



Universidad
Rey Juan Carlos

ESCUELA DE INGENIERÍA DE FUENLABRADA

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Superficies Inteligentes Reflectoras Pasivas para
Cobertura de Servicios Multicast en Ondas Milimétricas

Autor: Javier Gutiérrez Rodríguez

Tutor: Alejandro de la Fuente Iglesias

Co-tutor: Eduardo María Martínez de Rioja del Nido

Curso académico 2023/24

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado presenta un escenario práctico de implementación de una superficie inteligente reflectora (RIS) pasiva, explorando su modelado matemático, analizando su impacto en el rendimiento del sistema y brindando una introducción a esta innovadora tecnología. Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando la plataforma Matlab para analizar nuestro caso práctico.

Nuestro escenario se enfoca en proveer servicios de cobertura en dos zonas: una con línea de visión directa y otra bloqueada por obstáculos, mediante la evaluación de distintos posicionamientos de la RIS para optimizar la relación señal/ruido (SNR) y, en consecuencia, la tasa de datos entregada. La investigación involucró el estudio del modelado matemático y las técnicas de diseño de RIS, utilizando diversas fuentes bibliográficas para comprender su funcionamiento en el contexto de las telecomunicaciones.

Los resultados de las simulaciones muestran que la eficiencia es mayor cuando la RIS se ubica en las proximidades del receptor. En el caso de un servicio multicast, se observa que el uso de haces ensanchados en lugar de haces directivos resulta más factible y rentable, ya que permite una mayor tasa de bits para ofrecer el servicio a un número más significativo de usuarios en condiciones aceptables. Esto se debe a la limitación de usuarios que pueden ser atendidos eficientemente con haces directivos, debido a que al ser una RIS pasiva, los haces directivos no pueden adaptarse a variaciones en la posición de los usuarios, lo que hace que los haces ensanchados sean más beneficiosos permitiendo cubrir toda la zona donde se ubiquen los usuarios, asegurándose así de proporcionar servicios de alta capacidad.

Abstract

This Final Degree Project presents a practical implementation scenario of a passive intelligent reflective surface (RIS), exploring its mathematical modeling, analyzing its impact on system performance and providing an introduction to this innovative technology. Simulations were carried out using the Matlab platform to analyze our practical case.

Our scenario focuses on providing coverage services in two areas: one with direct line of sight and another blocked by obstacles, by evaluating different positioning of the RIS to optimize the signal-to-noise ratio (SNR) and, consequently, the delivered data rate. The research involved the study of mathematical modeling and RIS design techniques, using various bibliographic sources to understand its operation in the context of telecommunications.

The simulation results show that the efficiency is higher when the RIS is located in the vicinity of the receiver. In the case of a multicast service, it is observed that the use of spread beams instead of directional beams is more feasible and profitable, since it allows a higher bit rate to offer the service to a more significant number of users under acceptable conditions. This is due to the limitation of users that can be efficiently served with directional beams, because being a passive RIS, the directional beams cannot adapt to variations in the position of the users, which makes the widened beams more beneficial allowing to cover the entire area where users are located, thus ensuring high capacity services are provided.

Índice

Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1 Contexto y motivación	1
1.2 Objetivos generales y específicos	1
1.3 Metodología	2
1.4 Estructura de la memoria.....	2
Capítulo 2	4
La innovación tecnológica RIS	4
2.1 Superficies inteligentes reflectoras	4
2.2 Estructura, diseño y aplicación.....	7
Capítulo 3	9
Modelado Matemático	9
3.1 Modelado del sistema extremo a extremo	9
3.2 Modelado de la superficie inteligente reflectora.....	16
Capítulo 4	19
Descripción del escenario de trabajo	19
4.1 Planteamiento	19
4.2 Escenarios propuestos	20
4.3 Servicio multicast propuesto.....	24
Capítulo 5	27
Simulación del sistema y análisis de resultados	27
5.1 Simulación	27
5.2 Validación del modelo.....	30
5.3 Resultados de zonas de Cobertura.....	32
5.4 Eficiencia Espectral y Eficiencia Espectral Agregada	41
5.5 Análisis de ancho de banda de cada servicio propuesto	41
5.6 Comparativa simulación multicast.....	44
Capítulo 6	47
Conclusiones	47
6.1 Consecución de objetivos.....	47
6.2 Competencias.....	47
6.3 Lecciones aprendidas	48
6.4 Futuros trabajos	49
Referencias	50

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama de Gantt	2
Figura 2: Sistema de comunicación asistido por RIS [4].....	6
Figura 3: Sistema inalámbrico convencional con propagación del canal incontrolable [5].....	9
Figura 4: Sistema de comunicación asistido por RIS con ruta de propagación controlable[5]	10
Figura 5: Sistema de extremo a extremo con respuesta de impulso	13
Figura 6: Dibujo del planteamiento inicial del escenario	20
Figura 7: Representación del escenario 1 en AutoCad	21
Figura 8: Representación escenario 2 en AutoCad	22
Figura 9: Representación escenario 3 en AutoCad	23
Figura 10: Representación escenario 4 en AutoCad	24
Figura 11: Diagramas de radiación de haz pincel del modelado propio	31
Figura 12: Diagrama de radiación de la antena transmisora de la estación base.....	33
Figura 13: Diagrama de radiación de la RIS.....	34
Figura 14: Representación zona de cobertura 1 en AutoCad	34
Figura 15: Diagrama de radiación de la antena transmisora de la estación base.....	35
Figura 16: Diagrama de radiación de la RIS.....	36
Figura 17: Representación zona de cobertura 2 en AutoCad	36
Figura 18: Diagrama de radiación de la antena transmisora de la estación base.....	37
Figura 19: Diagrama de radiación de la RIS.....	38
Figura 20: Representación zona de cobertura 3 en AutoCad	38
Figura 21: Diagrama de radiación de la antena transmisora de la estación base.....	39
Figura 22: Diagrama de radiación de la RIS.....	40
Figura 23: Representación zona de cobertura 4 en AutoCad	40
Figura 24: Diagrama de radiación de la RIS con haz ensanchado	44
Figura 25: Diagrama de radiación de la RIS con haz pincel	44

Lista de tablas

Tabla 1: Requisitos de la red de VR (ancho de banda y latencia) [22]	26
Tabla 2: Resultados de SNR y ganancia de la validación	32
Tabla 3: Resultados de SNR, SE y ASE.....	41
Tabla 4: Resultados de áreas de cobertura del caso 1 GHz	42
Tabla 5: Resultados de áreas de cobertura del caso 400 MHz	42
Tabla 6: Resultados de áreas de cobertura del caso 100 MHz	43
Tabla 7: Resultados de áreas de cobertura del caso 10 MHz.....	43
Tabla 8: Resultados de simulación multicast de 5 usuarios.....	46
Tabla 9: Resultados de simulación multicast de 10 usuarios.....	46
Tabla 10: Resultados de SNR mínima de cada simulación multicast	46

Lista de acrónimos

5G	Quinta generación
6G	Sexta generación
RIS	<i>Reflecting Intelligent Surface</i> , Superficie Inteligente Reflectora
HD	<i>Half Duplex</i> , Semidúplex
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i> , Fidelidad Inalámbrica
LoS	<i>Line of Sight</i> , Línea de visión
NLOS	<i>Non-Line-of-Sight</i> , Sin Línea de Visión
BS	<i>Base Station</i> , Estación Base
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i> , Relación Señal-Interferencia-más-ruido
FD	<i>Full Duplex</i> , Dúplex Completo
mmWave	<i>Millimeter Wave</i> , Onda Milimétrica
SWIPT	<i>Simultaneous Wireless Information and Power Transfer</i> , Transferencia Inalámbrica Simultánea de Información y Energía
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i> , Banda Ancha Móvil Mejorada
mMTC	<i>massive Machine Type Communications</i> , Comunicaciones Masivas Tipo Máquina
URLLC	<i>Ultra-Reliable and Low Latency Communications</i> , Comunicaciones Ultraconfiables y de Baja Latencia
CSI	<i>Channel State Information</i> , Información del Estado del Canal
AP	<i>Access Point</i> , Punto de Acceso
PIN	Positivo-intrínseco-negativo
FET	<i>Field-Effect Transistor</i> , Transistor de Efecto de Campo
LTI	<i>Linear Time-Invariant</i> , Lineal Invariante en el Tiempo
HPBW	<i>Half Power Beamwidth</i> , Ancho de Haz de Media Potencia
SISO	<i>Single Input Single Output</i> , Entrada Única Salida Única
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> , Relación Señal-Ruido
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> , Entrada Múltiple Salida Múltiple
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio
VR	<i>Virtual Reality</i> , Realidad Virtual
AR	<i>Augmented Reality</i> , Realidad Aumentada
NBA	<i>National Basketball Association</i> , Asociación Nacional de Baloncesto
3D	Tres dimensiones
SD	<i>Standard Definition</i> , Definición Estándar

HD	<i>High Definition</i> , Alta Definición
UHD	<i>Ultra High Definition</i> , Ultra Alta Definición
4K	<i>UHD Resolution</i> , Resolución UHD
SE	<i>Spectral Efficiency</i> , Eficiencia Espectral
ASE	<i>Aggregated Spectral Efficiency</i> , Eficiencia Espectral Agregada

Capítulo 1

Introducción

1.1 Contexto y motivación

La mejora de popularidad y disponibilidad de las redes inalámbricas ha ocasionado un mayor desarrollo de la tecnología y, con ello, descubrir diferentes tipos de aplicaciones que puedan ofrecer. Las redes inalámbricas de quinta generación (5G) se han desplegado comercialmente a nivel global. En la actualidad, se ha iniciado una investigación exhaustiva sobre las tecnologías inalámbricas de sexta generación (6G) para satisfacer requisitos más exigentes, como un menor consumo de energía y un mayor rendimiento. Para hacer frente al crecimiento exponencial del tráfico de datos y una disponibilidad constante en cualquier lugar y momento, las superficies inteligentes reflectoras (RIS) se presentan como una innovación tecnológica clave para 6G. Los sistemas de comunicación asistidos por RIS tienen la capacidad de ajustar de forma autónoma el entorno de propagación, en lugar de adaptarse al mismo. Una RIS puede reflejar inteligentemente la señal hacia el usuario deseado sin amplificar la señal de forma activa, mejorando así la calidad de transmisión de la señal con un bajo consumo de energía.

1.2 Objetivos generales y específicos

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado es analizar la aplicabilidad y el impacto de la implementación de RIS en entornos de telecomunicaciones, evaluando su capacidad para mejorar la calidad y eficiencia de la transmisión de señales.

En cuanto a los objetivos específicos, en primer lugar, se realizará una exhaustiva investigación de la tecnología RIS, explorando los principios de funcionamiento, las características fundamentales y las diversas aplicaciones en el ámbito de las telecomunicaciones. Seguidamente, se procede a modelar el entorno de telecomunicaciones, desarrollando un modelo matemático basado en los previamente investigados.

El siguiente objetivo consiste en analizar el comportamiento de la RIS en diferentes ubicaciones y con diversas disposiciones en un escenario planteado para evaluar los efectos que la RIS tiene en el rendimiento de las señales y optimizar su configuración para incrementar sus beneficios. Se emplearán simulaciones para evaluar la relación señal/ruido (SNR), la ampliación de cobertura y la tasa de transmisión del sistema. Posteriormente, se compararán y evaluarán los resultados obtenidos, cuantificando los beneficios y desafíos asociados con su implementación, identificando posibles aplicaciones, limitaciones y áreas de investigación futura.

Finalmente, se formularán las conclusiones del trabajo y se propondrán recomendaciones basadas en los hallazgos obtenidos durante el estudio.

1.3 Metodología

La información ha sido obtenida mediante una revisión bibliográfica de artículos y libros científicos. Como motor de búsqueda se utilizó Google Scholar y otras bibliotecas digitales proporcionadas por la Universidad Rey Juan Carlos.

Además, para la implementación práctica y el procesamiento de los resultados obtenidos, se utiliza el software Matlab. Este entorno de programación proporcionó las herramientas necesarias para realizar los cálculos y análisis requeridos para este trabajo.

A continuación, en la Figura 1 se presenta un diagrama de Gantt que ilustra el cronograma de actividades planificadas para el TFG:

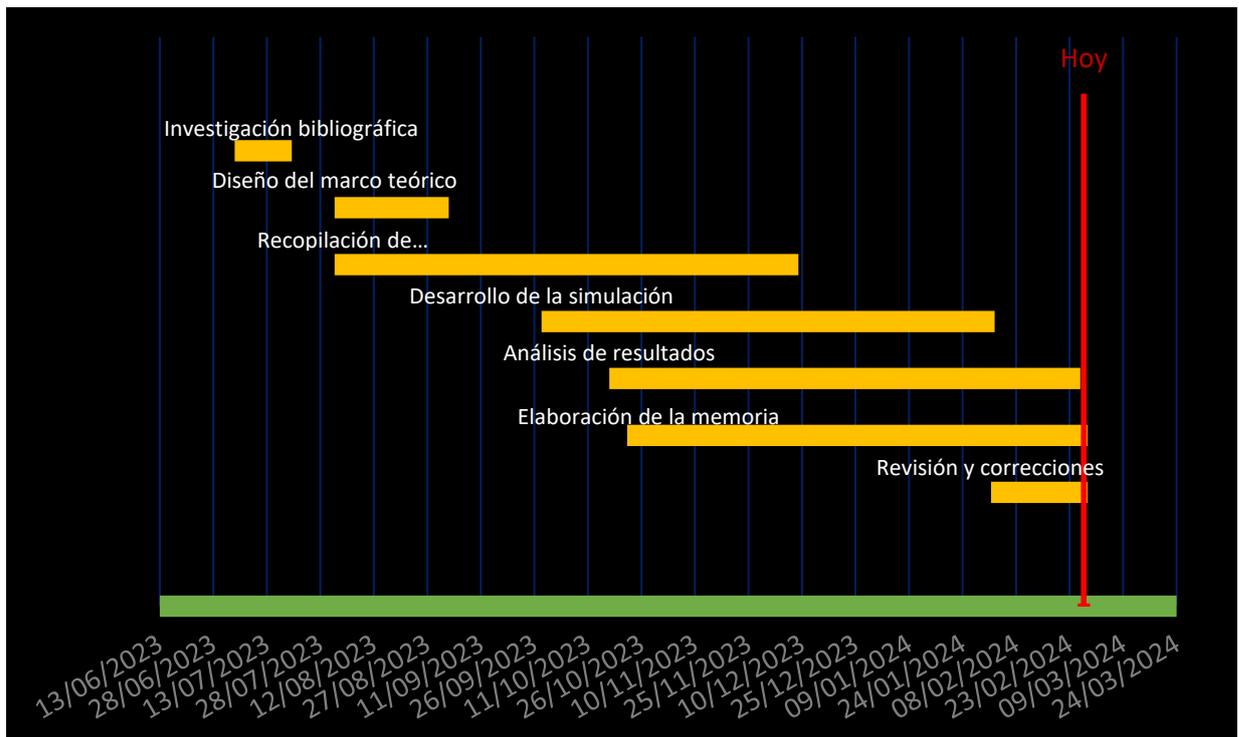


FIGURA 1: DIAGRAMA DE GANTT

1.4 Estructura de la memoria

Este primer capítulo constituye una breve introducción que establece el contexto y la motivación del Trabajo de Fin de Grado (TFG). En él, se declaran los objetivos generales y específicos, se presenta la metodología utilizada y se proporciona la estructura de la memoria.

El segundo capítulo explora la tecnología RIS, cubriendo su contexto, descripción, estructura, diseño y detalles relevantes sobre esta innovadora tecnología.

El tercer capítulo es el modelado matemático de la RIS y se divide en diferentes secciones. Comienza con la descripción del sistema extremo a extremo seguido por el modelado del canal. Se detalla el modelado de la superficie RIS, incluyendo el cálculo en forma cerrada del cambio

de fase y el modelado de sistema SISO. Finalmente, se presentan definiciones y fórmulas relacionadas con la relación señal/ruido, capacidad y eficiencia espectral.

En el cuarto capítulo se contextualiza y se describe el servicio multicast propuesto para el TFG que implica la multidifusión de vídeos inmersivos de 360°. Además, se plantea el escenario de simulación variando la posición de la RIS en cuatro ubicaciones diferentes: RIS muy próxima a la estación base, RIS en posición intermedia, RIS alejada y RIS muy próxima a la estación base.

El quinto capítulo recoge la información acerca del procedimiento utilizado para el desarrollo y la ejecución de la simulación del caso práctico, junto con la validación de los resultados en comparación con el modelo teórico de procesamiento de señales, y se muestran los resultados obtenidos de la simulación abarcando las zonas de cobertura de los diferentes escenarios según la posición de la RIS, la eficiencia espectral, resultados de pruebas de ancho de banda para cada servicio propuesto y la comparativa de la simulación multicast.

El sexto capítulo son las conclusiones derivadas del TFG, destacando la consecución de los objetivos planteados al comienzo del mismo, las competencias cumplidas de la rama de Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación, lecciones aprendidas y el planteamiento de ideas para futuros trabajos.

Capítulo 2

La innovación tecnológica RIS

2.1 Superficies inteligentes reflectoras

La RIS es una estructura plana diseñada para controlar dinámicamente las ondas electromagnéticas. Su propio nombre indica sus características principales:

- Superficie: Conjunto bidimensional de elementos.
- Reflectora: La señal procedente de la estación base incide sobre la superficie y sale reflejada.
- Inteligente: La reflexión de la señal se realiza de manera "inteligente", ya sea porque se genera un haz con un apuntamiento y conformado específicos (en lugar de la reflexión especular de una simple placa metálica), o bien porque la superficie es programable/controlable en tiempo real.

En las comunicaciones inalámbricas, las RISs han surgido recientemente como una tecnología prometedora para crear entornos de propagación inalámbrica inteligentes, programables y reconfigurables a través de transformaciones de señal casi pasivas. Con la ayuda de las RIS, el entorno inalámbrico se convierte en un parámetro de diseño de la red sujeto a optimización.

RIS es un término general utilizado para referirse a una matriz bidimensional de elementos pasivos que reflejan de manera difusa las ondas electromagnéticas incidentes después de un filtrado análogo "pasivo" [1]. Cada elemento filtra la señal al reducir potencialmente la amplitud, incurriendo en retardos temporales y/o cambiando la polarización [2].

Al desplegar RIS de manera densa en una red inalámbrica y coordinar de manera inteligente sus reflexiones, la propagación de señales/canales inalámbricos entre transmisores y receptores puede reconfigurarse de manera flexible para lograr realizaciones y/o distribuciones deseadas. Esto proporciona un nuevo medio para abordar de manera fundamental la atenuación y los problemas de interferencia en el canal inalámbrico, y potencialmente lograr una mejora significativa en la capacidad y confiabilidad de las comunicaciones inalámbricas. Además, la RIS carece de cualquier amplificación de ruido de antena y autointerferencia. Esto le confiere ventajas competitivas sobre los repetidores activos tradicionales, como los de half-dúplex (HD), que sufren de baja eficiencia espectral, y los de full-dúplex, que requieren técnicas avanzadas para la cancelación de autointerferencias. Además, gracias a su perfil delgado, peso ligero y geometría conformada, las RISs pueden ser fácilmente montadas o desmontadas en objetos del entorno para sus implementaciones o reemplazos. Por último, la RIS actúa como un dispositivo auxiliar en redes inalámbricas y se puede integrar de manera transparente, proporcionando así una flexibilidad excepcional y compatibilidad con los sistemas inalámbricos existentes, como los sistemas celulares o WiFi [3].

Debido a su capacidad para modificar proactivamente el entorno de comunicación inalámbrica, las RIS se han convertido en un enfoque primordial de investigación en las comunicaciones

inalámbricas. A través de diferentes investigaciones se pueden enumerar distintas ventajas que la RIS ofrece [2]:

- **Facilidad de implementación:** las RISs se pueden instalar en varias estructuras, que incluyen, entre otras cosas, fachadas de edificios, paredes interiores, plataformas aéreas, vallas publicitarias en carreteras, postes de carreteras, ventanas de vehículos, así como la ropa de los peatones debido a su bajo coste.
- **Mejora de la eficiencia espectral:** Las RISs son capaces de reconfigurar el entorno de propagación inalámbrica al compensar la pérdida de potencia en distancias largas. Se pueden formar enlaces virtuales de línea de visión directa (LoS) entre estaciones base (BSs) y usuarios móviles mediante la reflexión pasiva de las señales de radio incidentes. La mejora del rendimiento se vuelve significativa cuando el enlace LoS entre BS y usuarios está bloqueado por obstáculos, como edificios de gran altura. Debido al despliegue y diseño inteligente de las RISs, se puede construir un entorno inalámbrico definido por software, lo que, a su vez, proporciona mejoras potenciales en la relación señal a interferencia más ruido (SINR) recibida.
- **Compatibilidad:** Las RISs admiten transmisión full-dúplex (FD) y en toda la banda debido a que sólo reflejan las ondas electromagnéticas. Además, las redes inalámbricas mejoradas con RIS son compatibles con los estándares y hardware de las redes inalámbricas existentes [3].
- **Respeto con el medio ambiente:** A diferencia de los sistemas de repetición convencionales, implementar RIS es más eficiente en términos de energía y respetuoso con el medio ambiente, ya que son capaces de dar forma a la señal entrante mediante el control del cambio de fase de cada elemento reflectora, en lugar de utilizar un amplificador de potencia.

