



**Análisis del desempeño de un sistema de comunicaciones empleando arreglos de antenas basados en superficies inteligentes**

Salazar Argoti, Irina Isabel

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones

Ing. Olmedo Cifuentes, Gonzalo Fernando. Ph.D.

14 de agosto del 2023



## Plagiarism and AI Content Detector Report

### Tesis Escrito - Salazar Isabel.pdf

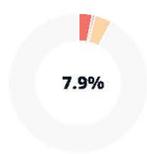
#### Scan details

Scan time:  
August 14th, 2023 at 13:46 UTC

Total Pages:  
60

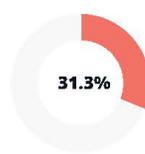
Total Words:  
14837

#### Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	3.2%	476
Minor Changes	0.6%	90
Paraphrased	4%	600
Omitted Words	0%	0

#### AI Content Detection



Text coverage		Words
AI text	31.3%	4637
Human text	68.7%	10200

[Learn more](#)

#### Alerts: (1)

##### Cross Language: Same Document Language

Submitted language and cross-language text are the same language. No credits were used.

2/5 Severity



#### Plagiarism Results: (80)

**Unmanned Aerial Vehicle-Assisted Reconfigurable I...** 1%

<https://www.springerprofessional.de/en/unmanned-aerial-ve...>

...

**Unmanned-Aerial-Vehicle-Cellular-Communications...** 0.8%

<https://download.bibis.ir/books/aerospace/communications/...>

Unmanned System Technologies Agbotiname Lucky Imoize · Sardar M. N. Islam · T. Poongodi · Lakshmana Kumar Ramasamy · B. V. V. Siva Prasa...





**Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones**

**Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones**

### **Certificación**

Certifico que el trabajo de titulación: **“Análisis del desempeño de un sistema de comunicaciones empleando arreglos de antenas basados en superficies inteligentes”** fue realizado por la señorita **Salazar Argoti Irina Isabel**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 14 de agosto del 2023**



**Olmedo Cifuentes Gonzalo Fernando**

C. C.: 1711696342



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

**Responsabilidad de Autoría**

Yo, **Salazar Argoti Irina Isabel**, con cédula de ciudadanía n°1726295486, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis del desempeño de un sistema de comunicaciones empleando arreglos de antenas basados en superficies inteligentes** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 14 de agosto del 2023

**Salazar Argoti Irina Isabel**

C.C.: 1726295486



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

**Autorización de Publicación**

Yo **Salazar Argoti Irina Isabel**, con cédula de ciudadanía n°1726295486, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Título: Análisis del desempeño de un sistema de comunicaciones empleando arreglos de antenas basados en superficies inteligentes** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 14 de agosto del 2023

**Salazar Argoti Irina Isabel**

C.C.: 1726295486

### **Dedicatoria**

El presente trabajo lo dedico a mis hermanos quienes son mis pilares fundamentales y mi motor de vida en cada paso que damos juntos. A mis padres por apoyarme en esta locura que fue la ingeniería. De igual forma, a mis abuelitos, tías y primos que, con tu sabiduría y apoyo, confiando en mí aun cuando lo veía perdido.

Por último, a mis seres queridos y amigos muy especiales que formaron un gran equipo conmigo en esta etapa.

## **Agradecimiento**

Agradezco primero a mis hermanos por estar siempre presentes en cada paso que daba, siendo mis pilares, mis sentidos y sobre todo mi motor, los amo mucho y todo esto es para y por ustedes, ¡mis “changos” vamos por más! También agradezco a mis padres que han hecho todos los esfuerzos necesarios para lograr ser lo que soy ahora, gracias por invertir en mí.

A mis familiares cercanos, aquellos que no dejaron de creer en mí, apoyarme en todo momento, dándome consejos o desvelándose conmigo. De igual manera, a mi “gran equipo”, gracias por hacer de esta etapa más amena juntos, logrando cosas que no imagine y sobre todo por hacerme creer en todo sentido sin dejarme sola en el camino.

De igual manera, agradezco a mis amigos, a aquellos con los que empezamos y terminamos esta etapa, gracias por cada memoria y aprendizaje juntos. A los docentes de la carrera, que dejaron una gran huella en mí.

Por último, a mis tutores de tesis, el Ing. Gonzalo Olmedo por permitirme desarrollar este tema con toda predisposición y apoyo. Y al Ing. Carvajal Henry, gracias por creer en mis habilidades y en mis conocimientos semana a semana.

## Índice de Contenido

<b>Dedicatoria .....</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>7</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>12</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo I.....</b>	<b>14</b>
<b>Planteamiento del problema de investigación.....</b>	<b>14</b>
<b>Antecedentes.....</b>	<b>14</b>
<b>Justificación .....</b>	<b>16</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo II.....</b>	<b>18</b>
<b>Marco Teórico .....</b>	<b>18</b>
<b>Superficie Reflectante Inteligente (RIS - "Intelligent Reflecting Surface").....</b>	<b>21</b>
<b>Grandes Superficies Inteligentes (LIS - "Large Intelligent Surface").....</b>	<b>27</b>
<b>LIS vs. RIS.....</b>	<b>33</b>
<b>Desafíos de las comunicaciones inalámbricas y el papel de las superficies inteligentes (RIS).....</b>	<b>35</b>
<b>Fundamentos de las superficies inteligentes (RIS) y su papel en la mejora de las comunicaciones inalámbricas .....</b>	<b>36</b>
<b>Diseño de sistemas de comunicación con superficies inteligentes .....</b>	<b>38</b>
<b>Características por tomar en cuenta en configuración de sistemas de comunicación con superficies inteligentes .....</b>	<b>39</b>

Modulaciones en un sistema de comunicaciones .....	41
Métricas para la evaluación de rendimiento de un sistema de comunicaciones .....	42
Análisis del estado del arte .....	45
Capítulo III.....	48
Metodología.....	48
Modelo del sistema .....	49
Análisis de desempeño .....	51
Cálculo de la probabilidad de error de bit – BER.....	55
Capítulo IV .....	57
Análisis de Resultados.....	57
Potencia de Outage - OP .....	58
Probabilidad de error de bit – BER.....	63
Capítulo V .....	70
Conclusiones y Recomendaciones.....	70
Conclusiones.....	70
Recomendaciones.....	72
Trabajos futuros .....	72
Bibliografía .....	74

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1 Características de la RIS</b> .....	24
<b>Tabla 2 Características de LIS</b> .....	31
<b>Tabla 3 Cuadro comparativo entre LIS y RIS</b> .....	33
<b>Tabla 4 Parámetros de entrada generales para el caso de la probabilidad de outage (OP)</b> .....	58
<b>Tabla 5 Variación del parámetro <math>P_t</math></b> .....	59
<b>Tabla 6 Variación de los parámetros <math>d_1</math> y <math>d_2</math></b> .....	60
<b>Tabla 7 Variación de los parámetros <math>\alpha_{txR}</math> y <math>\alpha_{Rrx}</math></b> .....	62
<b>Tabla 8 Parámetros de entrada generales para el caso de la probabilidad de error de bit (BER)</b> .....	64
<b>Tabla 9 Variación del parámetro N</b> .....	64
<b>Tabla 10 Variación de los parámetros <math>d_1</math> y <math>d_2</math></b> .....	66
<b>Tabla 11 Variación de los parámetros <math>\alpha_{txR}</math> y <math>\alpha_{Rrx}</math></b> .....	67

## Índice de Figuras

Figura 1 Sistema de comunicaciones asistido por RIS sin línea de vista directa .....	49
Figura 2 Parámetros de entrada del sistema de comunicaciones en la simulación .....	57
Figura 3 Probabilidad de outage (OP) en función de N, parametrizado por la potencia transmitida $P_t$ .....	59
Figura 4 Probabilidad de outage (OP) en función de N, parametrizado por la distancia $d_1$ .....	60
Figura 5 Probabilidad de outage (OP) en función de N, parametrizado por la distancia $d_2$ .....	61
Figura 6 Probabilidad de outage (OP) en función de N, parametrizado pérdida de trayectoria $\alpha_{txR}$ .....	62
Figura 7 Probabilidad de outage (OP) en función de N, parametrizado pérdida de trayectoria $\alpha_{Rrx}$ .....	63
Figura 8 La probabilidad de error de bit (BER) en función de $P_t$ , parametrizada por el número de elementos de la RIS N. ....	65
Figura 9 La probabilidad de error de bit (BER) en función de $P_t$ , parametrizada por la distancia $d_1$ .....	66
Figura 10 La probabilidad de error de bit (BER) en función de $P_t$ , parametrizada por la distancia $d_2$ .....	67
Figura 11 Probabilidad de error de bit (BER) en función de $P_t$ , parametrizada pérdida de trayectoria $\alpha_{txR}$ .....	68
Figura 12 Probabilidad de error de bit (BER) en función de $P_t$ , parametrizada pérdida de trayectoria $\alpha_{rxR}$ .....	69

## Resumen

A lo largo del desarrollo de la tecnología se ha visto modificado el sistema de comunicaciones y dentro de las nuevas tecnologías ha surgido el uso de metasuperficies o de superficies inteligentes para mejorar la transmisión de la comunicación. Con el fin de identificar la metodología y el funcionamiento de un sistema de comunicaciones asistido por superficies inteligentes reconfigurables (RIS) se realiza una evaluación detallada utilizando dos parámetros clave: la potencia de fallo de transmisión (outage) y la probabilidad de error de bit (BER). Se utilizan técnicas de simulación y deducción de ecuaciones teóricas, y se emplea el software MATLAB R2021a para realizar la simulación y cálculos. El modelo del sistema es básico donde el canal de comunicaciones del enlace del emisor a la RIS y de la RIS al receptor se modela considerando desvanecimiento a través de variables aleatorias de tipo Rayleigh. Las ganancias del canal se modelan como variables aleatorias gaussianas complejas. La señal transmitida se describe como una combinación de haces reflejados por la RIS. Se realiza un análisis de desempeño en función de la potencia de outage y la probabilidad de error de bit. Finalmente, se presenta los resultados de las simulaciones realizadas en MATLAB. Se analiza la probabilidad de outage (OP) y la probabilidad de error de bit (BER) en función de diferentes parámetros. Se muestra cómo cambian estas métricas en respuesta a las variaciones en la potencia de transmisión, las distancias y los exponentes de pérdida de trayectoria. Se destaca la importancia de las Superficies Inteligentes Reconfigurables (RIS) en mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicación. Se concluye que las expresiones teóricas y las simulaciones están en buen acuerdo, lo que valida la aproximación utilizada y la metodología del análisis. Además, se recomienda considerar diferentes parámetros de diseño para optimizar el rendimiento del sistema y adaptarse a diferentes escenarios de comunicación.

*Palabras clave:* Superficies Inteligentes Reconfigurables, potencia de outage, probabilidad de error de bit.

### **Abstract**

Throughout the development of technology, the communication system has been modified, and within the realm of new technologies, the use of metasurfaces or smart surfaces has emerged to enhance communication transmission. In order to comprehend the methodology and operation of a Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)-assisted communication system, a detailed evaluation is conducted using two key parameters: Transmission Outage Power and Bit Error Rate (BER). Simulation techniques and deduction of theoretical equations are employed, with MATLAB R2021a software being utilized for simulations and calculations. The system model is basic, where the communication channel from the sender to the RIS and from the RIS to the receiver is modeled considering fading through Rayleigh-distributed random variables. Channel gains are modeled as complex Gaussian random variables. The transmitted signal is described as a combination of beams reflected by the RIS. A performance analysis is carried out based on transmission outage power and bit error rate. Ultimately, the results of the simulations conducted in MATLAB are presented. The probability of outage (OP) and bit error rate (BER) are analyzed in relation to different parameters. The changes in these metrics in response to variations in transmission power, distances, and path loss exponents are demonstrated. The significance of Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) in enhancing communication system performance is underscored. It is concluded that the theoretical expressions and simulations are in good agreement, validating the utilized approach and analytical methodology. Furthermore, considering different design parameters is recommended to optimize system performance and adapt to different communication scenarios.

*Keywords:* Reconfigurable Intelligent Surface, outage power, Bit Error Rate.

## Capítulo I

### Planteamiento del problema de investigación

#### Antecedentes

Mediante el paso de las décadas, las comunicaciones inalámbricas móviles han evolucionado paso acelerado, con su inicio a finales de los años 1970 hasta la actualidad son gran parte del avance tecnológico en el mundo. Lo que se conoce como la Generación (G) inalámbrico celular, es el cambio que sufre la comunicación inalámbrica en sus características primales como lo son: el sistema, la frecuencia, la tecnología y la velocidad (Gawas, 2015), siendo esta la última la que caracteriza principalmente a cada una de las generaciones. El cambio más importante es cuando la tecnología móvil celular empezó a hacer uso de servicios de datos de Internet, mismo que se dio a inicios del 2005 en la tercera y cuarta generación, 3G y 4G respectivamente. Esto permitió el desarrollo de una amplia biblioteca de aplicaciones de entretenimiento e información a las cuales se tiene acceso en cualquier momento y geolocalización.

La tercera generación 3G, también nombrado Servicio Universal de Telecomunicaciones Móviles UMTS (en inglés “Universal Mobile Telecommunications System”) aporta al envío de los datos a través de la tecnología de conmutación de paquetes (en inglés “Packet Switching”). Su transmisión de audio y video es evidentemente mejor a comparación de su generación anterior que utilizaba circuitos de conmutación. Se inicia la admisión de videoconferencias y se configuran los soportes para TV transmitida por internet, IPTV (en inglés “TV through the Internet”) (Kachhavay & Thakare, 2014; Mukhopadhyay et al., 2016).

La multiplexación por división de código, acceso múltiple por división de código o CDMA (en inglés “Code Division Multiple Access”) (Dubendorf, 2003), misma que permite el acceso de múltiples emisores al envío de información de manera simultánea. CDMA es la base del inicio

de la tecnología 3G, también permitió desarrollar aplicaciones como YouTube y GPS como Google Maps. Al operar en un rango de 2100 MHz con un ancho de banda de 15-20 MHz tiene acceso al servicio de Internet de alta velocidad (Mukhopadhyay et al., 2016).

4G o cuarta generación brinda más servicios de banda ancha basado en el Protocolo de Internet-IP (en inglés "Internet Protocol"), el propósito es brindar alta calidad, alta velocidad y capacidad con seguridad y bajo costo de servicios de voz y datos, multimedia e Internet sobre IP. Los terminales del usuario deben ser multimodo, y poder seleccionar el sistema de destino, por esto algunas de las tecnologías aplicadas son: OFDM (Multiplexación por división de frecuencia ortogonal), antenas inteligentes para múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), IPv6 (Protocolo de Internet versión 6), VoIP (Protocolo de voz sobre Internet), OFDM (Multiplexación por división de frecuencia ortogonal), Sistema de radio definido por software (SDR) (Kachhavay & Thakare, 2014; Mukhopadhyay et al., 2016).

