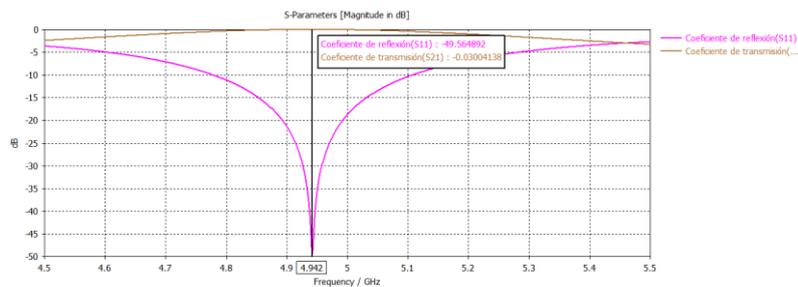


Figura 38: Parámetro S_{11} y parámetro S_{12} de la celda unitaria
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

En la Fig.38 se observa también la funcionalidad de la celda unitaria, la cual se asemeja a un filtro pasa banda, reflejando las ondas electromagnéticas que se encuentren dentro de la banda de 5 GHz e ignorará las otras ondas electromagnéticas que no estén en esa banda de frecuencia.

En la Fig.39 se representa la gráfica del nivel de absorción de la celda unitaria con un valor de -0.0300 dB.

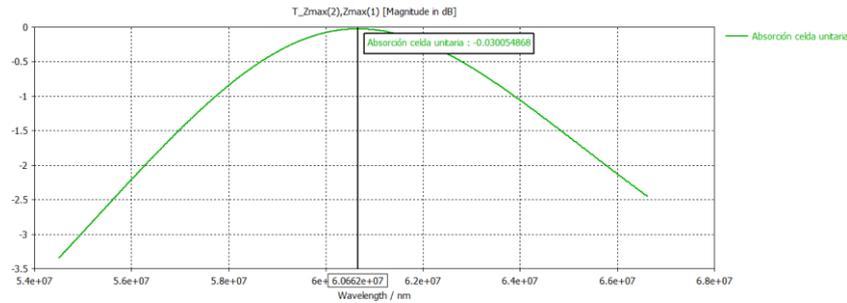


Figura 39: Nivel de Absorción de la Celda Unitaria (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

La eficiencia de radiación de la celda unitaria tiene un valor de 21.634 dB, como muestra la Fig.40

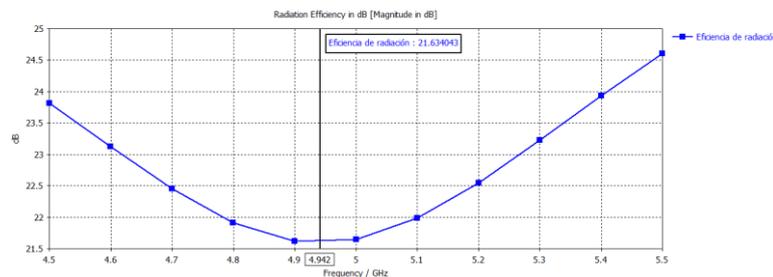


Figura 40: Eficiencia de radiación de la Celda Unitaria (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Luego del diseño de la celda unitaria se procede a realizar un conjunto de celdas unitarias para que su eficiencia sea mucho mejor y no tener el problema cuando solo se utilizaba una.

Para obtener un efecto de cadena de las celdas unitarias de las RIS, la mediada precisas de distancia de trabajo para los resonadores es de $\frac{\lambda}{4}$ como máximo para un efecto normal.

El análisis principal se realiza en 90° , correspondiente a una dirección perpendicular al plano de la superficie, lo que representa la máxima ganancia o radiación en ese ángulo. Este ángulo se suele utilizar para estudiar y caracterizar el comportamiento de la superficie en condiciones de incidencia y reflexión perpendiculares, donde los efectos de los elementos de la RIS en el control de la fase y la amplitud de las ondas electromagnéticas pueden ser más evidentes y medibles [19].

Para realizar la RIS con la celda unitaria simulada en la Fig.34, en CST Studio existe una herramienta ese propósito, en la pestaña de “Simulation Project” se elige el ítem array task como muestra la Fig.41.

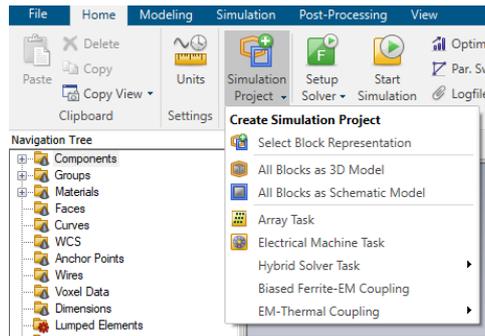


Figura 41: Array task en CST Studio
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

En la Fig.42 se muestra el cuadro de dialogo donde se introducen las propiedades que tendrá la RIS con la celda unitaria simulada.

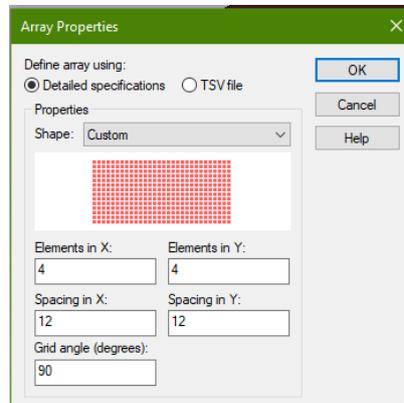


Figura 42: Array propiedades
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

El número de celdas por lado que se obtuvo con la ecuación (25) fue de 25 celdas como muestra la Fig.43.

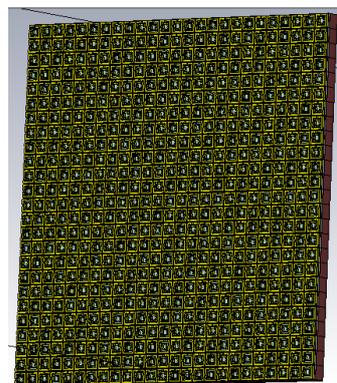


Figura 43: RIS de 25x25 celdas unitarias
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

En el simulador CST Studio es complicado simular las 25 celdas unitarias de la RIS como lo recomienda la ecuación (25), por costos operacionales del computador del autor y el

tiempo que tarda la simulación (aproximadamente 4 días cada simulación), para ello se escogió 10 celdas por lado, un número considerable donde se puede simular, analizar y observar la RIS sin mayor problema y demostrando como es el funcionamiento al implementarla como un bloqueador de señal para evitar que un espía pasivo se conecte a la red Wi-Fi.

La Fig.44 muestra el diseño de la RIS con las especificaciones anteriormente descritas.

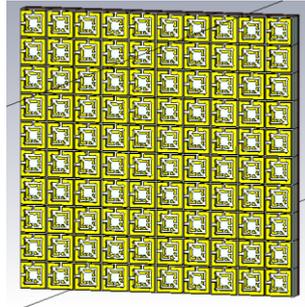


Figura 44: RIS de 10X10 celdas unitarias
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

La Fig.45 muestra el coeficiente de reflexión y el coeficiente de transmisión de la antena RIS, siendo el parámetro S_{21} el coeficiente de transmisión y el parámetro S_{11} el coeficiente de reflexión, demostrando así que donde la antena RIS transmite es donde menos absorbe y donde más absorbe es donde menos transmite la antena RIS.

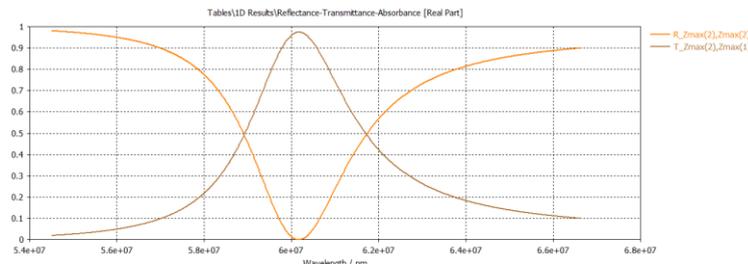


Figura 45: Parámetros S_{11} y S_{22} de la Antena RIS
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

La gráfica de absorción de la antena RIS está representada en la Fig.46.

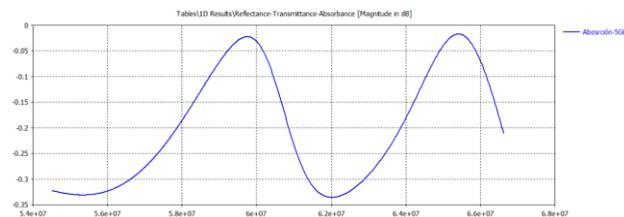


Figura 46: Gráfica de absorción de la Antena RIS
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

El coeficiente de reflexión encontrado en la antena RIS con un valor de -19.67 dB, se representa en la Fig.47.

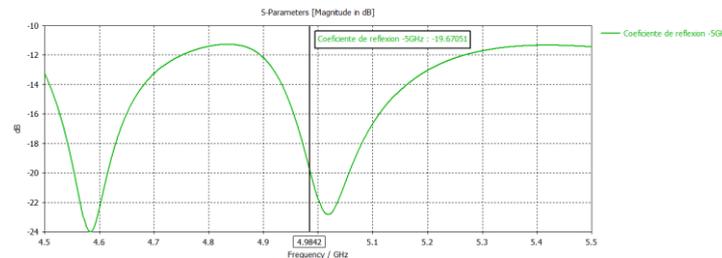


Figura 47: Coeficiente de reflexión de la Antena RIS (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

La eficiencia de radiación en la antena RIS es de -1.169 dB como muestra la Fig.48.

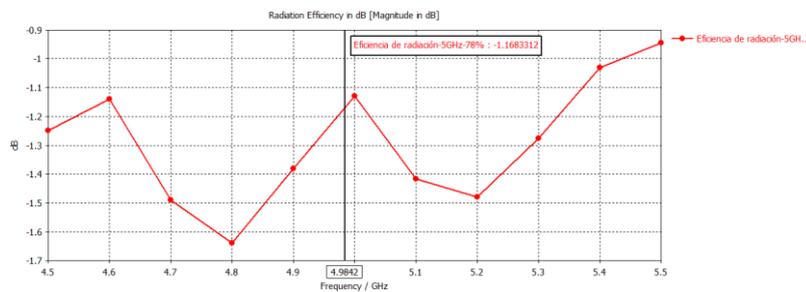


Figura 48: Eficiencia de radiación de la antena RIS (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

3.8.1 Diagrama de Apertura de la Antena RIS 10x10

La grafica polar del diagrama de apertura del diseño de la antena RIS 10x10 esta representado en la Fig.49.

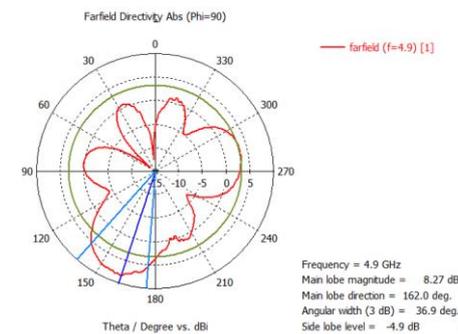


Figura 49: Gráfica polar del diagrama de apertura de la antena RIS 10x10 (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

La grafica cartesiana del diagrama de apertura del diseño de la antena RIS 10x10 está representado en la Fig.50.

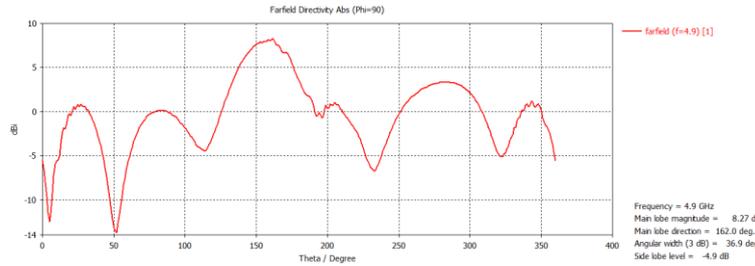


Figura 50: Gráfica cartesiana del diagrama de apertura de la antena RIS 1 (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

En las Fig.49 y la Fig.50 se puede observar los siguientes datos.

- Frecuencia de 4.9 GHz.
- Magnitud de la señal principal de 8.27 dB.
- La dirección principal de máxima radiación es de 180°.
- El ancho de haz de 36.9° indicando cuanta concentración de radiación tiene en torno a la dirección principal.
- Los lóbulos laterales tienen un valor de 4.9 dB indicando la magnitud de radiación fuera de la dirección principal.

3.8.2 Cortes Copolares de la Antena RIS 10x10

La Fig.51 presenta el plano “H” copolar a 0° de la RIS, mostrando una radiación directamente a lo largo del plano horizontal donde generalmente se espera la máxima radiación.