Debido a las características atractivas mencionadas anteriormente, las RISs se reconocen como una solución efectiva para mitigar una amplia gama de desafíos en aplicaciones comerciales y civiles.

Un caso de uso básico de la tecnología RIS se ilustra en la Figura 2, donde una RIS se despliega para capturar la energía de la señal de la fuente en proporción a su área y retransmitirla en forma de un haz hacia el receptor deseado [4]. Dado que la RIS no amplifica la señal, generalmente se requiere una gran superficie para lograr una SNR dada en el receptor.

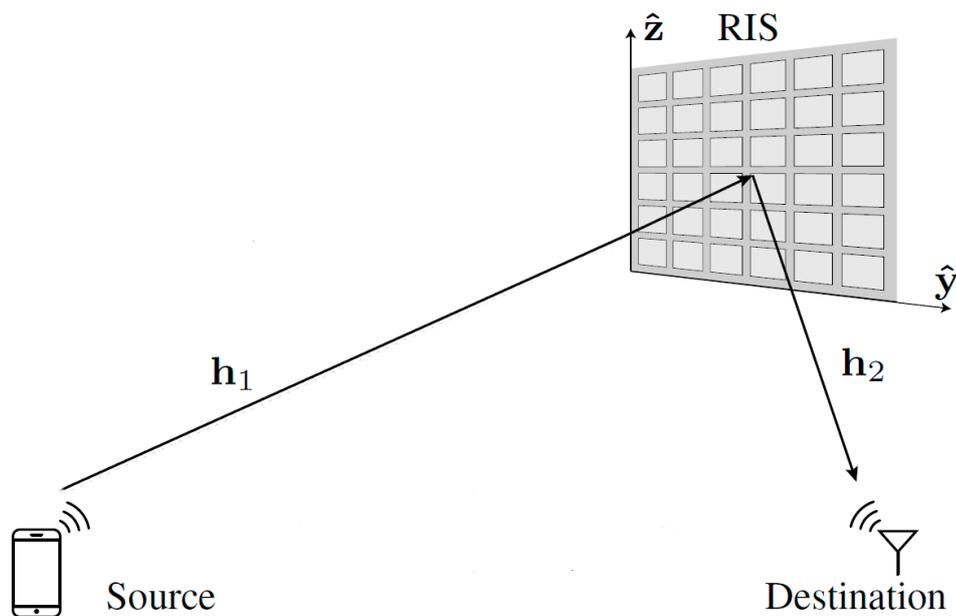


FIGURA 2: SISTEMA DE COMUNICACIÓN ASISTIDO POR RIS [4]

La RIS cuenta con una gran variedad de aplicaciones prometedoras, por ejemplo, la RIS es particularmente útil para extender la cobertura en comunicaciones de ondas milimétricas (mmWave) y terahercios (THz), especialmente en escenarios susceptibles a bloqueos. Desplegar RIS en los bordes de celdas no sólo ayuda a mejorar la potencia de la señal deseada para los usuarios en el borde de las celdas, sino que también facilita la supresión de la interferencia co-canal de celdas vecinas hacia ellos. Además, en escenarios de transferencia simultánea de información y energía inalámbrica (SWIPT) para mejorar la eficiencia de la transferencia de energía, una gran apertura de la RIS puede compensar la pérdida de potencia a largas distancias a través de la formación de haces de reflexión hacia los dispositivos cercanos.

En entornos interiores, instalar RIS en techos, paredes, muebles e incluso detrás de cuadros/decoraciones mejora la cobertura y la capacidad para aplicaciones como banda ancha móvil mejorada (eMBB) y comunicación masiva de tipo máquina (mMTC) en fábricas inteligentes, estadios, centros comerciales y aeropuertos. Para escenarios de mMTC con actividad de dispositivos esporádica, las RISs pueden mejorar la precisión y eficiencia de detección de dispositivos al explotar trayectorias adicionales controlables. En entornos exteriores, las RISs recubiertas en fachadas de edificios, postes de luz, vallas publicitarias o incluso la superficie de vehículos de alta velocidad admiten diversas aplicaciones, como comunicación ultrafiabile de baja latencia (URLLC) para control remoto y transporte inteligente al compensar los efectos Doppler y la dispersión temporal. Por ejemplo, la fiabilidad de la comunicación puede mejorar significativamente al convertir canales inalámbricos típicamente aleatorios en canales más deterministas utilizando RIS, lo que ayuda a reducir las retransmisiones de paquetes y minimizar la latencia, algo crítico para aplicaciones de URLLC [3]. Por lo tanto, la RIS es una tecnología disruptiva para hacer que nuestro entorno actual sea inteligente, lo que puede beneficiar potencialmente a una amplia gama de industrias verticales en 5G/6G, como transporte, manufactura y ciudades inteligentes.

2.2 Estructura, diseño y aplicación

En la siguiente sección, se examinará en detalle la tecnología RIS, centrándose en su estructura, diseño y aplicación [3].

El diseño de sistemas/redes inalámbricas asistidos por RIS enfrenta desafíos nuevos y únicos que surgen desde el punto de vista de la comunicación, los cuales se detallan a continuación.

En primer lugar, las reflexiones pasivas de todos los elementos reflectores en cada RIS deben diseñarse adecuadamente para lograr un enfoque cooperativo de la señal y/o la cancelación de interferencias en su proximidad local. Al mismo tiempo, para servir a todos los usuarios en la red, independientemente de si hay alguna RIS asociada cerca de cada usuario, las reflexiones pasivas de la RIS también deben diseñarse conjuntamente con las transmisiones de las estaciones base (BS) o los usuarios, para optimizar sus comunicaciones de extremo a extremo a través de los canales inalámbricos reconfigurados por las RISs.

En segundo lugar, dado que la RIS generalmente no posee cadenas de radiofrecuencia (RF), una tarea extremadamente complicada en aplicaciones prácticas es cómo adquirir la información del estado del canal (CSI) entre la RIS y las BS o los usuarios que sirven, lo cual es esencial para la optimización de las reflexiones de la RIS mencionada anteriormente. Este desafío es especialmente significativo considerando que la RIS suele tener un gran número de elementos reflectores y, por lo tanto, coeficientes de canal asociados que deben ser estimados.

En tercer lugar, se espera que la estrategia óptima de implementación de RIS en una red inalámbrica para maximizar la capacidad de la red sea significativamente diferente de la de las redes inalámbricas convencionales con solo estaciones base/puntos de acceso (AP) y repetidores, debido a sus diferentes arquitecturas de matriz (pasiva) y mecanismos de funcionamiento (reflexiones), lo que implica la necesidad de una investigación exhaustiva.

La altamente controlable reflexión de una RIS puede lograrse prácticamente aprovechando la existencia de una metasuperficie digitalmente reconfigurable o programable [6]. Específicamente, una metasuperficie es una matriz plana compuesta por una gran cantidad de elementos reflectores (meta-átomos) debidamente diseñados, cuyo tamaño eléctrico suele estar en el orden de la mitad de la longitud de onda de la señal de interés. Al diseñar la forma geométrica, tamaño/dimensión, orientación, disposición, etc., de los elementos de la RIS, se puede lograr la respuesta deseada de la señal reflejada (por ejemplo, amplitud de la reflexión y/o cambio de fase) por cada elemento/átomo. Sin embargo, en las comunicaciones inalámbricas, el canal generalmente varía con el tiempo debido a la movilidad del transmisor/receptor y los objetos circundantes, lo que hace recomendable una respuesta sintonizable en tiempo real de la RIS basada en la variación del canal. Con este fin, los elementos de la RIS pueden fabricarse con coeficientes de reflexión ajustables dinámicamente y la RIS puede conectarse a la red inalámbrica para aprender el entorno de comunicación exterior y permitir su reflexión adaptativa en tiempo real.

Para reconfigurar los elementos de una RIS para una reflexión altamente controlable, se proponen tres enfoques principales en la literatura:

- Actuación mecánica (por ejemplo, rotación y traslación mecánicas).
- Materiales funcionales (por ejemplo, cristal líquido y grafeno).

- Dispositivos electrónicos (por ejemplo, diodos positivo-intrínseco-negativo (PIN), transistores de efecto de campo (FET) o interruptores de sistemas microelectromecánicos (MEMS)) [7].

En particular, el tercer enfoque ha sido ampliamente adoptado en implementaciones prácticas debido a su tiempo de respuesta rápido, baja pérdida de reflexión, así como a un consumo de energía y costes de hardware relativamente bajos.

Al aplicar distintos voltajes de polarización al diodo PIN mediante una línea de alimentación de corriente continua (CC), el diodo PIN puede conmutarse entre los estados "ENCENDIDO" o "APAGADO", lo que permite que el elemento genere una diferencia de cambio de fase de δ en la señal incidente. De acuerdo con [8], la frecuencia de conmutación del diodo PIN puede llegar hasta 5 MHz, lo que se traduce en un tiempo de conmutación de 0.2 μ s. Esto es considerablemente menor que el tiempo típico de coherencia del canal, que está en el orden de milisegundos, por lo que resulta adecuado para aplicaciones móviles con canales que varían en el tiempo.

Además de ajustar el cambio de fase, un control adicional de la amplitud de reflexión de cada elemento de la RIS brinda mayor flexibilidad para remodelar la señal reflejada y lograr diversos objetivos de comunicación de manera efectiva. Esto también ofrece una forma flexible de equilibrar los costes de hardware y el rendimiento de reflexión en la práctica, ya que el control de amplitud generalmente es menos costoso de implementar en comparación con el control de fase. Existen varias formas de lograr el ajuste de amplitud de la RIS. Un método común es ajustar la resistencia/impedancia de carga en cada elemento [9]. Por ejemplo, al cambiar la resistencia de cada elemento, una cierta cantidad de la energía de la señal incidente se disipa como calor, logrando así un rango dinámico de la amplitud de reflexión en el margen [0, 1].

En la práctica, con el objetivo de reducir aún más tanto los costes de hardware como la complejidad del diseño, es común implementar únicamente el control discreto del cambio de fase o el control discreto de la amplitud. Esto nos lleva a dos casos especiales derivados de los modelos discretos mencionados anteriormente:

- RIS con control discreto únicamente del cambio de fase: en este escenario, cada elemento reflector permite ajustar exclusivamente el cambio de fase, manteniendo la amplitud de reflexión fija en su valor máximo (uno).
- RIS con control discreto únicamente de la amplitud: en este caso, cada elemento reflector posibilita ajustar solo la amplitud de reflexión, mientras que el cambio de fase se mantiene constante, por ejemplo, en cero sin pérdida de generalidad.

Capítulo 3

Modelado Matemático

3.1 Modelado del sistema extremo a extremo

Para realizar el modelado de la RIS se tienen en cuenta los cálculos generales utilizados para un sistema con canal de comunicación inalámbrica. En la siguiente sección, se examinará en detalle el modelado del sistema de extremo a extremo utilizando RIS [5].

En los sistemas inalámbricos actuales, el canal de propagación es impredecible. Al introducir un RIS con N elementos en el sistema, se añaden N vías controlables al canal de extremo a extremo. Se tiene la capacidad de ajustar la amplitud y la fase de cada elemento para mejorar la calidad de la señal en el receptor.

La Figura 3 muestra el canal de propagación sin control que puede examinarse mediante métodos clásicos de procesamiento de señales. Sin embargo, en la Figura 4 podemos observar un canal de propagación controlable que presenta propiedades inusuales que exploraremos al establecer la conexión entre las representaciones en tiempo continuo de los canales y el hardware, junto con los modelos en tiempo discreto necesarios para el procesamiento digital de señales.

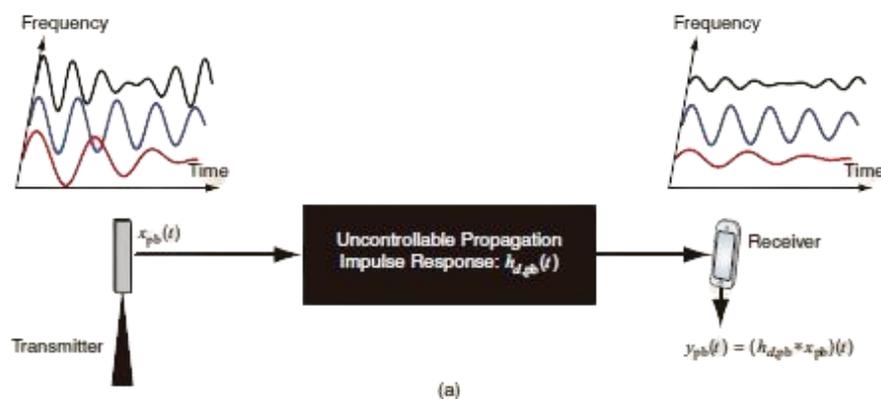


FIGURA 3: SISTEMA INALÁMBRICO CONVENCIONAL CON PROPAGACIÓN DEL CANAL INCONTROLABLE [5]

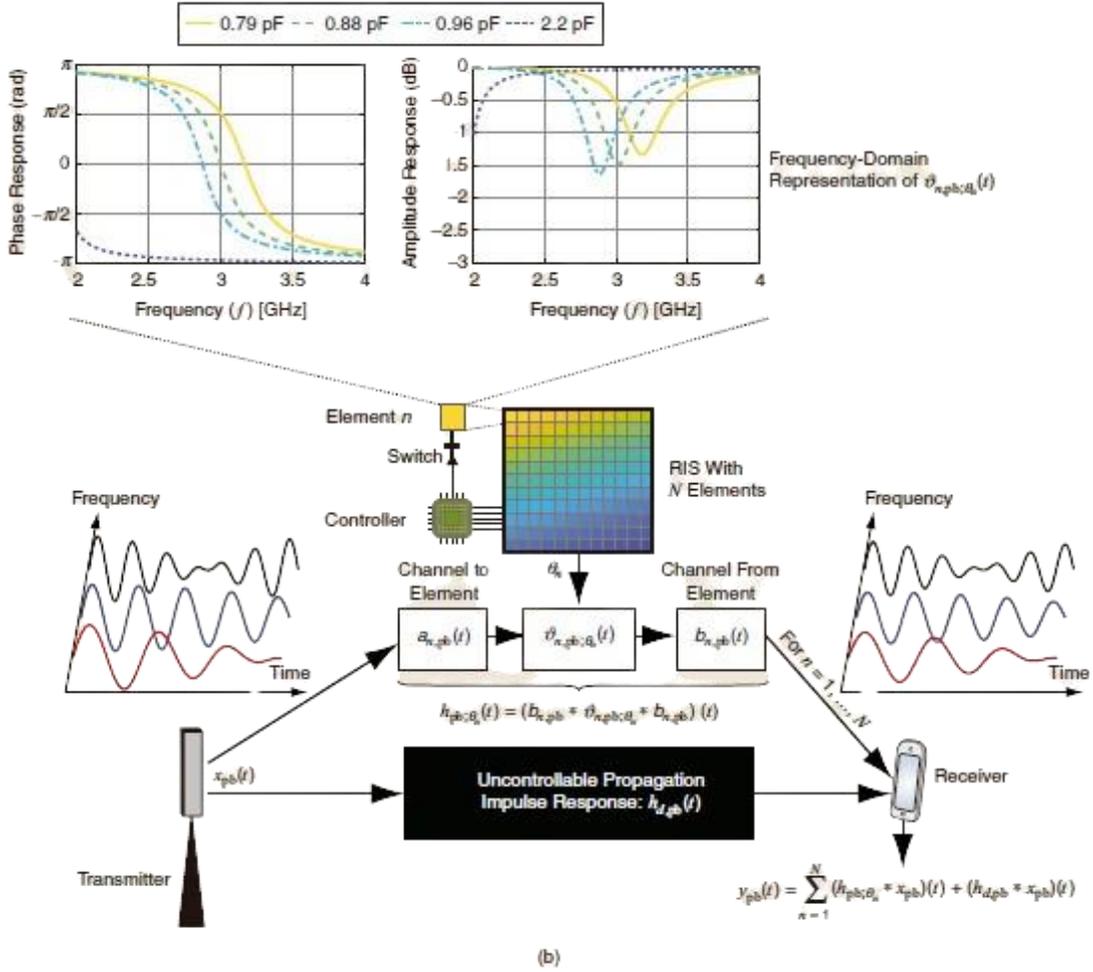


FIGURA 4: SISTEMA DE COMUNICACIÓN ASISTIDO POR RIS CON RUTA DE PROPAGACIÓN CONTROLABLE [5]

Para el análisis del sistema de comunicación, por sencillez, se plantea un transmisor de antena única que envía una señal inalámbrica en banda base $x_{pb}(t)$, con la variable temporal $t \in \mathbb{R}$, hacia un receptor, a través de un RIS que consta de N elementos dispersores. Comenzamos considerando todo el sistema como incontrolable; más precisamente, se modela como lineal e invariante en el tiempo (LTI) con una respuesta al impulso de valores reales $h_{pb}(t)$. Se sigue de la teoría estándar de procesamiento de señales que la señal de salida $y_{pb}(t)$ es la convolución entre la entrada y la respuesta al impulso:

$$y_{pb}(t) = (h_{pb} * x_{pb})(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{pb}(u) x_{pb}(t - u) du \quad (1)$$

La característica distintiva de una RIS reconfigurable es que sus propiedades pueden cambiar con el tiempo. Por lo tanto, este modelo LTI puede utilizarse únicamente durante la duración de una configuración con una respuesta al impulso fija $h_{pb}(t)$. Podemos distinguir entre dos regímenes de RIS: 1) constante por partes, en el cual $h_{pb}(t)$ no cambia mientras la señal de interés es distinta de cero y 2) continuamente variable, para el cual el modelo LTI en (1) no es válido.

Supongamos que la señal transmitida se genera a partir de una señal en banda base $x(t)$ con valores complejos y ancho de banda $B/2$, que se modula a la frecuencia portadora f_c ,

cumpliendo con $B \leq 2f_c$ y típicamente $B \ll f_c$. La señal de banda ancha transmitida tendrá un ancho de banda B y puede expresarse como:

$$x_{pb}(t) = \text{Re}(\sqrt{2}x(t)e^{j2\pi f_c t}) = \frac{x(t)e^{j2\pi f_c t} + x'(t)e^{-j2\pi f_c t}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

donde $\text{Re}(\cdot)$ produce la parte real de su argumento, y $\sqrt{2}$ mantiene constante la potencia. Si convertimos la notación en forma de transformada de Fourier continua, la relación dada en (2) es equivalente a:

$$X_{pb}(f) = \frac{X(f - f_c) + X'(-f - f_c)}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

donde $X_{pb}(f)$ es la transformada de Fourier de $x_{pb}(t)$ y $X(f)$ es la transformada de Fourier de $x(t)$, y son las representaciones en el dominio de frecuencia de la señal de paso banda y de la señal de banda base, respectivamente.

La respuesta en frecuencia es la transformada de Fourier de $h_{pb}(t)$ que describe cómo el sistema filtra las diferentes frecuencias de la señal, generalmente modificando la amplitud y el retardo de manera diferente. Cuando se analizan sistemas en banda base en comunicación y localización, resulta conveniente abstraer la frecuencia portadora y considerar únicamente la señal en banda base $x(t)$ que, por definición, tiene la misma potencia que $x_{pb}(t)$. Luego, necesitamos encontrar el equivalente en banda base de la relación entrada-salida. Muchos autores derivan tal relación para el caso especial de $h_{pb}(t)$ siendo un filtro de paso de banda limitado, pero no podemos hacer esa suposición ya que nuestro sistema describe un entorno de propagación inalámbrica que puede manejar señales de entrada con contenido de frecuencia arbitrario. Por lo tanto, presentaremos brevemente la llamada representación compleja en pseudo-banda base, donde la señal recibida $y(t)$ se define mediante $y(t) = \text{Re}(\sqrt{2}y(t)e^{j2\pi f_c t})$. Al tomar la transformada de Fourier de $y_{pb}(t)$ se obtiene:

$$Y_{pb}(f) = H_{pb}(f) \frac{X(f - f_c) + X'(-f - f_c)}{\sqrt{2}} = \frac{H_{pb}(f)X(f - f_c) + H'_{pb}(f)X'(-f - f_c)}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

donde $Y_{pb}(f) = \frac{Y(f - f_c) + Y'(-f - f_c)}{\sqrt{2}}$ es la transformada de Fourier de $y_{pb}(t)$ y donde la transformada de Fourier de $y(t)$ es $Y(f)$. La igualdad final utiliza la propiedad $H_{pb}(f) = H'_{pb}(-f)$ para sistemas de valores reales. A partir de la anterior ecuación, podemos identificar la transformada de Fourier de la señal de banda base recibida como:

$$Y(f - f_c) = H_{pb}(f)X(f - f_c) \rightarrow Y(f) = H_{pb}(f + f_c)X(f) \quad (5)$$

Y aplicando la transformada inversa de Fourier da como resultado:

$$y(t) = (h * x)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(u) x(t - u) du \quad (6)$$

donde la respuesta al impulso $h(t) = h(t)e^{j2\pi f_c t}$ representa la pseudo-banda base compleja del sistema. El adjetivo "pseudo" indica que el desplazamiento descendente $h(t)$ no es un filtro de banda base, de todas maneras, la señal de salida $y(t)$ es de banda base ya que ingresamos la señal de banda base $x(t)$. Los beneficios clave de la representación en pseudo-banda base son que podemos variar el ancho de banda B de $x_{pb}(t)$ sin cambiar la respuesta al impulso, y que $h(t)$ representa el verdadero sistema físico en lugar de una versión filtrada en banda base del mismo.