Debido a la necesidad de altas ganancias en el cambio de generaciones, se presentan en consecuencia la absorción y atenuación atmosférica mismas que se buscan solucionar mediante la configuración de las antenas de manera que los elementos de la matriz den una alta ganancia (Naqvi et al., 2019). Dentro de las soluciones se observan el conjunto de antenas, de la cual, su característica de antenas inteligentes ha sido empleada con el propósito de abastecer el aumento de transmisión de datos que se necesita garantizar (Reicino Prieto, 2017). Se han propuesto arreglos de antenas como la matriz PIFA conectada a MIMO de 4 elementos que busca garantizar las 28 GHz que se emplea en 5G con una estructura con dimensiones de 130 mm × 68 mm × 0.76 mm (Naqvi et al., 2019).

Antenas con módulos 4G y 5G conocidas como híbridas, son utilizadas con un arreglo MIMO de 8x8 en lugar de una sola antena. Para 4G se utilizan 2 antenas con configuración MIMO 2x2 que trabaja en las bandas operativas GSM850/900/1800/1900, UMTS2100 y LTE2300/2500. Para 5G se hace uso de 8 elementos de la antena configurados MIMO 8x8 que

operan en la banda de 3,5 GHz (Jha & Sharma, 2021). El conjunto de las antenas busca tener un mejor rendimiento de los sistemas de comunicaciones, donde se debe poder eliminar las interferencias co-canal (Naqvi et al., 2019).

### **Justificación**

Debido a la acelerada evolución de la tecnología, en la actualidad, vemos dispositivos de muy alta gama con acceso a una red inalámbrica, por esto se ha visto la necesidad de mejorar la comunicación inalámbrica comparado a su última versión implementada. En la actualidad contamos con la tecnología conocida como 5G (Release 18 - 3GPP). La mayor diferencia que se espera es el acceso a internet de ultra velocidad, debido a la necesidad creada por la sociedad en los últimos 4 años donde, se crearon aplicaciones específicas como: el teletrabajo, telemedicina, vehículos autónomos, y más.

En 6G se ha observado la posibilidad de una tecnología que provee a esta generación de un medio para transmisión a altas velocidad con cambios de fase en sus ondas incidentes, mismo que hace la transmisión a través de Superficies Inteligentes Reconfigurables – RIS (Basar, 2019; Gawas, 2015; Jian et al., 2022; Mitra et al., 2021). Esta tecnología es actualmente estudiada por varios grupos de ingeniería que buscan potenciar la transmisión en las comunicaciones inalámbricas. En 2018 la Asociación China de Estandarización de las Comunicaciones (CCSA), presentó dos artículos de estudio donde se observan la visión y los requisitos que se necesita para la tecnología 6G y las claves para lograr su objetivo principal, tomando en cuenta los desafíos que esta tecnología enfrentará, como: el requerimiento de ultra altas velocidades, redes enormes y complejas, muchos más dispositivos de conexión (Alghamdi et al., 2020; Ijala et al., 2021).

RIS es una tecnología actual que representa el concepto de “entornos de radio inteligentes”, el objetivo de esta tecnología es tener el control de entorno de propagación, de esta manera asegurar mejor calidad de servicio y velocidad de transmisión (Makarfi et al.,

2020). Este tipo de tecnología es parte de varios temas innovadores que buscan tomar forma en un futuro en la tecnología 6G (Jian et al., 2022).

Este proyecto busca obtener un modelo básico de sistema de comunicación asistido por RIS, donde su interacción es: emisor (txR) – RIS – receptor (rxR). Este modelo permite la comprensión más básica del funcionamiento de una RIS en un sistema de comunicación, obteniendo las fórmulas matemáticas teóricas que permiten el análisis de la potencia de *outage* ( $P_o$ ) y la probabilidad de error de bit (*BER*).

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Analizar el desempeño de un sistema de comunicaciones empleando arreglos de antenas basados en superficies inteligentes.

### ***Objetivos Específicos***

- Describir el estado del arte y fundamentos de un sistema de comunicación en el cual se emplean arreglos de antenas basados en superficies inteligentes.
- Analizar la estructura matemática que permite evaluar el desempeño del sistema RIS a través de la potencia de outage y la probabilidad de error de bit.
- Diseñar un modelo básico de sistema de comunicaciones basado en RIS para su interpretación y análisis matemático.
- Simular y analizar el desempeño del sistema de comunicación inalámbrica asistido por RIS diseñado.

## Capítulo II

### Marco Teórico

En el mundo actual, las comunicaciones inalámbricas desempeñan un papel fundamental en nuestra sociedad interconectada. Con el rápido crecimiento de dispositivos móviles, Internet de las cosas (IoT) y aplicaciones de transmisión de datos, existe una creciente demanda de sistemas de comunicación inalámbrica más eficientes y confiables. Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad de usuarios y dispositivos conectados, surgen diversos desafíos que deben ser abordados para garantizar un rendimiento óptimo del sistema. Esta investigación se centra en el uso de superficies inteligentes como una solución potencial para mejorar las comunicaciones inalámbricas en términos de capacidad, cobertura y eficiencia (Basar et al., 2019).

Las redes de telefonía móvil son sistemas de comunicación inalámbrica que permiten la transmisión de voz y datos entre dispositivos móviles, como teléfonos celulares y tabletas. Estas redes están diseñadas para brindar cobertura y conectividad a los usuarios en áreas geográficas específicas. Existen diferentes tecnologías de redes de telefonía móvil, las más conocidas son:

- **Redes 2G (segunda generación):** Estas fueron las primeras redes digitales de telefonía móvil y ofrecían principalmente servicios de voz. Utilizaban tecnologías como GSM (Global System for Mobile Communications) y CDMA (Code Division Multiple Access).
- **Redes 3G (tercera generación):** Estas redes introdujeron servicios de datos de alta velocidad, lo que permitió la transmisión de información más allá de las llamadas de voz. Las tecnologías 3G incluyen UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) y CDMA2000. Estas redes permitieron la transferencia de datos a velocidades más

altas, lo que facilitó la navegación por Internet, el envío de mensajes multimedia y la transmisión de video en tiempo real.

- **Redes 4G (cuarta generación):** Conocidas como redes de cuarta generación, las redes 4G ofrecen velocidades de datos aún más rápidas y mayor capacidad en comparación con las redes 3G. Estas redes son ideales para servicios de transmisión de video de alta definición, juegos en línea y otras aplicaciones que requieren una conexión rápida y estable.

Estas redes se desarrollaron para brindar velocidades de datos aún más rápidas, lo que permitió la proliferación de aplicaciones y servicios basados en Internet móvil. Las tecnologías 4G incluyen LTE (Long-Term Evolution) y WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

- **Redes 5G (quinta generación):** La quinta generación de redes móviles, conocida como 5G, está diseñada para ofrecer velocidades de datos ultrarrápidas, baja latencia y capacidad masiva de conexión de dispositivos. El 5G tiene el potencial de habilitar tecnologías avanzadas como el Internet de las cosas (IoT), la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR).

- **Redes 6G (sexta generación):** El 6G es la próxima generación de redes móviles que se encuentra en etapas tempranas de investigación y desarrollo. Su objetivo es ofrecer velocidades de datos ultrarrápidas, mayor capacidad de red y menor latencia en comparación con el 5G. Se espera que alcance velocidades de terabits por segundo y tiempos de respuesta ultra bajos, permitiendo una mayor conectividad y soporte para aplicaciones avanzadas.

Además, el 6G impulsará la conectividad de dispositivos y la integración de la inteligencia artificial en las redes de comunicación. También se espera que sea más eficiente energéticamente y ofrezca una mejor cobertura en áreas remotas.

Actualmente, el 6G se encuentra en una etapa de investigación y desarrollo, por lo que no existe un estándar oficial ni una fecha de implementación comercial. Se espera que la investigación continúe en los próximos años, y tomará tiempo antes de que se establezcan los estándares y se implemente a gran escala.

Además de estas generaciones, también existen otras tecnologías y estándares que complementan o mejoran las redes móviles, como Wi-Fi y Bluetooth.

Según (Wu et al., 2022), las redes de telefonía móvil están compuestas por antenas de transmisión (estaciones base), que se distribuyen geográficamente para proporcionar cobertura a las áreas donde se encuentran los usuarios. Los dispositivos móviles se conectan a la red a través de estas estaciones base, y la comunicación se realiza mediante señales de radio.

Es importante tener en cuenta que la disponibilidad y el despliegue de tecnologías de redes móviles pueden variar según el país y el proveedor de servicios de telefonía móvil. Las redes de telefonía móvil son sistemas de comunicación inalámbrica que permiten la transferencia de datos y la realización de llamadas telefónicas utilizando dispositivos móviles como teléfonos celulares, tabletas y otros dispositivos compatibles.

Cada una de estas generaciones de redes móviles ha supuesto un avance tecnológico significativo y ha mejorado la experiencia de los usuarios al permitir una mayor velocidad de transferencia de datos y una mejor calidad de conexión en general. Es importante destacar que la disponibilidad de estas redes varía según el país y la región, ya que su despliegue y adopción dependen de factores como la infraestructura de telecomunicaciones y las políticas de los operadores de telefonía móvil.

El contexto en el que se realiza esta investigación se basa en los desafíos que enfrentan las comunicaciones inalámbricas en la actualidad. A medida que más personas dependen de dispositivos móviles y aplicaciones conectadas, la demanda de capacidad y

cobertura de red aumenta exponencialmente. Sin embargo, la infraestructura existente a menudo tiene dificultades para satisfacer esta creciente demanda, lo que resulta en una calidad de servicio deficiente y problemas de congestión de red. Estos desafíos impulsan la necesidad de explorar nuevas soluciones y tecnologías que puedan mejorar el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas (Pei et al., 2021).

Las superficies inteligentes, también conocidas como metasuperficies reconfigurables (RIS), son estructuras pasivas y reconfigurables compuestas por una matriz de elementos pequeños y controlables. Estos elementos pueden manipular la fase, la amplitud y la polarización de las ondas electromagnéticas que inciden en ellos. Al ajustar las características de las ondas reflejadas, las superficies inteligentes tienen el potencial de mejorar la calidad de la señal, aumentar la cobertura y optimizar la capacidad de las redes inalámbricas.

### **Superficie Reflectante Inteligente (RIS - "Intelligent Reflecting Surface")**

La superficie reflectante inteligente (RIS), también conocida como "intelligent reflecting surface" en inglés, es una tecnología revolucionaria en el campo de las comunicaciones electrónicas. Consiste en el uso de superficies con capacidades de reflexión controladas de manera inteligente para mejorar la calidad y eficiencia de las comunicaciones inalámbricas.

El RIS utiliza técnicas avanzadas de sensores, procesamiento de señales y materiales especiales para regular y ajustar la reflexión de las ondas electromagnéticas. Estas superficies pueden ser implementadas en edificios, vehículos, objetos y otros dispositivos para dirigir y reflejar de forma precisa las señales de radiofrecuencia.

Al controlar la reflexión de las ondas, el RIS tiene la capacidad de mejorar significativamente la cobertura, capacidad y calidad de las comunicaciones inalámbricas. Puede amplificar las señales en áreas de baja cobertura, reducir la interferencia y mejorar la velocidad de transmisión de datos (Pei et al., 2021).

La tecnología RIS es adaptable y puede ajustar la reflexión de las ondas en tiempo real, en respuesta a las condiciones cambiantes del entorno de comunicación. Esto se logra mediante el uso de sensores para recopilar información y algoritmos de procesamiento de señales para tomar decisiones óptimas sobre cómo reflejar las ondas electromagnéticas.

Además de sus beneficios en las comunicaciones inalámbricas, el RIS también tiene aplicaciones en áreas como la eficiencia energética y la reducción de la exposición a radiaciones innecesarias.

RIS es una tecnología de vanguardia en las comunicaciones electrónicas que utiliza superficies reflectantes controladas de manera inteligente para mejorar la calidad, cobertura y eficiencia de las comunicaciones inalámbricas. Al regular la reflexión de las ondas electromagnéticas, el RIS ofrece nuevas oportunidades para optimizar las redes de comunicación y mejorar la experiencia del usuario en entornos inalámbricos.

RIS se refiere a superficies que tienen la capacidad de reflejar y controlar las ondas electromagnéticas de manera inteligente, lo que proporciona beneficios significativos para las comunicaciones inalámbricas. Esta tecnología innovadora ha despertado el interés de investigadores, ingenieros y profesionales del sector, debido a su potencial para mejorar la calidad, la eficiencia y el alcance de las redes de comunicación inalámbricas.

El concepto básico del RIS implica el uso de superficies inteligentes que pueden adaptar y ajustar la reflexión de las ondas electromagnéticas para optimizar la calidad de las comunicaciones. Estas superficies pueden ser integradas en diversos entornos, como edificios, vehículos y objetos, para interactuar con las señales de radiofrecuencia. La clave de esta tecnología radica en su capacidad de modificar dinámicamente la reflexión de las ondas, lo que permite mejorar la cobertura, reducir la interferencia y aumentar la capacidad de las redes inalámbricas (Liberti & Rappaport, 1999).

El RIS se compone de múltiples elementos, conocidos como "elementos de reflexión inteligente" o simplemente "reflectores", que se distribuyen estratégicamente en la superficie deseada. Estos reflectores pueden estar hechos de materiales especiales, como metamateriales, que les confieren propiedades electromagnéticas únicas. Cada reflector puede ajustar su fase y amplitud de reflexión para manipular la dirección y la intensidad de las ondas electromagnéticas.

Para lograr este ajuste dinámico de la reflexión, los reflectores del RIS están equipados con circuitos de control y sensores que monitorean constantemente las condiciones del entorno y las señales recibidas. Estos sensores proporcionan información en tiempo real sobre la señal y el ruido, la interferencia y otros parámetros relevantes. Los circuitos de control utilizan esta información para calcular los ajustes óptimos de fase y amplitud de los reflectores, lo que permite una reflexión inteligente y adaptativa de las ondas electromagnéticas.

El funcionamiento del RIS implica una comunicación bidireccional entre el emisor y el receptor. El emisor envía señales electromagnéticas que son reflejadas y direccionadas por la superficie reflectante inteligente hacia el receptor. El receptor, a su vez, puede utilizar su propia superficie reflectante inteligente para enviar señales de retroalimentación al emisor a través de la misma ruta. Esta retroalimentación permite un ajuste continuo y optimizado de la reflexión de las ondas, lo que mejora aún más la calidad de la comunicación.