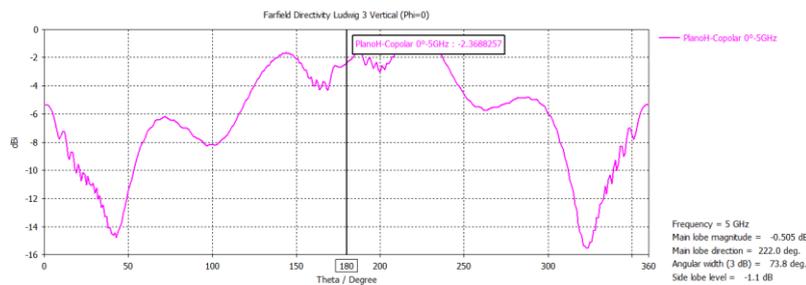


Figura 51: Plano “H” copolar 0° (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

En el plano “H” copolar 45°, la RIS proporciona la información sobre cómo se comporta la radiación en una dirección intermedia entre los ejes principales del patrón de radiación, como se observa en la Fig.52.

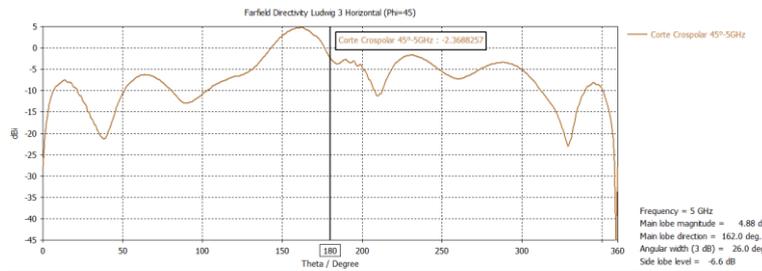


Figura 52: Plano “H” copolar 45°
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

La Fig.53 representa el plano “E” copolar 90°, esta gráfica analiza la radiación perpendicular al plano “H” lo cual es útil para evaluar la simetría del patrón de radiación

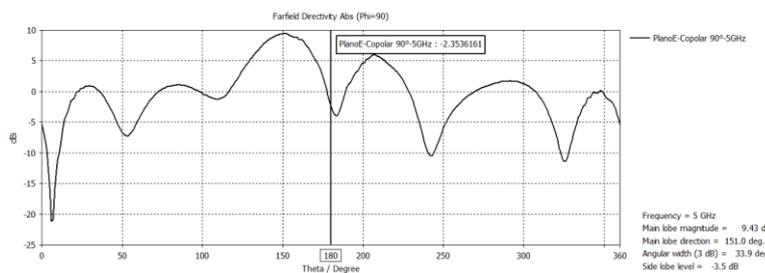


Figura 53: Plano “E” copolar 90°
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Estos cortes permiten analizar la interacción entre el alimentador y la RIS facilitando el control y la orientación de la radiación hacia las direcciones requeridas.

3.8.3 Diagrama de apertura con la antena RIS 25x25

Con el diseño de la RIS de 25x25 de la Fig.43, la gráfica polar del diagrama de apertura de la RIS diseñada a una frecuencia de 4.9 GHz, está representada en la Fig.54.

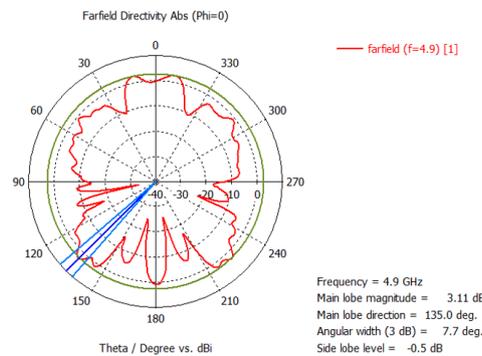


Figura 54: Gráfica polar del diagrama de apertura de la antena RIS 25x25
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

La gráfica cartesiana del ángulo de apertura de la RIS diseñada a una frecuencia de 4.9 GHz, está representada en la Fig.55.

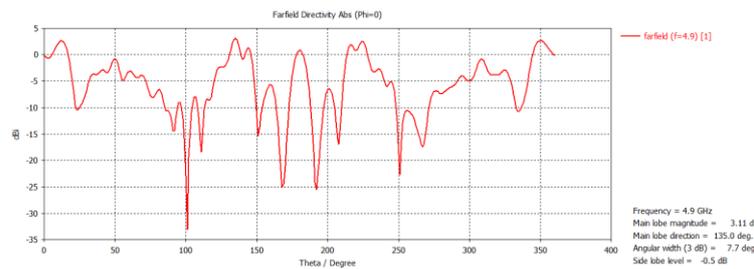


Figura 55: Gráfica cartesiana del diagrama de apertura de la antena RIS 25x25 (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Con las Fig.54 y Fig.55 se observan los siguientes resultados:

- Frecuencia 4.9 GHz.
- Magnitud de la señal principal es de 3.11 dB.
- dirección principal de máxima radiación aproximadamente 180°
- Ancho de haz de 15.73° valor más concentrado ideal para aplicaciones que requieran una transmisión más precisa en una dirección específica.

3.9 DISEÑO DEL AMBIENTE DE TRABAJO PARA LAS SIMULACIONES

El diseño del ambiente de trabajo con una antena RIS 25x25 se muestra en la Fig.56.

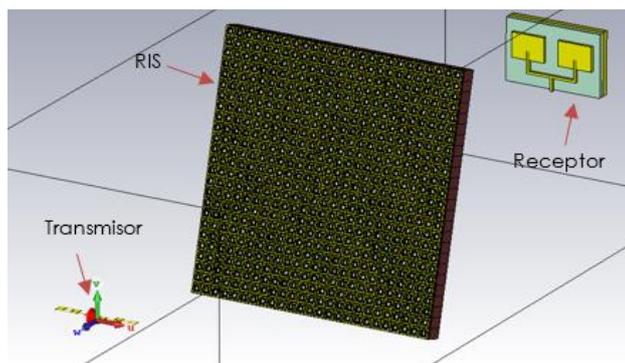


Figura 56: Ambiente de trabajo de la RIS 25 x 25 con un transmisor y un receptor (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Como la ecuación (25) sugiere una RIS de 25 x 25, pero al simular en el programa CST Studio con un computador de 12 GB de RAM y un procesador AMD A10-4600M APU el tiempo que tarda en simular cada escenario es aproximadamente 4 días, se procede a diseñar

el ambiente de trabajo con la antena RIS 10x10 donde interactúe con el transmisor (el arreglo de antena dipolo) y el receptor del espía pasivo (el arreglo de antena microstrip) como muestra la Fig.57.

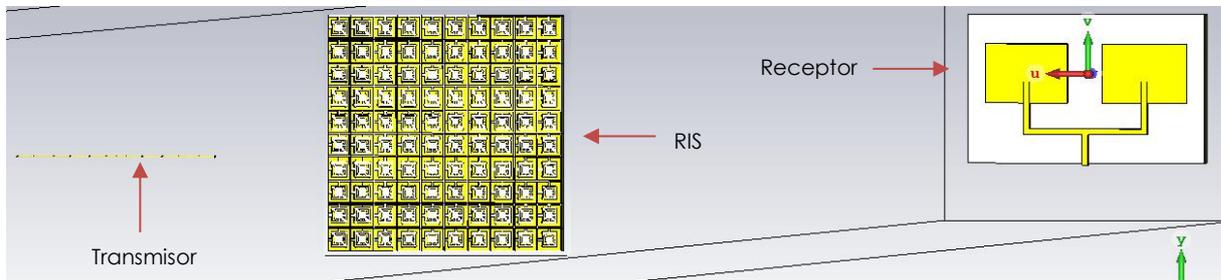


Figura 57: Ambiente de trabajo de la RIS 10 x 10 con un transmisor y un receptor
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

CAPÍTULO IV.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1.1 Interpretación Comparativa de los Diagramas de Apertura de la Antena RIS 25x25 con la Antena RIS 10x10.

Al comparar la Fig.50 de la gráfica cartesiana del diagrama de apertura de la RIS 10x10 y la Fig.55 de la gráfica cartesiana del diagrama de apertura de la RIS 25x25 como muestra la Fig.58.

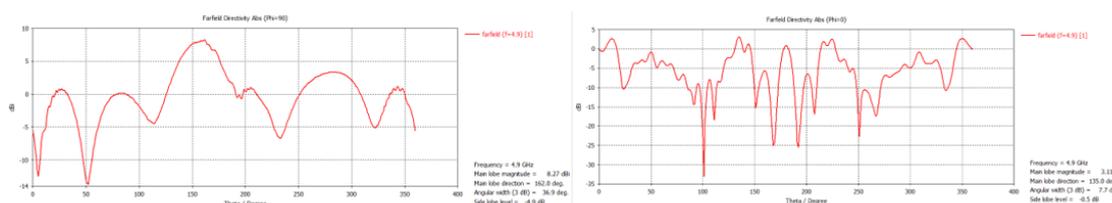


Figura 58: Comparación de los diagramas de radiación de la antena RIS 10x10 y la antena RIS 25x25 (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

En la antena RIS 10x10 se observa que:

- Más disperso en términos de la distribución de la radiación.
- Tiene un mayor nivel de lóbulos laterales, lo que significa que es menos eficiente en términos de direccionamiento preciso.
- El ancho del haz es más amplio, lo que sugiere que la radiación se distribuye en un rango mayor de direcciones.

Por otro lado, en la antena RIS 25x25 se describe que:

- Haz más concentrado, con un ancho de haz más estrecho, lo que mejora la capacidad de dirigir la señal a un objetivo específico.
- Tiene menos radiación lateral (menor nivel en los lóbulos laterales), lo que implica que la señal no se dispersa tanto en direcciones no deseadas.
- Magnitud de la señal principal más baja, lo que puede estar relacionado con una mayor eficiencia direccional, pero con menos potencia total irradiada en comparación con el RIS 10x10.

4.1.2 Proceso para la recolección de datos

Se evalúan los resultados obtenidos de un cierto número de simulaciones del ambiente de trabajo donde se encuentra el transmisor (arreglo de antenas dipolo), receptor del espía pasivo (arreglo de antenas microstrip) y la antena RIS como bloqueador de señal entre transmisor y receptor del espía pasivo. En estas simulaciones se realiza los siguientes modificaciones los siguientes aspectos:

- Posición del transmisor Wi-Fi representado por el arreglo de antena dipolo de 8 etapas, con las posiciones de la Fig.60.
- Distancia de separación entre la antena transmisora Wi-Fi y la antena RIS.
- Ángulo de inclinación de la antena RIS

Estas modificaciones se realizan para encontrar una posición ideal donde la RIS logre bloquear la mayor parte de señal del transmisor para que el receptor del espía pasivo no logre conectarse.

4.2 CAMBIO DE POSICIÓN DEL TRANSMISOR

La Fig.59 muestra el escenario base donde se realizará los cambios de posición del transmisor.

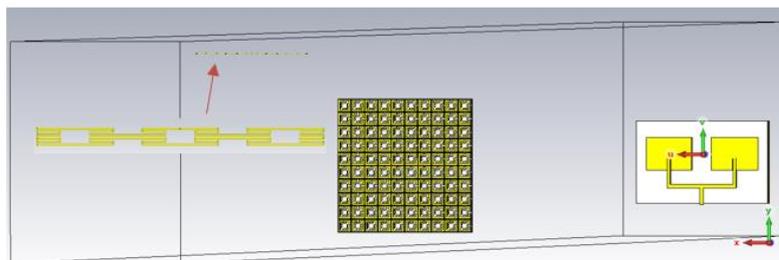


Figura 59: Cambio de posición del transmisor.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

La posición del transmisor se cambiará de forma horizontal y vertical mientras que la RIS y el receptor del espía pasivo se mantienen fijos. Se consideran 5 posiciones relevantes y las más comunes que se utilizan en la colocación de la antena Wi-Fi en un hogar, la posición se muestra en la Fig.60.

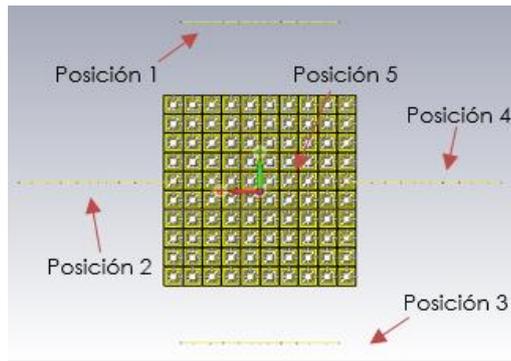


Figura 60: Posiciones del transmisor consideradas para las simulaciones.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Las distancias del transmisor consideradas para las simulaciones en CST Studio son de 1 metro, 2 metros y 3 metros siendo 3 metros una distancia estándar utilizada en los hogares para la utilización en la cobertura Wi-Fi. La distancia determinará cuanta cantidad de señal llega al receptor del espía pasivo proveniente de la antena transmisora a través de la antena RIS. En la Fig.61 se muestra una distancia de 1 metro, en la Fig.62 se muestra una distancia de 2 metros y finalmente en la Fig.63 una distancia de 3 metros.