3.1.1 Modelado del canal RIS

La señal recibida se calculará siguiendo el modelo matemático de un canal de comunicación inalámbrica siendo:

$$y(t) = (h * x)(t) + w(t) \quad (7)$$

En el canal de propagación controlable, para cada uno de los N elementos dispersores de la RIS, la señal transmitida $x_{pb}(t)$ se propagará hacia ellos a través de un canal LTI representado por una respuesta de impulso arbitraria $a_{n,pb}(t)$ para el elemento $n = 1, \dots, N$. Dado que la señal transmitida se propaga a través del elemento "n" a través de una cascada de tres filtros LTI, la respuesta de impulso conjunta es la convolución de sus respuestas de impulso: $(b_{n,pb} * a_{n,pb})(t)$. Cuando la señal alcanza el elemento "n" esta se filtra en su interior y luego se vuelve a irradiar. Todo esto ocurre en el dominio analógico, y consideramos una operación pasiva que puede describirse mediante un filtro lineal e invariante en el tiempo (LTI). La característica especial de la RIS es que la respuesta al impulso $\vartheta_{n,pb;\theta_n}(t)$ es reconfigurable en el sentido de que está determinada por un estímulo externo representado por la variable γ_n . Dependiendo de la implementación de la RIS, esta variable de control puede tomar valores en conjuntos discretos y continuos. Este proceso ocurre para todos los N elementos; por lo tanto, obtenemos la relación de entrada-salida. Si su respuesta en frecuencia tiene una amplitud constante y una fase lineal a lo largo de la banda de paso utilizada por la señal, lo denominamos canal de banda estrecha. En caso contrario, lo llamamos canal de banda ancha [5].

Teniendo en cuenta esto, la respuesta de impulso del sistema extremo a extremo, que cuenta con los componentes que se muestran en la Figura 5 en función de las respuestas de impulso de los tramos recorridos (hacia el elemento, causado por el elemento y hacia el receptor), es:

$$h_{pb}(t) = \sum_{n=1}^N (b_{n,pb}(t) * \theta_{n,pb} * a_{n,pb}(t))(t) \quad (8)$$

Sistema de extremo a extremo con respuesta de impulso

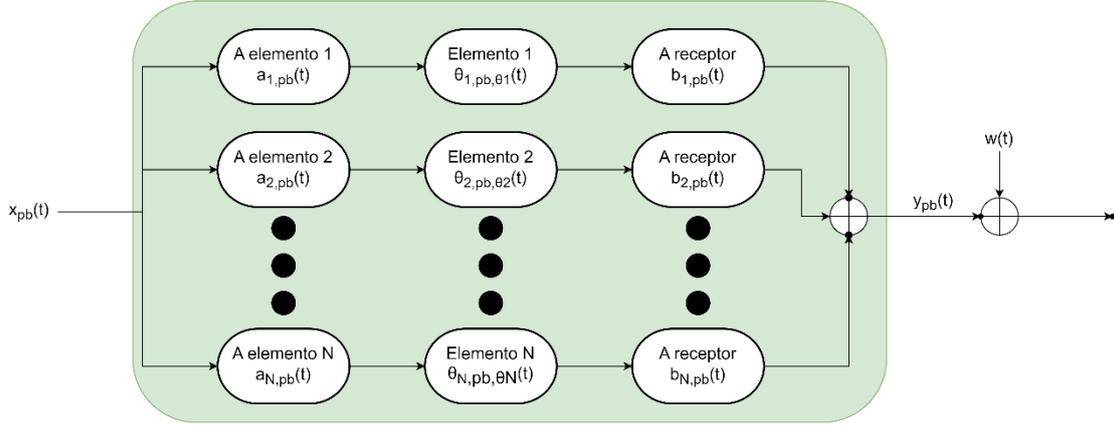


FIGURA 5: SISTEMA DE EXTREMO A EXTREMO CON RESPUESTA DE IMPULSO

Para cada elemento “n” de la RIS, se tienen en cuenta las respuestas al impulso de cada tramo recorrido, las cuales se calculan de la siguiente manera:

$$a_{n,pb}(t) = \sqrt{\alpha_n} \delta(t - \tau_{n,a}) \rightarrow a_n(t) = \sqrt{\alpha_n} e^{-i2\pi f_c t} \delta(t - \tau_{n,a}) \quad (9)$$

$$\theta_{n,pb;\theta_n}(t) = \sqrt{\gamma_n} \delta(t - \tau_{\theta_n}) \rightarrow \theta_{n;\theta_n}(t) = \sqrt{\gamma_n} e^{-i2\pi f_c t} \delta(t - \tau_{\theta_n}) \quad (10)$$

$$b_{n,pb}(t) = \sqrt{\beta_n} \delta(t - \tau_{n,b}) \rightarrow b_n(t) = \sqrt{\beta_n} e^{-i2\pi f_c t} \delta(t - \tau_{n,b}) \quad (11)$$

En este contexto, la ganancia del canal se modela de la siguiente manera, donde A_{eff} representa el área efectiva de un elemento de una RIS, N es el número de elementos de la RIS, d_{txRIS} es la distancia del transmisor a la RIS, y d_{RISrx} es la distancia de la RIS al receptor:

$$\sqrt{\alpha_n} = \frac{A_{eff}}{4\pi d_{txRIS}} \quad (12)$$

$$\sqrt{\gamma_n} = N \quad (13)$$

$$\sqrt{\beta_n} = \frac{A_{eff}}{4\pi d_{RISrx}} \quad (14)$$

La señal recibida viene dada por el sumatorio de diferentes convoluciones de la señal transmitida:

$$y_{pb}(t) = \sum_{n=1}^N (h_{pb;\theta_n} * x_{pb})(t) \quad (15)$$

Simplificando el modelado de pérdidas de cada elemento, aproximando el valor de pérdidas para cada camino presente en el trayecto en dirección al usuario, se obtiene así una señal recibida que dependerá de las pérdidas del conjunto de elementos de la RIS (γ), pérdidas de propagación del camino en dirección a la RIS (α) y el camino del haz reflejado (β):

$$y = \left(\sum_{n=1}^N \sqrt{\alpha * \gamma * \beta} * e^{-i2\pi f_c (\tau_{n,a} + \tau_{\theta_n} + \tau_{n,b})} \right) * s + n \quad (16)$$

siendo s la señal y n el ruido del sistema.

Una vez tenemos el modelado del sistema con la RIS, hay que tener en cuenta dos situaciones posibles donde la RIS puede trabajar:

- Uso en campo cercano (*Near Field*):

En el contexto de la RIS, el campo cercano se refiere a la región cercana a la RIS, generalmente dentro de una distancia relativamente corta, que se define como $R = 2 \left(\frac{D^2}{\lambda} \right)$, donde D es el diámetro de la RIS y λ es la longitud de onda. En esta región, las ondas electromagnéticas aún no han alcanzado un estado estacionario.

En el campo cercano, la RIS se utiliza principalmente para enfocar y redirigir la señal en áreas próximas a la superficie de la RIS. Esto puede implicar el ajuste de fases y amplitudes de los elementos de la RIS para crear haces de señal direccionales y específicos.

El uso de RIS en el campo cercano es relevante en aplicaciones como comunicación de corta distancia, carga inalámbrica, y sistemas de radar de proximidad.

- Uso en campo lejano (*Far Field*):

En el contexto de la RIS, el "far field" se refiere a la región a una distancia superior a $R = 2 \left(\frac{D^2}{\lambda} \right)$ donde las ondas electromagnéticas se han estabilizado y se comportan como ondas planas.

En el campo lejano, la RIS se utiliza para modificar y controlar la propagación de la señal en distancias mayores, lo que implica la alteración de la dirección y la intensidad de la señal en el espacio libre.

El uso de RIS en el campo lejano es relevante en aplicaciones de comunicación de larga distancia, mejora de la cobertura de señal, eliminación de zonas muertas, y aumento de la capacidad del canal.

En el escenario analizado en nuestro caso práctico, por su mayor simplicidad a la hora de modelar la RIS, se trabajará con la hipótesis de campo lejano. Para alguna de las posiciones de la RIS consideradas en este caso práctico, aunque la distancia que hay hasta los usuarios es menor que R (por lo que técnicamente no se cumpliría la condición de campo lejano), sí es una distancia lo suficientemente grande como para suponer que el funcionamiento en campo cercano no va a diferir mucho del modelo de campo lejano aplicado. En este caso, la onda plana entrante y saliente vendrá determinada por:

- Localización de elemento $n \rightarrow u_n$
- Ángulo de azimuth $\rightarrow \varphi \in [-\pi, \pi]$
- Ángulo de elevación $\rightarrow \theta \in [-\pi/2, \pi/2]$
- Vector de respuesta del array de elementos $\rightarrow a(\varphi, \theta)$
- Vector canal de una onda plana $\rightarrow constante * a(\varphi, \theta)$
- Vector de onda en coordenadas esféricas $\rightarrow k(\varphi, \theta)$

$$a(\varphi, \theta) = \begin{bmatrix} e^{jk(\varphi, \theta)^T u_1} \\ \vdots \\ e^{jk(\varphi, \theta)^T u_N} \end{bmatrix}, \quad k(\varphi, \theta) = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\varphi) \\ \cos(\theta) \sin(\varphi) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (17)$$

- Vector de canal para L ondas planas en coordenadas esféricas $\rightarrow h$

$$h = \sum_{l=1}^L \frac{c_l}{\sqrt{L}} a(\varphi, \theta) \quad (18)$$

Este trabajo llevará a cabo una validación del modelo propuesto mediante una comparativa entre la RIS seleccionada, cuyo modelado se presenta en la siguiente sección, y el modelo teórico ideal de procesamiento de señal. En este último caso, se asume una ganancia ideal de la RIS de N^2 . Esta asunción se basa en la suposición de que la ganancia óptima, en términos de la cantidad de elementos, sería cuadrática, ya que viene dada por el producto de la ganancia en transmisión y la ganancia en recepción, siendo de valor N cada una. Esta suposición se deriva de la capacidad teórica de cada elemento para controlar la amplitud y la fase de la señal reflejada de manera independiente. A medida que se incrementa el número de elementos N , la capacidad para manipular y optimizar la señal reflejada también crece exponencialmente, lo que lleva a una ganancia proporcional a N^2 . Este supuesto será confrontado con la implementación práctica y los resultados obtenidos a partir de la RIS elegida para el estudio.

3.1.1 Relación señal/ruido

La SNR o relación señal-ruido es la relación entre la información deseada o la potencia de una señal y la señal no deseada o la potencia del ruido de fondo:

$$SNR = \frac{P_{tx} |\sum_{n=1}^N \sqrt{Lb2 * \alpha * Lb3}|^2}{BN_0} \quad (19)$$

3.1.2 Capacidad

La capacidad de un canal en teoría de la información es una medida de la cantidad máxima de información que puede ser transmitida de manera confiable a través de ese canal en un período de tiempo dado. Se expresa en bits por segundo (bps) y depende de las características del canal y de las técnicas de codificación utilizadas.

La capacidad de un canal se calcula mediante la fórmula de Shannon-Hartley, viene dada por:

$$C = B * \log_2 \left(1 + \frac{(P_{tx} * \text{Beamforming Gain} * \text{Pathloss})}{(N_0 * B)} \right) \quad (20)$$

3.1.3 Eficiencia espectral

La eficiencia espectral es una métrica importante en sistemas de comunicación y se utiliza para evaluar cuánta información se puede transmitir o recibir en un ancho de banda específico. Se expresa típicamente en bits por segundo por hercio (bps/Hz) y es una medida de la eficiencia con la que se utiliza el espectro electromagnético para transmitir datos. La eficiencia espectral es crucial en la optimización de sistemas de comunicación para lograr una alta capacidad de datos y un uso eficiente del espectro disponible.

$$SE = \log_2(1 + SNR) \quad (21)$$

3.1.4 Modelado de sistema SISO

En este caso, la comunicación desde una fuente de antena única hacia un destino de antena única, el canal de desvanecimiento plano determinístico se denota por $h_{sd} \in \mathbb{C}$ y la señal recibida en el destino es [15]:

$$y(t) = h_{sd}\sqrt{p}s(t) + n(t) \quad (22)$$

donde p representa la potencia de transmisión, s es la señal de información de potencia unitaria, y $n \sim N_c(0, \sigma^2)$ es el ruido del receptor. Para mayor conveniencia, las ganancias de la antena se incluyen en los canales. La capacidad de este canal con una antena en transmisión y otra en recepción (SISO) es:

$$C_{SISO} = \log_2\left(1 + \frac{p|h_{sd}|^2}{\sigma^2}\right) \quad (23)$$

El canal determinista desde la fuente hasta la RIS se denota como $h_{sr} \in \mathbb{C}^N$, donde $[h_{sr}]_n$ denota el componente n -ésimo. El canal entre la RIS y el destino se denota como $h_{rd} \in \mathbb{C}^N$. Cada elemento tiene un tamaño menor que la longitud de onda, por lo que dispersa la señal entrante con una ganancia aproximadamente constante en todas las direcciones de interés [11]. Las propiedades de la RIS están, por lo tanto, completamente representadas por la matriz diagonal:

$$\Theta = \alpha \text{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N}) \quad (24)$$

donde $\alpha \in (0,1]$ es el coeficiente de reflexión de amplitud fija y $\theta_1, \dots, \theta_N$ son las variables de cambio de fase que pueden ser optimizadas por la RIS. Siguiendo el modelo del sistema derivado en [11] la señal recibida en el destino es:

$$y(t) = (h_{sr}^T \Theta h_{rd})\sqrt{p}s(t) + n(t) \quad (25)$$

Dado que los canales son deterministas, el destino los conoce perfectamente y las variables de cambio de fase pueden optimizarse.

La capacidad del canal en la red respaldada por la RIS es:

$$\begin{aligned} C_{RIS}(N) &= \max_{\theta_1, \dots, \theta_N} \log_2\left(1 + \frac{p|h_{sr}^T \Theta h_{rd}|^2}{\sigma^2}\right) = \\ &= \log_2\left(1 + \frac{p(\sum_{n=1}^N |h_{sr}^T]_n [h_{rd}]_n|^2)}{\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (26)$$

3.2 Modelado de la superficie inteligente reflectora

Para la realización de la simulación del caso práctico, se considera un panel de RIS implementado mediante un reflectarray [7] de dimensiones 40 cm × 40 cm, compuesto por 80 × 80 celdas desfasadoras dispuestas en una retícula rectangular de periodo 5 mm × 5 mm. El reflectarray (y, por lo tanto, la RIS), está diseñado para reflejar y desviar la señal de la estación base en el plano de azimut, aunque también podría introducir una cierta desviación en el plano de elevación, como en [16]. Además, el panel RIS debe proporcionar un haz conformado con un ancho entre puntos de potencia mitad (HPBW) de 10° en azimut y 5° en elevación, operando a 27 GHz en un ancho de banda variable durante la simulación, con el mismo funcionamiento tanto en

polarización lineal horizontal (H) como vertical (V). Por lo tanto, es vital conocer el modelado específico para estas superficies RIS que desarrollamos a continuación [11].

El objetivo de una RIS es lograr una reflexión total con el lóbulo principal de radiación apuntando en la dirección deseada, que denotamos como θ_r . Por lo tanto, la superficie debe diseñarse para redirigir la onda plana incidente ($E_i; H_i$) y obtener las siguientes distribuciones de campo ideales de la onda reflejada/dispersa:

$$E_r = E_r e^{-jk(\sin(\theta_r)y + (\cos(\theta_r)z)u_x} \quad (27)$$

$$H_r = \frac{E_r}{\eta} (\sin(\theta_r)u_z - \cos(\theta_r)u_y) e^{-jk(\sin(\theta_r)y + (\cos(\theta_r)z)} \quad (28)$$

suponiendo que la RIS está situada en el plano XY del sistema cartesiano, con el eje Z perpendicular a su superficie.

Un enfoque ampliamente utilizado en la literatura para diseñar RISs se basa en la ley de reflexión generalizada de Snell [12]. Utilizando este método, el perfil de fase superficial requerido para transformar la onda incidente ($E_i; H_i$), que llega con un ángulo θ_i , en la reflejada ($E_r; H_r$) se obtiene adaptando la impedancia superficial. En la superficie ($z = 0$), la superposición del campo eléctrico incidente y reflejado se puede escribir como [13]:

$$E_t = E_i e^{-jksin(\theta_i)y} u_x + E_r e^{-jksin(\theta_r)y} u_x \quad (29)$$

Entonces, la fase deseada del coeficiente de reflexión deseado es:

$$\varphi_r(y) = \angle\left(\frac{E_r e^{-jksin(\theta_r)y}}{E_i e^{-jksin(\theta_i)y}}\right) = -k(\sin(\theta_r)y - ksin(\theta_i)y) \quad (30)$$

Su diferenciación respecto a la componente y proporciona el gradiente del coeficiente de reflexión en la ley generalizada de Snell:

$$k(\sin(\theta_i) - \sin(\theta_r)) = \frac{d\varphi_r(y)}{dy} \quad (31)$$

Lo que proporciona la relación entre θ_i , θ_r y la fase superficial local $\varphi_r(y)$. Al modificar la impedancia superficial, obtenemos $\varphi_r(y)$. en cada punto de la superficie y se logra la fase deseada de la onda de salida:

$$-k(\sin(\theta_i)y + \varphi_r(y)) = -ksin(\theta_r)y \quad (32)$$

Debido a que cuenta con "n" elementos para reconfigurar las fases locales con alta resolución, no tiene un impacto negativo en la magnitud máxima del campo disperso y el ancho de haz no será más estrecho que en el caso ideal de una superficie metálica pasiva. La corriente se ajusta en la RIS ajustando la impedancia superficial en cada elemento para obtener un perfil de fase superficial que se aproxime al requerido por la ley de Snell generalizada. Esta operación resulta en una onda dispersa con amplitud máxima hacia θ_r en lugar de hacia la dirección especular de θ_i .

Cuando se utiliza una RIS para reflejar una señal en la dirección θ_r , el cuadrado de la magnitud del campo disperso en un ángulo de observación arbitrario $\theta_r \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ es:

$$S_{RIS} = (r, \theta_s, E_i^2) = \left(\frac{ab}{\lambda}\right) \frac{E_i^2 \cos^2(\theta_i)}{r^2} \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda}(\sin(\theta_s) - \sin(\theta_r))\right)}{\frac{\pi b}{\lambda}(\sin(\theta_s) - \sin(\theta_r))}\right)^2, \quad (33)$$

La atenuación de la ruta a una distancia de campo lejano r es:

$$\beta_{RIS} = (r, d_t, \theta_r) = \frac{P_r(P_t, d_t, r, \theta_s)}{P_t} = \frac{G_t G_r}{(4\pi)^2} \left(\frac{ab}{d_t r}\right)^2 \cos^2(\theta_i) \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda}(\sin(\theta_s) - \sin(\theta_r))\right)}{\frac{\pi b}{\lambda}(\sin(\theta_s) - \sin(\theta_r))}\right)^2, \quad (34)$$

y en el caso ideal cuando el receptor tiene $\theta_s = \theta_r$, la expresión de las pérdidas de propagación se simplifica a:

$$\beta_{RIS} = (r, d_t, \theta_r) = \frac{G_t G_r}{(4\pi)^2} \left(\frac{ab}{d_t r}\right)^2 \cos^2(\theta_i). \quad (35)$$

3.2.1 Cálculo en forma cerrada del cambio de fase en la RIS

La RIS debería introducir una distribución de desplazamiento de fase para desviar el haz en una dirección específica y darle forma en azimut y elevación. Para generar un haz colimado (o haz pincel) en la dirección de coordenadas esféricas (θ_r, φ_r) correspondiente al centro del área de cobertura, la distribución de desplazamiento de fase requerida en la RIS, como se conoce por la teoría de las antenas reflectarray [14], se puede expresar como sigue:

$$\Phi_{cb}(x_l, y_l) = k_0(d_l - (x_l \cos\varphi_r + y_l \sin\varphi_r) \sin\theta_r) \quad (36)$$

donde d_l es la distancia desde la estación base hasta el l -ésimo elemento de la RIS y k_0 es el número de onda. La distribución de cambio de fase dada por la anterior ecuación generará el haz con la mayor ganancia para el tamaño de RIS definido.