La aplicación del RIS abarca diversas áreas de las comunicaciones inalámbricas. En entornos urbanos densamente poblados, el RIS puede ayudar a superar los desafíos de cobertura y capacidad, mejorando la calidad de las señales y reduciendo la interferencia entre dispositivos. En aplicaciones de comunicación vehicular, el RIS puede optimizar la transmisión de datos y mejorar la seguridad y la eficiencia del tráfico. Además, el RIS tiene el potencial de mejorar la comunicación inalámbrica en áreas rurales o remotas, donde la infraestructura de red es limitada (Pei et al., 2021).

Además de sus beneficios para las comunicaciones inalámbricas, el RIS también ofrece ventajas en términos de eficiencia energética. Al permitir una mejor calidad de señal, se pueden minimizar las transmisiones repetidas y las pérdidas de energía asociadas. Esto puede resultar en un menor consumo de energía y una mayor vida útil de la batería en dispositivos móviles.

A pesar de las numerosas ventajas del RIS, aún existen desafíos técnicos y de implementación que deben abordarse. Uno de los desafíos clave es el diseño y la optimización de los algoritmos de control, que deben garantizar una adaptación precisa y rápida de la reflexión de las ondas en tiempo real. También es necesario considerar los efectos de múltiples fuentes de señal y la interferencia entre los reflectores del RIS. Además, la integración del RIS en dispositivos y sistemas existentes plantea desafíos de compatibilidad y costos; todas las características identificadas de la RIS se describen en la Tabla 1.

A pesar de estos desafíos, el RIS representa un avance significativo en las comunicaciones inalámbricas y tiene el potencial de transformar la forma en que nos conectamos y comunicamos. Con su capacidad de adaptar y optimizar la reflexión de las ondas electromagnéticas, el RIS allana el camino para redes inalámbricas más eficientes, confiables y de mayor calidad en diversos entornos y aplicaciones.

**Tabla 1**

*Características de la RIS*

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Función principal	Controlar la reflexión de las ondas electromagnéticas para optimizar las comunicaciones inalámbricas.
Tipo de tecnología	Superficies reflectantes inteligentes con arreglo de antenas.
Componentes	Reflectores inteligentes, antenas, circuitos de control.
Cobertura	Depende de la cantidad y disposición de los reflectores y antenas.
Capacidad de transmisión	Aumenta la calidad y eficiencia de las comunicaciones inalámbricas

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Interferencia	Puede mitigar la interferencia electromagnética entre dispositivos
Eficiencia energética	Puede mejorar la eficiencia al optimizar la calidad de señal
Adaptabilidad	Capacidad de adaptarse a cambios en el entorno y condiciones de la señal
Aplicaciones potenciales	Mejora la comunicación inalámbrica en áreas densamente pobladas
Integración	Puede integrarse en infraestructuras de comunicación inalámbrica existentes
Desafíos técnicos	Diseño y optimización de algoritmos de control para ajustar la reflexión de las ondas. Abordar la compatibilidad y costos en la integración con dispositivos y sistemas existentes

*Nota: Tomado de (Liberti & Rappaport, 1999).*

El cuadro de características la RIS, Tabla 1, en un análisis de un sistema de comunicaciones inalámbricas, basado en arreglo de antenas en superficies inteligentes, presenta las principales características y funcionalidades de esta tecnología en el contexto de las comunicaciones inalámbricas.

- **Función principal:** El RIS tiene como función principal controlar la reflexión de las ondas electromagnéticas. Actúa como una superficie reflectante inteligente que puede modificar la dirección y la intensidad de las ondas para optimizar la comunicación inalámbrica.
- **Tipo de tecnología:** El RIS se basa en el uso de superficies reflectantes inteligentes con un arreglo de antenas. Estas superficies pueden ser integradas en diferentes dispositivos y entornos para mejorar las comunicaciones inalámbricas.
- **Componentes:** Los componentes principales del RIS incluyen los reflectores inteligentes, las antenas y los circuitos de control. Los reflectores inteligentes son responsables de ajustar la reflexión de las ondas electromagnéticas, mientras que las antenas transmiten y reciben las señales.

- Cobertura: La cobertura del RIS depende de la cantidad y disposición de los reflectores y antenas. El arreglo de antenas en la superficie inteligente permite una distribución estratégica de la cobertura para optimizar la comunicación en diferentes áreas.
- Capacidad de transmisión: La implementación del RIS puede aumentar la calidad y eficiencia de las comunicaciones inalámbricas. Al controlar la reflexión de las ondas, se mejora la señal y se reduce la interferencia, lo que resulta en una mayor capacidad de transmisión de datos.
- Interferencia: El RIS puede mitigar la interferencia electromagnética entre dispositivos, lo que contribuye a una comunicación más clara y confiable.
- Eficiencia energética: La tecnología RIS puede mejorar la eficiencia energética al optimizar la calidad de la señal. Esto puede resultar en un menor consumo de energía y una mayor duración de la batería en dispositivos móviles.
- Adaptabilidad: El RIS tiene la capacidad de adaptarse a cambios en el entorno y condiciones de la señal. Puede ajustar dinámicamente la reflexión de las ondas para optimizar la comunicación en tiempo real.
- Aplicaciones potenciales: El RIS tiene el potencial de mejorar la comunicación inalámbrica en áreas densamente pobladas, así como en entornos con alta demanda de conectividad.
- Integración: El RIS puede integrarse en infraestructuras de comunicación inalámbrica existentes, lo que facilita su implementación y aprovecha las redes de comunicaciones ya establecidas.
- Desafíos técnicos: Entre los desafíos técnicos del RIS se encuentran el diseño y optimización de algoritmos de control para ajustar la reflexión de las ondas de manera óptima. Además, se deben abordar cuestiones de compatibilidad y costos en la integración con dispositivos y sistemas existentes.

RIS en un sistema de comunicaciones inalámbricas. Esta tecnología muestra un gran potencial para mejorar la calidad y eficiencia de la comunicación inalámbrica al controlar la reflexión de las ondas electromagnéticas de manera inteligente y adaptativa (Basar et al., 2019).

### **Grandes Superficies Inteligentes (LIS - "Large Intelligent Surface")**

La tecnología de la superficie reflectante inteligente (LIS, por sus siglas en inglés, "Large Intelligent Surface") es una evolución de la tecnología RIS (intelligent reflecting surface) que ha llamado la atención en el campo de las comunicaciones electrónicas. Al igual que el RIS, el LIS se basa en el uso de superficies inteligentes para controlar la reflexión de las ondas electromagnéticas y mejorar las comunicaciones inalámbricas.

El LIS se caracteriza por tener una mayor escala y alcance que el RIS, lo que significa que las superficies reflectantes inteligentes utilizadas en LIS son significativamente más grandes y abarcan áreas más extensas. Esto permite una mayor capacidad de manipulación y direccionamiento de las ondas electromagnéticas en aplicaciones de comunicaciones a gran escala.

El concepto básico del LIS sigue siendo similar al del RIS. Consiste en implementar una serie de elementos reflectores inteligentes distribuidos en la superficie deseada. Estos reflectores, al igual que en el RIS, pueden ajustar su fase y amplitud de reflexión para controlar la dirección y la intensidad de las ondas electromagnéticas (Liberti & Rappaport, 1999).

Para lograr este control avanzado de la reflexión, los reflectores del LIS están equipados con circuitos de control y sensores que monitorean y procesan la información sobre las condiciones del entorno y las señales recibidas. La principal diferencia con el RIS radica en la mayor complejidad y capacidad de estos circuitos y sensores, lo que permite manejar áreas más grandes y aplicaciones de mayor escala.

El funcionamiento del LIS sigue involucrando una comunicación bidireccional entre el emisor y el receptor. El emisor envía las señales electromagnéticas que son reflejadas y direccionadas por la superficie reflectante inteligente hacia el receptor. La reflexión inteligente y adaptativa de las ondas electromagnéticas por parte del LIS mejora la calidad de la comunicación, optimiza la cobertura y reduce la interferencia.

El LIS tiene un gran potencial en aplicaciones de comunicación a gran escala, como en entornos urbanos densamente poblados, estadios, eventos masivos o zonas industriales extensas. Al utilizar superficies reflectantes inteligentes de mayor tamaño, se pueden mejorar las comunicaciones inalámbricas en áreas donde la capacidad y la calidad de la señal son cruciales.

Además de sus ventajas en comunicaciones inalámbricas, el LIS también puede tener aplicaciones en otros campos, como en sistemas de radar, detección y localización, así como en la optimización de la eficiencia energética en redes de comunicación.

A pesar de sus prometedoras ventajas, la tecnología LIS aún se encuentra en una fase de investigación y desarrollo. Se requieren esfuerzos adicionales para abordar los desafíos técnicos y de implementación, incluyendo la escalabilidad, la complejidad de los circuitos y sensores, y la compatibilidad con sistemas existentes.

LIS se refiere a superficies que tienen la capacidad de reflejar, modular y dirigir la luz de manera inteligente, lo que permite una transmisión de datos eficiente y de alta velocidad.

El concepto básico del LIS implica el uso de superficies equipadas con elementos ópticos y controladores, que permiten manipular la luz incidente de manera dinámica. Estos elementos ópticos pueden ser reflectores, difractores o moduladores que, junto con los

controladores, ajustan la dirección, la intensidad y las características ópticas de la luz que se refleja o se transmite a través de la superficie.

En un sistema de comunicación óptica basado en LIS, el emisor de luz envía señales ópticas que son moduladas y dirigidas por la superficie inteligente de iluminación hacia el receptor. La superficie del LIS puede modular la luz incidente según la información que se desea transmitir, como datos digitales o señales analógicas. El receptor, a su vez, puede detectar y decodificar la información contenida en la luz reflejada o transmitida, permitiendo la comunicación óptica entre los dispositivos. El LIS ofrece varias ventajas en las comunicaciones ópticas, así:

En primer lugar, proporciona un mayor ancho de banda y una mayor capacidad de transmisión en comparación con las tecnologías convencionales. Esto se debe a la capacidad del LIS de modular la luz en diferentes frecuencias y amplitudes, permitiendo la transmisión de datos a alta velocidad. Además, el LIS ofrece una mayor flexibilidad y adaptabilidad en la configuración de la red, ya que las superficies pueden ser reconfiguradas y ajustadas según las necesidades de comunicación.

Otra ventaja clave del LIS es su capacidad para mitigar los problemas de atenuación y dispersión de la luz en la transmisión óptica. La superficie inteligente puede dirigir y enfocar la luz de manera precisa, lo que reduce las pérdidas de señal y mejora la calidad de la comunicación. Además, el LIS puede adaptarse a cambios en el entorno, como cambios en la geometría o la presencia de obstáculos, para optimizar la transmisión de luz.

El LIS tiene aplicaciones potenciales en diversas áreas, como las comunicaciones en interiores, la transmisión de datos en entornos de alta densidad, la comunicación entre dispositivos móviles y la conectividad en redes de sensores. Además, el LIS puede integrarse

con sistemas de iluminación existentes, lo que permite una doble funcionalidad en términos de iluminación y comunicaciones ópticas (Liberti & Rappaport, 1999).

Aunque el LIS presenta numerosas ventajas y promesas, también presenta desafíos técnicos que deben abordarse. Entre ellos se encuentran la optimización de la eficiencia y la uniformidad de la reflexión y la transmisión de la luz, la mitigación de las interferencias y la garantía de una alta confiabilidad en los sistemas de comunicación.

La tecnología de la superficie inteligente de iluminación (LIS) ofrece una nueva perspectiva en las comunicaciones ópticas al permitir la manipulación y dirección inteligente de la luz. Con su capacidad para modular y dirigir la luz de manera dinámica, el LIS ofrece ventajas en términos de ancho de banda, capacidad de transmisión y adaptabilidad. Con aplicaciones potenciales en diversas áreas, el LIS tiene el potencial de mejorar la eficiencia y la calidad de las comunicaciones ópticas en entornos diversos.

En conclusión, la tecnología de la superficie reflectante inteligente (LIS) representa una evolución en las comunicaciones inalámbricas. Al permitir el control avanzado de la reflexión de las ondas electromagnéticas en áreas más grandes, el LIS tiene el potencial de mejorar significativamente la calidad, la capacidad y la eficiencia de las redes de comunicación en aplicaciones de gran escala. Sin embargo, aún se requiere una investigación adicional para llevar esta tecnología a su pleno potencial y realizar implementaciones prácticas en el mundo real (Liberti & Rappaport, 1999).

**Tabla 2***Características de LIS*

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de Tecnología	Superficie reflectante inteligente que ajusta la reflexión de ondas electromagnéticas.
Función Principal	Control de la reflexión de las ondas electromagnéticas para optimizar las comunicaciones inalámbricas.
Componentes	Reflectores y circuitos de control para ajustar la reflexión de las ondas.
Adaptabilidad	Capacidad de adaptarse a cambios en el entorno y condiciones de la señal.
Cobertura	Depende de la cantidad y disposición de los reflectores.
Interferencia	Puede mitigar la interferencia entre dispositivos.
Ancho de Banda	Puede ser alto o variable según la configuración.
Eficiencia Energética	Puede mejorar la eficiencia al optimizar la calidad de señal.
Aplicaciones Potenciales	Mejora de la calidad y eficiencia de comunicación inalámbrica en áreas densamente pobladas.
Integración	Puede integrarse en infraestructuras de comunicación existentes.
Desafíos Técnicos	Diseño y optimización de algoritmos de control para ajustar la reflexión de las ondas. Abordar la compatibilidad y costos en la integración con dispositivos y sistemas existentes

*Nota: Tomado de (Liberti & Rappaport, 1999).*

El sistema de comunicaciones inalámbrico basado en la tecnología de superficie reflectante inteligente (LIS - "Large Intelligent Surface") utiliza reflectores y circuitos de control para ajustar de manera inteligente la reflexión de las ondas electromagnéticas. Esta tecnología tiene como función principal mejorar las comunicaciones inalámbricas al optimizar la calidad de señal y mitigar la interferencia entre dispositivos.

La adaptabilidad del LIS le permite adaptarse a cambios en el entorno y en las condiciones de la señal, lo que mejora la eficiencia y eficacia de las comunicaciones. La cobertura del LIS depende de la cantidad y disposición de los reflectores, lo que permite una configuración personalizada para diferentes necesidades (Basar et al., 2019).

Una de las ventajas del LIS es su capacidad para mitigar la interferencia entre dispositivos, lo que resulta en una comunicación más eficiente y confiable. Además, la tecnología LIS puede lograr un alto ancho de banda o variar según la configuración utilizada.

En términos de eficiencia energética, el LIS puede mejorar la eficiencia al optimizar la calidad de señal, lo que ayuda a reducir el consumo de energía y prolongar la vida útil de las baterías en dispositivos móviles.