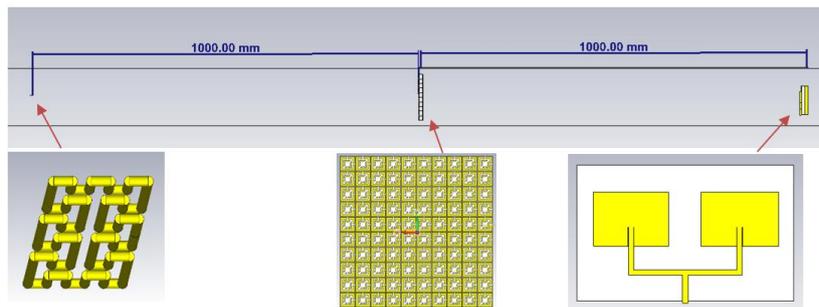


Figura 61: Distancia de 1 metro entre el transmisor y la antena RIS
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)



Figura 62: Distancia de 2 metros entre el transmisor y la antena RIS
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)



Figura 63: Distancia de 3 metros entre el transmisor y la antena RIS
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Los ángulos de inclinación de la RIS considerados para las simulaciones en CST Studio son de 90 grados, 100 grados, 110 grados y 120 grado; siendo 90 grados una posición

perpendicular al plano de la superficie, lo que representa la máxima ganancia o radiación en ese ángulo. El cambio de Angulo de inclinación se realiza para encontrar el valor máximo del ángulo de inclinación que puede tener la RIS para realizar una correcta reflexión de señal. En la Fig.64 se muestra un ángulo de inclinación de 90 grados, en la Fig.65 se muestra un ángulo de inclinación de 100 grados, Fig.66 se muestra un ángulo de inclinación de 110 grados y finalmente en la Fig.67 se muestra un ángulo de inclinación de 120 grados.

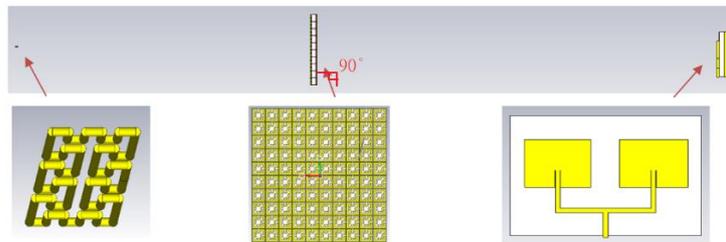


Figura 64: Ángulo de inclinación igual a 90 grados de la RIS
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)



Figura 65: Ángulo de inclinación igual a 100 grados de la RIS
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)



Figura 66: Ángulo de inclinación igual a 110 grados de la RIS
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)



Figura 67: Ángulo de inclinación igual a 120 grados de la RIS
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Para poder entender de una mejor forma el diagrama de radiación que se muestra en las siguientes figuras se toma en cuenta la barra de colores de la Fig.68.

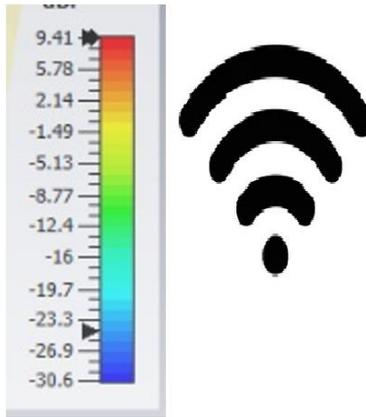


Figura 68: Barra de colores del diagrama de radiación
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Esta barra de colores representa la intensidad del campo radiado, donde el color azul representa un punto de menor intensidad en la radiación del transmisor de la antena Wi-Fi (-30.6 dBi) siendo casi imperceptible para el receptor del espía pasivo y evitando así su conexión, por otro lado, el color rojo indica un punto de mayor intensidad en la radiación del transmisor (9.41 dBi), donde será muy fácil la conexión del receptor del espía pasivo con el transmisor de la antena Wi-fi.

4.3 ANÁLISIS DEL AMBIENTE DE TRABAJO CON UN ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 90 GRADOS

4.3.1 Distancia de 1 metro

La Fig.69 muestra el coeficiente de absorción y reflexión de la antena RIS sometida al alimentador que se encuentra a un metro de distancia de la antena RIS, siendo la línea roja el coeficiente de transmisión y la línea verde el coeficiente de reflexión.

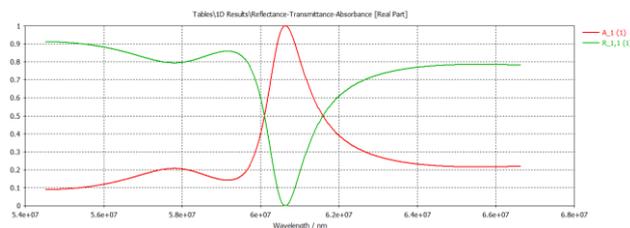


Figura 69: Coeficiente de Reflexión y absorción de la RIS con alimentador
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Tomando en cuenta las posiciones de la Fig.60 y al colocar el transmisor en la posición 5 a una distancia de un metro de la antena RIS, la Fig.70 muestra el diagrama de radiación que el programa CST Studio obtuvo en este caso.

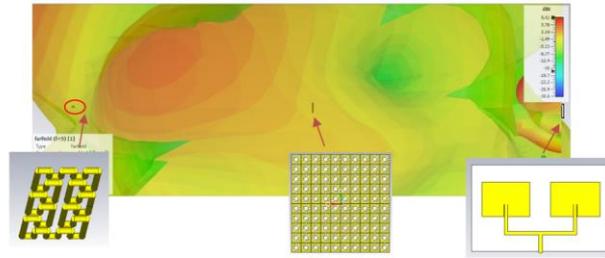


Figura 70: Diagrama de radiación posición 5 a 1 metro con 90° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Al cambiar el transmisor de la antena Wi-Fi a la posición 1, el diagrama de radiación no posee muchos cambios, por el factor de distancia que se mantuvo, no obstante, el nivel concentración de radiación cambio de lugar por la posición del transmisor actual como lo muestra la Fig.71.

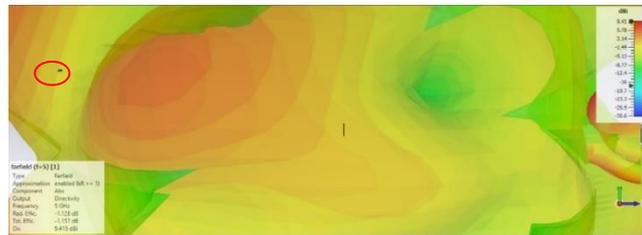


Figura 71: Diagrama de radiación posición 1 a 1 metro con 90° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.3.2 Distancia de 2 metro

Al colocar la antena transmisora a una distancia de 2 metros y en la posición 5, se puede observar que la señal de la antena transmisora Wi-Fi se encuentra más alejada del transmisor del espía pasivo como muestra la Fig.72.

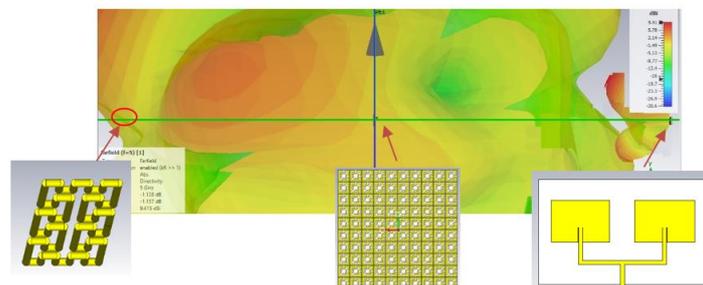


Figura 72: Diagrama de radiación posición 5 a 2 metros con 90° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Al mantener la distancia de dos metros y colocar el transmisor en la posición 5, se observa el mismo efecto de señal que llega al receptor de la Fig.59 con la diferencia del cambio de intensidad de que refleja la antena RIS devuelta al transmisor como muestra la Fig.73.

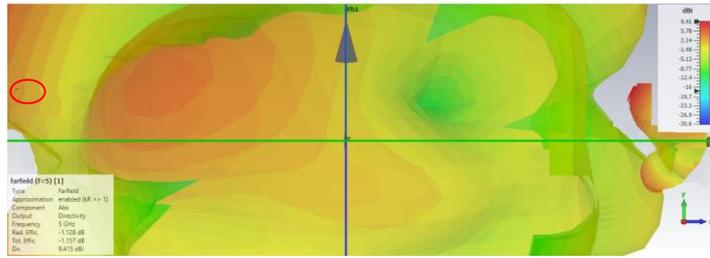


Figura 73: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 90° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.3.3 Distancia de 3 metro

Con la distancia de 3 metros y en la posición 5 del transmisor, se observa que la señal que emite la antena transmisora Wi-Fi, no llega a ser percibida por el receptor del espía pasivo como lo muestra la Fig.74.

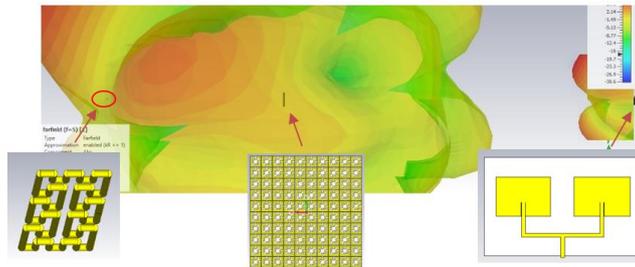


Figura 74: Diagrama de radiación posición 5 a 3 metros con 90° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Al mantener la distancia de 3 metros y colocar la antena transmisora en la posición 1, se mantiene el mismo efecto de señal que llega al transmisor del espía pasivo, con la diferencia de intensidad que refleja la antena RIS como muestra la Fig.75.

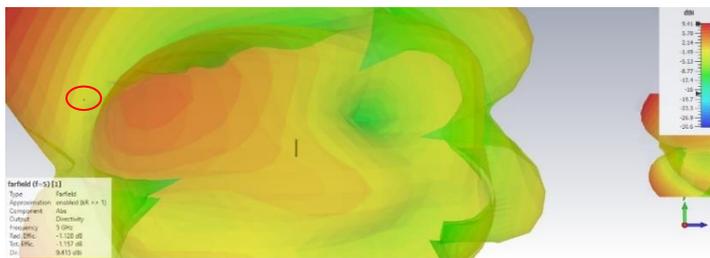


Figura 75: Diagrama de radiación posición 1 a 3 metros con 90° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.4 ANÁLISIS DEL AMBIENTE DE TRABAJO CON UN ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 100 GRADOS

4.4.1 Distancia de 1 metro

Al cambiar el ángulo de inclinación de la antena RIS, a 100 grados como muestra la Fig.77 se observa que la reflexión de la antena RIS cambia de dirección, y una parte de la señal reflejada no regresara al transmisor de la antena Wi-Fi. En la Fig.76 se muestra el diagrama polar.

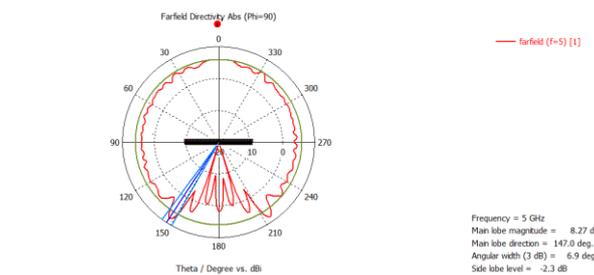


Figura 76: Diagrama de polar posición 5 a 1 metros con 100° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

La Fig.77 representa el diagrama de radiación.

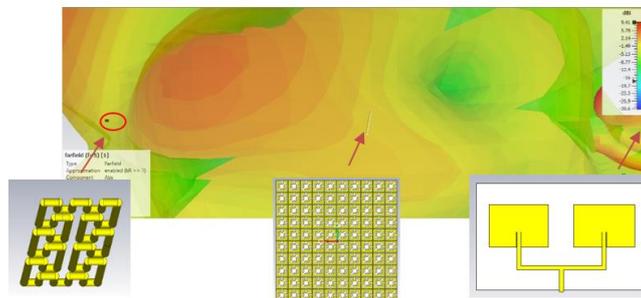


Figura 77: Diagrama de radiación posición 5 a 1 metro con 100° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Al mantener la distancia de 1 metro y cambiar el transmisor a la posición 1, se mantiene el mismo efecto cuando estaba el transmisor en la posición 5, con la diferencia de reflexión de señal de la antena RIS como muestra la Fig.78.



Figura 78: Diagrama de radiación posición 1 a 1 metro con 100° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.4.2 Distancia de 2 metro

Al colocar la antena transmisora a una distancia de 2 metros y en la posición 5 con una inclinación de 100° , la señal de la antena transmisora Wi-Fi se aleja del transmisor del espía pasivo, pero aún es posible su conexión como muestra la Fig.79.

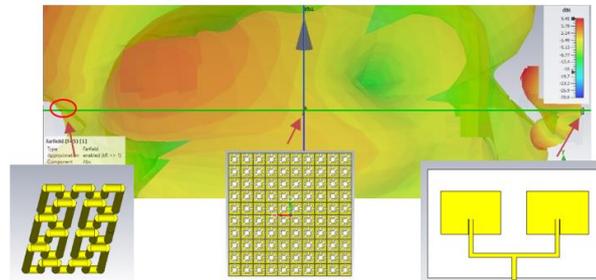


Figura 79: Diagrama de radiación posición 5 a 2 metros con 100° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Si se cambia a la posición 1 la antena transmisora y se mantiene los demás parámetros, la señal de la antena transmisora Wi-Fi que llega al receptor del espía pasivo es igual al de la Fig.79 con el único cambio de la señal reflejada provocada por la antena transmisora Wi-Fi como muestra la Fig.80.