Es importante destacar que una ganancia alta es deseable para aumentar el nivel de la señal, pero esto reduce el rango angular de cobertura (el lóbulo principal de radiación será más estrecho). Para ensanchar el haz, una técnica sencilla a la vez que eficiente [14] consiste en agregar un término cuadrático de fase para controlar de forma independiente el ancho de haz en azimut y elevación, de la siguiente manera:

$$\Phi_{bb}(x_l, y_l) = \Phi_{cb}(x_l, y_l) + A_x(x_l) + A_y(y_l) \quad (37)$$

donde el segundo y tercer término son:

$$A_x(x_l) = k_0 \left(\alpha_x \left(\left(\frac{L_x}{2} \right)^2 - x_l^2 \right) \right) \quad (38)$$

$$A_y(y_l) = k_0 \left(\alpha_y \left(\left(\frac{L_y}{2} \right)^2 - y_l^2 \right) \right) \quad (39)$$

para controlar el grado de ampliación del haz en los planos x e y , respectivamente. Es importante notar que cuando $\alpha_x = 0$ y $\alpha_y = 0$, la fase en el término cuadrático de fase corresponde a la de un haz colimado. También se destaca que la corrección de fase es cero en el centro de la RIS y aumenta hacia los bordes del panel.

Capítulo 4

Descripción del escenario de trabajo

4.1 Planteamiento

Durante la realización de este TFG, hemos analizado el funcionamiento de una superficie inteligente reflectora mediante la aplicación de la misma en un escenario que cuenta con una serie de componentes:

- Antena transmisora de la estación base.
- Superficie inteligente reflectora (RIS).
- Usuarios del servicio multicast.

Nuestro escenario de investigación se fundamenta en estudios previos que han explorado aplicaciones similares en entornos de telecomunicaciones. Los estudios presentados en [16] y [17] han investigado, desde el punto de vista electromagnético, el diseño y utilización de estructuras tipo RIS basadas en antenas reflectarray, en entornos interiores y exteriores. Sin embargo, en dichos trabajos previos [16]-[17] no se realiza un análisis de prestaciones del sistema de comunicaciones con la RIS.

El primer estudio [16] se enfoca en el uso de paneles reflectores pasivos funcionando como RIS para mejorar la cobertura de ondas milimétricas en entornos interiores 5G. Se diseñó un panel RIS de 40 cm x 40 cm para operar en la banda de 28 GHz de 5G, el cual genera un haz ampliamente ensanchado en el plano azimutal. Mediante simulaciones electromagnéticas, se evaluó el rendimiento del panel RIS mostrando ganancia estable, niveles de lóbulos laterales reducidos y una muy baja polarización cruzada. Se destaca la posibilidad de instalar este panel RIS para mejorar la cobertura en oficinas o salas de conferencias, ya que su perfil plano ofrece un impacto visual mínimo.

Por otro lado, se diseñó un reflectarray pasivo para mejorar la cobertura en un escenario convencional de red 5G al aire libre [17]. Este reflectarray se desarrolló para concentrar la potencia recibida de la estación base en un área específica, con el objetivo de mejorar el acceso inalámbrico para los usuarios ubicados en esa zona. Se diseñó un reflectarray de haz conformado a 27.7 GHz, capaz de generar un haz ensanchado y desviado tanto en azimut como en elevación, en polarización lineal dual. A pesar de los amplios ángulos de incidencia desde la estación base (aproximadamente 50°), la RIS mostró un comportamiento robusto dentro del rango de frecuencias de funcionamiento: 27.2-28.2 GHz.

Basándonos en estos enfoques previos y ampliando su alcance, hemos diseñado un escenario de simulación del uso de RIS, específicamente implementada mediante una superficie reflectarray, cuyo objetivo es dar cobertura de un servicio multicast. Esta cobertura abarca a una zona con línea de visión directa (LOS) desde la estación base y a una zona de cobertura sin línea de visión directa (NLOS) por bloqueo de un obstáculo mediante el uso de la RIS consiguiendo evadir el obstáculo tal como se representa en la Figura 6. Para lograrlo, decidimos realizar un estudio de eficiencia de nuestro escenario alternando la posición de la RIS en

diferentes posiciones alejada de la estación base: posición cercana a la BS con un obstáculo de menor tamaño, posición cercana con obstáculo de mayor tamaño, posición intermedia y posición alejada. También analizamos un escenario con un obstáculo de menor tamaño para poder apreciar el rendimiento de la RIS muy acercada a la estación base.

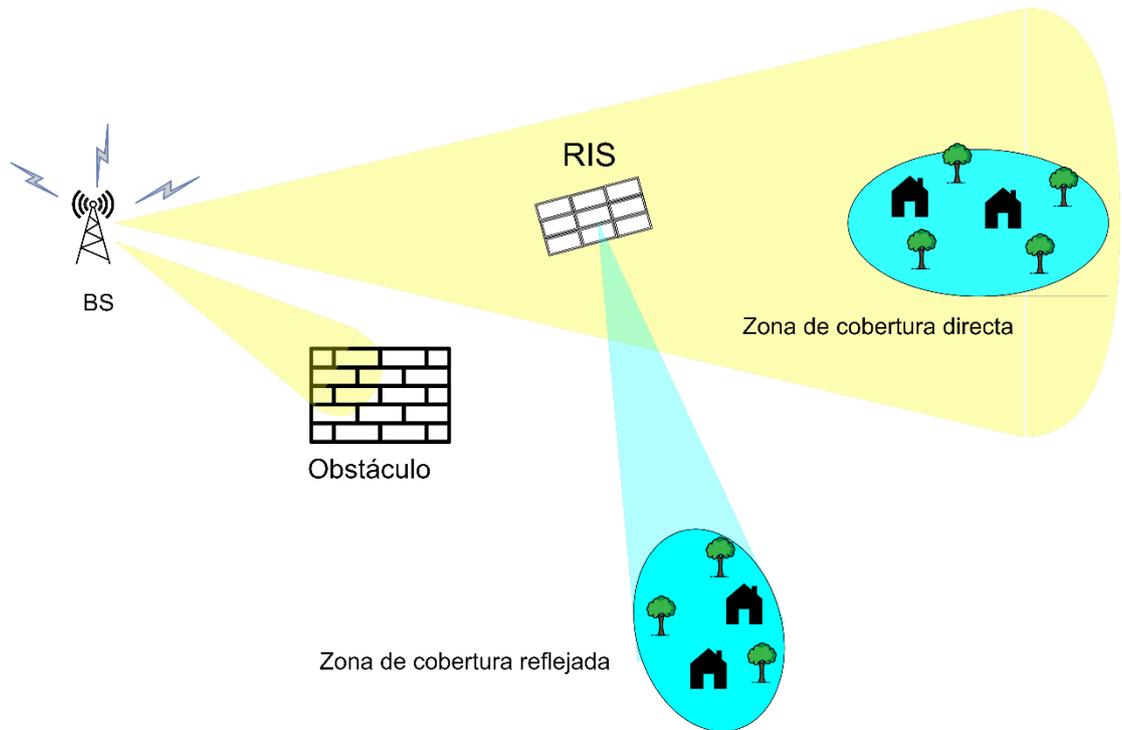


FIGURA 6: DIBUJO DEL PLANTEAMIENTO INICIAL DEL ESCENARIO

Por último, aclarar que para todos estos casos realizaremos el estudio del comportamiento de la RIS en campo lejano, ya que a pesar de que en algunos escenarios se cumple que las distancias entre la RIS y los usuarios, o entre la estación base y la RIS, son menores que la distancia que se considera como el comienzo del funcionamiento en campo lejano ($L_{campolejano} = \frac{2D^2}{\lambda}$), siendo D el diámetro de la RIS, son distancias lo suficientemente grandes eléctricamente como para suponer que el funcionamiento en campo cercano no va a diferir mucho del modelo de campo lejano aplicado (que tiene la ventaja de una mayor simplicidad en el análisis). Por tanto, durante la simulación hemos utilizado una aproximación particular de campo lejano para simular el haz reflejado por la RIS, sin tener en cuenta las pequeñas variaciones que podría haber debidas a la situación de campo cercano.

4.2 Escenarios propuestos

A continuación, se describen los escenarios planteados para la simulación, los cuales serán influenciados por la ubicación de la RIS y la presencia de obstáculos que impactarán en la línea de visión entre la estación base y las áreas de cobertura, tanto las reflejadas como las directas.

4.2.1 RIS muy próxima a la BS

El primer escenario consiste en colocar la RIS en una posición muy cercana a la BS presuponiendo que hay un obstáculo de tamaño reducido muy próximo a la BS que interfiere en la visión del haz reflejado por la RIS. En la Figura 7 se muestran las zonas de cobertura tanto directa como reflejada para este escenario con sus respectivas medidas.

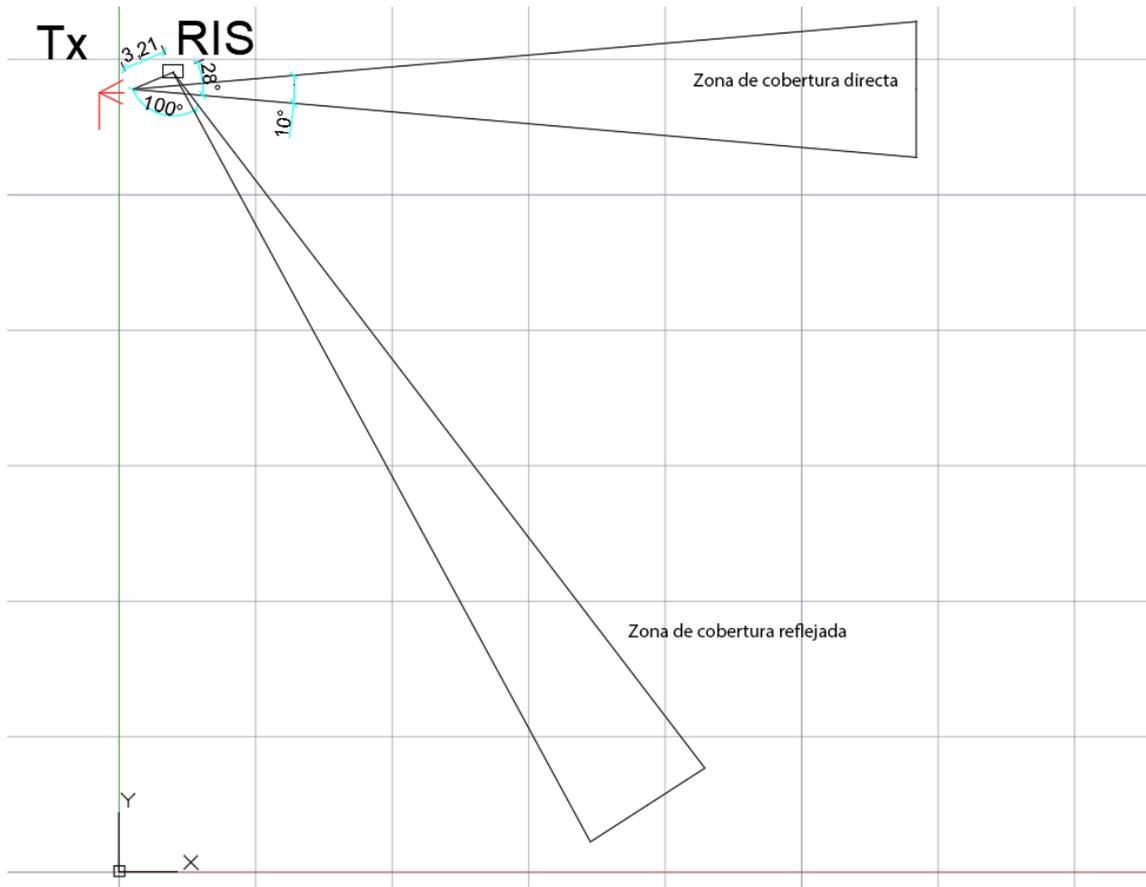


FIGURA 7: REPRESENTACIÓN DEL ESCENARIO 1 EN AUTOCAD

4.2.2 RIS intermedia entre BS y zona de cobertura directa

A partir del primer escenario, consideramos un obstáculo en el trayecto hasta la región reflejada de usuarios, que impide que la RIS esté muy cerca de la estación base. En este escenario, por tanto, se coloca la RIS en una posición intermedia entre la BS y el primer grupo de usuarios. En la Figura 8 se muestran las zonas de cobertura tanto directa como reflejada para este escenario con sus respectivas medidas.

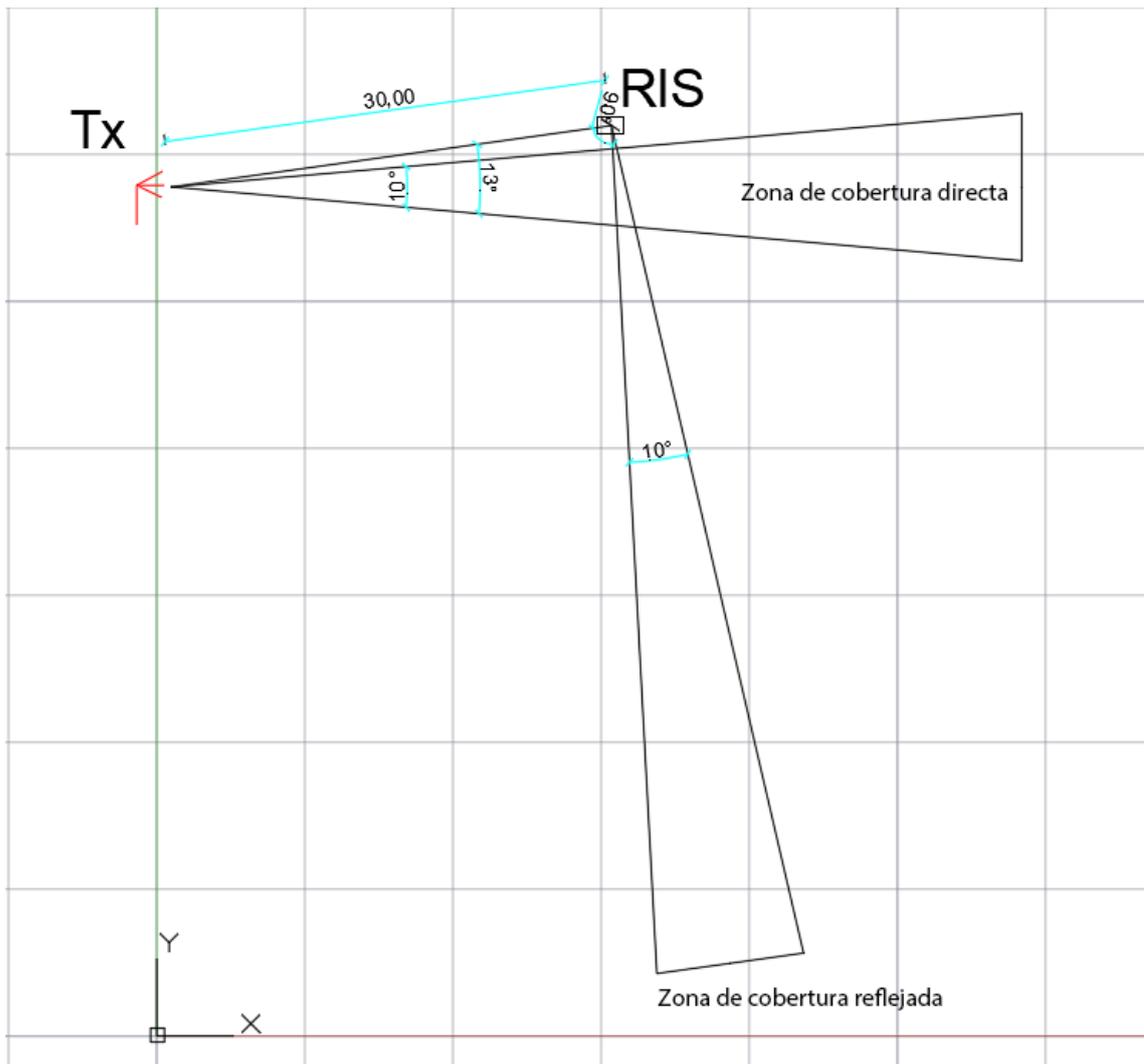


FIGURA 8: REPRESENTACIÓN ESCENARIO 2 EN AUTOCAD

4.2.3 RIS próxima a la zona de cobertura directa

El tercer escenario consiste en colocar la RIS en una posición muy alejada de la BS, evaluando la eficiencia de la RIS cuando es alejada de la BS. En la Figura 9 se muestran las zonas de cobertura tanto directa como reflejada para este escenario con sus respectivas medidas.

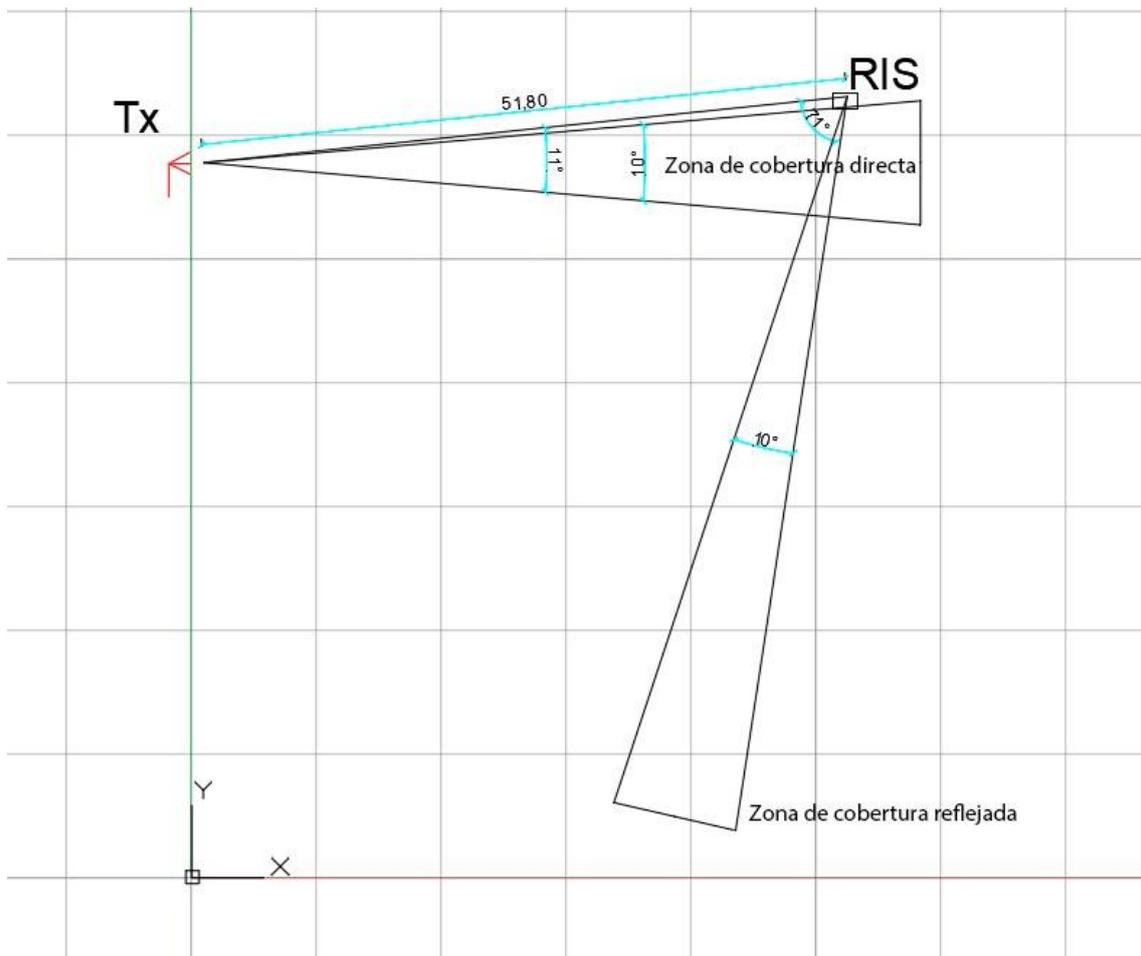


FIGURA 9: REPRESENTACIÓN ESCENARIO 3 EN AUTOCAD

4.2.4 RIS próxima a la BS

El cuarto escenario consiste en colocar la RIS en una posición cercana de la BS, en este caso, a una distancia más alejada que en el primer escenario, para cumplir el requisito de evadir el obstáculo que se encuentra entre la BS y la segunda región de usuarios. En la Figura 10 se muestran las zonas de cobertura tanto directa como reflejada para este escenario con sus respectivas medidas.