Las aplicaciones potenciales del LIS incluyen la mejora de la calidad y eficiencia de la comunicación inalámbrica en áreas densamente pobladas, donde la infraestructura de red puede ser limitada. Además, esta tecnología puede integrarse en infraestructuras de comunicación existentes, lo que facilita su implementación y adopción.

Algunos de los desafíos técnicos asociados con el LIS incluyen el diseño y optimización de algoritmos de control para ajustar de manera precisa la reflexión de las ondas y garantizar una comunicación óptima. También es necesario abordar la compatibilidad y los costos en la integración con dispositivos y sistemas existentes para asegurar una implementación exitosa.

En resumen, el LIS es una tecnología prometedora que puede mejorar significativamente la calidad y eficiencia de las comunicaciones inalámbricas mediante el control inteligente de la reflexión de las ondas electromagnéticas. Su capacidad de adaptarse a diferentes entornos y necesidades lo convierte en una opción atractiva para optimizar los sistemas de comunicación inalámbrica en diversas aplicaciones (Pei et al., 2021).

## LIS vs. RIS

**Tabla 3**

*Cuadro comparativo entre LIS y RIS*

<b>Aspecto</b>	<b>LIS (Grande Superficie Inteligente)</b>	<b>RIS (Superficie Reflectante Inteligente)</b>
Funcionalidad.	Control de la reflexión de las ondas electromagnéticas para optimizar las comunicaciones inalámbricas. Refleja y dirige las ondas electromagnéticas para mejorar las comunicaciones inalámbricas.	
Medio de transmisión.	Comunicación inalámbrica. Utiliza ondas electromagnéticas para la transmisión de señales.	
Componentes	Está compuesta por elementos pasivos, como antenas, que pueden ajustar sus propiedades de reflexión.	
Ancho de banda	Alto, mayor capacidad de transmisión de datos. Ofrece un alto ancho de banda y capacidad de transmisión.	Puede ser alto o variable según la configuración. Puede mejorar la capacidad y el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas.
Cobertura.	Al ser grande, puede tener una cobertura significativa para influir en la propagación de señales., especialmente en entornos exteriores y grandes distancias.	Depende de la cantidad y disposición de los reflectores. Puede mejorar la cobertura en áreas con mala señal o con interferencia.
Interferencia.	Baja, menor susceptibilidad a interferencias.	Puede mitigar la interferencia entre dispositivos. Puede ayudar a reducir la interferencia y mejorar la calidad de las señales.
Eficiencia energética.	Al optimizar la reflexión de señales, puede mejorar la eficiencia energética en sistemas de comunicación inalámbrica.	Puede contribuir a una mayor eficiencia energética al mejorar la calidad de las señales y reducir transmisiones repetidas.
Adaptabilidad	Capacidad de adaptarse a cambios en el entorno y condiciones de la señal	Flexibilidad para reconfigurar y ajustar la superficie según necesidades de comunicación
Aplicaciones potenciales	Mejorar la cobertura de redes inalámbricas en grandes espacios, comunicaciones en entornos industriales o urbanos, y aplicaciones de Internet de las cosas (IoT).	Mejora de la calidad y eficiencia de comunicación inalámbrica en áreas densamente pobladas
Integración	Puede integrarse en infraestructuras de comunicación existentes	
Desafíos técnicos	Optimización de la eficiencia y uniformidad de la reflexión. Mitigación de interferencias y garantía de alta confiabilidad en los sistemas de comunicación óptica	Diseño y optimización de algoritmos de control para ajustar la reflexión de las ondas. Abordar la compatibilidad y costos en la integración con dispositivos y sistemas existentes

<b>Aspecto</b>	<b>LIS (Grande Superficie Inteligente)</b>	<b>RIS (Superficie Reflectante Inteligente)</b>
Flexibilidad	Permite una mayor flexibilidad y adaptabilidad en la configuración de la red.	Ofrece flexibilidad en términos de dirección y ajuste de la reflexión de las ondas.

Luego el cuadro comparativo resalta las características clave de las tecnologías LIS y RIS, mostrando cómo ambas pueden mejorar las comunicaciones inalámbricas mediante el uso de superficies inteligentes. Mientras el LIS se enfoca en la manipulación de grandes cantidades de reflectores para la comunicación, el RIS controla la reflexión de las ondas electromagnéticas para optimizar la comunicación inalámbrica en superficies reconfigurables. Ambas tecnologías presentan potencial para mejorar la calidad, eficiencia y adaptabilidad de las redes de comunicaciones inalámbricas en diversos entornos y aplicaciones (Liberti & Rappaport, 1999).

Es importante tener en cuenta que LIS y RIS son tecnologías similares que se aplican en diferentes contextos. Mientras que LIS se enfoca en la transmisión de datos a gran escala, RIS se centra en mejorar las comunicaciones inalámbricas mediante la reflexión y dirección de ondas electromagnéticas a escala moderada. Ambas tecnologías tienen su propia utilidad y pueden complementarse en ciertos escenarios para ofrecer mejoras en la calidad y capacidad de las comunicaciones. Las diferencias más resaltables son:

- **Tamaño y Cobertura:**

LIS es una superficie más grande en comparación con RIS. Por lo tanto, su área de cobertura es significativamente más extensa, lo que le permite influir en la propagación de señales en áreas más amplias.

RIS, aunque también es una superficie inteligente, es más pequeña en comparación con LIS y, por lo tanto, tiene una cobertura más limitada.

- **Adaptabilidad:**

LIS generalmente está diseñada para ser más estática y no cambia su configuración con frecuencia. Por lo tanto, su adaptabilidad a diferentes entornos y condiciones puede ser relativamente menor.

RIS, como su nombre indica, es reconfigurable, lo que significa que puede ajustar sus propiedades de reflexión de manera más dinámica y adaptarse rápidamente a cambios en el entorno y requisitos de comunicación.

- **Complejidad y Control:**

Dado su tamaño, LIS puede requerir un diseño y control más complejo para lograr una sincronización adecuada y asegurar un funcionamiento eficiente en grandes superficies.

RIS, al ser más pequeña, puede ser más fácil de controlar y sincronizar, lo que permite una implementación más rápida y sencilla.

Es decir, la diferencia clave entre LIS y RIS radica en su tamaño, cobertura y capacidad de adaptabilidad. LIS es una superficie más grande con una cobertura más extensa y, generalmente, es menos adaptable, mientras que RIS es más pequeña, con una cobertura más limitada, pero con una mayor capacidad de adaptación y reconfiguración.

### **Desafíos de las comunicaciones inalámbricas y el papel de las superficies inteligentes (RIS)**

En el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, existen diversos desafíos que afectan la capacidad, cobertura y eficiencia de los sistemas. Estos desafíos se han vuelto aún más evidentes con el creciente número de dispositivos y usuarios que dependen de las redes inalámbricas. Algunos de los problemas más comunes son:

- **Interferencia:** En entornos densamente poblados, como áreas urbanas o centros comerciales, puede haber una gran cantidad de dispositivos que generan señales inalámbricas. Esta congestión del espectro electromagnético puede causar

interferencias y degradar la calidad de la señal. La interferencia limita la capacidad de transmisión y puede provocar una mayor tasa de errores en la comunicación.

- **Capacidad limitada:** A medida que la demanda de ancho de banda aumenta, las redes inalámbricas pueden enfrentar dificultades para proporcionar una capacidad suficiente para satisfacer las necesidades de los usuarios. La limitada disponibilidad de espectro electromagnético y la congestión del canal pueden restringir la capacidad de transmisión de datos, lo que afecta la velocidad y la calidad de la conexión.
- **Pérdida de señal y cobertura limitada:** Las señales inalámbricas pueden debilitarse a medida que viajan a través del aire o se encuentran con obstáculos físicos, como edificios, árboles o terrenos accidentados. Esto puede resultar en una disminución de la intensidad de la señal y una cobertura limitada, lo que dificulta la comunicación confiable en áreas distantes o con condiciones adversas.
- **Consumo de energía:** Los dispositivos inalámbricos, como teléfonos móviles y sensores IoT, dependen de baterías que tienen una capacidad limitada. El consumo de energía de la transmisión y recepción de señales inalámbricas puede agotar rápidamente la energía de los dispositivos, lo que afecta la duración de la batería y puede generar costos adicionales de energía.

### **Fundamentos de las superficies inteligentes (RIS) y su papel en la mejora de las comunicaciones inalámbricas**

Las superficies inteligentes, también conocidas como metasuperficies reconfigurables (RIS), han surgido como una solución potencial para superar los desafíos mencionados anteriormente en las comunicaciones inalámbricas. Las RIS son estructuras compuestas por una matriz de elementos pequeños y controlables que pueden manipular las propiedades de las ondas electromagnéticas que inciden en ellas.

El papel fundamental de las superficies inteligentes en la mejora de las comunicaciones inalámbricas radica en su capacidad para controlar y redirigir las ondas electromagnéticas. Al ajustar la fase, la amplitud y la polarización de las ondas reflejadas, las RIS pueden influir en la propagación de las señales inalámbricas de manera selectiva y adaptativa (Wu et al., 2022).

Una de las principales ventajas de las RIS es su capacidad para reducir la interferencia. Al controlar las características de las ondas reflejadas, las RIS pueden generar patrones de interferencia constructiva y destructiva que minimizan la interferencia entre las señales transmitidas y recibidas. Esto mejora la calidad de la señal y aumenta la capacidad de transmisión al reducir el ruido y la interferencia de otros dispositivos cercanos.

Además, las superficies inteligentes pueden contribuir a una cobertura mejorada de las redes inalámbricas. Al reflejar y redirigir las ondas electromagnéticas, las RIS pueden extender la cobertura de la señal, especialmente en áreas con obstáculos o condiciones desfavorables. Esto permite una mayor conectividad y un alcance más amplio de la señal, lo que es especialmente beneficioso en entornos con cobertura deficiente.

Otra ventaja significativa de las superficies inteligentes es su potencial para optimizar el consumo de energía. Al mejorar la calidad de la señal y aumentar la eficiencia en la transmisión, las RIS pueden ayudar a reducir el consumo de energía de los dispositivos inalámbricos. Esto se traduce en una mayor duración de la batería de los dispositivos y una mayor eficiencia energética en general.

Luego las superficies inteligentes desempeñan un papel clave en la mejora de las comunicaciones inalámbricas al abordar los desafíos de capacidad, cobertura y eficiencia. Al reducir la interferencia, mejorar la cobertura y optimizar el consumo de energía, las RIS ofrecen soluciones prometedoras para optimizar el rendimiento de las redes inalámbricas. Estos

avances pueden tener un impacto significativo en una amplia gama de aplicaciones, desde la conectividad móvil hasta el Internet de las cosas (IoT) y las redes de sensores inalámbricos.

### **Diseño de sistemas de comunicación con superficies inteligentes**

El diseño de sistemas de comunicación con superficies inteligentes (RIS) requiere la comprensión y consideración de varios componentes esenciales. Estos componentes desempeñan roles específicos en el funcionamiento del sistema y son fundamentales para garantizar un rendimiento óptimo. Los componentes esenciales incluyen:

- **Transmisor:** El transmisor es responsable de generar y modular la señal que se enviará a través del canal de comunicación. Puede ser un dispositivo móvil, una estación base u otro emisor de señal inalámbrica. El transmisor debe estar diseñado para ser compatible con el uso de superficies inteligentes en el sistema.
- **Superficies inteligentes (RIS):** Las superficies inteligentes son una parte central del diseño de sistemas de comunicación con RIS. Estas superficies consisten en una matriz de elementos controlables que pueden manipular la fase, amplitud y polarización de las ondas electromagnéticas que inciden en ellas. Los elementos de la RIS pueden ser estructuras pasivas y reconfigurables, lo que permite un control adaptativo y selectivo de la propagación de la señal. Esto implica el ajuste de la fase, amplitud y polarización de las ondas reflejadas para optimizar la propagación de la señal. Las superficies inteligentes pueden ser programadas para adaptarse a diferentes condiciones de propagación y requisitos de comunicación, lo que las hace altamente flexibles y adaptables.
- **Canal de comunicación:** El canal de comunicación es el medio a través del cual la señal se transmite desde el transmisor a través de las superficies inteligentes y se recibe en el receptor. El canal puede ser inalámbrico, a través del aire, o puede involucrar conexiones físicas en caso de sistemas híbridos. El canal de comunicación

debe ser modelado y tenido en cuenta para optimizar el rendimiento del sistema. El canal puede introducir ruido, interferencia y pérdida de señal, lo que puede afectar la calidad de la comunicación. Por lo tanto, es esencial modelar y comprender las características del canal para optimizar el rendimiento del sistema. Esto implica considerar la atenuación de la señal, la propagación multipath, la interferencia y otros factores que pueden afectar la calidad de la comunicación.

- **Receptor:** El receptor es responsable de recibir y decodificar la señal transmitida a través del canal de comunicación. Puede ser un dispositivo móvil, una antena receptora u otro receptor de señal inalámbrica. El receptor debe estar diseñado para ser compatible con el uso de superficies inteligentes en el sistema y debe ser capaz de interpretar las modificaciones realizadas por las superficies inteligentes en la señal recibida. El receptor es responsable de recibir y procesar la señal transmitida a través del canal de comunicación. Esto implica la detección y demodulación de la señal recibida, la decodificación de la información transmitida y la recuperación de la información original. El receptor también puede realizar funciones de corrección de errores y procesamiento de señales para mejorar la calidad y la integridad de la señal recibida.

### **Características por tomar en cuenta en configuración de sistemas de comunicación con superficies inteligentes**

El diseño y la configuración de sistemas de comunicación con superficies inteligentes implican considerar varios aspectos para garantizar un rendimiento óptimo. Algunos de los factores clave a tener en cuenta incluyen:

- **Ubicación y distribución de las superficies inteligentes:** Es importante determinar la ubicación y distribución óptimas de las superficies inteligentes en el entorno de comunicación. Esto implica considerar la topología de la red, las características del

canal y las restricciones físicas. La ubicación estratégica de las superficies inteligentes puede maximizar la cobertura, minimizar la interferencia y optimizar la calidad de la señal en áreas específicas.