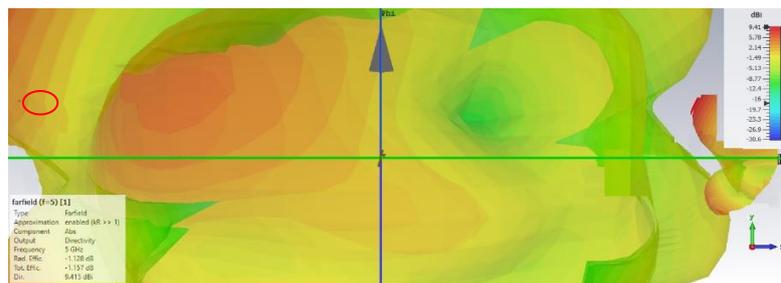


Figura 80: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 100° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.4.3 Distancia de 3 metro

Al incorporar una distancia de 3 metros y en la posición 5 del transmisor, se observa que la señal que emite la antena transmisora Wi-Fi, no llega a ser percibida por el receptor del espía pasivo como lo muestra la Fig.81. Este fenómeno fue percibido de igual manera en la Fig.84 con la diferencia de la dirección de la señal reflejada de la antena RIS.

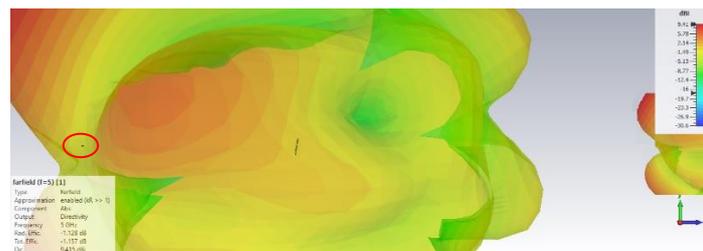


Figura 81: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 100° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Si el transmisor de la antena WI-Fi se cambia a la posición 1, se observa que la señal que refleja la antena RIS va en una dirección va más en su dirección haciéndole más eficiente a la hora de recibir la señal reflejada proveniente del a RIS como lo muestra la Fig.82.

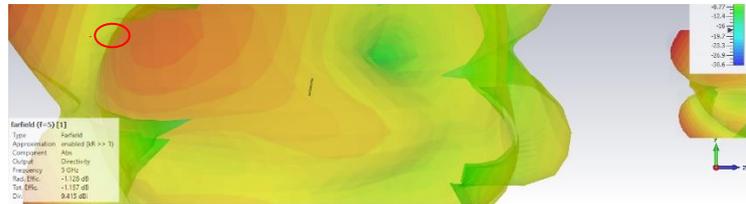


Figura 82: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 100° de inclinación. (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.5 ANÁLISIS DEL AMBIENTE DE TRABAJO CON UN ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 110 GRADOS

4.5.1 Distancia de 1 metro

La antena RIS en la posición 5 a 1 metro de distancia y con un ángulo de inclinación de 110° obtiene una desviación más pronunciada de la señal reflejada del transmisor de la antena Wi-Fi como lo muestra con el diagrama polar de la Fig.83.

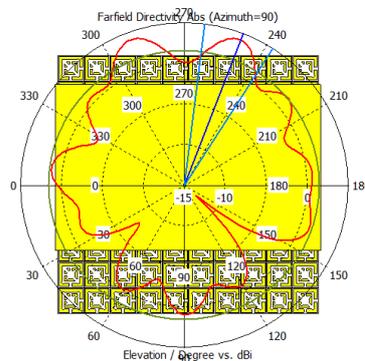


Figura 83: Diagrama polar posición 1 a 1 metro con 110° de inclinación. (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

En este caso la señal reflejada de la antena RIS que llega de la antena transmisora Wi-Fi, poca por el ángulo de inclinación de la RIS como muestra la Fig.84.

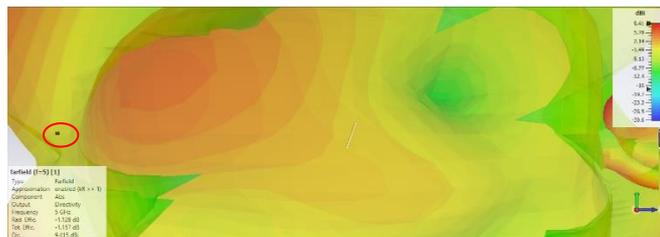


Figura 84: Diagrama de radiación posición 5 a 1 metro con 110° de inclinación. (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Al cambiar la antena transmisora Wi-Fi a la posición 1, se corrige el error presentado en la Fig.70, la señal reflejada de la antena RIS que llega al transmisor Wi-Fi es mucho mejor como muestra la Fig.85.

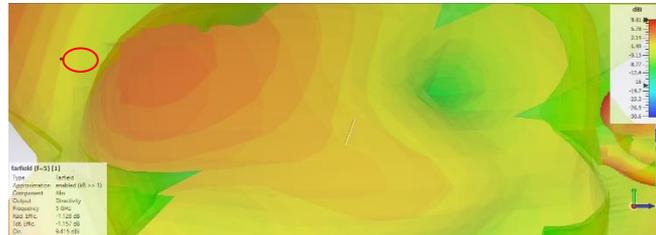


Figura 85: Diagrama de radiación posición 1 a 1 metro con 110° de inclinación. (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.5.2 Distancia de 2 metro

Cambiando el factor de distancia entre la antena RIS y el transmisor Wi-Fi a 2 metros y colándola en la posición 5, la señal emitida por el transmisor Wi-Fi que llega al receptor es menor, por otro lado, la señal reflejada de la antena Wi-Fi que llega al transmisor es muy poca como muestra la Fig.86.

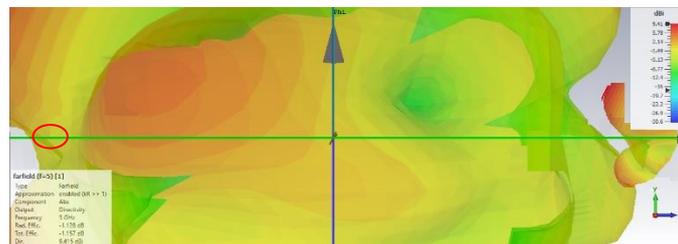


Figura 86: Diagrama de radiación posición 5 a 2 metros con 110° de inclinación. (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Si el transmisor de la antena Wi-Fi es colocada en la posición 1, el transmisor recibe más señal reflejada por la antena RIS como muestra la Fig.87.

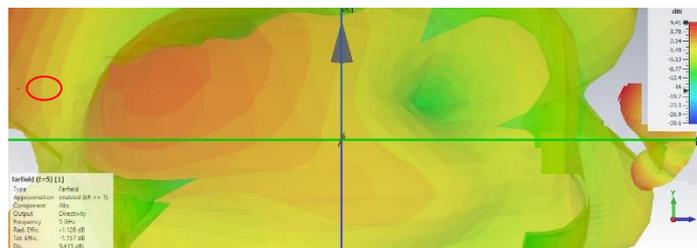


Figura 87: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 110° de inclinación. (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.5.3 Distancia de 3 metro

Como en los casos anteriormente analizados a una distancia de 3 metros, la señal emitida por la antena transmisora Wi-Fi es casi imperceptible por el espía pasivo, con la diferencia de la señal reflejada por la antena RIS, la cual al colocarla en la posición (5) esa señal es poco percibida por la antena transmisora Wi-Fi como muestra la Fig.88.

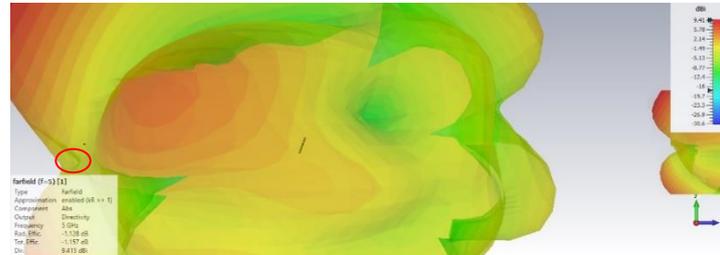


Figura 88: Diagrama de radiación posición 5 a 3 metros con 110° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Cambiando de posición la antena transmisora Wi-Fi a la posición 1, la señal reflejada por la antena RIS es percibida por la antena transmisora Wi-Fi como muestra la Fig.89.

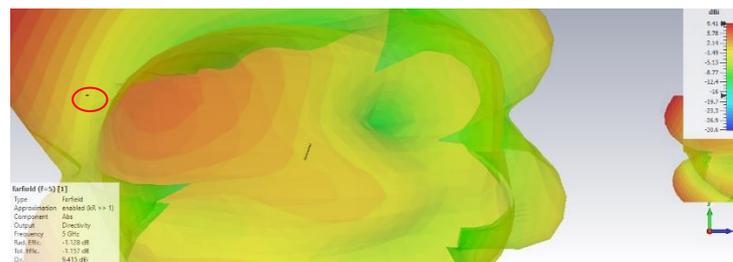


Figura 89: Diagrama de radiación posición 1 a 3 metros con 110° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.6 ANÁLISIS DEL AMBIENTE DE TRABAJO CON UN ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 120 GRADOS

4.6.1 Distancia de 1 metro

Al incorporar una inclinación de 120° a la antena RIS, la señal reflejada se aleja mucho más de la antena transmisora Wi-Fi como muestra la Fig.90 con su diagrama polar.

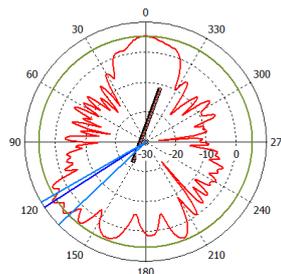


Figura 90: Diagrama de radiación posición 5 a 1 metro con 120° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Si se aplica una distancia de 1 metro entre la antena RIS con un ángulo de inclinación de 120° y la antena transmisora Wi-Fi en la posición 5, la señal reflejada por la antena RIS no es percibida por la antena transmisora Wi-Fi como muestra la Fig.91.

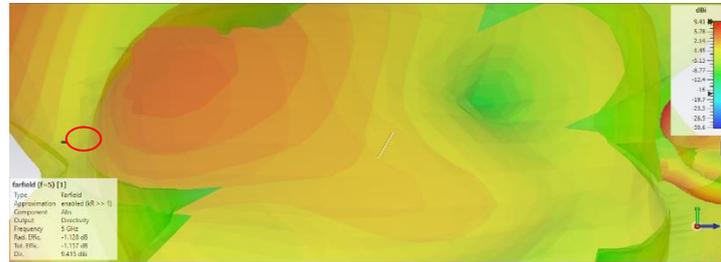


Figura 91: Diagrama de radiación posición 5 a 1 metros con 120° de inclinación. (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Al cambiar a la posición 1 la antena transmisora Wi-Fi la señal reflejada por la antena RIS se puede percibir más como muestra la Fig.92.

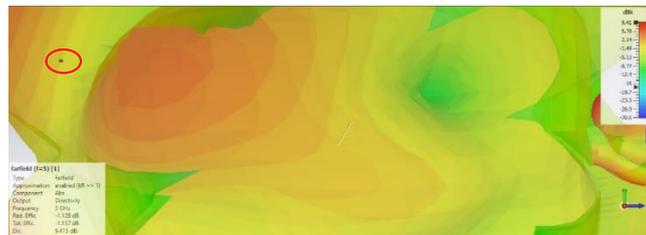


Figura 92: Diagrama de radiación posición 1 a 1 metros con 120° de inclinación. (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.6.2 Distancia de 2 metros

Con una distancia de 2 metros entre la antena RIS y la antena transmisora Wi-Fi en la posición 5, la señal reflejada por la RIS que llega a la antena transmisora es muy poca como muestra la Fig.93.

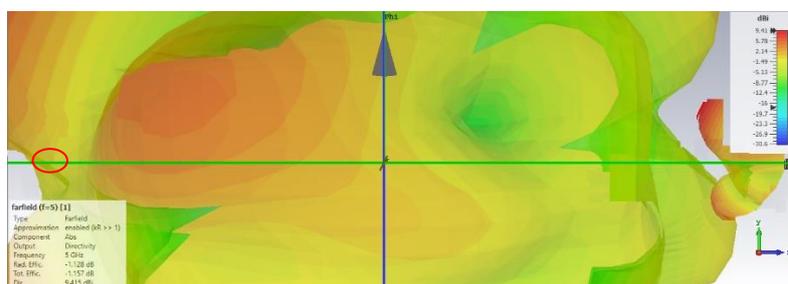


Figura 93: Diagrama de radiación posición 5 a 2 metros con 120° de inclinación. (Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Al cambiar de posición la antena transmisora Wi-Fi a la posición 1, la antena transmisora percibe de mejor manera la señal reflejada por la antena RIS como muestra la Fig.94.

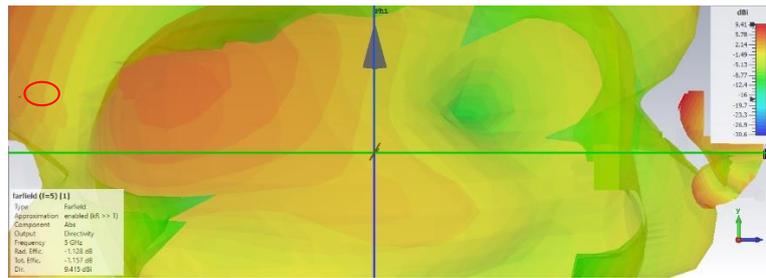


Figura 94: Diagrama de radiación posición 1 a 2 metros con 120° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.6.3 Distancia de 3 metro

Si se aumenta la distancia a 3 metros entre la antena RIS y la antena transmisora Wi-Fi, la señal que logra reflejar la RIS es la necesaria para evitar la conexión del espía pasivo a la señal del transmisor, sin embargo, en la posición 5, la señal reflejada por la antena RIS no la capta muy bien el transmisor como muestra la Fig.95.