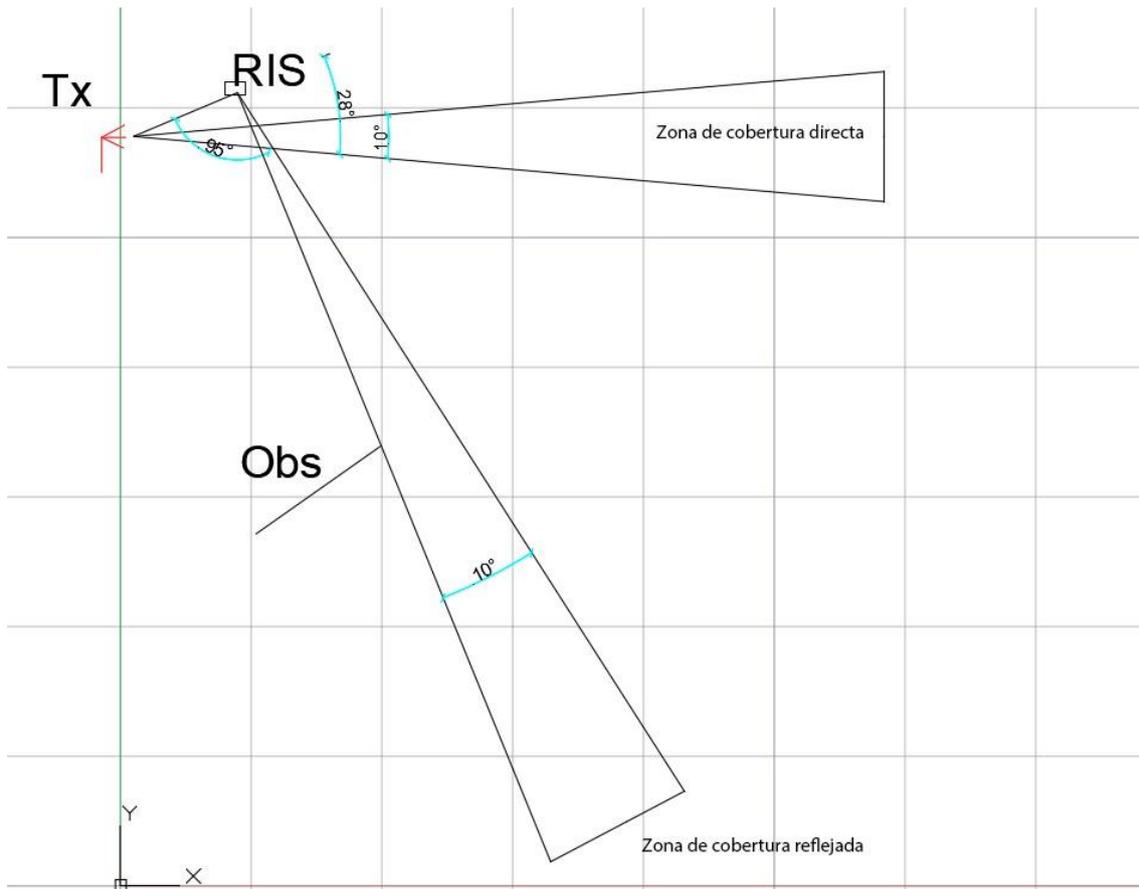


FIGURA 10: REPRESENTACIÓN ESCENARIO 4 EN AUTOCAD

4.3 Servicio multicast propuesto

En este apartado, se ofrece una breve contextualización sobre los servicios multicast para proporcionar al lector una comprensión inicial de su relevancia y subrayar su importancia en la actualidad. Posteriormente, se razonará el uso de estas aplicaciones en escenarios de RIS implementada, seguido de una descripción de un servicio particular, acompañado de sus respectivas especificaciones.

4.3.1 Contexto

Los servicios multicast han estado asociados tradicionalmente con comunicaciones omnidireccionales en bandas de frecuencia sub-6 GHz [18]. En los últimos años, los servicios multicast han cobrado impulso en comunicaciones altamente direccionales de ondas milimétricas (mmWave) y terahercios (THz) con MIMO masivo (mMIMO) [19], lo que plantea nuevos desafíos relacionados con una alta pérdida de propagación, atenuación severa de la señal debido al bloqueo y cobertura reducida [20]. Los servicios multicast asistidos por RIS en mmWave puede reducir los efectos severos de bloqueo en la gestión eficiente de recursos y la correspondiente calidad de servicio (QoS) gracias a sus múltiples elementos de reflexión pasivos. Además, las RIS pueden mejorar la cobertura de red sin necesidad de desplegar numerosas BS de bajo consumo, lo que lleva a una reducción de costos [22].

Los servicios multicast abarcan una amplia gama de tecnologías y aplicaciones, desde transmisiones en vivo hasta distribución de contenido. En este panorama, la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR) han emergido como servicios innovadores. La VR sumerge a los usuarios en entornos completamente digitales, mientras que la AR superpone elementos digitales al mundo real. Con el progreso en la tecnología de visualización, sensores y procesamiento de datos, la VR y la AR han evolucionado hacia experiencias más inmersivas y realistas. Desde aplicaciones de juegos y entretenimiento hasta aplicaciones médicas, de diseño arquitectónico, educación, y entrenamiento profesional, estas tecnologías ofrecen un potencial considerable para transformar numerosos sectores.

La tasa de bits juega un papel fundamental en estas tecnologías, ya que afecta directamente la calidad de la experiencia ofrecida. El desarrollo de servicios específicos de VR y AR depende en gran medida de la capacidad de la red para admitir velocidades de datos suficientemente altas y latencias bajas para una experiencia fluida y realista.

4.3.2 Videos inmersivos de 360°

Los servicios de VR y AR han presenciado un auge significativo en la transmisión de Vídeos inmersivos de 360°. Estos vídeos han desempeñado un rol esencial en la evolución de las aplicaciones de VR/AR. Por ejemplo, entre 2014 y 2015, el tráfico de VR experimentó un notable aumento, multiplicándose por cuatro, alcanzando 17.9 PB al mes en 2015 desde 4.2 PB al mes en 2014 [21]. Las proyecciones indican un aumento de 61 veces en el tráfico global de VR entre 2015 y 2020. En 2016, se observó una mayor difusión de vídeos en 360°: más de 8000 nuevos videos en YouTube fueron vistos más de 250,000 veces diarias, mientras que se crearon más de 1000 nuevos videos para la plataforma Oculus. Eventos populares a nivel mundial, como juegos de la NBA y el torneo de golf US Open, se transmitieron en vivo utilizando la tecnología de vídeo en 360° [23].

Esta evolución de los vídeos de VR 360° se enfoca en la experiencia inmersiva del usuario, avanzando desde vistas individuales a vistas 3D/múltiples, y desde interacciones limitadas a interacciones completas. Esta transición plantea desafíos considerables para las redes, exigiendo una capacidad ultra alta y una latencia ultra baja [23]. En concurrence, estos servicios requieren capacidades exigentes para ofrecer una experiencia óptima a los usuarios. A continuación, en la Tabla 1, se detallan algunos de los requerimientos clave de red para servicios de VR:

	Resolución VR	Res. Equivalente TV	Tasa de bits	Latencia
Early stage VR	1K*1K@visual field 2D_30fps_8bit_4K	240P	25 Mbps	40 ms
Entry level VR	2K*2K@visual field 2D_30fps_8bit_8K	SD	100 Mbps	30 ms
Advanced VR	4K*4K@visual field 2D_60fps_10bit_12K	HD	400 Mbps	20 ms
Extreme VR	8K*8K@visual field 3D_120fps_12bit_24K	4K	1 Gbps (smooth play) 2.35 Gbps (interactive)	10 ms

TABLA 1: REQUISITOS DE LA RED DE VR (ANCHO DE BANDA Y LATENCIA) [22]

En nuestro escenario, evaluaremos la capacidad de proporcionar cada uno de estos servicios en relación con el ancho de banda disponible. Se determinará el servicio ofrecido de entre las opciones enumeradas en la Tabla 1 mediante el análisis de los datos derivados de los resultados de la simulación, con el objetivo de seleccionar el servicio más apropiado de acuerdo con los requisitos establecidos.

Capítulo 5

Simulación del sistema y análisis de resultados

5.1 Simulación

La simulación de los escenarios se ha llevado a cabo en Matlab, cuyo código se encuentra en el repositorio de github <https://github.com/jgutierrezr2019/RIS-Application>. Como referencia utilizamos el primer escenario, llevando a cabo la simulación mediante los siguientes pasos:

1. Especificación datos iniciales.

Se establecen los datos iniciales del escenario:

- Potencia transmitida por la estación base: 30 dBm.
- Ganancia del terminal de usuario: 1 dB.
- Velocidad de la luz: 3×10^8 m/s.
- Ancho de banda: Variable (rango de 25 MHz a 1 GHz).
- Frecuencia de trabajo: 27 GHz.
- Longitud de onda: Variable (se mide en m).
- Número de elementos de RIS: 6400.
- Área efectiva de un elemento de la RIS: 25 mm².
- Número de usuarios total del sistema: Variable.
- Densidad espectral de ruido: Variable (se mide en dBm/Hz).

2. Asignación de distancias y ángulos relevantes para la realización de cálculos.

Asignamos las distancias y ángulos para poder obtener las ganancias y pérdidas del sistema. Las distancias y ángulos dependen del escenario analizado y se clasifican del siguiente modo:

- Distancia BS a RIS: distancia en metros desde la estación base a la RIS, se utiliza para calcular las pérdidas de propagación para el caso del área de usuarios sin línea de visión directa.
- Ángulo de azimuth: es el ángulo de orientación sobre el plano horizontal que presentan la onda incidente en la RIS (asociada al haz radiado desde la estación base a la RIS) y la onda reflejada por la RIS. Se utiliza para obtener la ganancia de la RIS al redirigir el haz hacia la zona de cobertura reflejada.
- Ángulo de elevación: es el ángulo de orientación en el plano vertical que presentan las ondas incidente y reflejada por la RIS. En nuestro escenario, todos los componentes (BS, RIS, usuarios) mantienen la misma altura por lo que se mantendrá siempre con valor de 0°. Se utiliza para obtener la ganancia de la RIS al redirigir el haz hacia la zona de cobertura reflejada.
- HPBW: es el ancho total del haz radiado entre puntos situados a -3 dB del máximo, se fija en función de los requisitos del escenario (regiones de cobertura), tanto para la BS como para la RIS, y determina el valor de ganancia máxima de la estación base y la RIS. En nuestro caso, supondremos una RIS con

un haz ensanchado con HPBW de 10°, que permite cubrir la región de cobertura reflejada.

- Theta: es el ángulo de orientación horizontal que indica el apuntamiento del haz generado por la estación base. Se define para cubrir tanto la región directa de usuarios como la RIS, por lo que su valor se ajusta en función del escenario..

3. Balance de enlace

El balance de enlace de nuestro escenario se obtiene mediante el análisis de pérdidas y ganancias asociadas a los elementos del sistema que forman parte de la simulación.

Como datos iniciales contaremos con:

- $P_{BS} = 30 \text{ dBm}$ -> potencia transmitida estación base
- G_{BS} -> ganancia de estación base (variable)
- PL_{BS} -> pérdidas de propagación de la estación base a la RIS (variable)
- G_{RIS} -> ganancia de la RIS de entrada o salida del haz incidente (variable)
- SL_{RIS} -> pérdidas de escaneo de la RIS de entrada o salida del haz (variable)
- PL_{UE} -> pérdidas de propagación de RIS al usuario (variable)
- $G_{UE} = 1 \text{ dB}$ -> Ganancia de la antena del usuario
- $f = 27 \text{ GHz}$ -> frecuencia de trabajo

Para ello, seguimos un método de modelado de ganancia que entiende como ganancia de transmisión todo el esquema conformado tanto por la RIS como la estación base teniendo en cuenta la potencia de transmisión, las ganancias de cada componente del esquema y las pérdidas de propagación que dan lugar a una potencia recibida del usuario [10]:

$$P_{UE} = P_{BS} + G_{RIS} + PL_{UE} + G_{UE} \quad (40)$$

Las pérdidas de propagación vienen dadas por la ecuación del modelo de Friis [10]:

$$PL = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right) \quad (41)$$

A partir de la potencia recibida, calcularemos la SNR de cada usuario restando la potencia de ruido (P_N) en dB:

$$SNR = P_{UE} - P_N \quad (42)$$

El factor más importante de este modelo es la ganancia de la RIS, cuyo valor depende de varios parámetros como:

- Número de elementos: Con una elevada cantidad elementos la eficiencia de la RIS mejora, adquiriendo mayor factor de beamforming.
- Ángulo de incidencia y reflexión: El ángulo de incidencia del haz transmitido tiene influencia en el diseño de la RIS para poder desviarlo de tal manera que apunte a la dirección deseada. El diagrama de radiación de la RIS depende de estos ángulos. Además, cuando el ángulo de reflexión es distinto del normal (0°), se produce una pequeña pérdida de ganancia (pérdida por escaneo), debido a que el tamaño efectivo de la apertura de radiación de la RIS se reduce.
- Tamaño de la RIS: En un escenario es preferible una RIS de mayor tamaño para poder colocar más elementos, debido a veces a la necesidad de usar elementos de mayor tamaño para aumentar el área efectiva de cada elemento.

- Diagramas de radiación: constituyen una representación del haz o los haces radiados por la RIS y la estación base, que permiten caracterizar la ganancia, directividad y anchura del haz transmitido. El haz transmitido por la estación base incidirá en la RIS, y gracias a su capacidad reflectora se generará otro haz cuyo diagrama será objeto de estudio.

Antes de ver en detalle la ganancia de la estación base y la RIS, es importante entender cómo se modelan estos parámetros en nuestro escenario. Para la ganancia de la estación base, utilizamos un modelo de radiación que depende del ancho del haz principal (HPBW) de la antena, expresado como una función $\cos(\theta)^q$ donde 'q' es un parámetro que varía según el HPBW específico de la BS en cada escenario. La ganancia de la BS se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$G_{BS} = 10 \log_{10}(4\pi/HPBW^2) \quad (43)$$

donde HPBW se expresa en radianes.

Esta ganancia refleja la capacidad de la estación base para concentrar su energía en una dirección específica, lo que influye directamente en la calidad de la señal transmitida y recibida.

En cuanto a la ganancia de la RIS, empleamos dos enfoques: uno teórico basado en el modelo de procesamiento de señales y otro mediante análisis electromagnético del conjunto $RIS + BS$. En el primer caso, la ganancia se calcula utilizando la fórmula del logaritmo del cuadrado del número de elementos de la RIS (N^2). Para el segundo enfoque, diseñamos una RIS pasiva específica para cada escenario, considerando ángulos de incidencia y reflexión según las condiciones del entorno. Luego, simulamos esta configuración para obtener su diagrama de radiación en azimuth. Es importante destacar en este segundo método que la ganancia de la RIS ya incluye la ganancia de la BS, las pérdidas de propagación hasta la RIS, la ganancia de la RIS en sí misma y posiblemente otras pérdidas adicionales, lo que modifica la forma en que se calcula la ganancia total del sistema.

El balance de enlace en el caso del grupo directo de usuarios, se analiza y simula como un radioenlace, cuya ganancia vendrá dada por el HPBW de la estación base y pérdidas de propagación siguiendo el modelo de Friis:

$$P_{UE} = P_{BS} + G_{BS} + PL_{UE} + G_{UE} \quad (44)$$

A partir de la potencia recibida, calcularemos la SNR según (42).

4. Cálculo de zonas de cobertura

En nuestro escenario se ofrece un servicio que requiere de una tasa de bits. A partir de ella, se calcula la distancia máxima para que este servicio pueda ser difundido en condiciones adecuadas. Dicha distancia varía en función de la SNR calculada a partir del teorema de Shannon mencionado en (20).

Para ello, se calculan las pérdidas de propagación (PL) despejándolas de la ecuación del balance de enlace y SNR, de (40) y (42) respectivamente, con el valor de ganancia de la estación base para el primer área de cobertura y valor de ganancia de haz reflejado para el segundo área, para el ángulo con peor ganancia en sus respectivos diagramas de radiación:

$$PL_{UE} = SNR + P_N - (P_{BS} + G_{BS} + G_{RIS} + G_{UE}) \quad (45)$$

Una vez calculado $PLUE$, podemos obtener la distancia máxima como:

$$D = \frac{\lambda}{10^{(PLUE/20)4\pi}} \quad (46)$$

Mediante trigonometría se calcula la altura, base y área del triángulo que conformarán nuestras zonas de cobertura a partir del ángulo utilizado y la distancia obtenida.

Por último, se calcula la eficiencia espectral y la eficiencia espectral agregada para la SNR limitante del servicio ofrecido y los usuarios de nuestro sistema.

5. Comparativa con una RIS de haz pincel

A continuación, se realiza una comparativa entre el rendimiento de nuestro escenario con una RIS de haces ensanchados para la SNR limitante requerida por el servicio y un nuevo enfoque, considerando el mismo escenario, pero utilizando una RIS con haces directivos (haces de tipo pincel) para cada usuario perteneciente a la zona reflejada.

En esta sección, se utiliza la ganancia máxima del haz pincel dirigido a cada usuario de la zona reflejada. Debido a que la RIS tiene que generar diferentes haces a partir de la incidencia de un único haz, se reparte la energía de la onda incidente entre los haces generados. Existen varios métodos para lograrlo, en nuestro caso utilizaremos el método de división equitativa de potencia, consistiendo en repartir la potencia de transmisión a partes iguales entre los usuarios del sistema. Para ello, se toma como referencia la ganancia de la RIS cuando se diseña para generar un único haz pincel, obtenida mediante simulación electromagnética. A este valor se la aplica un factor de reducción de ganancia en función del número de haces que se desee generar. Mediante este enfoque, calculamos el máximo teórico posible, entendiendo que las implementaciones prácticas siempre estarán por debajo de este valor.

El objetivo es averiguar el máximo número de usuarios posible para este sistema manteniendo el mismo rendimiento del escenario con haces ensanchados. Con este fin, se calcula el número de usuarios (N_u) a partir de la ecuación del balance de enlace utilizando los datos iniciales del anterior enfoque, la ganancia máxima del haz pincel y la SNR limitante:

$$N_u = 10^{P_{BS} - (SNR + P_N - (P_{BS} + G_{RIS} + G_{UE}))} \quad (47)$$

5.2 Validación del modelo

Previamente a la realización de la simulación con una RIS de haz ensanchado que permite abarcar toda la región de cobertura, se verifica la funcionalidad del modelo del sistema y la RIS utilizado, comparando los resultados de una simulación unicast de nuestros escenarios de prueba con los resultados obtenidos en las mismas condiciones utilizando el código de simulación empleado en [2], que aplica un modelo teórico basado en el procesado de señal. Para ello, se realiza una comparación de la SNR del sistema y la ganancia de la RIS, en este caso particularizada para un diseño de haz pincel, que es el que se toma como referencia en el modelo teórico de [2]. El objetivo es ver si los resultados del código de simulación desarrollado en el TFG, que incluye la caracterización de la RIS mediante sus diagramas de radiación, concuerdan con los del modelo teórico del procesado de señal.

En esta validación es requerido el uso de la ganancia máxima del haz pincel generado por la RIS, que se dirige hacia el usuario específico que es objeto de la simulación, y se procede a comparar

su rendimiento con el modelo teórico de procesamiento de señal. Para ello, consideramos en el balance de enlace las pérdidas de propagación entre la estación base y la RIS, la ganancia de la estación base, y la ganancia ideal de la RIS obtenida a partir del valor cuadrático de su número de elementos. Esto da lugar a una comparativa entre los balances de enlace para ambos casos:

Balance unicast (modelo propio):

$$SNR = P_{BS} + G_{RIS} + PL_{UE} + G_{UE} - P_N \quad (48)$$

Modelo teórico: $SNR = P_{BS} + G_{BS} + PL_{BS} + G_{RA} + PL_{UE} + G_{UE} - P_N \quad (49)$

Después de presentar las fórmulas correspondientes, es importante destacar que la ganancia de la RIS (G_{RIS}) que aparece en la ecuación (48) se deriva de la simulación de un haz pincel. Como en (40), la ganancia de la RIS ya incluye la ganancia de la BS, las pérdidas de propagación hasta la RIS, la ganancia de la RIS en sí misma y posiblemente otras pérdidas adicionales. Los siguientes diagramas de radiación en la Figura 11 ilustran esta ganancia en el escenario con las diferentes posiciones de la RIS, destacando una directividad alta que apunta al usuario. La máxima ganancia se presenta en la dirección determinada por el azimuth, con un HPBW, aproximadamente alrededor de 5°.