- **Configuración de los elementos de la RIS:** Cada elemento de la superficie inteligente puede tener un impacto significativo en la propagación de la señal y, por lo tanto, es importante configurar adecuadamente los elementos de la RIS. Esto implica ajustar la fase, la amplitud y la polarización de cada elemento para lograr el enfoque deseado de la señal y optimizar su rendimiento. La configuración de los elementos de la RIS puede ser adaptativa, lo que significa que puede ajustarse dinámicamente según las condiciones de propagación y los requisitos de comunicación.
- **Optimización de parámetros:** Para garantizar un rendimiento óptimo, es esencial optimizar los parámetros del sistema, como la potencia de transmisión, la asignación de recursos, los esquemas de modulación y codificación, entre otros. Esto implica encontrar un equilibrio entre la capacidad, la calidad de la señal y la eficiencia energética. La optimización de parámetros puede realizarse mediante técnicas de optimización matemática y algoritmos de aprendizaje automático.
- **Gestión de la interferencia:** La interferencia es un desafío común en las comunicaciones inalámbricas, y su gestión adecuada es fundamental para garantizar un rendimiento óptimo del sistema. En el contexto de las superficies inteligentes, la gestión de la interferencia implica minimizar la interferencia entre las señales transmitidas y recibidas mediante técnicas como la cancelación de interferencia, la selección de haces y el uso de algoritmos de mitigación de interferencias.
- **Coordinación y sincronización:** En sistemas de comunicación con múltiples superficies inteligentes y dispositivos, la coordinación y sincronización adecuadas son importantes para garantizar un funcionamiento sin problemas. Esto implica establecer

protocolos de comunicación eficientes, sincronizar las transmisiones y recepciones de los dispositivos y coordinar el funcionamiento de las superficies inteligentes para maximizar la eficiencia y minimizar la interferencia.

En conclusión, la configuración de sistemas de comunicación con superficies inteligentes requiere la consideración cuidadosa de varios componentes esenciales, como el transmisor, las superficies inteligentes, el canal de comunicación y el receptor. El funcionamiento y las características de estos componentes son fundamentales para lograr un rendimiento óptimo del sistema. Además, es necesario tener en cuenta aspectos como la ubicación y distribución de las superficies inteligentes, la configuración de los elementos de la RIS, la optimización de parámetros, la gestión de la interferencia y la coordinación adecuada. La configuración adecuados de los sistemas de comunicación con superficies inteligentes son clave para mejorar la capacidad, cobertura y eficiencia de las comunicaciones inalámbricas (Liberti & Rappaport, 1999).

### **Modulaciones en un sistema de comunicaciones**

La modulación de un sistema de comunicaciones es forma en la que la señal por enviar se combina con la portadora para lograr su transmisión mediante el medio de comunicación. Por ende, el tipo de modulación se escoge según el entorno de comunicación, la capacidad requerida, la calidad del canal y las limitaciones del sistema. Para un sistema asistido por superficies inteligentes, es importante tomar en cuenta el rendimiento del sistema, así como la modulación que mejor asista a la metasuperficie. Hay varias modulaciones compatibles con las superficies inteligentes en sistemas de comunicaciones. Algunas de estas son:

- **BPSK (Binary Phase Shift Keying):** Esta modulación digital en su portadora tiene dos fases diferentes, mismas que representanta en bits 1 y 0.
- **QPSK (Quadrature Phase Shift Keying):** Esta modulación, cuenta con cuatro fases en su portadora lo que permite representar 2 bits por símbolo.

- **QAM (Quadrature Amplitude Modulation):** En esta modulación, se obtiene la combinación tanto de la fase como la amplitud de la portadora, esto permite enviar varios bits por símbolo. 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, etc. son variaciones de QAM que hacen uso de varios niveles de amplitud y fase lo que permite transmitir una mayor cantidad de bits por símbolo.
- **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing):** El tipo de modulación es multiportadora, esto significa que hacer divisiones en el espectro de frecuencia, estas divisiones son las subportadoras ortogonales. De esta manera se logra enviar varios símbolos simultáneamente.
- **CDMA (Code Division Multiple Access):** Esta técnica de modulación utiliza la asignación de códigos únicos por usuario y de esta manera permitir la transmisión simultánea de múltiples señales dentro de un mismo canal.

### Métricas para la evaluación de rendimiento de un sistema de comunicaciones

#### ***SNR (Signal-to-Noise-Ratio).***

Esta métrica de rendimiento permite conocer la calidad de un sistema de comunicación al determinar la cantidad de señal deseada con respecto al ruido. Se determina por la relación existente entre la potencia de la señal transmitida  $P$  y la potencia del ruido que afecta a la señal  $N_0$ , medida en decibelios (dB) (Alam, 2008).

$$SNR_{dB} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{P}{N_0} \right)$$

donde:

-  $P$  es la potencia de la señal transmitida

-  $N_0$  es la potencia de ruido

La SNR en la recepción en términos del desvanecimiento a corta escala puede ser expresada por:

$$SNR_{R_x} = \gamma = \frac{P|h|^2}{WN_0}$$

donde:

- $P$  es la potencia de la señal transmitida
- $|h|^2$  es la ganancia del canal
- $h$  es el coeficiente del canal
- $W$  es el ancho de banda normalizado de la señal,  $W=1$ .
- $N_0$  es la potencia del ruido

### **$E_b/N_0$**

$E_b/N_0$  (del inglés, Energy per bit to noise power spectral density) es la SNR normalizada por cada bit transmitido. Este es una función decreciente de la tasa de ocurrencia de bits errados en un enlace, es decir para conocer qué tan robusta es una señal. Matemáticamente, se describe por (Markosyan et al., 2018):

$$\frac{E_b}{N_0} = SNRT_b \times W = SNR \times \frac{W}{R}$$

donde:

- $T_b$  es el tiempo de transmisión de un bit,  $T_b = \frac{1}{R}$
- $R$  es la tasa de transmisión [ $bps/Hz$ ]

### ***Bit Error Rate (BER)***

Esta métrica permite medir la calidad del enlace de extremo a extremo, desde los bits transmitidos hasta los recibidos. El BER determina cada cuantos bits que se transmiten se presentará un error, por lo que si este número es muy grande significa que el enlace es deficiente. La cantidad de bits que se pierden en la transmisión por los efectos del canal y del ruido. Es la relación del número de bits recibidos con error y el número total de bits que se transmitieron y es definida por (Alam, 2008):

$$BER = \frac{\text{número de bits errados}}{\text{número total de bits enviados}}$$

### ***Probabilidad de Outage***

La probabilidad de outage es una medida crítica empleada en sistemas de comunicación para determinar la posibilidad de que una tasa de transmisión particular no pueda lograrse debido a condiciones adversas de señal y ruido. Esta métrica también se refiere a la probabilidad de que la capacidad del sistema se sitúe por debajo de un umbral específico previamente establecido (Jorswieck & Boche, 2007).

En un sistema de comunicación, es posible adaptar la tasa de transmisión de acuerdo con las condiciones del canal y la calidad de la señal recibida. Sin embargo, en escenarios con alto nivel de ruido o señales debilitadas debido a la distancia o interferencias, mantener una tasa de transmisión específica sin errores significativos puede resultar desafiante.

La probabilidad de outage se define como la probabilidad de que el valor de la relación señal a ruido (SNR) sea menor que un umbral específico (SNR umbral) necesario para mantener una tasa de transmisión. Matemáticamente, se expresa como:

$$P_{outage} = Prob (SNR < SNR \text{ umbral})$$

Cuando el SNR es inferior al umbral establecido, el sistema no puede mantener la tasa de transmisión deseada, lo que conlleva a un aumento en la probabilidad de outage. En resumen, la probabilidad de outage refleja la posibilidad de que las condiciones del canal sean tan desfavorables que el sistema no pueda alcanzar el nivel de rendimiento deseado.

La evaluación y reducción de la probabilidad de outage son aspectos fundamentales en el diseño y la optimización de sistemas de comunicación, especialmente en redes inalámbricas y enlaces de larga distancia. Al disminuir esta probabilidad, se logra mejorar la calidad de la transmisión y se asegura una comunicación más fiable y eficiente en el sistema.

### **Análisis del estado del arte**

A medida que la sociedad se vuelve cada vez más interconectada, el uso de metasuperficies controladas por software tiene el potencial de aplicarse en las redes inalámbricas de futuras generaciones. (Liaskos et al., 2018). Las superficies inteligentes reconfigurables (RIS) consisten en una matriz bidimensional de elementos reflectantes casi pasivos, donde cada elemento puede modificar inteligentemente las fases de las señales reflejadas debido a sus elementos de reflexión pasiva (Wu et al., 2021). Esto permite que la RIS controle intencionadamente el entorno de propagación al modificar también la señal transmitida, mejorando así el rendimiento de la comunicación (Basar et al., 2019; Yu et al., 2020).

Una variedad de trabajos recientes examina diferentes métricas de rendimiento en el contexto de esta novedosa técnica. La Probabilidad de Outage (OP) representa la probabilidad de que una tasa de transmisión determinada no pueda ser alcanzada en un solo bloque de desvanecimiento (Jorswieck & Boche, 2007).

Por ejemplo, (Wang et al., 2021) analizan una comunicación asistida por RIS sobre canales de línea de visión (LOS) donde se demostró que al aumentar los elementos de RIS se

puede reducir significativamente la probabilidad de outage del sistema. En un sistema RIS bidireccional (TW) full-duplex (FD) fue necesario aproximar la expresión de la probabilidad de outage cuando hay  $N$  elementos reflectantes  $N \geq 2$ , por lo que esta expresión puede reducir en gran medida este impacto y evitar el error de piso (Nguyen et al., 2021).

Los autores en (Kudathanthirige et al., 2020) calculan un límite superior en la probabilidad de outage a través del teorema del límite central (CLT), y los resultados muestran que a medida que aumenta la relación señal-ruido (SNR), se obtiene una mejor probabilidad de outage. Por lo tanto, la aproximación CTL se aplica en varios trabajos, como en redes asistidas por RIS con dos esquemas de programación de usuarios con captación de energía (EH) (Lin et al., 2021), donde se calcula el análisis cerrado de la probabilidad de outage, demostrando que la aproximación CTL permite reducir significativamente la probabilidad de outage. Además, (Boulogeorgos et al., 2022) demuestra una nueva expresión cerrada para la probabilidad de outage aplicada a sistemas inalámbricos de vehículos aéreos no tripulados (UAV) bajo desorientación y desalineación, donde la probabilidad de outage se minimiza a medida que aumenta la SNR.

Otras métricas son la tasa de error de símbolo (SER) y la tasa de error de bit (BER), ambas medidas del rendimiento de error en un sistema de comunicación, pero difieren en términos de la unidad de medida de error. SER mide la probabilidad de error a nivel de símbolo, mientras que BER mide la probabilidad de error a nivel de bit individual. Por ejemplo, (Sikri et al., 2022) proponen un esquema de comunicación asistido por RIS de doble salto (RIS-DH) y un esquema de transmisión asistido por RIS (RIS-T), donde diferentes distribuciones como la distribución de chi-cuadrado no central (NCCS) y la distribución GK cuadrado permiten derivar en análisis matemáticos con expresiones cerradas de BER, lo que permite que el sistema muestre un rendimiento muy bueno para  $N \geq 2$ .

En (Kudathanthirige et al., 2020), básicamente se analiza una configuración de comunicación inalámbrica de extremo a extremo que revela que el SER promedio depende en gran medida del coeficiente de reflexión. (Hassouna et al., 2023) describe el estado del arte de diferentes trabajos relacionados con métricas medibles, en un sistema sin considerar una configuración de cambio de fase viable que no requiere cambios significativos en los modelos MIMO existentes para un buen análisis de BER; también, para las modulaciones BPSK y M-QAM con la influencia de canales de desvanecimiento Nakagami-m, (Thirumavalavan & Jayaraman, 2020) derivan una forma de BER donde el análisis funciona sin problemas para  $N \leq 4$  utilizando la aproximación gaussiana para las componentes en fase y cuadratura, y se muestra que a medida que aumentan los valores de  $N$ , el análisis se complica.

Aunque BER es una métrica comúnmente analizada en sistemas de comunicación, no hay suficientes documentos publicados que analicen esta métrica para comunicaciones asistidas por RIS, más adelante en este trabajo desglosamos este análisis.

## Capítulo III

### Metodología

En el presente capítulo, se procede con un análisis detallado del proceso de diseño del sistema de comunicaciones respaldado por RIS. La evaluación de este diseño se lleva a cabo en función de dos parámetros clave: la potencia de fallo de transmisión (outage) y la probabilidad de error de bit. Esta evaluación se efectúa mediante la combinación de técnicas de simulación y la deducción de ecuaciones teóricas correspondientes. En este contexto, se presta una atención rigurosa a las modificaciones de las variables que rigen el sistema de comunicación, con el objetivo de capturar su desempeño en diversos escenarios.

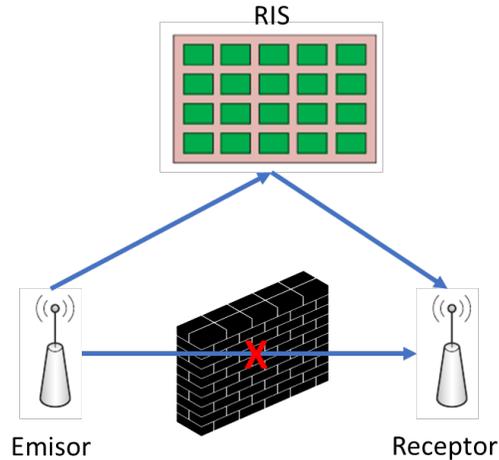
La simulación de la comunicación y la obtención de los cálculos de las expresiones teóricas se llevaron a cabo utilizando el software MATLAB R2021a. Los resultados obtenidos se representan visualmente a través de dos gráficas fundamentales:

- Una gráfica que ilustra la relación entre el número de elementos presentes en la Superficie Inteligente Reconfigurable (RIS) y la potencia de fallo de transmisión (outage).
- Una segunda gráfica que muestra cómo varía la potencia de transmisión en relación con la probabilidad de error de bit (BER).

## Modelo del sistema

**Figura 1**

*Sistema de comunicaciones asistido por RIS sin línea de vista directa*



En esta sección se hace la descripción detallada del sistema de comunicaciones estudiado de la Figura 1, tomando en cuenta que es un modelo asistido por RIS, sin línea de vista directa, que cuenta con  $N$  número de elementos pasivos reflectantes, donde tanto el receptor como el transmisor tienen una antena y  $x(t)$  representa el símbolo transmitido.