Figura 95: Diagrama de radiación posición 5 a 3 metros con 120° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Al cambiar la posición de antena transmisora Wifi a la posición 1 y la RIS con el ángulo de inclinación de 120° se logra captar la señal reflejada por la antena Wi-Fi, pero será el ángulo máximo de inclinación que podrá tener la RIS para que la señal reflejada pueda llegar al transmisor como lo muestra la Fig.96.

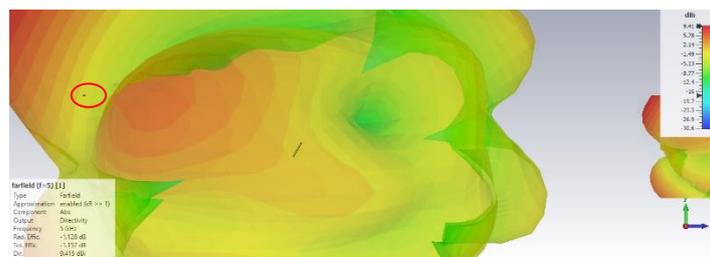


Figura 96: Diagrama de radiación posición 1 a 3 metros con 120° de inclinación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

4.7 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para determinar si el receptor del espía pasivo se pudo conectar a la antenna transmisora Wi-Fi, se tomará en cuenta el diagrama de radiación de cada caso, cabe recalcar que el total de simulaciones realizadas son 35 con 48 resultados, donde se tuvo en cuenta:

- Los 4 ángulos de inclinación de la RIS.
- Las tres distancias entre la antenna transmisora Wi-Fi y la antenna RIS.
- Las 5 posiciones en la Fig.60.

El diagrama de radiación muestra la intensidad de señal que existe en cada caso, y que tan cerca está el diagrama de radiación de la antenna transmisora Wi-Fi al diagrama de radiación del receptor. Los niveles de intensidad de radiación van desde 9.41 dB como un punto máximo de radiación y -30.6 como punto mínimo de radiación como lo muestra la Fig.63.

Se debe considerar que en el ambiente simulado en el programa CST Studio se posee 2 diagramas de radiación que se van a encontrar para hacer posible la conexión entre la antenna transmisora y la antenna receptora como se muestra en la Fig.97.

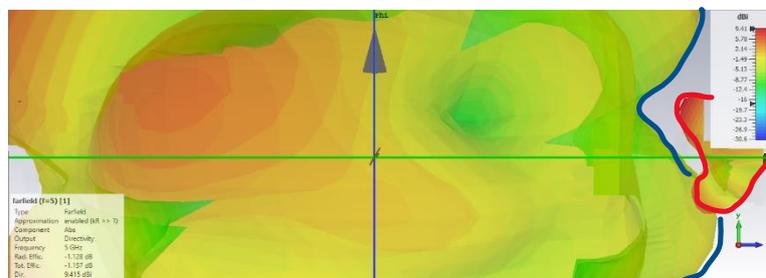


Figura 97: Separación de los diagramas de radiación encontrados en la simulación.
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

Si un punto en el diagrama de radiación es de color rojo tiene un valor de 9.41 dBi y si un punto en el diagrama de radiación es de color azul tiene un valor de -30.6 dBi, considerando también que existen 2 diagramas de radiación que se van a encontrar o no en un punto para analizar una posible conexión. Al partir de estas premisas se procede a realizar un promedio aritmético con la ecuación (26) de los puntos máximos de radiación de los dos diagramas en un solo punto.

$$\bar{x} = \frac{I_{maxR} + I_{maxT}}{2} \quad (27)$$

Donde:

- I_{maxR} es la intensidad máxima radiación del receptor del espía pasivo.
- I_{maxT} es la intensidad máxima radiación del transmisor de la antena Wi-Fi.

Considerando que si el promedio tiene un valor de:

- -19.7 a -8.77 dBi no hay conexión entre el transmisor de la antena Wifi y receptor del espía pasivo.
- -8.77 a -1.49 dBi tiene una conexión inestable entre el transmisor de la antena Wifi y receptor del espía pasivo.
- -1.49 a 9.41 tiene una excelente conexión entre el transmisor de la antena Wifi y receptor del espía pasivo.

Si en el caso en que el transmisor se encuentre a 1 metro de distancia y en la posición 5, se selecciona un punto en el que ambos diagramas de radiación alcancen su nivel máximo de intensidad y estén lo más próximos posible entre sí como muestra la Fig.98.

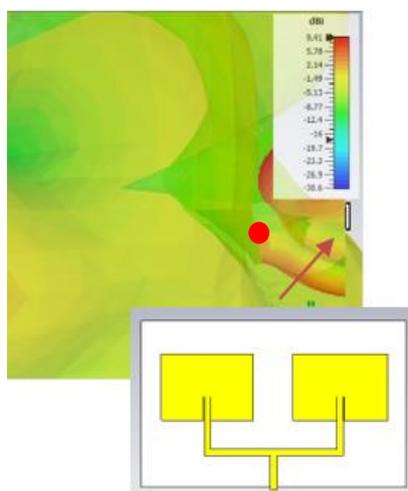


Figura 98: Punto máximo de conexión
(Autor-CST Studio/Versión Estudiantil)

En la Fig.98, se observa que la intensidad de radiación total proveniente de la antena transmisora Wi-Fi tiene un valor de -9.41 dBi y la intensidad de radiación del receptor es de 1.49 dBi.

Utilizando la ecuación (27), se calcula el promedio de conexión en ese punto de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{I_{maxR} + I_{maxT}}{2}$$

$$\bar{x} = \frac{1.49 \text{ dBi} - 9.41}{2}$$

$$\bar{x} = -3.96 \text{ dBi}$$

Al obtener el promedio de radiación en ese punto que es 0.64 dBi se procede a colocar el resultado en la tabla (3), correspondiente a cada caso cuando la antena RIS posee un ángulo de 90° de inclinación a una distancia de 1 metro en la posición 5.

Para los siguientes casos se procede de la misma forma como se realizó anteriormente.

Tabla 3: Resultados del promedio de intensidad de radiación de las posiciones del transmisor de la Fig.60 con ángulo de inclinación de 90°

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Distancia 1 (m)	-3.39	-3.3	3.96	3.88	-3.96
Distancia 2 (m)	-3.56	-3.49	2.14	2.06	-3.5
Distancia 3 (m)	-30.6	-30.6	-30.6	-30.6	-30.6

Los resultados obtenidos cuando la RIS posee un ángulo de inclinación de 100 grados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados del promedio de intensidad de radiación de las posiciones del transmisor de la Fig.60 con ángulo de inclinación de 100°

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Distancia 1 (m)	-3.35	-3.2	4.12	4.03	-3.32
Distancia 2 (m)	-3.49	-3.32	2.3	-3.32	-3.4
Distancia 3 (m)	-30.6	-30.6	-30.6	-30.6	-30.6

Los resultados obtenidos cuando la RIS posee un ángulo de inclinación de 110 grados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados del promedio de intensidad de radiación de las posiciones del transmisor de la Fig.60 con ángulo de inclinación de 110°

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Distancia 1 (m)	4.7	1.88	4.7	-3.35	-3.29

Distancia 2 (m)	2.5	-3.29	2.5	-3.29	-3.3
Distancia 3 (m)	-30.6	-30.6	-30.6	-30.6	-30.6

Los resultados obtenidos cuando la RIS posee un ángulo de inclinación de 120 grados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados del promedio de intensidad de radiación de las posiciones del transmisor de la Fig.60 con ángulo de inclinación de 120°

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Distancia 1 (m)	4.88	2.64	4.88	2.64	-3.29
Distancia 2 (m)	2.54	1.29	2.54	1.29	-3.29
Distancia 3 (m)	-30.6	-30.6	-30.6	-30.6	-30.6

Aplicando nuevamente la ecuación (27) se puede encontrar el promedio entre el “Acceso Exitoso” y “Acceso Fallido” del receptor del espía pasivo a la antena Wi-Fi de la siguiente manera.

$$\bar{x} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$$

$$\bar{x} = \frac{9.41 - 16}{2}$$

$$\bar{x} = -3.295 \text{ dBi}$$

Obteniendo el promedio se puede expresar que sí, el promedio entre los dos diagramas de radiación es mayor a -3.295 la conexión es estable obteniendo un “Acceso Exitoso” por otro lado, si el promedio entre los dos diagramas de radiación es menor a -3.295 la conexión es inestable obteniendo un “Acceso Fallido”.

Los resultados obtenidos anteriormente se pueden expresar de forma cualitativa, clasificando las conexiones como “Acceso Exitoso” o “Acceso Fallido” según el valor promedio de los diagramas de radiación. Esto permite interpretar de manera más intuitiva el desempeño de la conexión, facilitando el análisis de los datos en términos prácticos. Los resultados cualitativos cuando la RIS tiene un ángulo de inclinación de 90° se muestra en la Tabla 7, en la Tabla 8 se muestra los resultados cualitativos de la RIS con ángulo de inclinación de 100°, en la Tabla 9 se muestra los resultados cualitativos de la RIS con ángulo de inclinación de 110° y finalmente en la Tabla 10 los resultados cualitativos de la RIS con ángulo de inclinación de 120°.

La Tabla 7 muestra los resultados de la RIS con un ángulo de inclinación de 90°

Tabla 7: Resultados cualitativos de la RIS con 90° de inclinación.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Distancia 1 (m)	Fallida	Fallida	Exitoso	Exitoso	Fallida
Distancia 2 (m)	Fallida	Fallida	Exitoso	Exitoso	Fallida
Distancia 3 (m)	Fallida	Fallida	Fallida	Fallida	Fallida

La Tabla 8 muestra los resultados de la RIS con un ángulo de inclinación de 100°

Tabla 8: Resultados cualitativos de la RIS con 100° de inclinación.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Distancia 1 (m)	Fallida	Exitoso	Exitoso	Exitoso	Fallida
Distancia 2 (m)	Fallida	Fallida	Exitoso	Fallida	Fallida
Distancia 3 (m)	Fallida	Fallida	Fallida	Fallida	Fallida

La Tabla 9 muestra los resultados de la RIS con un ángulo de inclinación de 110°

Tabla 9: Resultados cualitativos de la RIS con 110° de inclinación.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Distancia 1 (m)	Exitoso	Exitoso	Exitoso	Fallida	Fallida
Distancia 2 (m)	Exitoso	Fallida	Exitoso	Fallida	Fallida
Distancia 3 (m)	Fallida	Fallida	Fallida	Fallida	Fallida

La Tabla 10 muestra los resultados de la RIS con un ángulo de inclinación de 120°.

Tabla 10: Resultados cualitativos de la RIS con 120° de inclinación.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Distancia 1 (m)	Exitoso	Exitoso	Exitoso	Exitoso	Fallida
Distancia 2 (m)	Exitoso	Exitoso	Exitoso	Exitoso	Fallida
Distancia 3 (m)	Fallida	Fallida	Fallida	Fallida	Fallida

4.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO IMPLEMENTADO EN CST STUDIO.

De acuerdo con los datos de las Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10, se realiza una tabla cruzada para resumir y analizar la relación entre el ángulo de inclinación de la antena RIS, la distancia entre la antena RIS y antena de transmisión Wi-Fi y la cantidad de “Accesos Exitosos (E)” o “Accesos Fallidos (F)” del espía pasivo a la red inalámbrica como lo presenta, este resumen está representado en la Tabla 11.

Tabla 11: Acceso del Espía Pasivo a la Red Inalámbrica

	Acceso del Espía Pasivo a la Red Inalámbrica									
	Ángulo de inclinación de 90°		Ángulo de inclinación de 100°		Ángulo de inclinación de 110°		Ángulo de inclinación de 120°			
Distancia de separación	E	F	E	F	E	F	E	F	Suma parcial E	Suma parcial F
1 metro	2	3	3	2	3	2	4	1	12	8
2 metros	2	3	1	4	2	3	4	1	9	11
3 metros	0	5	0	5	0	5	0	5	0	20
Total, de accesos									21	39

En la Tabla 11, de un total de 60 datos obtenido de las simulaciones, se observa 21 accesos exitoso del espía pasivo a la señal de la antena Wi-Fi, y 39 accesos fallidos. Esto demuestra que la RIS tiene un correcto funcionamiento al bloquear el acceso del espía pasivo a la red Wi-Fi. La eficiencia de la RIS para bloquear la señal del transmisor depende de la distancia entre la antena RIS y la antena transmisora, el ángulo de inclinación de la antena RIS, y la posición de la antena transmisora Wi-Fi.

En la Fig.99 se observa el grafico de barras con la frecuencia de “Accesos Fallidos” y “Accesos Exitosos” según la información proporcionada por la Tabla 11.