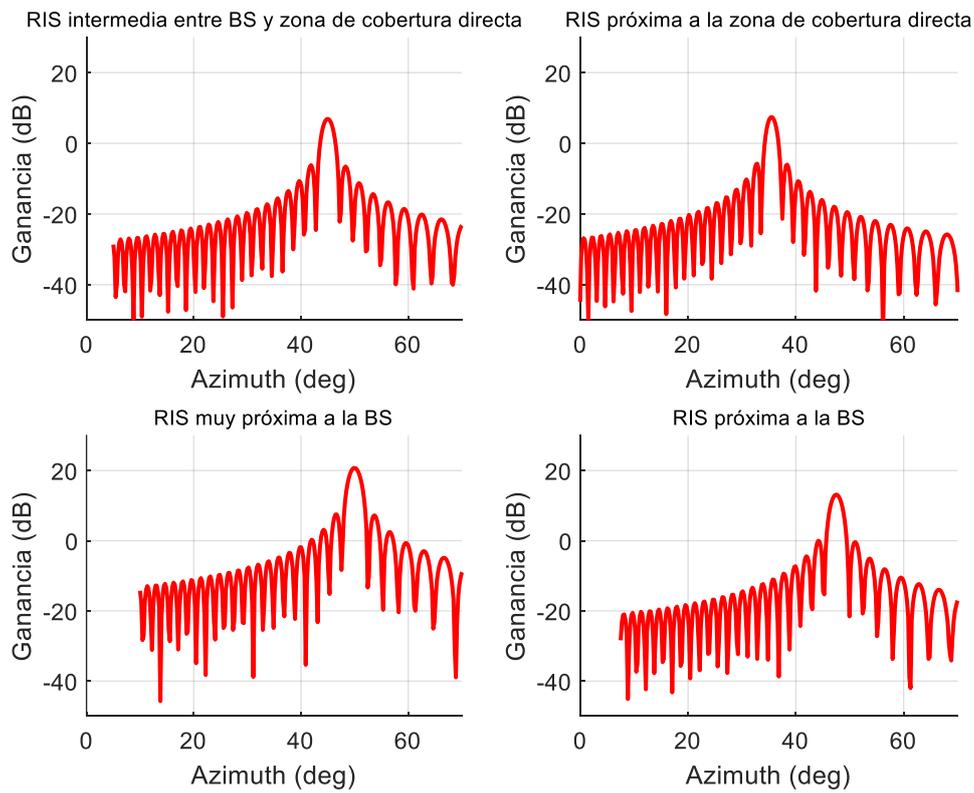


FIGURA 11: DIAGRAMAS DE RADIACIÓN DE HAZ PINCEL DEL MODELADO PROPIO

Sin embargo, la ganancia de la RIS (G_{RA}) en la ecuación (49) se calcula utilizando la fórmula del logaritmo del cuadrado del número de elementos (N^2). Del mismo modo, en el caso de las pérdidas de propagación (PL), el término de PL asociado con la ecuación (48) sigue la relación definida por la ecuación (41), mientras que el PL correspondiente a la ecuación (49) depende de A_{eff} , como se indica en la ecuación (50). En este caso, consideramos la fórmula teórica del modelo de procesamiento de señal, que aborda las pérdidas de propagación en ambos trayectos

(BS-RIS y RIS-usuario). En esta ecuación, el valor de PL se calcula empleando el término A_{eff} que representa el área efectiva de un elemento de la RIS y D la respectiva distancia del tramo de propagación analizado:

$$PL = 20 \log \left(\frac{A_{eff}}{4\pi D} \right) \quad (50)$$

Una vez realizada la simulación para esta validación, se obtienen los siguientes valores de SNR y ganancias, anotados en la Tabla 2. Estos resultados se tienen en cuenta para cada posición de la RIS, con 30 metros de distancia al usuario desde la propia RIS.

Escenario según Posición de RIS	Caso teórico (dB)		Modelo propio (dB)	
	Ganancia RIS	SNR	Ganancia RIS	SNR
Cercano Obstáculo Muy Próximo	84.23	51.41	77.96	45.14
Intermedio	84.23	39.04	76.50	31.31
Alejado	84.23	35.71	80.35	31.82
Cercano Obstáculo Próximo	84.23	42.94	78.83	37.53

TABLA 2: RESULTADOS DE SNR Y GANANCIA DE LA VALIDACIÓN

Los resultados evidencian que tanto la ganancia como la relación señal-ruido (SNR) obtenidos con nuestro modelo son inferiores a los obtenidos con el modelo teórico (lo cual es lógico), aunque existe una diferencia relativamente pequeña entre ambos. Esta diferencia se debe a las limitaciones prácticas en la determinación de la ganancia de la RIS, que en el modelo teórico se supone óptimamente cuadrática respecto al número de elementos (N^2). Sin embargo, en la práctica, factores como los ángulos de incidencia y reflexión del haz, las pérdidas por disipación en la RIS, la eficiencia de iluminación y *spillover* asociada al haz de la estación base, etc, influyen en la ganancia final de la RIS, impidiendo alcanzar el valor máximo teórico.

5.3 Resultados de zonas de Cobertura

Esta sección presenta los resultados obtenidos mediante simulación para los distintos escenarios estudiados, en los que se emplea una RIS con un haz ensanchado en el plano de azimuth, que permite cubrir por completo la región de cobertura, a costa de una menor ganancia máxima del haz. Los resultados obtenidos en función de la posición de la RIS, permiten analizar los requerimientos del servicio, distancias máximas y áreas de cobertura.

La tasa de bits requerida por el mejor servicio propuesto de VR (Extreme VR) es 2.35 Gbps, que para el escenario anterior es fácilmente alcanzable debido a que la SNR, según el Teorema de Shannon mencionado en el capítulo de modelado, es 4.09 dB, dado que tenemos un ancho de banda disponible para el servicio de 1 GHz. Por ello, se realiza el cálculo de zona de cobertura haciendo uso de este servicio. En este apartado se incluyen los diagramas de radiación de la estación base y el haz reflejado por la RIS utilizados para hallar la ganancia del haz.

Los resultados de las zonas de cobertura se han obtenido con el objetivo de proporcionar cobertura a grupos específicos de usuarios en direcciones determinadas. Estas áreas se han determinado al enfocarse inicialmente en las direcciones requeridas por el servicio seleccionado, asegurando así que abarquen todas las zonas que cumplan con los niveles de SNR necesarios para ofrecer el servicio propuesto.

5.3.1 Zona de cobertura 1: RIS muy próxima a la BS

Diagramas de radiación utilizados:

Las Figuras 12 y 13 representan los diagramas de radiación de la antena transmisora de la BS y de la RIS, respectivamente. El diagrama de radiación representa la ganancia en dB en función del ángulo en grados, que en las Figuras 12 y 13 se definen con una nomenclatura diferente (Theta en un caso y Azimuth en el otro, para diferenciar los dos haces). En la Figura 12, el corte a -3 dB determina la anchura del haz de la estación base para poder incidir en la RIS y cubrir al mismo tiempo la región directa de usuarios. Esta ganancia a -3 dB se asocia al término GBS del balance del enlace, que hace referencia a la ganancia de la antena transmisora de la estación base. En este caso, esa ganancia es aproximadamente 16.6 dB.

Del diagrama de radiación de la RIS, se observa que tiene un HPBW de aproximadamente 10° para cubrir completamente la región reflejada, apuntando en dirección 50° en azimuth, determinada por la geometría del escenario analizado. La ganancia del haz de la RIS oscila entre aproximadamente 12 y 13 dB.

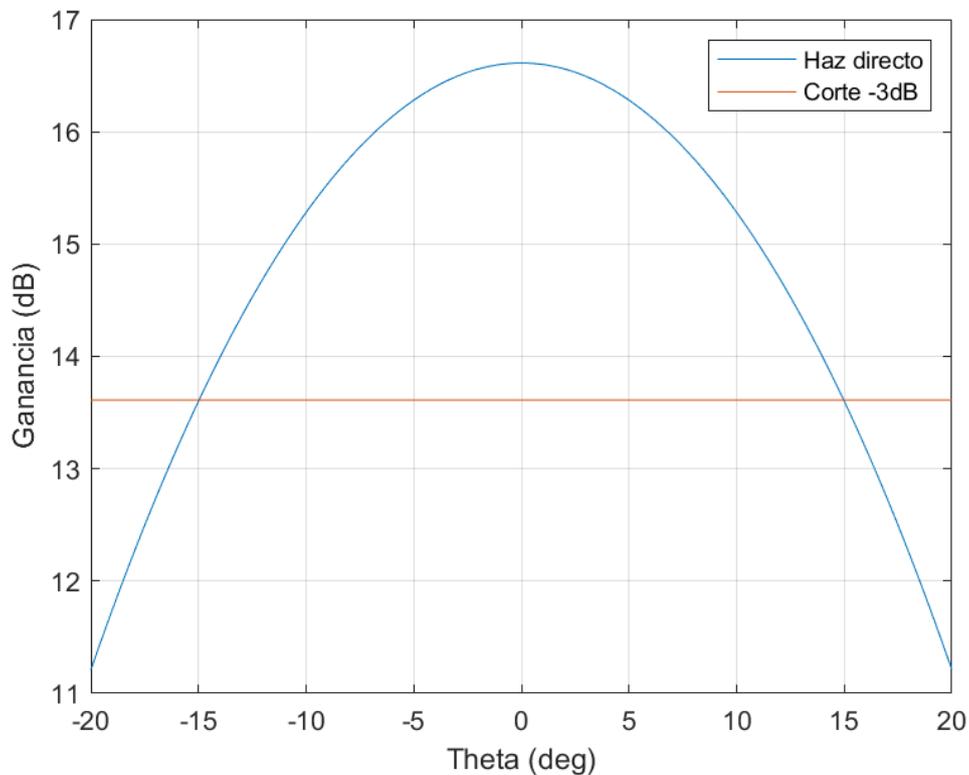


FIGURA 12: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA TRANSMISORA DE LA ESTACIÓN BASE

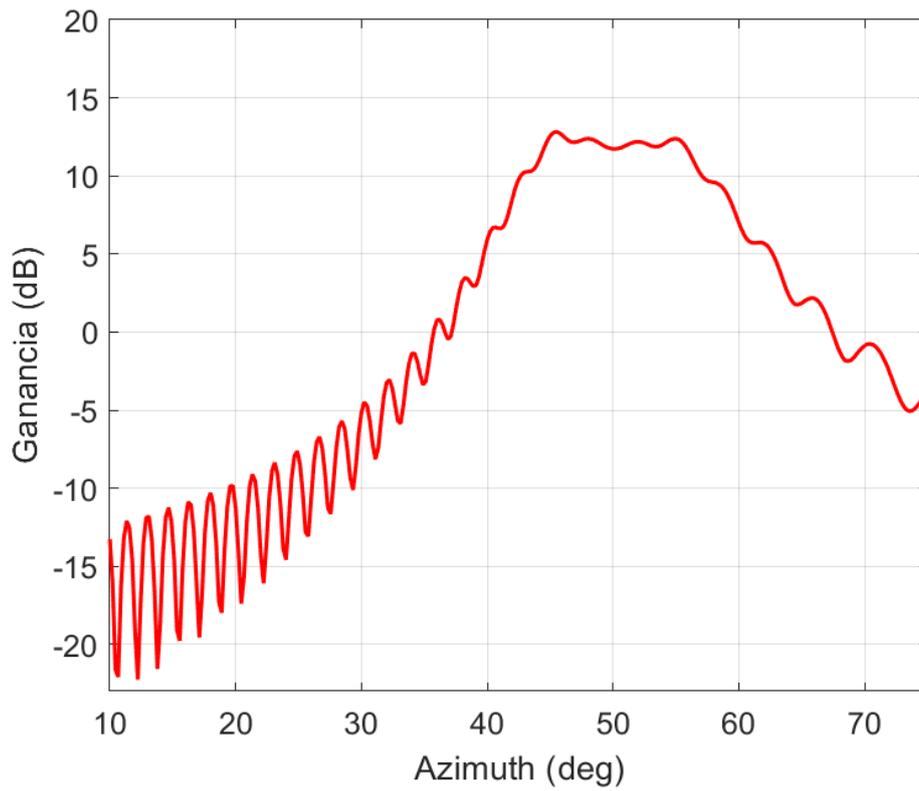


FIGURA 13: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA RIS

Representación de zona de cobertura:

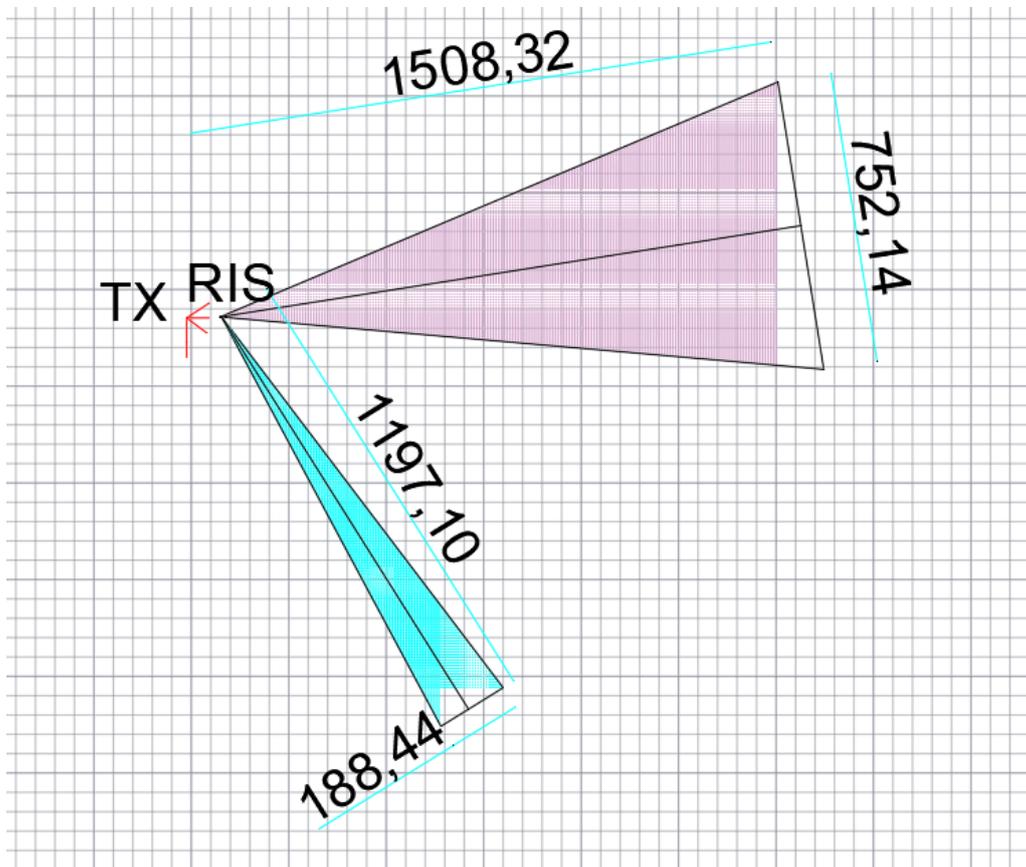


FIGURA 14: REPRESENTACIÓN ZONA DE COBERTURA 1 EN AUTOCAD

En la Figura 14 se muestran las áreas de cobertura máximas para el haz directo y reflejado: el área de la zona de cobertura del haz directo es de 549830.2 m², mientras que el área de la zona de cobertura del haz reflejado por la RIS es de 124901.3 m². En este contexto, la zona de cobertura del haz directo presenta una mayor amplitud, pero una menor distancia en comparación con los escenarios donde la BS tiene un HPBW menor. Esta diferencia se atribuye al ángulo del haz que incide en la RIS y a la ganancia obtenida, como se ilustra en la Figura 12, donde el diagrama de radiación muestra una menor directividad. Por otro lado, en la zona reflejada se observa un buen alcance y área de cobertura debido a una mayor ganancia de transmisión generada por la RIS, tal como se muestra en la Figura 13, especialmente al ubicarse más próxima a la estación base.

5.3.2 Zona de cobertura 2: RIS intermedia entre BS y zona de cobertura directa

Diagramas de radiación utilizados:

Las Figuras 15 y 16 presentan los diagramas de radiación de la antena transmisora y la RIS, respectivamente. En este caso, el diagrama de radiación muestra la ganancia en dB en función del ángulo del haz de transmisión en grados. En las Figuras 15 y 16, se utilizan diferentes nomenclaturas para los ángulos del haz de transmisión, Theta y Azimuth, respectivamente. En la Figura 15, el corte a -3 dB determina la amplitud del haz de la estación base necesario para incidir en la RIS, con una ganancia aproximada de 24.4 dB. Por otro lado, al analizar el diagrama de radiación de la RIS en la Figura 16, se observa un HPBW de aproximadamente 10° y una orientación en azimuth de 45°. La ganancia del haz de la RIS oscila entre aproximadamente -1 y -2.5 dB.

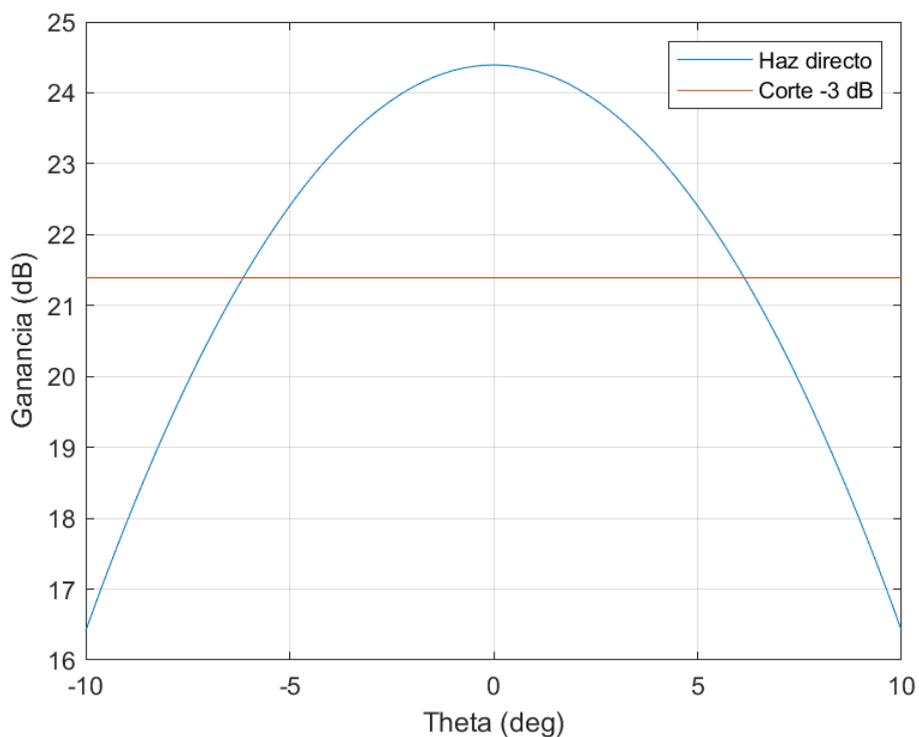


FIGURA 15: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA TRANSMISORA DE LA ESTACIÓN BASE

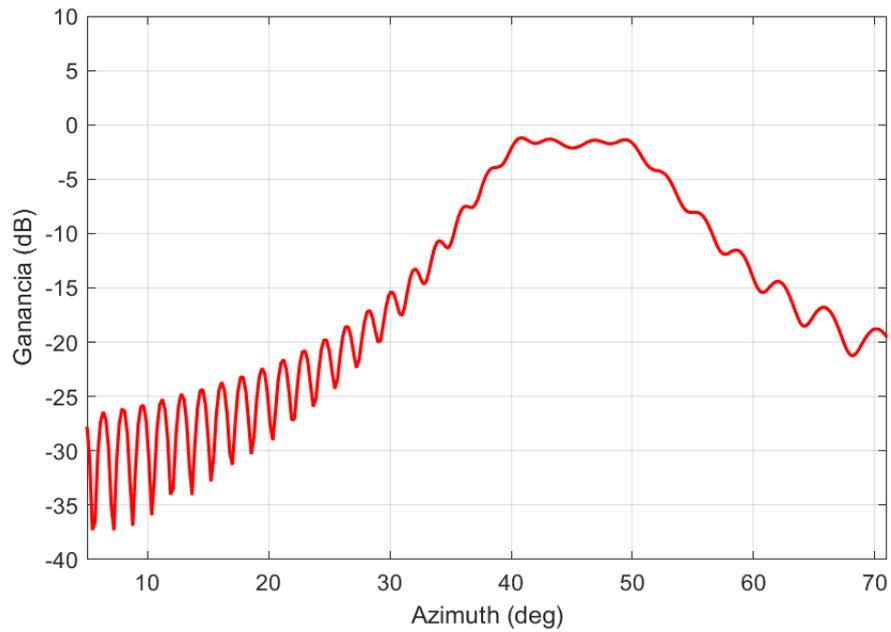


FIGURA 16: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA RIS

Representación de zona de cobertura:

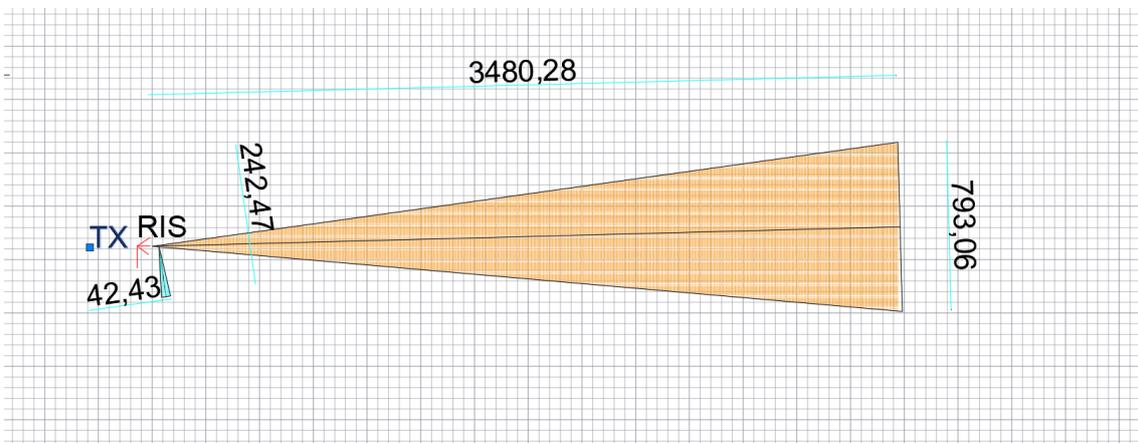


FIGURA 17: REPRESENTACIÓN ZONA DE COBERTURA 2 EN AUTOCAD

En la Figura 17 se ilustran las áreas de cobertura máximas para el haz directo y reflejado en este segundo escenario: el área de la zona de cobertura del haz directo es de 1366274 m^2 , mientras que el área de la zona de cobertura del haz reflejado por la RIS es de 5124.17 m^2 . En este caso, la zona de cobertura con línea de visión directa presenta una menor amplitud, pero una mayor distancia en comparación con las zonas de cobertura generadas por una RIS próxima a la BS. Esta distinción se debe al ángulo del haz que incide en la RIS y a la ganancia obtenida, como se muestra en la Figura 15, donde el diagrama de radiación muestra una mayor directividad. Por otro lado, en la zona reflejada se observa un alcance y área de cobertura muy reducidos debido a una menor ganancia de transmisión generada por la RIS, como se representa en la Figura 16, especialmente al ubicarse más alejada de la estación base.