El canal de comunicaciones del enlace del emisor a la RIS y la RIS al receptor se modela considerando desvanecimiento a través de variables aleatorias de tipo Rayleigh. En este caso las ganancias del canal  $h \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  y  $g^T \in \mathbb{C}^{1 \times N}$  respectivamente se pueden modelar como variables aleatorias gaussianas complejas cuyos componentes tienen valor medio cero y varianza  $\sigma^2$ . El símbolo al llegar a la RIS se refleja con una fase  $\theta$ . En consecuencia, la señal transmitida se describe como:

$$y(t) = \left( \sum_{n=1}^N h_n g_n e^{j\theta_n} \right) x(t)$$

Al maximizar los haces pasivos reflejados por la RIS, se logra maximizar el SNR, entonces se excluyen los valores constantes. También se considera que la amplitud y el

cambio de fase son continuos. Por lo tanto, el sistema de comunicación está conformado por las matrices directrices:

$$\begin{aligned} h^T &= [h_1, h_2, \dots, h_n] \\ \theta &= \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_n}) \\ g &= [g_1, g_2, \dots, g_n]^T \end{aligned}$$

La potencia recibida es determinada por  $P_r = P_t k_1 d_1^{-\alpha_1} k_2 d_2^{-\alpha_2}$ , donde:  $P_t$  es la potencia transmitida,  $d_1$  es la distancia del emisor a la RIS,  $d_2$  es la distancia de la RIS al transmisor,  $\alpha_1$  es el exponente de propagación del primer enlace.  $\alpha_2$  es el exponente de propagación del segundo enlace, tal que,  $\alpha_1, \alpha_2 \geq 2$  debido a que el mejor escenario de propagación es en el espacio libre. Por otra parte  $k_1$  y  $k_2$  se conocen como factores de propagación. Los parámetros de propagación,  $k$  y  $\alpha$ , dependen del entorno y se pueden calcular mediante diferentes modelos de propagación empíricos disponibles en la literatura, los valores cogidos en este sistema no obedecen a un modelo de propagación en específico, finalmente se tiene un sistema genérico cuyos valores pueden variar aleatoriamente.

La señal transmitida es afectada por los canales, donde inciden la potencia promedio  $\sqrt{P_r}$  y el ruido AWGN  $n$ .

$$Y(t) = (h_n g_n e^{j\theta_n}) \sqrt{P_r} x(t) + n$$

Para el desarrollo del sistema se parte del SNR o  $\gamma$  recibido por el usuario, mismo que está determinado por:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{P_r x^2}{\sigma_n^2} |h^T \theta g|^2 \\ \gamma &= \frac{P_r x^2}{\sigma_n^2} \left| \sum_{n=1}^N h_n e^{j\theta_n} g_n \right|^2 \end{aligned}$$

## Análisis de desempeño

En esta sección se va a analizar el desempeño del sistema de comunicaciones en términos de la potencia de outage y la probabilidad de error de bit, para esto es importante iniciar maximizando la relación señal a ruido del sistema:

### Cálculo de la relación señal a ruido Maximizada

La tasa máxima alcanzable está determinada por:

$$r = \log_2(1 + \gamma)$$

El objetivo es maximizar  $\gamma$  sujeto a  $0 \leq \theta_n \leq 2\pi$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$

$$\theta_n^* = \text{mod}[-(\phi_n + \varphi_n), 2\pi]$$

Donde:

$$\phi_n = \text{fase de } h_n = |h_n|e^{j\theta_n}$$

$$\varphi_n = \text{fase de } g_n = |g_n|e^{j\varphi_n}$$

$$\theta_n^* = -(\phi_n + \varphi_n)$$

Tomando en cuenta que  $x$  es la señal de información que parte del modelamiento de un variable aleatoria independiente e idénticamente distribuida (i.i.d), se supone que la potencia media de la señal transmitida es igual a 1. Lo que permite resolver el SNR de tal manera que:

$$\gamma^* = \frac{P_r x^2}{\sigma_n^2} \left| \sum_{n=1}^N |h_n| e^{j\theta_n} e^{j(-(\phi_n + \varphi_n))} |g_n| e^{j\varphi_n} \right|^2$$

$$\gamma^* = \frac{P_r x^2}{\sigma_n^2} \left| \sum_{n=1}^N |h_n| e^{j\theta_n} e^{-j\phi_n} e^{-j\varphi_n} |g_n| e^{j\varphi_n} \right|^2$$

Entonces el valor de SNR maximizado está definido por:

$$\gamma^* = \frac{P_r}{\sigma_n^2} \left| \sum_{n=1}^N |h_n| |g_n| \right|^2$$

La norma de  $h_n$  y  $g_n$  son variables aleatorias Rayleigh independientes e idénticamente distribuidas (i.i.d.).

### **Cálculo de la probabilidad de outage.**

Considerando que el sistema está caracterizado por variables aleatorias de Rayleigh, es difícil modelar el sistema matemáticamente, para esto se considera el teorema de límite central, donde  $N$  es un valor muy grande por lo tanto se calcula el valor medio y la varianza de una variable gaussiana aplicando el operador lineal esperanza.

- Análisis de valor medio

$$E \left[ \sum_{n=1}^N |h_n| |g_n| \right] = \sum_{n=1}^N E[|h_n| |g_n|]$$

Por la naturaleza del sistema de comunicaciones modelado, tanto  $h_n$  y  $g_n$  son canales independientes, por ende, se supone independencia estadística, entonces cada canal son variables independientes:

$$E[h_n g_n] = E[h_n] E[g_n]$$

Se conoce que las variables con distribución tipo Rayleigh tienen el valor medio definido por  $\sigma\sqrt{\pi/2}$ , por lo tanto, se identifica que  $E[h_n g_n]$  es un número determinístico, entonces:

$$\sum_{n=1}^N E[|h_n| |g_n|] = N E[h_n] E[g_n]$$

Se determina que el valor medio de  $\sum_{n=1}^N E[|h_n| |g_n|]$  es:

$$N\sigma^2 \frac{\pi}{2} = \zeta$$

- Análisis de varianza.

La varianza se define:

$$\text{var} \left[ \sum_{n=1}^N |h_n| |g_n| \right] = \text{var}[h_1 g_1] + \text{var}[h_2 g_2] + \dots + \text{var}[h_N g_N]$$

Por facilidad es asignada  $a \Rightarrow h_n g_n$ , y partiendo de la definición de esperanza  $E[(x - \bar{x})^2]$ , entonces:

$$\begin{aligned} \text{Var}[h_n g_n] &= E[(a - \bar{a})^2] = E[a^2] - 2E^2[a] + E^2[\bar{a}] \\ &= E[a^2] - E^2[a] \end{aligned}$$

Ahora se obtiene la varianza para el escenario, donde primero se calcula el valor cuadrático medio considerando que son variables independientes:

$$E[x^2] = E[(h_n g_n)^2] = E[h_n^2 g_n^2] = E[h_n^2] E[g_n^2]$$

Se conoce que la potencia media de una Rayleigh es  $2\sigma^2$ , por lo tanto

$$E[h_n^2] E[g_n^2] = 4\sigma^4$$

Entonces la varianza calculada es:

$$\begin{aligned} \text{Var}[h_n g_n] &= E[a^2] - E^2[a] = 4\sigma^4 - \sigma^4 \frac{\pi^2}{4} \\ &= \sigma^4 \left( 4 - \frac{\pi^2}{4} \right) = \mu \end{aligned}$$

De tal manera que, el sistema tiene varianza:

$$\text{var} \left[ \sum_{n=1}^N |h_n| |g_n| \right] = N\sigma^4 \left( 4 - \frac{\pi^2}{4} \right)$$

Para facilitar los cálculos se asigna la constante  $b \Rightarrow \frac{P_r}{\sigma_n^2}$  y dado lo mencionado anteriormente también se puede asignar  $x \Rightarrow \sum_{n=1}^N h_n g_n$  por ser una variable aleatoria de tipo gaussiana. Entonces el SNR se obtiene  $\gamma = bx^2$ , conociendo que la PDF de una gaussiana es:

$$f(x|\mu\sigma_n^2) = \frac{1}{\sqrt{2\zeta^2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\zeta^2}} \quad x \Rightarrow -\infty < x < \infty$$

Se realiza una transformación de variables para obtener la PDF de gamma, donde:

$$y = g(x) \quad f(y) = \left. \frac{f(x)}{\left| \frac{dy}{dx} \right|} \right|_{x=g^{-1}(y)}$$

$$\frac{\gamma}{b} = x^2 \Rightarrow x = \pm \sqrt{\frac{\gamma}{b}}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma_n^2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}}$$

$$\sigma_x^2 = \sigma^4 \left( 4 - \frac{\pi^2}{4} \right) N \quad \mu_x = \sigma^2 \frac{\pi}{2} N$$

$$\gamma = g(x) = bx^2 \quad g'(x) = 2ax$$

$$\gamma = bg'(\gamma) = x = \pm \sqrt{\frac{\gamma}{b}}$$

Se procede a calcular la PDF de SNR maximizada que es:

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta^2}} e^{-\frac{\left(\sqrt{\frac{\gamma}{b}}-\mu\right)^2}{2\zeta^2}}}{2b\sqrt{\frac{\gamma}{b}}} + \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta^2}} e^{-\frac{\left(-\sqrt{\frac{\gamma}{b}}-\mu\right)^2}{2\zeta^2}}}{2b\sqrt{\frac{\gamma}{b}}}$$

La potencia de outage es la probabilidad de que el SNR este bajo un umbral o la probabilidad de que la capacidad este por debajo de un umbral, entonces tomando el primer concepto se procede a integrar la PDF para encontrar el cálculo de la CDF. Para facilitar el cálculo es asignada  $z \Rightarrow \sqrt{\frac{\gamma}{b}}$ , entonces se obtiene:

$$\int_0^{\delta} \frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta^2}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\zeta^2}} + \frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta^2}} e^{-\frac{(-z-\mu)^2}{2\zeta^2}} dz$$

Se analiza en el rango  $2^R - 1$ , obteniendo:

$$\frac{\text{Erf} \left[ \frac{\sqrt{2^R - 1} - \sqrt{b}\mu}{\sqrt{2}\sqrt{b}\zeta^2} \right] + \text{Erf} \left[ \frac{\sqrt{2^R - 1} + \sqrt{b}\mu}{\sqrt{2}\sqrt{b}\zeta^2} \right]}{2}$$

### Cálculo de la probabilidad de error de bit – BER

La probabilidad de error de bit se calcula teniendo en cuenta las estadísticas de desvanecimiento y encontrando el valor medio.

$$\bar{p}_b = \int_0^{+\infty} P_b(\gamma) f(\gamma) d\gamma$$

Donde el BER condicionado al SNR instantáneo en el canal AWGN es  $P_b(\gamma)$  y  $f(\gamma)$  es la pdf de la distribución Chi-cuadrado. Para la modulación del sistema de comunicaciones utilizamos BPSK, por lo cual, la probabilidad de  $\gamma$  es  $P_b(\gamma) = \frac{1}{2} \text{erfc}[\sqrt{\gamma}]$  y  $f(\gamma)$  es la ecuación de la SNR Maximina, por lo tanto:

$$\bar{p}_b = \int_0^{+\infty} \frac{1}{2} \text{erfc}[\sqrt{\gamma}] \frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta^2}} e^{-\frac{\left(\sqrt{\frac{\gamma}{b}} - \mu\right)^2}{2\zeta^2}} + \frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta^2}} e^{-\frac{\left(-\sqrt{\frac{\gamma}{b}} - \mu\right)^2}{2\zeta^2}} dz$$

Debido a la naturaleza de la integral anterior, se encuentra que no es posible encontrar una expresión cerrada, por lo que se recurre a realizar la aproximación de esta, para esto se hace uso de la aproximación propuesta por (Chiani et al., 2003), donde la función de error complementario se puede aproximar  $erfc(x) \approx \frac{1}{6}e^{-x} + \frac{1}{2}e^{-\frac{4x}{3}}$  (Chiani et al., 2003, Ec. 14)

$$\bar{p}_b = \int_0^{+\infty} \frac{1}{2} \left( \frac{1}{6} e^{-\gamma} + \frac{1}{2} e^{-\frac{4\gamma}{3}} \right) \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta^2}} e^{-\frac{\left(\sqrt{\frac{\gamma}{b}} - \mu\right)^2}{2\zeta^2}}}{2b\sqrt{\frac{\gamma}{b}}} + \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta^2}} e^{-\frac{\left(-\sqrt{\frac{\gamma}{b}} - \mu\right)^2}{2\zeta^2}}}{2b\sqrt{\frac{\gamma}{b}}} dy$$

Esto genera una integral cerrada, la cual da como resultado el BER aproximado:

$$\frac{e^{-\frac{\mu^2}{2\zeta^2}} \left( 3e^{\frac{3\mu^2}{6\zeta^2 + 16b\zeta^4}} \sqrt{6 + \frac{3}{b\zeta^2}} + e^{\frac{\mu^2}{2\zeta^2 + 4b\zeta^4}} \sqrt{8 + \frac{3}{b\zeta^2}} \right)}{6\sqrt{b} \sqrt{2 + \frac{1}{b\zeta^2}} \sqrt{8 + \frac{3}{b\zeta^2}} \zeta}$$

Las aproximaciones utilizadas son consideradas buenas cuando el argumento de la ERFC es de un valor alto, por lo tanto, esta aproximación se realiza en función de la potencia transmitida.

## Capítulo IV

### Análisis de Resultados

En esta sección se describen los resultados obtenidos de las simulaciones en Matlab del sistema de comunicaciones asistido por RIS, cuyo procedimiento inicia en la descripción de las ecuaciones adquiridas matemáticamente dentro del entorno de Matlab, donde se compara con los resultados obtenido analíticamente.

Dentro del programa desarrollado en Matlab se tiene los siguientes parámetros de entrada:

#### Figura 2

*Parámetros de entrada del sistema de comunicaciones en la simulación*

```

%% Parámetros de Entrada
Tran_Pow_dBm = 13; % Potencia de transmisión (dBm)
NoisePow_dBm = -90; % Potencia de ruido (dBm)
d1 = 50; % Distancia del transmisor al RIS (metros)
d2 = 40; % Distancia del RIS al receptor (metros)
R = 1; % Tasa umbral para el cálculo de la probabilidad de outage
T = 1e6; % Número total de realizaciones para la simulación de Monte Carlo
N = 300; % Número de elementos en el RIS

% Canal Tx - RIS (txR)
k_txR_dB = -30; % Factor de atenuación del canal
alpha_txR = 2.6; % Exponente de atenuación del canal
% Canal RIS - Rx (Rrx)
k_Rrx_dB = -30; % Factor de atenuación del canal
alpha_Rrx = 2.8; % Exponente de atenuación del canal

```

Los parámetros mencionados en la Figura 1 fueron sometidos a variaciones, mismas que corresponden a cambios dentro de la comunicación, para así apreciar su rendimiento en diferentes escenarios, esos cambios serán aclarados en cada una de las figuras obtenidas.

Los parámetros de entrada y sus valores son referencias de un sistema de comunicaciones genérico y no obedecen a un escenario en particular. Esto debido a que el simulador desarrollado puede ser utilizado en cualquier escenario. De igual manera, la

variación en los valores de cada parámetro detallado posteriormente, son valores arbitrarios que permiten demostrar la validez matemática de las ecuaciones obtenidas en el capítulo anterior.