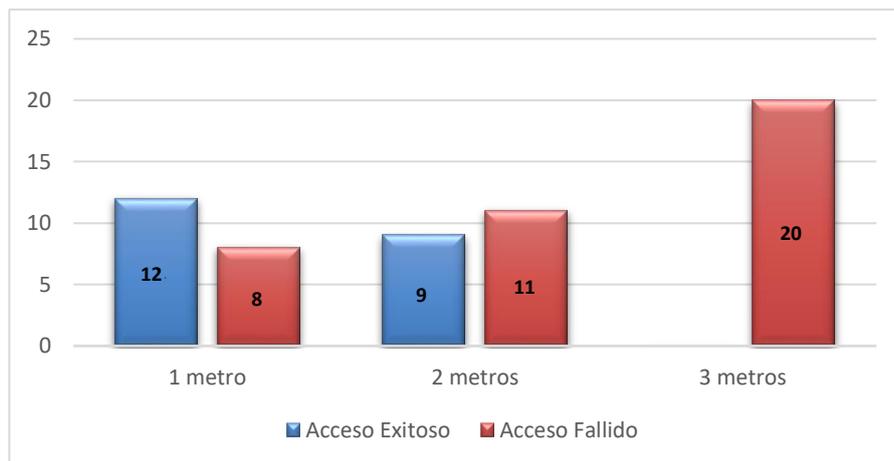


Figura 99: *Accesos del Espía Pasivo a la Red Inalámbrica (Autor)*

A la distancia de 1 metro la antena RIS no logra evitar que el espía pasivo se conecte a la red que transmite la antena Wi-Fi, obteniendo 60% de “Accesos Exitosos” y 40% de “Accesos Fallidos”.

A la distancia de 2 metros la antena RIS logra evitar parcialmente con un 45% de “Accesos Exitosos” y 55% de “Accesos Fallidos” la conexión del espía pasivo a la red Wi-Fi, no obstante, para que la antena RIS logre evitar la conexión del espía pasivo a la red inalámbrica Wi-Fi es importante la posición con respecto al transmisor Wi-Fi y el ángulo de inclinación de la antena RIS.

A la distancia de 3 metros el resultado fue exitoso la antena RIS logra reflejar toda la señal transmitida de la antena Wi-Fi, obteniendo un 100% de “Accesos Fallidos” en los ángulos de inclinación de 90°, 100°, 110° y 120° utilizados en cada caso de simulación.

Tabla 12: *Porcentaje de "Accesos Fallidos" y "Accesos Exitosos" de las simulaciones realizadas del ambiente de trabajo en el programa Cst Studio Versión Estudiantil*

	Porcentaje de accesos (%)	
	Acceso Fallido	Acceso Exitoso
1 metro	40	60
2 metros	55	45
3 metros	100	0

En resumen, la efectividad de la antena RIS para evitar la conexión de un espía pasivo a la red Wi-Fi depende de la distancia al transmisor y del ángulo de inclinación de la RIS. A 1 metro, la RIS no logra bloquear la señal debido a la omnidireccionalidad del alimentador Wi-Fi y al tamaño limitado de la RIS. A 2 metros, la RIS reduce parcialmente la conexión del espía pasivo, reflejando toda la señal a inclinaciones específicas de 90° , 100° y 110° , mientras que a 120° no logra bloquear la conexión. Finalmente, a 3 metros, la RIS refleja exitosamente toda la señal transmitida en los ángulos de 90° , 100° , 110° y 120° , demostrando su máxima efectividad en esta distancia.

Para lograr un bloqueo total de la señal emitida por la antena transmisora Wi-Fi, se propone un escenario con 4 antenas RIS en las direcciones principales de emisión de la señal del transmisor, teniendo en cuenta que la separación entre la antena RIS y la antena transmisora Wi-Fi es de 3 metros y el ángulo de inclinación de la RIS 90 grados como muestra la Fig.100.

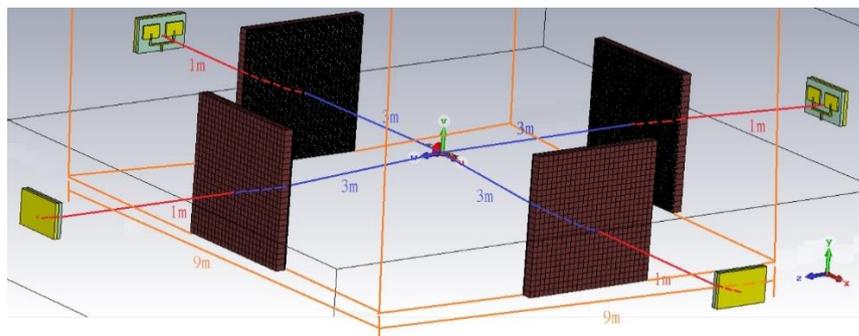


Figura 100: Accesos del Espía Pasivo a la Red Inalámbrica
(Autor – CST Studio/Versión Estudiantil)

CAPÍTULO V.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- A la distancia de 1 metro la antena RIS no logra evitar que el espía pasivo se conecte a la red que transmite la antena Wi-Fi, obteniendo 60% de “Accesos Exitosos” y 40% de “Accesos Fallidos”, esto se debe al arreglo de antena dipolo de 8 etapas elegida como alimentador (transmisor Wi-Fi) y la cercanía de la antena RIS con el transmisor, que al ser una antena omnidireccional el tamaño de la RIS no abarca a reflejar toda la señal que proporciona la antena Wi-Fi.
- A la distancia de 2 metros la antena RIS logra evitar parcialmente con un 45% de “Accesos Exitosos” y 55% de “Accesos Fallidos” la conexión del espía pasivo a la red Wi-Fi, no obstante, para que la antena RIS logre evitar la conexión del espía pasivo a la red inalámbrica Wi-Fi es importante la posición con respecto al transmisor Wi-Fi y el ángulo de inclinación de la antena RIS, tomando en cuenta que en 90°, 100° y 110° de inclinación, la antena RIS logra reflejar toda la señal emitida por el transmisor y así evitando la conexión del espía pasivo a la red Wi-Fi por otro lado al utilizar un ángulo de inclinación de 120° la RIS no logra evitar la conexión del espía pasivo a la red Wi-Fi.
- A la distancia de 3 metros el resultado fue exitoso la antena RIS logra reflejar toda la señal transmitida de la antena Wi-Fi, obteniendo un 100% de “Accesos Fallidos” en los ángulos de inclinación de 90°, 100°, 110° y 120° utilizados en cada caso de simulación.
- La RIS 25x25 presenta una radiación más direccional y eficiente, con un mayor enfoque en la dirección principal, lo que puede ser útil para aplicaciones de comunicación de alto rendimiento que requieran una mayor precisión en la transmisión de señales. En cambio, la RIS 10x10 es más adecuado para aplicaciones en las que se prefiera una cobertura más amplia y general, pero con un enfoque menos preciso.

5.2 RECOMENDACIONES

- Al utilizar en las simulaciones una antena RIS 10x10, no se logra demostrar toda la efectividad de reflexión con un arreglo de antena dipolo de 8 etapas (transmisor Wi-Fi) como alimentador; pero con una antena RIS 25x25 al ser más grande abarca más espacio de reflexión de señal, logrando así aumentar la efectividad de la antena RIS para que el espía pasivo reciba una mínima señal del transmisor Wi-Fi y no se pueda conectar a la red.
- La antena RIS por ser una antena RIS pasiva, no podrá bloquear la señal en otras direcciones más que en su propia recta, para ello el escenario ideal es encerrar la señal que emite la antena Wi-Fi con 4 RIS 25x25 como lo expuso la ecuación (25) en las 4 direcciones principales como muestra la Fig.100 logrando así un bloqueo total de las posibles conexiones de los espías pasivos.
- En esta investigación, se utilizó un arreglo de antenas dipolo de 8 etapas como alimentador para una superficie reflectora inteligente (RIS), tomando como referencia que la mayoría de los routers WiFi de 5G en entornos domésticos emplean arreglos de antenas dipolo para la propagación de señales.

6. REFERENCIAS

- [1] D. Kudathanthirige, D. Gunasinghe and G. Amarasuriya, "Performance Analysis of Intelligent Reflective Surfaces for Wireless Communication," ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), 1-6, 2021.
- [2] J. Li, L. Zhang, K. Xue, Y. Fang and Q. Sun, "Secure Transmission by Leveraging Multiple Intelligent Reflecting Surfaces in MISO Systems," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 22, 2023.
- [3] S. Sarp, H. Tang and Y. Zhao, "Use of Intelligent Reflecting Surfaces For and Against Wireless Communication Security," 2021 IEEE 4th 5G World Forum (5GWF), 2021.
- [4] X. Hu, L. Jin, K. Huang, X. Sun, Y. Zhou and J. Qu, "Intelligent Reflecting Surface-Assisted Secret Key Generation With Discrete Phase Shifts in Static Environment," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, Sept. 2021.
- [5] X. Gu, & G. Zhang, A Survey on UAV-assisted wireless communications Recent advances and future trends, *Computer communications*, 208, 2023.
- [6] X. Pei *et al.*, "RIS-Aided Wireless Communications: Prototyping, Adaptive Beamforming, and Indoor/Outdoor Field Trials," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, Dec. 2021.
- [7] M. Di Renzo *et al.*, "Reconfigurable Intelligent Surfaces vs. Relaying: Differences, Similarities, and Performance Comparison," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, 2021.
- [8] J. Vega, "SECURE PERFORMANCE OF 5G AND BEYOND NETWORKS UNDER GENERALIZED FADING CONDITIONS," ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2021
- [9] I. Beltrán, "Análisis y diseño de una red 5G para la interconexión de varias áreas operativas en una terminal aeroportuaria," Universidad Israel, 2021.
- [10] X. Pei *et al.*, "RIS-Aided Wireless Communications: Prototyping, Adaptive Beamforming, and Indoor/Outdoor Field Trials," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, Dec. 2021.
- [11] A. Cadena, "SIMULACIÓN DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS ASISTIDAS POR SUPERFICIES INTELIGENTES RECONFIGURABLES ASUMIENDO LA EXISTENCIA DE UN LINK DIRECTO" ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, 2021.

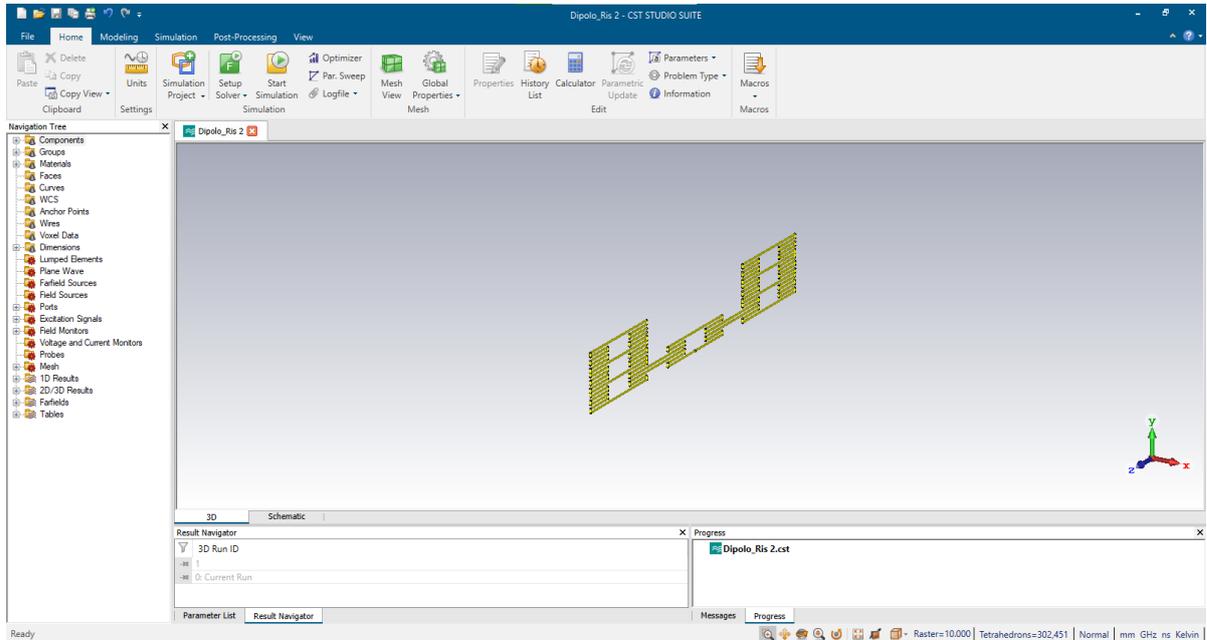
- [12] A. Resa, Encryptación sobre capa física para ethernet óptico de alta velocidad (Doctoral dissertation, Universidad de Zaragoza), 2021.
- [13] M. Blacutt, Ciberseguridad en la implementación de SD-WAN. INF-FCPN-PGI Revista PGI, 2021.
- [14] L. Yang, J. Yang, W. Xie, M. Hasna, T. Tsiftsis & M. Di Renzo, Secrecy performance analysis of RIS-aided wireless communication systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021.
- [15] Y. Liang, C. Chen, J. Long, R. He, X. Lin, c. Huang, ... & M. Di Renzo, Reconfigurable intelligent surfaces for smart wireless environments: channel estimation, system design and applications in 6G networks. Science China Information Sciences, 64, 1-21, 2021.
- [16] J. Nawaz, S. Sharma, B. Mansoor, M. Patwary, & N. Khan, Non-coherent and backscatter communications: Enabling ultra-massive connectivity in 6G wireless networks. IEEE Access, 9, 38144-38186, 2021.
- [17] R. Calderon, Diseño de una tecnología de superficie reconfigurable (RIS) en la banda de 1900 MHz, 2023.
- [18] L. Bravo & V. Collaguazo, Implementación de superficie inteligente reconfigurable (RIS) para experimentar con las comunicaciones inalámbricas Wi-Fi en el rango de 5 GHz aplicado ambientes interiores, 2024.
- [19] M. Herrera, “Redes 6G empoderadas por superficies inteligentes reconfigurables: simulación de comunicaciones inalámbricas asistidas por superficies inteligentes reconfigurables con errores de fase”, 2022.
- [20] A. Kishk, “Fundamentals of Antennas”. 2022
- [21] M. Rana, S. Hossain, S. Rana, M. Rahman, Microstrip patch antennas for various applications: a review, *Indonesian journal of Electrical Engineering and computer science*, 2023
- [22] K. Jácome, “Comparación de arreglos de antenas dipolo y dipolo doblada en banda de onda milimétrica”, 2023
- [23] M. Saeed & A. Nwajana, A review of Saeed, M. A., & Nwajana, A. O. (2024). A review of beamforming microstrip patch antenna array for future 5G/6G networks, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2024
- [24] Y. Wang, H. Zhu, L. Wang & S. Li., A Low Profile Microstrip Array Antenna for Automotive Radar. *Smart City Challenges & Outcomes for Urban Transformation (SCOUT)*. 2024.