5.3.3 Zona de cobertura 3: RIS próxima a la zona de cobertura directa

Diagramas de radiación utilizados:

Las Figuras 18 y 19 exhiben los diagramas de radiación de la antena transmisora y la RIS, respectivamente. En estas figuras, se presenta la ganancia en dB en función del ángulo del haz de transmisión en grados, utilizando las nomenclaturas de Theta y Azimuth para diferenciar los dos haces de transmisión. En la Figura 18, el corte a -3 dB delimita la amplitud del haz de la estación base, con una ganancia de aproximadamente 25.6 dB. Al analizar el diagrama de radiación de la RIS en la Figura 18, se observa un HPBW de aproximadamente 10° y una orientación en azimuth de 35°. La ganancia del haz de la RIS varía entre aproximadamente -1 y -3 dB.

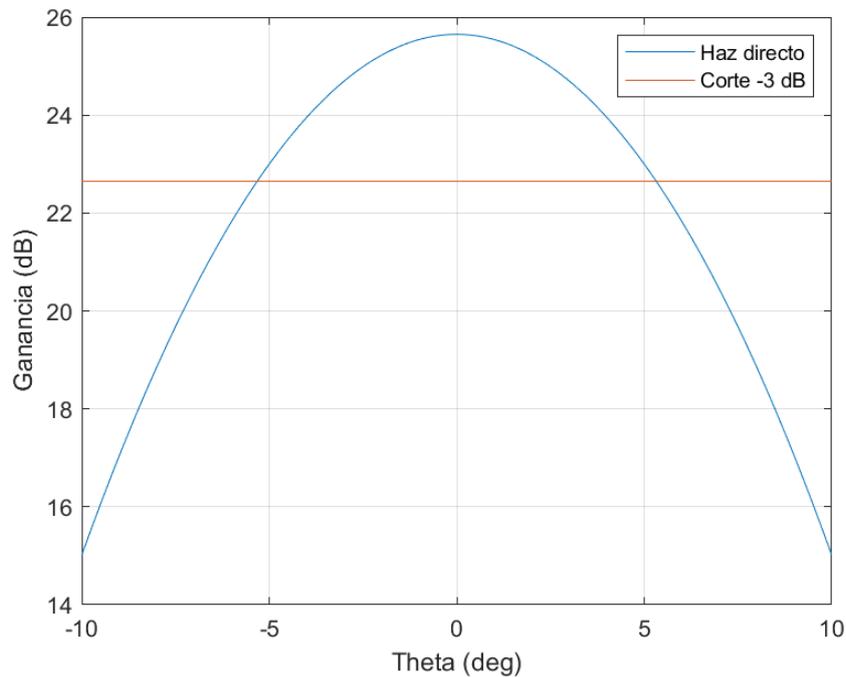


FIGURA 18: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA TRANSMISORA DE LA ESTACIÓN BASE

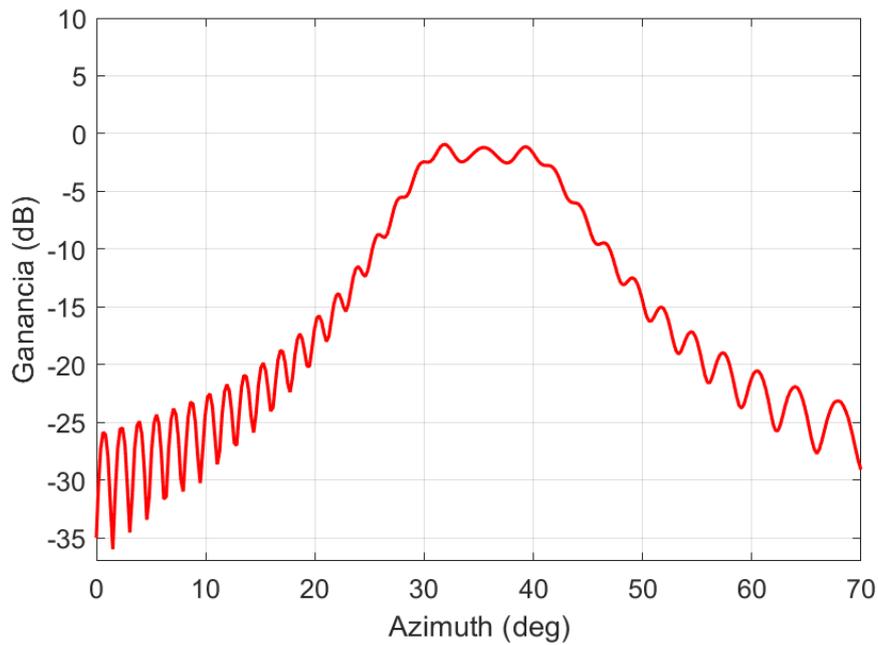


FIGURA 19: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA RIS

Representación de zona de cobertura:

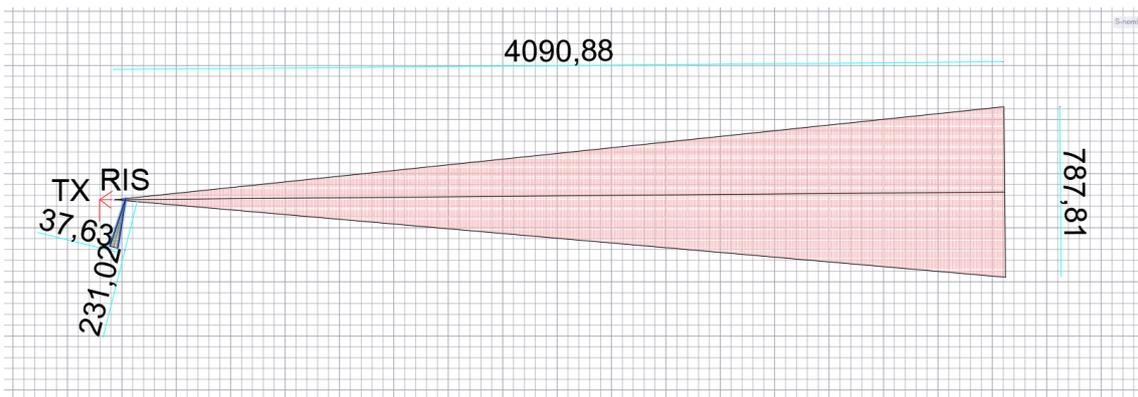


FIGURA 20: REPRESENTACIÓN ZONA DE COBERTURA 3 EN AUTOCAD

La Figura 20 representa las áreas de cobertura máximas para el haz directo y reflejado, donde el área de la zona de cobertura del haz directo es de 1603596 m² y el área de la zona de cobertura del haz reflejado por la RIS es de 4651.73 m². Similar al caso de una RIS de posición intermedia, la zona de cobertura con línea de visión directa presenta una menor amplitud, pero una mayor distancia en comparación con las zonas de cobertura generadas por una RIS próxima a la BS. Esta distinción se debe al ángulo del haz que incide en la RIS y a la ganancia obtenida, como se muestra en la Figura 18, donde el diagrama de radiación presenta una mayor directividad. Por otro lado, en la zona reflejada se observa un alcance y área de cobertura muy reducidos debido a una menor ganancia de transmisión generada por la RIS, como se representa en la Figura 19, especialmente al ubicarse más alejada de la BS.

5.3.4 Zona de cobertura 4: RIS próxima a la BS

Diagramas de radiación utilizados:

Las Figuras 21 y 22 representan los diagramas de radiación de la antena transmisora y la RIS, respectivamente. El diagrama de radiación muestra la ganancia en dB en función del ángulo del haz de transmisión en grados. En estas figuras, se emplean diferentes nomenclaturas para los ángulos del haz de transmisión, Theta y Azimuth, respectivamente. En la Figura 21, el corte a -3 dB determina la amplitud del haz de la estación base, con una ganancia de aproximadamente 16.8 dB. Al analizar el diagrama de radiación de la RIS en la Figura 22, se observa un HPBW de aproximadamente 10° y una orientación en azimuth de 47° . La ganancia del haz de la RIS oscila entre aproximadamente 4 y 5 dB.

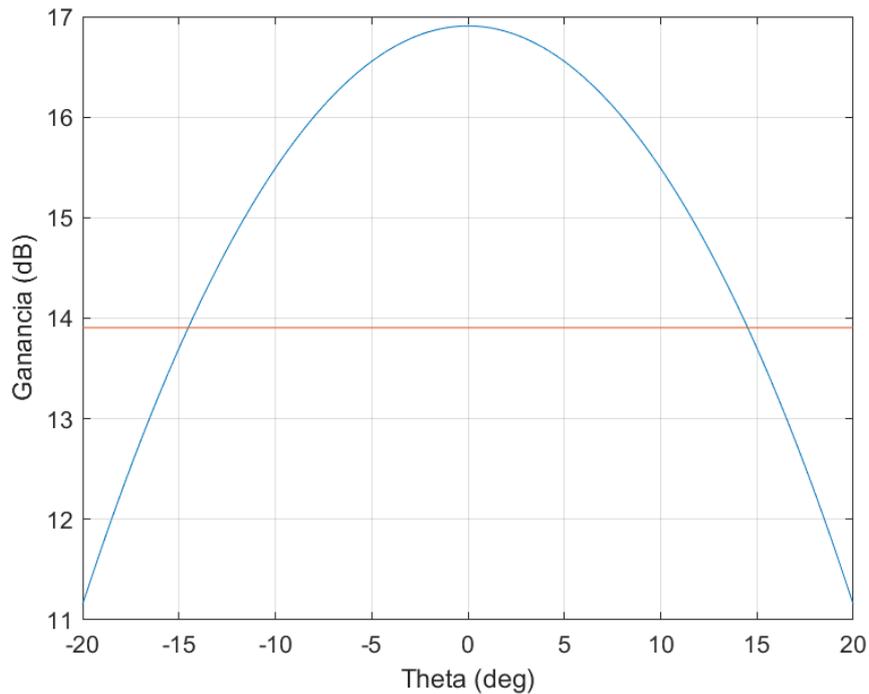


FIGURA 21: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA TRANSMISORA DE LA ESTACIÓN BASE

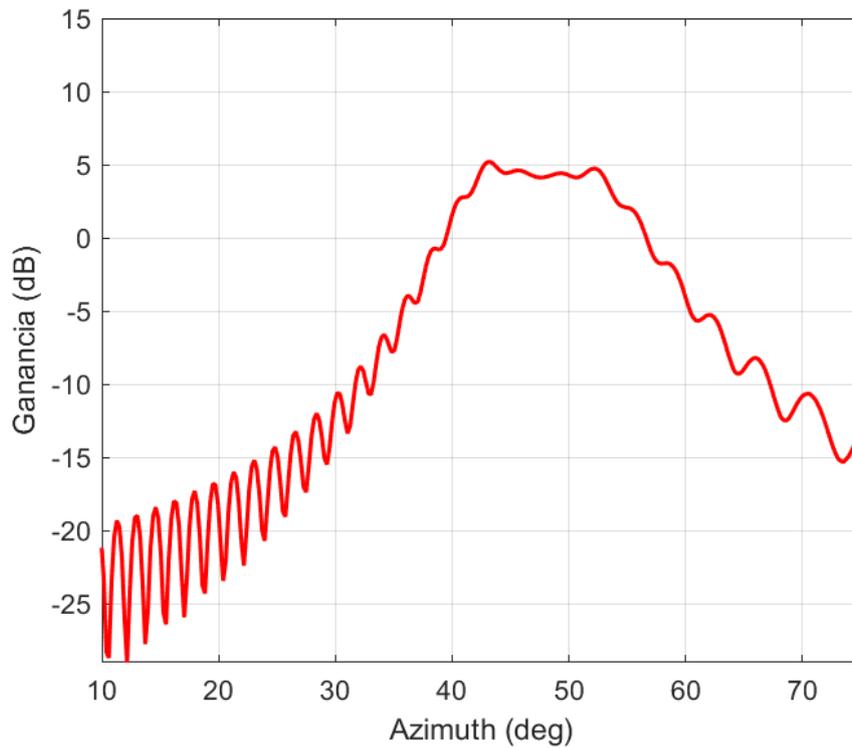


FIGURA 22: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA RIS

Representación de zona de cobertura:

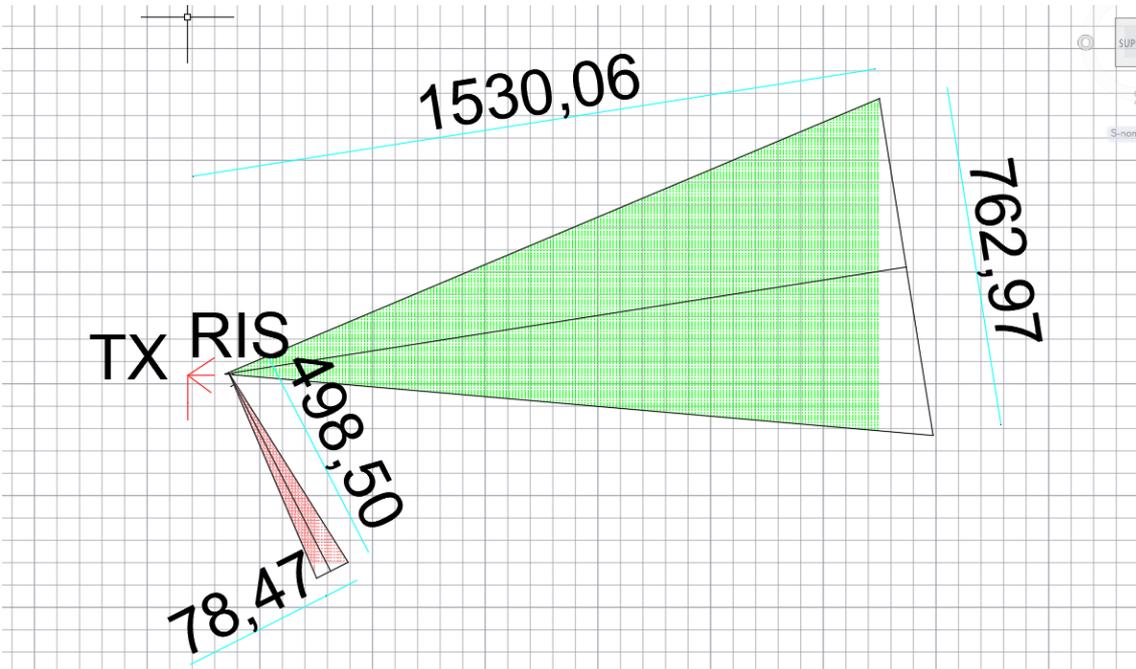


FIGURA 23: REPRESENTACIÓN ZONA DE COBERTURA 4 EN AUTOCAD

La Figura 23 muestra las áreas de cobertura máximas para el haz directo y reflejado, siendo el área de la zona de cobertura del haz directo de 565835.1 m^2 y el área de la zona de cobertura del haz reflejado por la RIS de 21658.53 m^2 . Al igual que en el caso de una RIS muy próxima a la BS, la zona de cobertura presenta una mayor amplitud, pero una menor distancia en comparación con los casos de menor ángulo de haz generado por la BS. Esta diferencia se debe al ángulo del haz que incide en la RIS y a la ganancia obtenida, como se muestra en la Figura 21,

donde el diagrama de radiación presenta una menor directividad. Por otro lado, en la zona reflejada se observa un buen alcance y área de cobertura debido a una mayor ganancia de transmisión generada por la RIS, como se representa en la Figura 23, especialmente al ubicarse más próxima a la estación base.

5.4 Eficiencia Espectral y Eficiencia Espectral Agregada

Los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 3, consideran el mismo servicio ofrecido a 50 usuarios que se encuentran aleatoriamente situados en las dos zonas de cobertura del escenario con la RIS en cualquier posición. En ellos, se muestran la eficiencia espectral y eficiencia espectral agregada, siendo esta última la eficiencia espectral del número total de usuarios (calculada a partir de la multiplicación del número de usuarios por la eficiencia espectral).

SNR LIMITANTE (dB)	SE (bps/Hz)	ASE (bps/Hz)
4.09	1.83	91.78

TABLA 3: RESULTADOS DE SNR, SE Y ASE

5.5 Análisis de ancho de banda de cada servicio propuesto

En este análisis se llevará a cabo una comparativa de los alcances máximos y áreas de cobertura tanto para la zona de cobertura directa reflejada. Esta prueba varía el ancho de banda y ajusta las tasas de bits para representar los diferentes servicios propuestos, lo que permite visualizar y comprender las diversas áreas de cobertura. Esta exploración brinda una perspectiva visual sobre las limitaciones y restricciones aplicables a nuestro escenario en función de diferentes servicios y anchos de banda. Los resultados obtenidos para un ancho de banda de 1 GHz se muestran en la Tabla 4, para 400 MHz en la Tabla 5, para 100 MHz en la Tabla 6 y para 25 MHz en la Tabla 7. Estos resultados revelan que al aumentar la tasa de servicio, se produce una disminución en el alcance y el área de cobertura. Por otro lado, al variar el ancho de banda, se observan cambios leves en el alcance y las áreas de cobertura. Se destaca que, al reducir el ancho de banda, por ejemplo, de 1 GHz a 400 MHz, debido a la baja variación, la potencia de ruido disminuirá. Esta reducción del ancho de banda conlleva un aumento de SNR y, con ello, del alcance y el área de cobertura como se puede apreciar en la diferencia entre los cuatro primeros servicios de la Tabla 5 y la Tabla 6. A medida que se reduce aún más el ancho de banda, se evidencia una disminución en los alcances y áreas de cobertura, llegando al punto en que ya no se puede ofrecer servicio en algunos casos, como se observa a partir de la Tabla 7. Además, se observa que el alcance y el área de cobertura son siempre mayores para la zona de visión directa, debido a las pérdidas reducidas y las mayores ganancias en comparación con la zona sin visión directa, es decir, la zona reflejada por la RIS.

Escenario con Obs Cercano	Resultados									
Servicios	Early stage VR		Entry level VR		Advanced VR		Extreme VR (smooth play)		Extreme VR (interactive)	
Tasa de bits requerida	25 Mbps		100 Mbps		400 Mbps		1 Gbps		2.35 Gbps	
Ancho de banda	1 GHz		1 GHz		1 GHz		1 GHz		1 GHz	
Zona de cobertura	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada
Alcance Máximo	2,52 km	0,7974 km	2,50 km	0,7924 km	2,43 km	0,7701 km	2,25 km	0,7121 km	1,57 km	0,4985 km
Ángulo de haz (°)	13,98	0	13,98	0	13,98	0	13,98	0	13,98	0
Área de Cobertura	1,49 km ²	0,0554 km ²	1,47 km ²	0,0547 km ²	1,39 km ²	0,0517 km ²	1,19 km ²	0,0442 km ²	0,5831 km ²	0,0216 km ²

TABLA 4: RESULTADOS DE ÁREAS DE COBERTURA DEL CASO 1 GHz

Escenario con Obs Cercano	Resultados									
Servicios	Early stage VR		Entry level VR		Advanced VR		Extreme VR (smooth play)		Extreme VR (interactive)	
Tasa de bits requerida	25 Mbps		100 Mbps		400 Mbps		1 Gbps		2.35 Gbps	
Ancho de banda	400 MHz		400 MHz		400 MHz		400 MHz		400 MHz	
Zona de cobertura	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada
Alcance Máximo	3,99 km	1,26 km	3,91 km	1,23 km	3,56 km	1,12 km	2,33 km	0,7391 km	0,0052 km	0,0016 km
Ángulo de haz (°)	13,98	0	13,98	0	13,98	0	13,98	0	13,98	0
Área de Cobertura	3,74 km ²	0,1391 km ²	3,58 km ²	0,1331 km ²	2,97 km ²	0,1105 km ²	1,28 km ²	0,0476 km ²	6,37e-6 km ²	0,23e-6 km ²

TABLA 5: RESULTADOS DE ÁREAS DE COBERTURA DEL CASO 400 MHz

Escenario con Obs Cercano	Resultados									
Servicios	Early stage VR		Entry level VR		Advanced VR		Extreme VR (smooth play)		Extreme VR (interactive)	
Tasa de bits requerida	25 Mbps		100 Mbps		400 Mbps		1 Gbps		2.35 Gbps	
Ancho de banda	100 MHz		100 MHz		100 MHz		100 MHz		100 MHz	
Zona de cobertura	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada
Alcance Máximo	7,99 km	2,52 km	7,12 km	2,25 km	1,42 km	0,449 km	5,65e-51 km	1,78e-51 km	X	X
Ángulo de haz (°)	13,98	0	13,98	0	13,98	0	13,98	0	X	X
Área de Cobertura	0,1498 km ²	0,5564 km ²	0,1190 km ²	0,4420 km ²	0,4737 km ²	0,0175 km ²	7,5e-102km ²	2,79e-103 km ²	X	X

TABLA 6: RESULTADOS DE ÁREAS DE COBERTURA DEL CASO 100 MHZ

Escenario con Obs Cercano	Resultados									
Servicios	Early stage VR		Entry level VR		Advanced VR		Extreme VR (smooth play)		Extreme VR (interactive)	
Tasa de bits requerida	25 Mbps		100 Mbps		400 Mbps		1 Gbps		2.35 Gbps	
Ancho de banda	10 MHz		10 MHz		10 MHz		10 MHz		10 MHz	
Zona de cobertura	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada	Directa	Reflejada
Alcance Máximo	25,27 km	7,99 km	1,78e-50 km	5,65e-99 km	X	X	X	X	X	X
Ángulo de haz (°)	13,98	0	13,98	0	X	X	X	X	X	X
Área de Cobertura	149,82 km ²	5,56 km ²	7,50e-101 km ²	2,79e-102 km ²	X	X	X	X	X	X

TABLA 7: RESULTADOS DE ÁREAS DE COBERTURA DEL CASO 10 MHZ

5.6 Comparativa simulación multicast

En este apartado se muestran los resultados de la comparación de nuestro escenario de entrega de servicio multicast en función de la diferente configuración utilizada para la RIS, es decir, uso de haz ensanchado o varios haces pincel. El escenario elegido a comparar es el escenario con posición de RIS cercana a la estación base con obstáculo de mayor tamaño.