### Potencia de Outage - OP

Referente a el análisis de rendimiento del sistema con la métrica de OP, al parámetro variable en todos los casos es  $N$ , que representa el número de elementos de RIS y varía entre 10 y 300. Para el resto de los parámetros, se determina un valor de entrada descritos en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Parámetros de entrada generales para el caso de la probabilidad de outage (OP).*

Parámetros de Entrada		
Parámetro	Descripción	Valor
$P_t$	Potencia Transmitida	13 dBm
$d_1$	Distancia Tx - RIS	50 m
$d_2$	Distancia RIS – Rx	40 m
$\alpha_{txR}$	Exponente de pérdida de trayecto Tx - RIS	2.6
$\alpha_{Rrx}$	Exponente de pérdida de trayecto RIS - Rx	2.8

En la Figura 2 se observa la probabilidad de outage (OP) en función del parámetro  $N$ , parametrizado por la potencia transmitida  $P_t$  dada en dBm, donde  $P_t$  cambia como se describe en la Tabla 5. Tomando en cuenta que comúnmente la potencia máxima de un terminal móvil es de 24 dBm, los valores escogidos varían entre 15 y 23 dBm.

En primer lugar, cabe destacar que las expresiones teóricas se ajustan de cerca a los resultados simulados, con solo pequeñas diferencias, lo que indica una muy buena aproximación. Esto justifica el uso del Teorema del Límite Central (CLT) para modelar el rendimiento del sistema. Se observa que a medida que aumenta el número de elementos en la

RIS, la probabilidad de outage (OP) disminuye. Esto se debe al mayor valor de  $N$ , lo que resulta en una menor probabilidad de que la capacidad del sistema caiga por debajo de un umbral.

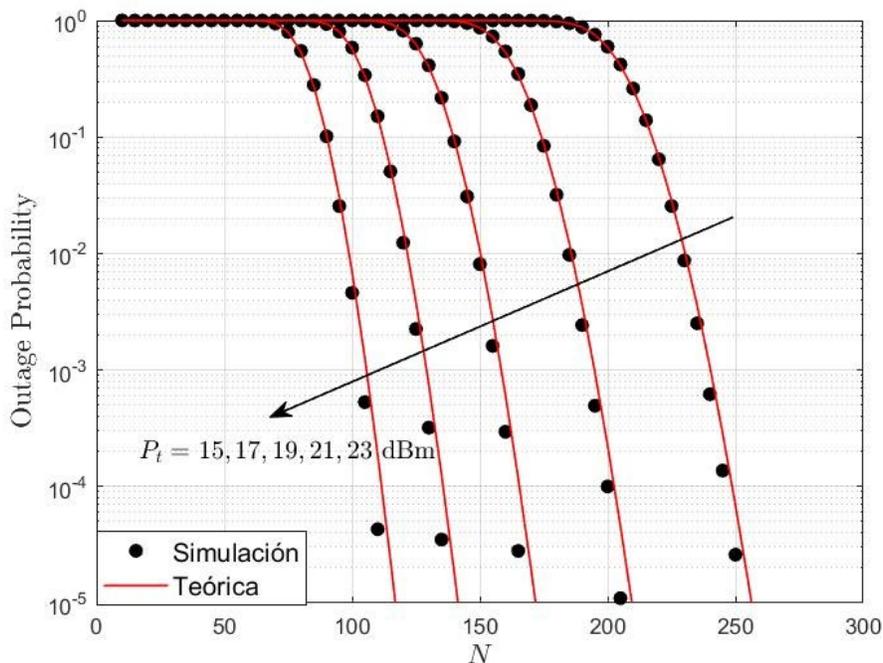
**Tabla 5**

Variación del parámetro  $P_t$ .

Parámetro	Valor
$P_t$	15, 17, 19, 21, 23 dBm

**Figura 3**

Probabilidad de outage (OP) en función de  $N$ , parametrizado por la potencia transmitida  $P_t$ .



Además, se observa que a medida que la potencia de transmisión aumenta, la probabilidad de outage disminuye más rápidamente cuando el número de elementos de la RIS es menor. Esto indica que aumentar la potencia de transmisión conlleva a un mejor rendimiento, como era de esperar.

La Figura 3 y 4 son similares a la Figura 2, esto muestra la probabilidad de outage (OP) en función de  $N$ , parametrizado por la distancia  $d_1$  y  $d_2$  respectivamente. Los cambios en los valores de  $d_1$  y  $d_2$  se describen en la Tabla 6.

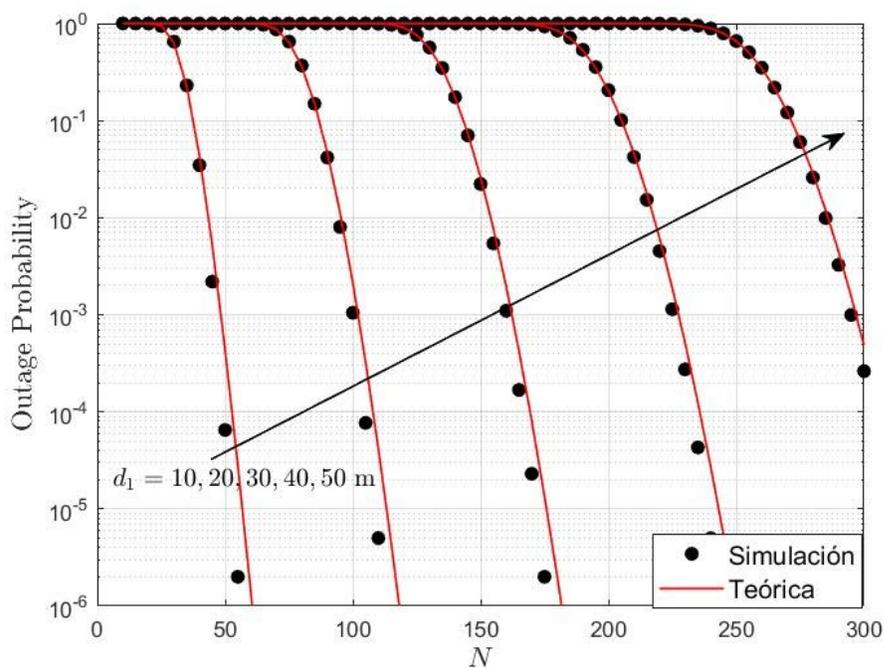
**Tabla 6**

*Variación de los parámetros  $d_1$  y  $d_2$ .*

Parámetro	Valor
$d_1$	10, 20, 30, 40, 50 m
$d_2$	10, 20, 30, 40, 50 m

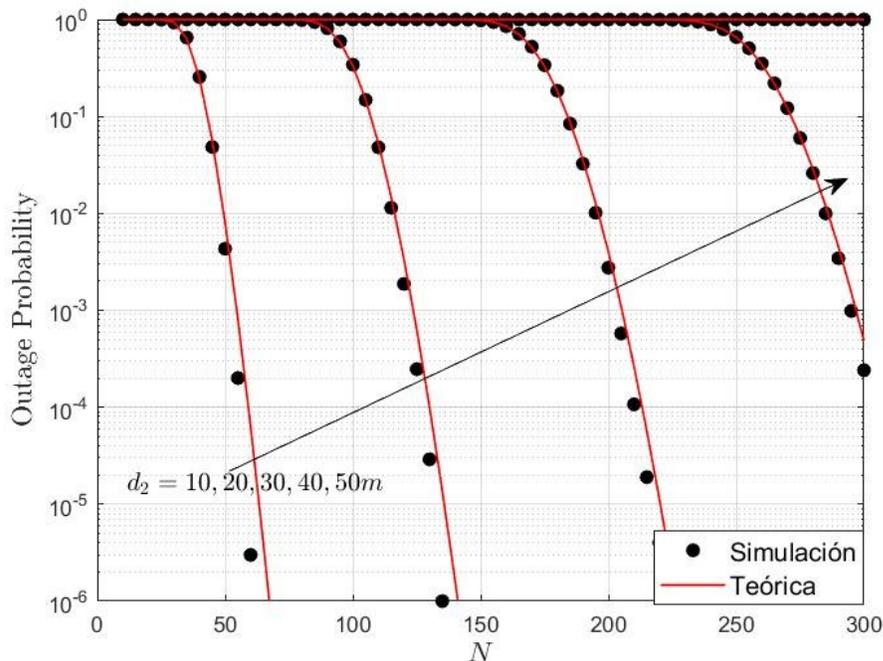
**Figura 4**

*Probabilidad de outage (OP) en función de  $N$ , parametrizado por la distancia  $d_1$ .*



**Figura 5**

Probabilidad de outage (OP) en función de  $N$ , parametrizado por la distancia  $d_2$ .



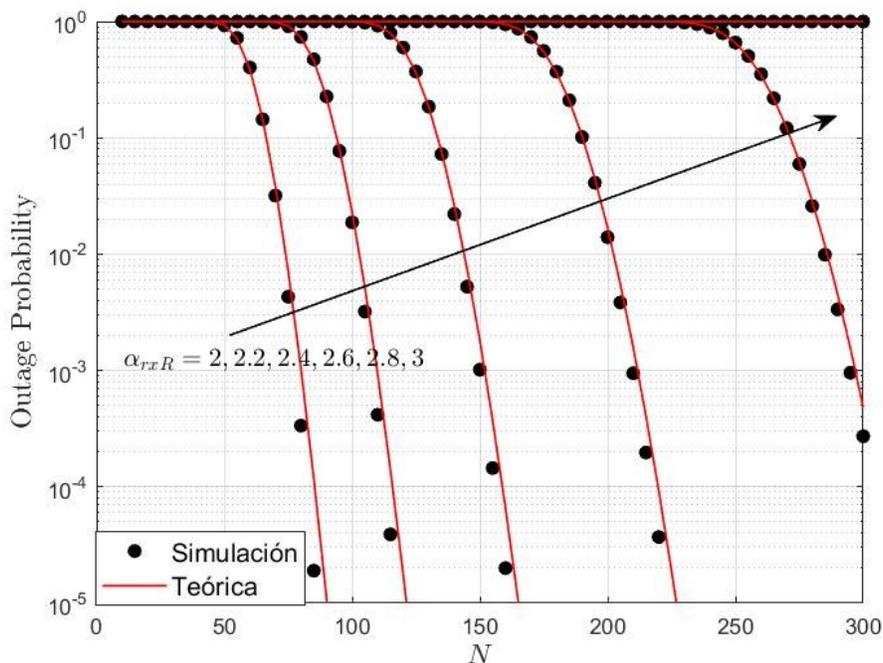
La precisión de las expresiones teóricas que coinciden estrechamente con los resultados simulados indica una aproximación muy buena. Cuando aumenta la distancia entre el transmisor y la RIS, la probabilidad de outage (OP) es mayor, de igual manera cuando la distancia entre la RIS y el receptor aumenta OP es mayor. Esto ocurre porque la potencia transmitida se atenúa por la pérdida de trayectoria en el canal. Además, si aumentamos la distancia, la pérdida de trayectoria se vuelve más alta. Por lo tanto, es importante analizar la distancia óptima entre el transmisor y la RIS, así como entre la RIS y el receptor, con el fin de obtener el mejor rendimiento en el sistema.

A continuación, las Figuras 5 y 6 muestra la probabilidad de outage (OP) en función de  $N$ , parametrizada por el exponente de pérdida de trayectoria  $\alpha_{txR}$  y  $\alpha_{Rrx}$ , cuyos cambios se describen en la Tabla 7.



Figura 7

Probabilidad de outage (OP) en función de  $N$ , parametrizado pérdida de trayectoria  $\alpha_{Rrx}$ .



Se observa que aumentar los parámetros  $\alpha_{txR}$  y  $\alpha_{Rrx}$  resulta en un aumento en la potencia de outage. Esto sucede porque el path-loss es alto y, por lo tanto, el exponente de path-loss también aumenta. Como consecuencia, el receptor recibe menos potencia, lo que conduce a una mayor potencia de outage.

### Probabilidad de error de bit – BER

Para el análisis BER, utilizamos la modulación BPSK para lograr un modelo simplificado de comunicación. En este caso también se cambiaron los parámetros uno por uno en un rango definido. En general, el parámetro  $P_t$  que es la potencia transmitida varía entre 1 y 50 dBm, este rango es seleccionado debido a que la aproximación realizada funcional cuando el argumento de la ERFC es alto, por lo tanto, los valores de la potencia transmitida son altos. Para cada parámetro, el valor estático se describe en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Parámetros de entrada generales para el caso de la probabilidad de error de bit (BER).*

<b>Parámetros de Entrada</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
$N$	Número de elementos de la RIS	50
$d_1$	Distancia Tx - RIS	50 m
$d_2$	Distancia RIS – Rx	40 m
$\alpha_{txR}$	Exponente de pérdida de trayecto Tx - RIS	2.6
$\alpha_{Rrx}$	Exponente de pérdida de trayecto RIS - Rx	2.8

La Figura 7 muestra la métrica BER como función de  $P_t$ , parametrizado por el número de elementos de RIS  $N$ , con cambios descritos en la Tabla 9. El número de elementos varia desde 10, tomando en cuenta que una RIS se considera superior a 2 elementos en su arreglo, y el valor superior de 100 es considerado un valor alto, lo que nos permite observar el desempeño de la RIS cuando tiene un número de elementos elevado.

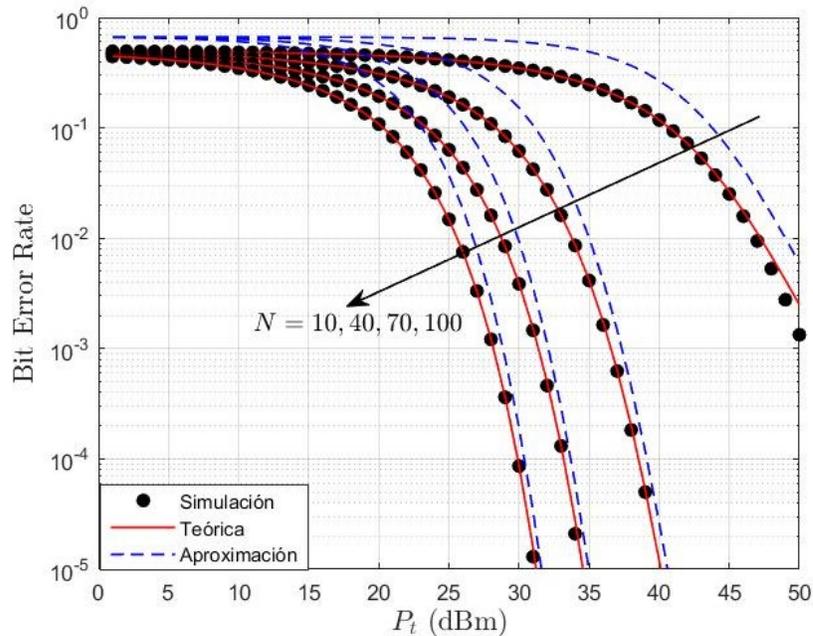
**Tabla 9**

*Variación del parámetro  $N$ .*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
$N$	10, 40, 70, 100

**Figura 8**

La probabilidad de error de bit (BER) en función de  $P_t$ , parametrizada por el número de elementos de la RIS  $N$ .