7. ANEXOS

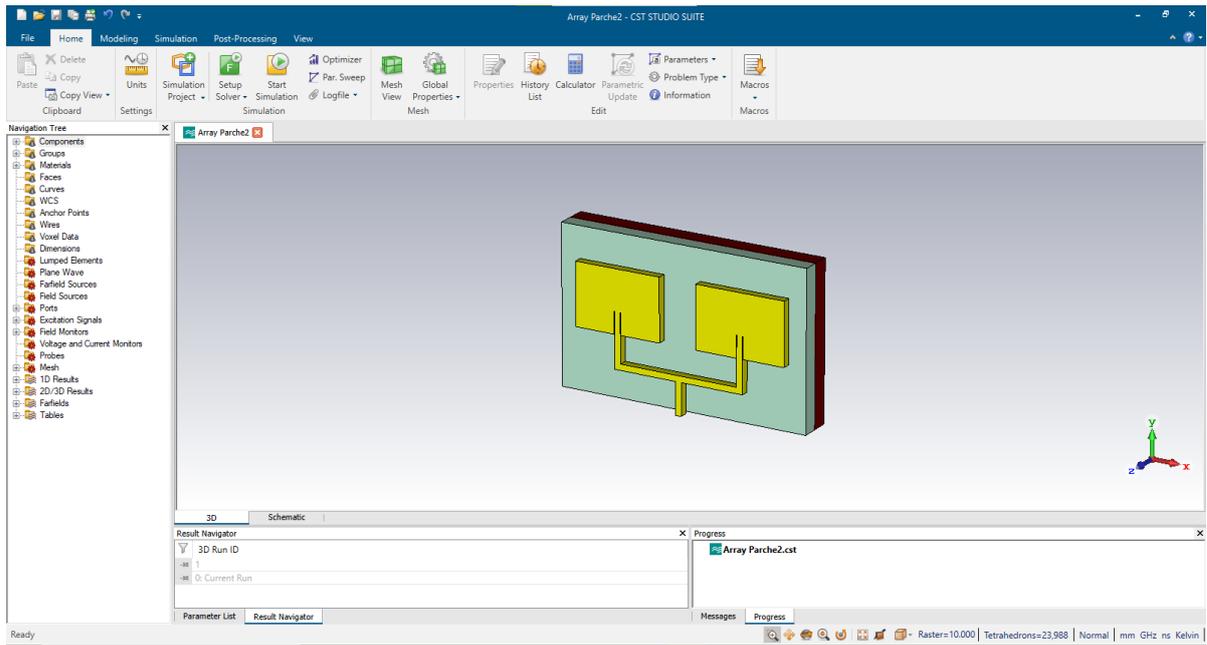
Anexo 1: Proyectos creados en CST Studio/Versión Estudiantil (Autor)

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Celda Unitaria - Modelo 4 - 2RIS	25/11/2024 1:24	Carpeta de archivos	
Celda Unitaria - Modelo 4 - 2RIS - Sustrato	22/11/2024 17:18	Carpeta de archivos	
Celda Unitaria - Modelo 4 - Giro25	18/11/2024 5:08	Carpeta de archivos	
Celda Unitaria - Modelo 4 - Giro75	19/11/2024 6:46	Carpeta de archivos	
Celda unitaria Graficas	26/7/2024 22:10	Carpeta de archivos	
Dipolo Graficas	26/7/2024 23:16	Carpeta de archivos	
Dipolo_Ris	25/7/2024 19:59	Carpeta de archivos	
Dipolo_Ris 2	22/11/2024 16:45	Carpeta de archivos	
imagenes	23/11/2024 16:01	Carpeta de archivos	
RIS Giro 25	26/7/2024 21:02	Carpeta de archivos	
RIS Giro 75	26/7/2024 20:05	Carpeta de archivos	
RIS Ground Giro 20	26/7/2024 21:19	Carpeta de archivos	
RIS-Sustrato	25/7/2024 20:28	Carpeta de archivos	
antena dipolo	2/7/2024 23:25	CST Studio File	63 KB
Array Parche2	26/7/2024 22:27	CST Studio File	179 KB
Celda Unitaria - Modelo 4 - 2RIS - Sustrato	3/8/2024 13:34	CST Studio File	69.994 KB
Celda Unitaria - Modelo 4 - 2RIS	8/11/2024 10:43	CST Studio File	69.802 KB
Celda Unitaria - Modelo 4 - Giro25	3/8/2024 13:38	CST Studio File	47.518 KB
Celda Unitaria - Modelo 4 - Giro75	3/8/2024 13:37	CST Studio File	47.501 KB
Celda Unitaria - Modelo 4	8/11/2024 10:17	CST Studio File	36.982 KB
Dipolo_Ris 2	26/7/2024 23:07	CST Studio File	204 KB

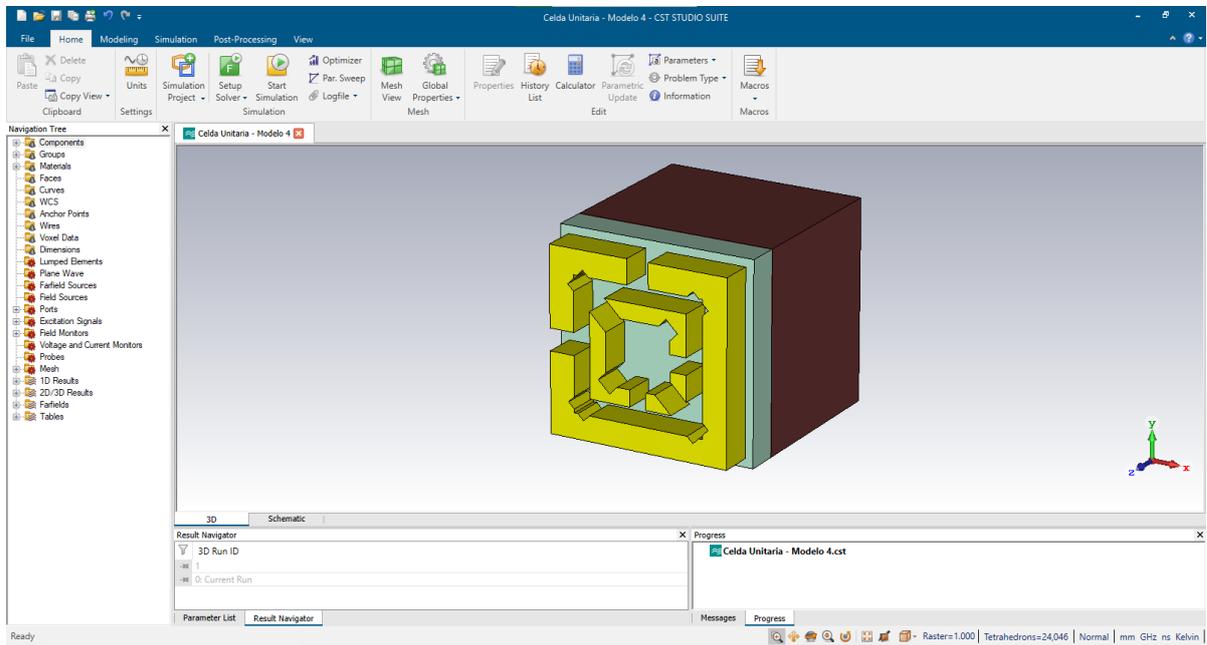
Anexo 2: Diseño del arreglo de antenas dipolo de 8 etapa (Autor – CST Studio/Versión Estudiantil)



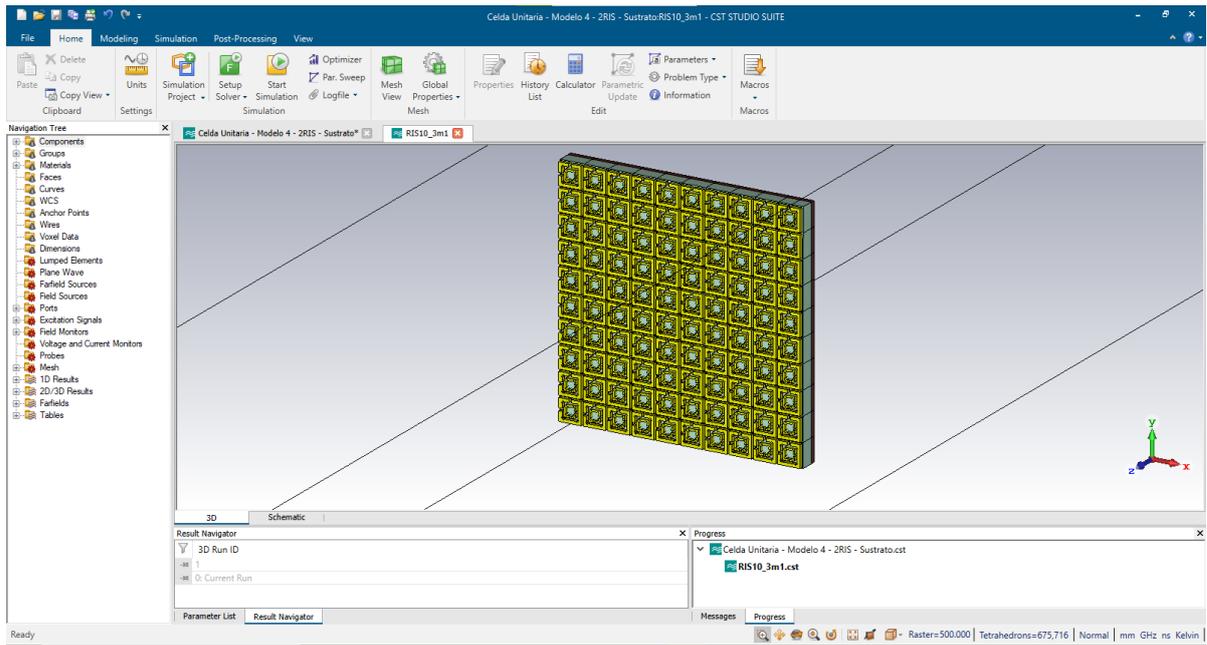
Anexo 3: Diseño del arreglo de antena microstrip de 2 etapas
(Autor – CST Studio/Versión Estudiantil)



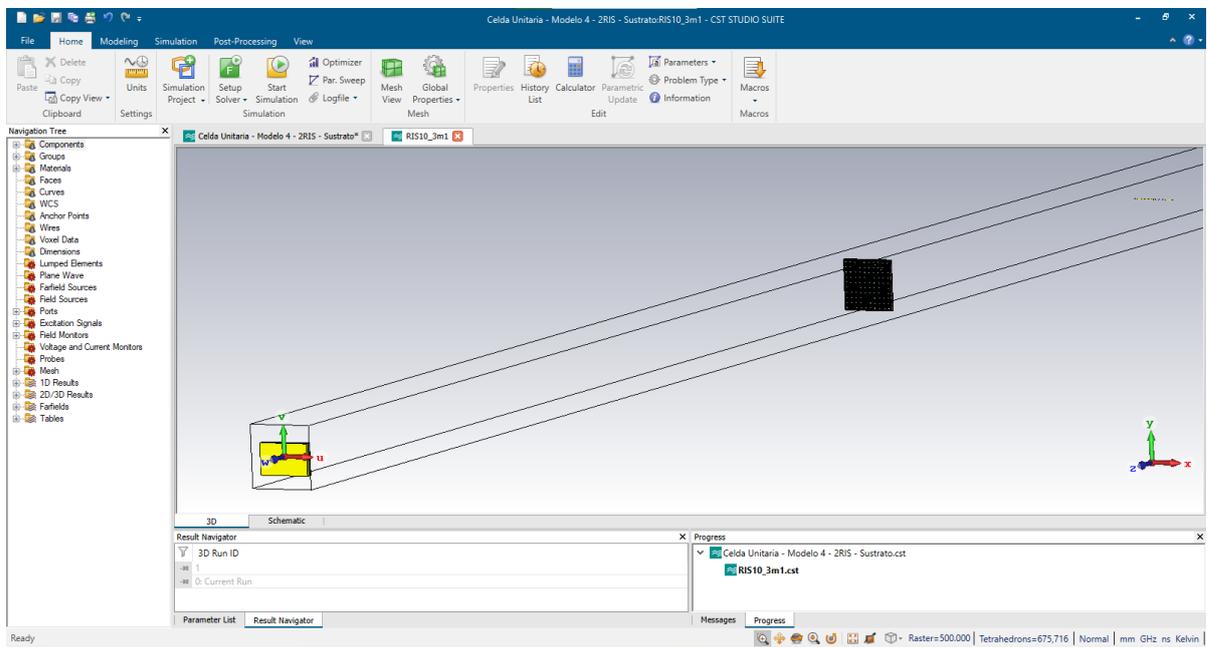
Anexo 4: Diseño de la Celda Unitaria para la antena RIS
(Autor – CST Studio/Versión Estudiantil)