Comparativa diagramas de radiación de haces reflejados:

Las figuras 24 y 25 representan los diagramas de radiación de la RIS con haz ensanchado y haz pincel respectivamente.

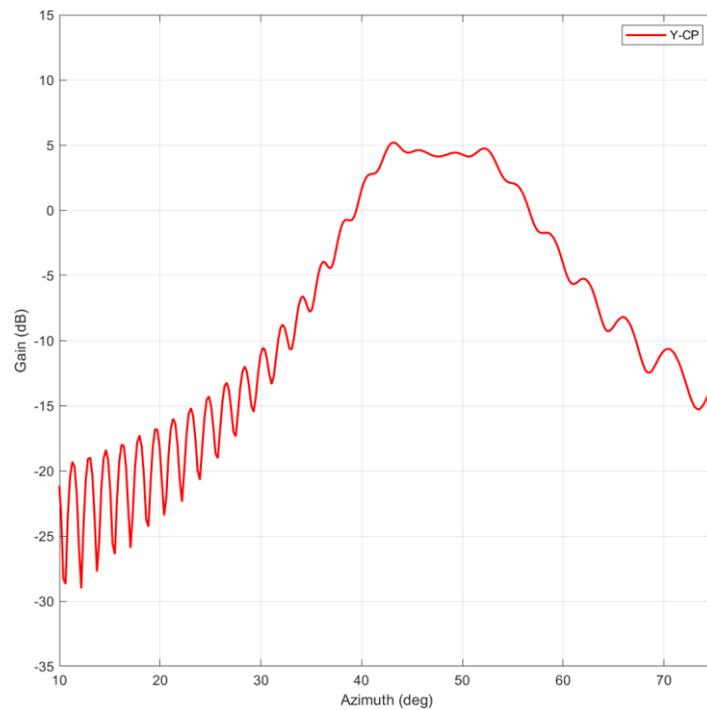


FIGURA 24: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA RIS CON HAZ ENSANCHADO

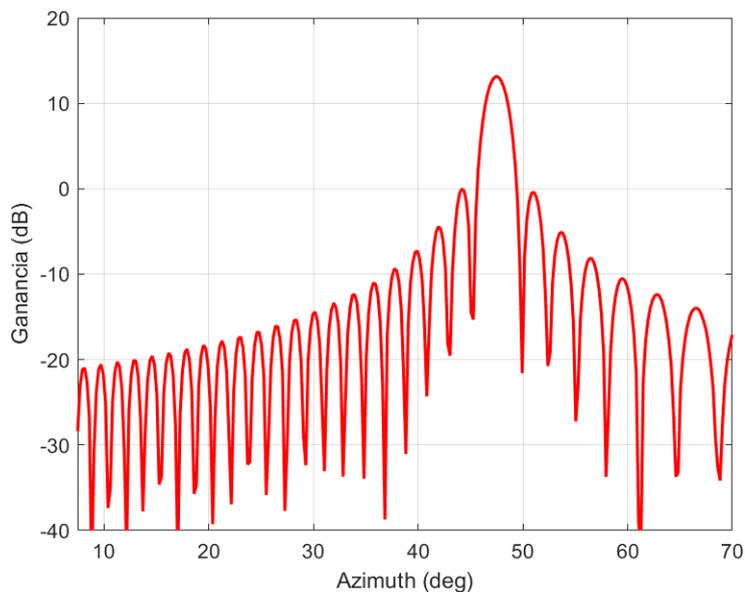


FIGURA 25: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA RIS CON HAZ PINCEL

Para un ancho de banda de 1 GHz y servicio Extreme VR se obtienen como máximo 7 usuarios para la zona reflejada ofreciendo el mismo rendimiento a través del uso de haces directivos tipo pincel obtenidos del modelado práctico de la RIS. En cambio, utilizando los mismos datos para el caso de uso de haces directivos obtenidos del modelado teórico de procesamiento de señal, se obtienen como máximo 27 usuarios.

Nota: Estos resultados muestran la diferencia de prestaciones teóricas con haz directivo adaptado a cada usuario y lo que conseguimos con un diseño práctico.

Una vez identificamos el número de usuarios como factor limitante, procedemos a llevar a cabo una simulación de tipo multicast. En dicha simulación, distribuimos aleatoriamente usuarios en las dos modalidades del escenario: haz ensanchado y haces directivos. Posteriormente, llevamos a cabo una comparativa de rendimiento al variar el número de usuarios empleados en la zona reflejada. Los resultados obtenidos para las simulaciones con 5 usuarios y 10 usuarios se muestran en las Tablas 8 y 9 respectivamente junto con los resultados de la SNR mínima obtenida para cada simulación (además de una simulación con 15 usuarios) anotados la Tabla 10.

Los resultados obtenidos revelan que a medida que aumenta el número de usuarios, la SNR mínima disminuye notablemente en el escenario de haz pincel, mostrando una diferencia cada vez mayor con respecto al escenario de haz ensanchado. Incluso en el caso de 15 usuarios, no se alcanza la SNR mínima requerida para un servicio de 2.35 Gbps de tasa de bits utilizando haces pinceles. Estos resultados se basan en una distribución equitativa de la señal entre los usuarios; sin embargo, existen otras estrategias más eficientes para asignar la señal, como el uso de algoritmos de maximización del mínimo del sistema (Maxmin). Es importante destacar que en el escenario con 15 usuarios, la transmisión multicast permite entregar el servicio satisfactoriamente, alcanzando las SNR mínimas requeridas para todos los usuarios. En contraste, la transmisión de haces pinceles, distribuyendo la señal equitativamente, no logra entregar el servicio a todos los usuarios, evidenciando la limitación de esta estrategia en comparación con la transmisión de haz ensanchado.

Escenario RIS con Obs Mayor	Resultados				
Servicios	Extreme VR (interactive)				
Tasa de bits requerida	2.35 Gbps				
Ancho de banda	1 GHz				
Usuarios	User 1	User 2	User 3	User 4	User 5
Distancia RIS a User (m)	70.90	210.40	456.51	396.18	479.88
Ángulo de azimuth (°)	45.48	46.39	47.73	49.78	49.82
SNR (Haz ensanchado dB)	21.52	11.90	4.86	6.33	4.66
SNR (Haz directivo pincel dB)	23.07	13.62	6.90	8.13	6.46

TABLA 8: RESULTADOS DE SIMULACIÓN MULTICAST DE 5 USUARIOS

Escenario RIS con Obs Mayor	Resultados									
Servicios	Extreme VR (interactive)									
Tasa de bits requerida	2.35 Gbps									
Ancho de banda	1 GHz									
Usuarios	User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9	User 10
Distancia RIS a User (m)	244.39	222.32	322.24	353.74	376.83	137.68	339.96	326.81	81.31	59.46
Ángulo de azimuth (°)	48.78	48.71	46.96	48.27	45.85	48.53	45.15	46.38	45.23	45.48
SNR (Haz ensanchado dB)	10.53	11.29	7.97	7.14	6.98	15.46	7.80	8.08	20.28	23.05
SNR (Haz directivo pincel dB)	9.31	10.13	6.91	6.10	5.55	14.30	6.45	6.79	18.87	21.59

TABLA 9: RESULTADOS DE SIMULACIÓN MULTICAST DE 10 USUARIOS

Escenario RIS con Obs Mayor	SNR Mínima (dB)	
	Haz Ensanchado	Haces Directivos Pincel
Numero de Usuarios = 5	6.46	4.66
Numero de Usuarios = 10	6.98	5.55
Numero de Usuarios = 15	4.75	1.78

TABLA 10: RESULTADOS DE SNR MÍNIMA DE CADA SIMULACIÓN MULTICAST

Capítulo 6

Conclusiones

6.1 Consecución de objetivos

Las simulaciones de los escenarios planteados a lo largo de la memoria han contribuido a la comprensión de la tecnología de RIS en redes de telecomunicación, en base al desempeño que presentan en función de su ubicación según la distancia a la que se coloque la RIS de la estación base para reflejar el haz de transmisión y redirigirlo a la zona de cobertura deseada. A partir de estas simulaciones, se obtienen mejores prestaciones en posiciones cercanas a la estación base, consiguiendo así un mejor entendimiento de su funcionamiento para poder aplicar eficazmente en otros posibles escenarios.

Los resultados obtenidos recalcan la importancia de la cercanía a la estación base en la posición de la RIS, con zonas de cobertura mayores para el haz reflejado, suponiendo un mejor reparto de cobertura para los usuarios del sistema. Por otra parte, cuando la RIS se encuentra más alejada se obtienen mejores prestaciones para el haz directo, con un alcance superior. No obstante, trabajar en con este tipo de escenarios supone una gran pérdida para el alcance y zona de cobertura para el haz reflejado.

En cuanto al servicio ofrecido, tratándose de aplicaciones con VR, es una gran ventaja proporcionarlo tanto para la zona del haz directo como la reflejada, resultando en el adecuamiento del uso de RIS para estos servicios con requerimientos de alta calidad.

Finalmente, se ha observado que la implementación de haces ensanchados puede resultar altamente beneficiosa en escenarios donde múltiples usuarios demandan el mismo servicio, particularmente en el caso de servicios multicast, dentro de un área de cobertura definida. Este enfoque representa un avance significativo en comparación con el uso de haces directivos, que suelen ser más adecuados para servicios unicast con exigentes requisitos de calidad. Además, la utilización de haces directivos a menudo requiere la estimación precisa del canal del usuario o la implementación de técnicas de multiplexación espacio-temporal, lo cual no es necesario en el caso de los haces ensanchados. Esto representa una mejora en términos de eficiencia y simplicidad.

6.2 Competencias

Como en cada trabajo, en nuestro proyecto trabajamos con ciertas competencias generales y específicas, algunas de las cuales coinciden con las marcadas para esta titulación y que menciono a continuación:

- C.1: Capacidad para aprender de manera autónoma nuevos conocimientos y técnicas adecuados para la concepción, el desarrollo o la explotación de sistemas y servicios de telecomunicación.

- C.2: Capacidad de utilizar aplicaciones de comunicación e informáticas (ofimáticas, bases de datos, cálculo avanzado, gestión de proyectos, visualización, etc.) para apoyar el desarrollo y explotación de redes, servicios y aplicaciones de telecomunicación y electrónica.
- C.3: Capacidad para utilizar herramientas informáticas de búsqueda de recursos bibliográficos o de información relacionada con las telecomunicaciones y la electrónica.
- C.4: Capacidad de analizar y especificar los parámetros fundamentales de un sistema de comunicaciones.
- C.5: Capacidad para evaluar las ventajas e inconvenientes de diferentes alternativas tecnológicas de despliegue o implementación de sistemas de comunicaciones, desde el punto de vista del espacio de la señal, las perturbaciones y el ruido y los sistemas de modulación analógica y digital.
- C.6: Capacidad de concebir, desplegar, organizar y gestionar redes, sistemas, servicios e infraestructuras de telecomunicación en contextos residenciales (hogar, ciudad y comunidades digitales), empresariales o institucionales responsabilizándose de su puesta en marcha y mejora continua, así como conocer su impacto económico y social.
- C.8: Capacidad para comprender los mecanismos de propagación y transmisión de ondas electromagnéticas y acústicas, y sus correspondientes dispositivos emisores y receptores.
- E.ST.2: Capacidad para aplicar las técnicas en que se basan las redes, servicios y aplicaciones de telecomunicación tanto en entornos fijos como móviles, personales, locales o a gran distancia, con diferentes anchos de banda, incluyendo telefonía, radiodifusión, televisión y datos, desde el punto de vista de los sistemas de transmisión.
- E.ST.2: Capacidad para aplicar las técnicas en que se basan las redes, servicios y aplicaciones de telecomunicación tanto en entornos fijos como móviles, personales, locales o a gran distancia, con diferentes anchos de banda, incluyendo telefonía, radiodifusión, televisión y datos, desde el punto de vista de los sistemas de transmisión.

6.3 Lecciones aprendidas

Una vez llegada la conclusión de este trabajo, cabe destacar diferentes aspectos que han fomentado mi crecimiento, como la comprensión y aplicación de los conocimientos sobre entornos de comunicación inalámbrica aprendidos durante mi carrera. Destaca el aprendizaje sobre esta innovadora tecnología (RIS) mediante el análisis y evaluación de prestaciones en diversas posiciones de nuestro escenario de estudio, remarcando la importancia de la proximidad de la RIS a la estación base para optimizar la calidad de la señal. Además, los resultados obtenidos me ayudaron a comprender su utilidad práctica observando prestaciones beneficiosas para servicios de multidifusión con requisitos de alta calidad, impulsando así la mejora continua de los entornos de comunicación inalámbrica.

6.4 Futuros trabajos

Si bien los resultados obtenidos hasta el momento han proporcionado un entendimiento valioso sobre la influencia de las RIS en entornos de telecomunicaciones, existen varias áreas de investigación que podrían explorarse para ampliar el conocimiento y aplicaciones prácticas de esta tecnología emergente. A continuación, se exponen algunas direcciones para futuros trabajos que podrían mejorar el estudio y aplicación de estas redes:

- *Escenarios dinámicos y zonas interiores:* Explorar el impacto de las RIS en entornos donde la configuración cambia dinámicamente a causa de la alta movilidad de usuarios o en zonas interiores con espacios reducidos.
- *Utilización de dos haces en la estación base para iluminar por separado la RIS y la zona de visión directa:* Investigar el uso de dos haces distintos en la estación base, uno dedicado exclusivamente a iluminar la RIS y otro diseñado para proporcionar cobertura únicamente a la zona de visión directa.
- *Entornos de elevación variable:* Investigar cómo las RIS pueden adaptarse a escenarios con variaciones en la elevación del terreno.
- *Caso práctico de aplicación de RIS como repetidor de señal:* Estudiar y evaluar el potencial de las RIS para actuar como repetidores de señal, mejorando la cobertura y calidad en áreas con deficiencia de señal.
- *Escenarios con múltiples RIS con haces directivos hacia cada usuario:* Investigar cómo se comportan y cómo pueden optimizarse los sistemas con múltiples RIS que dirigen haces específicos hacia cada usuario para mejorar la capacidad y eficiencia del sistema.

©2023 Javier Gutiérrez Rodríguez

Algunos derechos reservados

Este documento se distribuye bajo la licencia "Atribución 4.0 Internacional" de Creative Commons, disponible en: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>

Referencias

- [1] M. D. Renzo et al., "Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and road ahead," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 11, 2020.
- [2] E. Björnson, H. Wymeersch, B. Matthiesen, P. Popovski, L. Sanguinetti, and E. de Carvalho, "Reconfigurable intelligent surfaces: A signal processing perspective with wireless applications," *IEEE signal processing magazine*, Vol.39, no. 2, pp. 245-259, 2022.
- [3] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You, and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 5, pp. 3313–3351, 2021.
- [4] A. J. Torres, L. Sanguinetti, E. Björnson, "Electromagnetic Interference in RIS-Aided Communications", *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 668-672, April 2022.
- [5] E. Björnson, H. Wymeersch, B. Matthiesen, P. Popovski, L. Sanguinetti, and E. de Carvalho, "A signal processing perspective with wireless applications", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 39, no. 2, pp. 135-158, March 2022.
- [6] T. J. Cui, M. Q. Qi, X. Wan, J. Zhao, and Q. Cheng, "Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials," *Light: Sci. Appl.*, vol. 3, no. 10, p. e218-e218, article 218, Oct. 2014.
- [7] P. Nayeri, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, *Reflectarray Antennas: Theory, Designs, and Applications*. 1st edition. Hoboken, New Jersey:Wiley : IEEE Press, 2018.
- [8] L. Zhang et al., "Space-time-coding digital metasurfaces," *Nature Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 4334, 2018.
- [9] H. Yang et al., "Design of resistor-loaded reflectarray elements for both amplitude and phase control," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 1159–1162, Nov. 2017.
- [10] T.S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice / Theodore S. Rappaport*. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002. Print. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Ser.
- [11] Ö. Özdoğan, E. Björnson, E. G. Larsson, "Intelligent Reflecting Surfaces: Physics, Propagation, and Pathloss Modeling," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 581-585, May 2020.
- [12] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, and Z. Gaburro, "Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction," *Science*, vol. 334, no. 6054, pp. 333–337, 2011.
- [13] V. S. Asadchy, M. Albooyeh, S. N. Tsvetkova, A. Díaz-Rubio, Y. Ra'di, and S. A. Tretyakov, "Perfect control of reflection and refraction using spatially dispersive metasurfaces," *Phys. Rev. B*, vol. 94, p. 075142, Aug 2016.
- [14] D. Martinez-De-Rioja, J. A. Encinar, E. Martinez-De-Rioja, Á. F. Vaquero and M. Arrebola, "A Simple Beamforming Technique for Intelligent Reflecting Surfaces in 5G Scenarios," 2022 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Dublin, Ireland, 2022, pp. 249-252, doi: 10.1109/iWAT54881.2022.9811009.
- [15] E. Björnson, Ö. Özdoğan, E. G. Larsson, "Intelligent Reflecting Surface vs. Decode-and-Forward: How Large Surfaces Are Needed to Beat Relaying?," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 244-248, February 2020.

- [16]E. Martinez-de-Rioja, Á. F. Vaquero, M. Arrebola, E. Carrasco, J. A. Encinar, S. Salman and M. Achour, "Enhancement of 5G Millimeter-Wave Coverage in Indoor Scenarios by Passive Shaped-Beam Reflectarray Panels," 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Madrid, Spain, 2022, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9769652.
- [17]E. Martinez-de-Rioja, Á. F. Vaquero, M. Arrebola, E. Carrasco, J. A. Encinar and M. Achour, "Passive Dual-Polarized Shaped-Beam Reflectarrays to Improve Coverage in Millimeter-Wave 5G Networks," 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, Germany, 2021, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411196.
- [18]G. Araniti, M. Condoluci, M. Cotronei, A. Iera, and A. Molinaro, "A solution to the multicast subgroup formation problem in lte systems," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 4, no. 2, pp. 149–152, 2015.
- [19]A. de la Fuente, G. Interdonato, and G. Araniti, "User Subgrouping and Power Control for Multicast Massive MIMO Over Spatially Correlated Channels," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 68, no. 4, pp. 834–847, 2022.
- [20]N. Chukhno, O. Chukhno, S. Pizzi, A. Molinaro, A. Iera, and G. Araniti, "Efficient Management of Multicast Traffic in Directional mmWave Networks," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 67, no. 3, pp. 593–605, 2021.
- [21]Cisco. 2016. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015-2020. (2016). Retrieved 2017-05-26 from <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/index.html>
- [22]G. Brancati, E. F. Pupo, O. Chukhno, N. Chukhno, M. Murrioni, and G. Araniti, "Reconfigurable Intelligent Surface Deployment and Orientation in Beyond 5G Multicast Networks" IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Vol.2023-, p.1-6,2023.
- [23]S. Mangiante, G. Klas, A. Navon, Z. GuanHua, J. Ran and M. D. Silva, "VR is on the Edge: How to Deliver 360° Videos in Mobile Networks" ,VR/AR Network '17: Proceedings of the Workshop on Virtual Reality and Augmented Reality NetworkAugust, pp.30–35, SIGCOMM '17: ACM SIGCOMM 2017 Conference Los Angeles CA USA 25 August 2017.