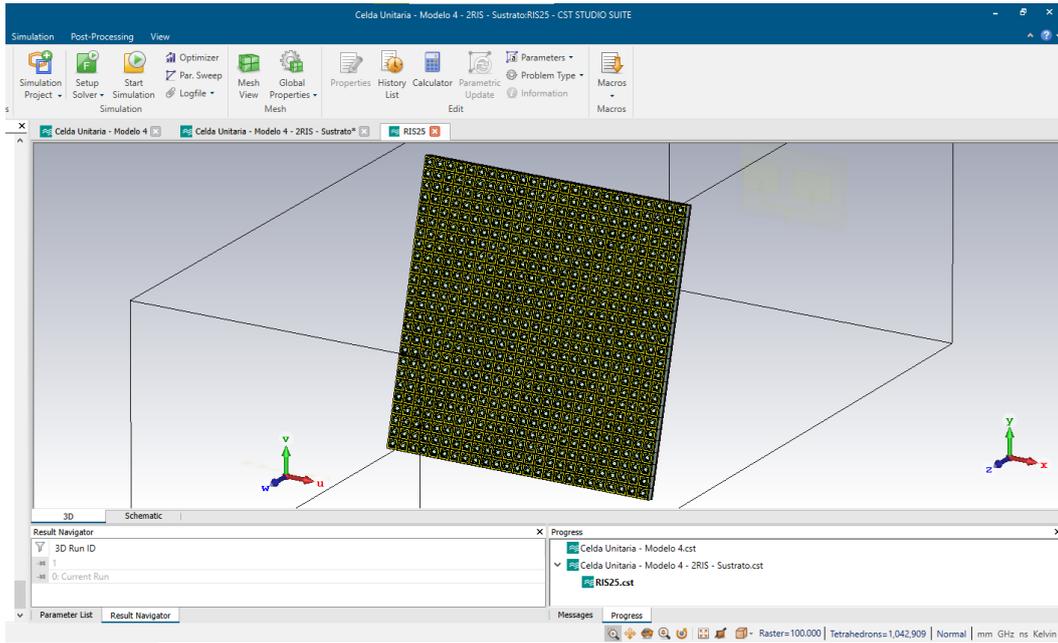
Anexo 5: Diseño de la Antena RIS 10x10
(Autor – CST Studio/Versión Estudiantil)



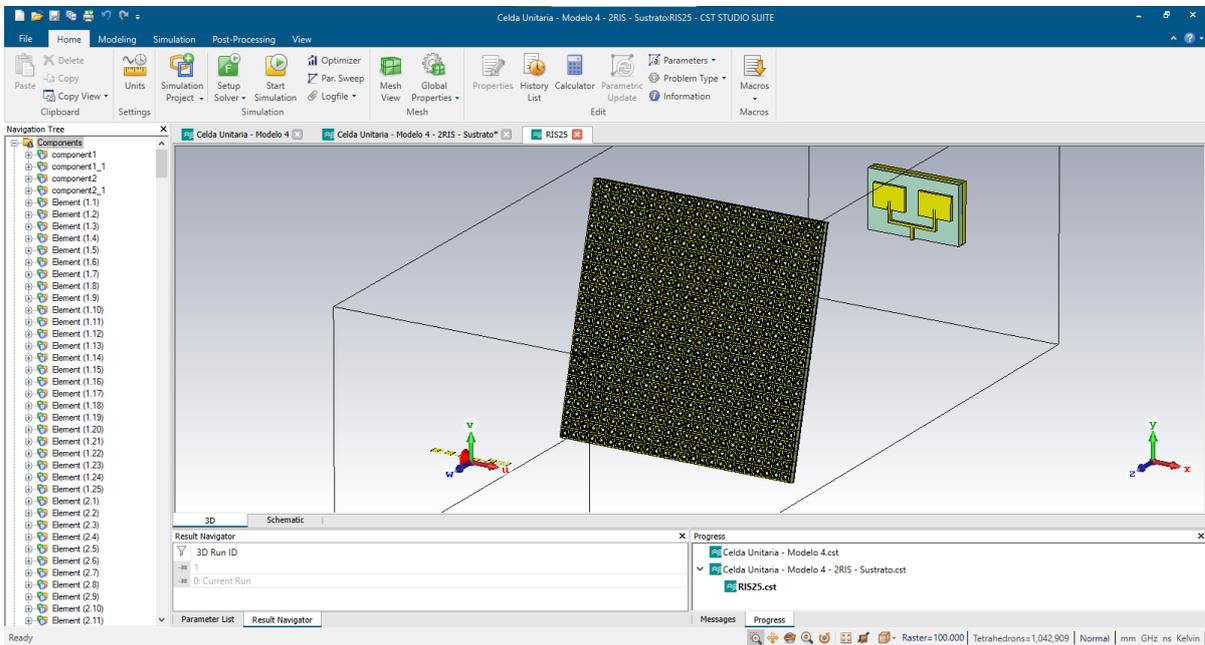
Anexo 6: Figura 103: Diseño del espacio de trabajo con la RIS 10x10
(Autor – CST Studio/Versión Estudiantil)



Anexo 7: Diseño de la Antena RIS 25x25
(Autor – CST Studio/Versión Estudiantil)



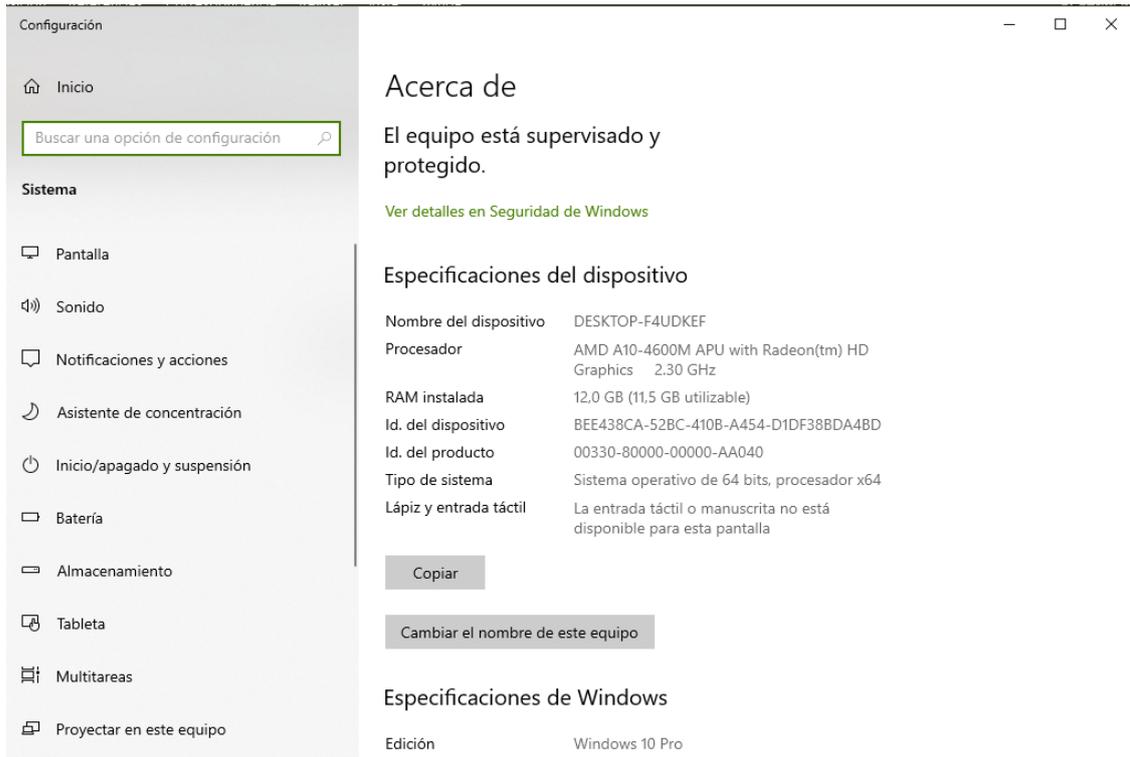
Anexo 8: Diseño del espacio de trabajo con la RIS 25x25
(Autor – CST Studio/Versión Estudiantil)



Anexo 9: Ficha técnica del sustrato ROGERS RO 3000
(A Low Profile Microstrip Array Antenna for Automotive Radar) [24]

Properties	Typical Value				Units	Test Conditions		Test Method
	RO3003	RO3035	RO3006	RO3010				
Electrical Properties								
Dielectric Constant (process)	3.00± 0.04	3.50 ± 0.05	6.15 ± 0.15	10.2 ± 0.30	-	23°C	10 GHz	IPC TM-650 2.5.5.5
Dielectric Constant (design)	3.00	3.60	6.50	11.20	-	8 GHz - 40 GHz		Differential Phase Length
Dissipation Factor	0.0010	0.0015	0.0020	0.0022	-	23°C	10 GHz	IPC TM-650 2.5.5.5
Thermal Coefficient of Dielectric Constant	-3	-45	-262	-395	ppm/°C	-50 to 150°C	10 GHz	IPC TM-650 2.5.5.5
Volume Resistivity	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁵	10 ⁵	MΩ-cm	Condition A		IPC TM-650 2.5.17.1
Surface Resistivity	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁵	10 ⁵	MΩ	Condition A		IPC TM-650 2.5.17.1
Thermal Properties								
Decomposition Temperature (Td)	500	500	500	500	°C TGA	-		ASTM D3850
Coefficient of Thermal Expansion - x	17	17	17	13	ppm/°C	-55 to 288°C 23°C/ 50% RH		IPC TM-650 2.4.41
Coefficient of Thermal Expansion - y	16	17	17	11	ppm/°C			
Coefficient of Thermal Expansion - z	25	24	24	16	ppm/°C			
Thermal Conductivity	0.50	0.50	0.79	0.95	W/(m·K)	50°C		ASTM D5470
Mechanical Properties								
Copper Peel Strength	12.7	10.2	7.1	9.4	lbs/in	1 oz. EDC After Solder Float		IPC TM-650 2.4.8
Young's Modulus	930 823	1025 1006	1498 1293	1902 1934	MPa	23°C		ASTM D638
Dimensional Stability (MD, CMD)	-0.06 0.07	-0.11 0.11	-0.27 -0.15	-0.35 -0.31	mm/m	Condition A		IPC TM-650 2.2.4
Physical Properties								
Flammability	V-0	V-0	V-0	V-0	-	-		UL 94
Moisture Absorption	0.04	0.04	0.02	0.05	%	D48/50		IPC TM-650 2.6.2.1
Density	2.1	2.1	2.6	2.8	g/cm ³	23°C		ASTM D792
Specific Heat Capacity	0.9		0.86	0.8	J/g/K	-		Calculated
Lead Free Process Compatible	Yes	Yes	Yes	Yes	-	-		-

Anexo II: Especificaciones Computacionales
(Autor)



The image shows a screenshot of the Windows Settings application, specifically the 'About' page. The left sidebar contains navigation options: Inicio, Sistema, Pantalla, Sonido, Notificaciones y acciones, Asistente de concentración, Inicio/apagado y suspensión, Batería, Almacenamiento, Tableta, Multitareas, and Proyectar en este equipo. The main content area is titled 'Acerca de' and includes a message: 'El equipo está supervisado y protegido.' with a link to 'Ver detalles en Seguridad de Windows'. Below this is the 'Especificaciones del dispositivo' section, which lists the following information:

Nombre del dispositivo	DESKTOP-F4UDKEF
Procesador	AMD A10-4600M APU with Radeon(tm) HD Graphics 2.30 GHz
RAM instalada	12,0 GB (11,5 GB utilizable)
Id. del dispositivo	BEE438CA-52BC-410B-A454-D1DF38BDA48D
Id. del producto	00330-80000-00000-AA040
Tipo de sistema	Sistema operativo de 64 bits, procesador x64
Lápiz y entrada táctil	La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla

Below the specifications are two buttons: 'Copiar' and 'Cambiar el nombre de este equipo'. At the bottom, the 'Especificaciones de Windows' section shows 'Edición' as 'Windows 10 Pro'.