Es importante notar que, al aumentar el número de elementos de RIS, se obtiene una disminución en el BER, lo cual es un resultado esperado. Además, en esta Figura 7 presentamos la expresión teórica exacta y la aproximación en líneas entrecortadas en azul. Observamos un acuerdo cercano entre la simulación y los resultados teóricos. Vale la pena mencionar que la aproximación es bastante precisa, especialmente en la región de alta SNR, que es la región de interés.

En las Figuras 8 y 9 muestra la métrica BER como función de la potencia de transmisión  $P_t$ , parametrizado por las distancias  $d_1$  y  $d_2$ , con cambios descritos en la Tabla 10.

Tabla 10

Variación de los parámetros  $d_1$  y  $d_2$ .

Parámetro	Valor
$d_1$	10, 20, 30, 40, 50 m
$d_2$	10, 20, 30, 40, 50 m

Figura 9

La probabilidad de error de bit (BER) en función de  $P_t$ , parametrizada por la distancia  $d_1$ .

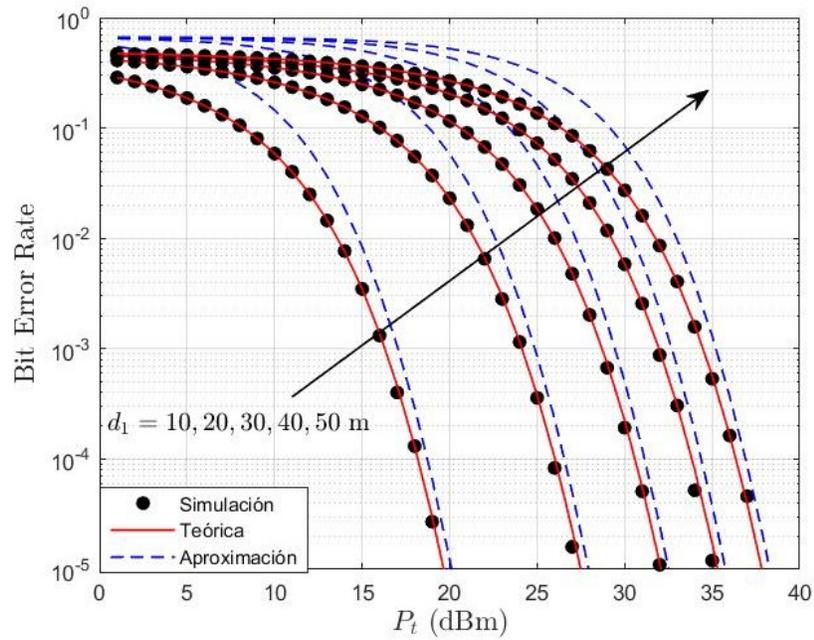
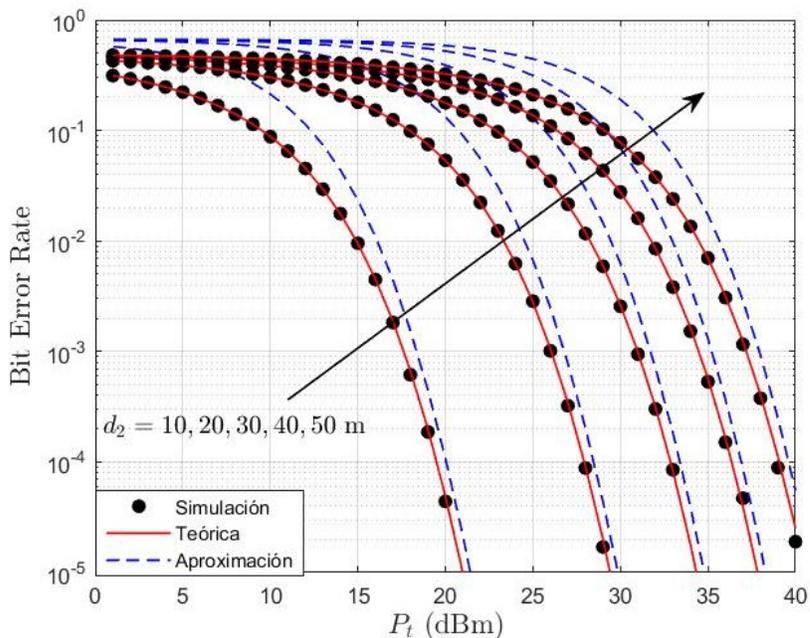


Figura 10

La probabilidad de error de bit (BER) en función de  $P_t$ , parametrizada por la distancia  $d_2$ .



Si aumentamos las distancias  $d_1$  y  $d_2$ , observamos que la BER disminuye. Esto ocurre porque se recibe un valor de potencia menor, lo que resulta en un deterioro en el rendimiento del sistema. Una vez más, es notable que las expresiones son más precisas en la región de alta SNR.

Finalmente, en las Figuras 10 y 11 muestra la métrica BER como función de la potencia de transmisión  $P_t$ , parametrizado por el exponente de pérdida de trayectoria  $\alpha_{txR}$  y  $\alpha_{Rx}$ , cuyos cambios se describen en la Tabla 11.

Tabla 11

Variación de los parámetros  $\alpha_{txR}$  y  $\alpha_{Rx}$ .

Parámetro	Valor
$\alpha_{txR}$	2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3
$\alpha_{Rx}$	2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3

Figura 11

Probabilidad de error de bit (BER) en función de  $P_t$ , parametrizada pérdida de trayectoria  $\alpha_{txR}$ .

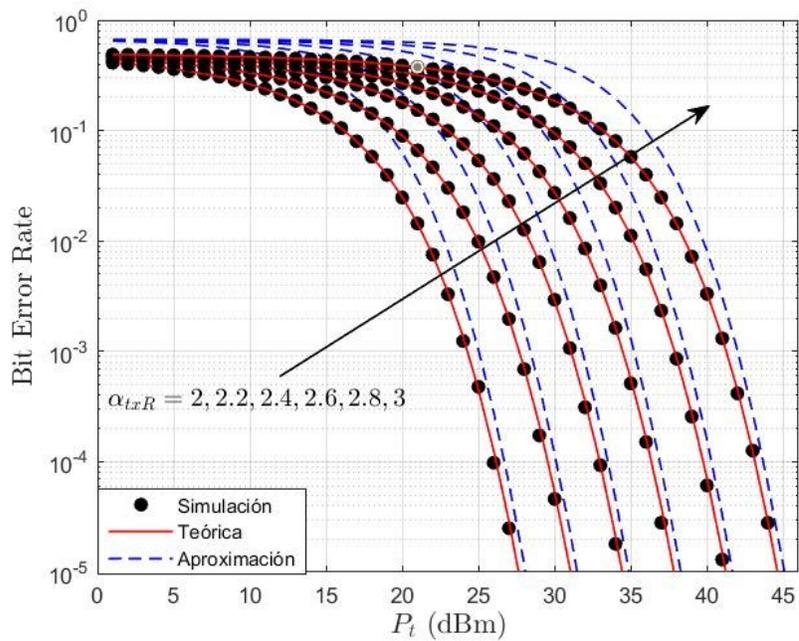
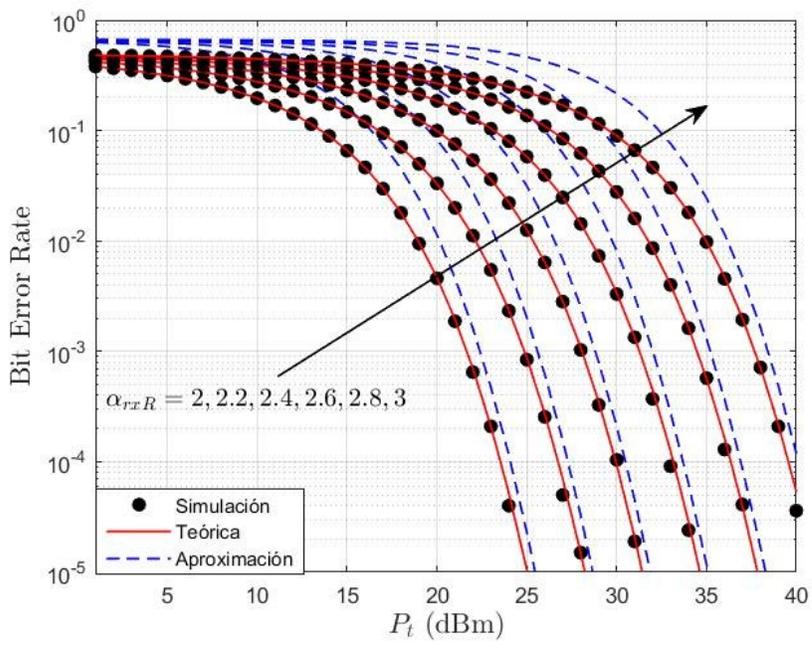


Figura 12

Probabilidad de error de bit (BER) en función de  $P_t$ , parametrizada pérdida de trayectoria  $\alpha_{rxR}$ .



Es importante destacar que al aumentar los parámetros  $\alpha_{txR}$  y  $\alpha_{Rrx}$ , se produce un aumento en la potencia de outage. Esto se debe a la alta pérdida de trayectoria, lo que resulta en un aumento en el exponente de pérdida de trayectoria, lo que hace que el canal sea más severo para las señales transmitidas. Como consecuencia, el receptor obtiene menos potencia, lo que resulta en una mayor BER.

## Capítulo V

### Conclusiones y Recomendaciones

#### Conclusiones

Este trabajo abordó de manera exhaustiva la evaluación de la potencia de fallo de transmisión (OP) y la tasa de error de bits (BER) en un sistema de comunicación respaldado por Superficies Inteligentes Reconfigurables (RIS). A lo largo del segundo capítulo, se realizó un análisis detallado de los términos y conceptos fundamentales relacionados con los sistemas de comunicación, junto con una identificación de los diversos arreglos de antenas en aplicaciones como las superficies inteligentes o metasuperficies. Asimismo, se llevó a cabo una comparación exhaustiva entre las RIS y las LIS, revelando diferencias en términos del número de elementos en los arreglos de antenas y su capacidad de configuración, aunque la RIS sobresalió por su facilidad superior de adaptación a las necesidades específicas. Es relevante destacar que ambas, RIS y LIS, compartieron el mismo objetivo y funcionalidad: mejorar los sistemas de comunicación al dirigir la reflexión de señales transmitidas hacia direcciones óptimas que favorezcan una recepción mejorada de las mismas.

El tercer capítulo se dedicó al modelado exhaustivo del sistema objeto de análisis, el cual comprende tanto su emisor como su receptor, ambos equipados con sus correspondientes antenas, además de la presencia de la RIS. En esta configuración, se procedió a un minucioso análisis utilizando el Teorema del Límite Central (CTL). La elección de este enfoque se sustentó en la naturaleza del canal, caracterizado por su distribución Rayleigh, que rige las conexiones tanto entre el emisor y la RIS, como entre la RIS y el receptor. Además, la elección se vio respaldada por la consideración de un elevado número de elementos en la RIS. Dicha elección metodológica permitió la transformación del sistema en variables gaussianas, lo que a su vez facilitó el cálculo de la función de distribución acumulada (CDF), desempeñando un papel esencial en la maximización del sistema. El resultado de este análisis culminó en la

obtención de la probabilidad de fallo de transmisión (outage), lo cual constituye un indicador fundamental en la evaluación del rendimiento del sistema bajo estudio.

Como se observó en el análisis de resultados, las fórmulas calculadas teóricamente muestran un alto nivel de precisión, especialmente en la región de alta SNR para la probabilidad de outage, lo que nos muestra el alto rendimiento de un sistema asistido por RIS.

En cuanto al análisis de BER, se observó que es necesaria una aproximación debido a los límites en su integral, al intentar resolver la no fue posible por los métodos comunes. Debido a esto se procedió a buscar una posible aproximación, y en este caso se logró la aproximación correcta utilizando la ecuación  $erfc(x) \approx \frac{1}{6}e^{-x} + \frac{1}{2}e^{-\frac{4x}{3}}$  propuesta en (Chiani et al., 2003, Ec. 14). Esto proporcionó una mejor aproximación con los resultados simulados, mostrando que el sistema tiene un rendimiento eficiente en la región de alta SNR, lo cual es un resultado esperado. Para verificar la ecuación obtenida, se realizó una segunda aproximación de la ecuación con el objetivo de reducir los valores constantes cuyo resultado se observa como una segunda aproximación. Ambas ecuaciones obtenidas funcionan con gran precisión comparando el resultado obtenido por simulación, este análisis es válido siempre que el argumento de la ERFC sea de un valor alto.

Es importante apreciar que, al realizar distintas variaciones en la configuración del sistema de comunicación como variar la potencia de transmisión, las distancias y la pérdida de trayectoria ayudan a verificar su comportamiento. Por esto, se observó que las ecuaciones obtenidas para el sistema de comunicaciones genérico modelado, tiene una muy buena precisión permitiendo observar su diferente funcionamiento en varias combinaciones de parámetros y así podemos concluir el modelamiento matemático del sistema genérico es válido para cualquier variación, donde su rendimiento analizado tanto por la potencia de outage como la probabilidad de error de bit es realmente bueno.

Por último, cabe recalcar que las ecuaciones obtenidas para ambos análisis provienen del cálculo matemático propio del escenario genérico modelado, lo que ha permitido apreciar un nuevo enfoque matemático para el análisis de sistemas asistidos por RIS sobre todo el análisis BER.

### **Recomendaciones**

En análisis de sistemas de comunicaciones se recomienda hacer uso de diferentes métricas que puedan demostrar la capacidad y la funcionalidad del sistema, esto nos lleva a analizar también el entorno en el que se va a modelar el sistema, es necesario escoger bien valor de los exponentes de propagación, así como el valor de atenuación de la señal que se va a manejar como el peor de los casos ya en un escenario de comunicaciones específico.

El número de elementos de la RIS también es recomendable escoger un valor que represente importante en el análisis, de igual manera, se conoce que un gran número de elementos es capaz de dar un mejor rendimiento, por ende, se debe escoger un valor superior a 2 elementos. Las distancias tanto entre el emisor y la RIS como la RIS y el receptor también deben ser seleccionadas de manera coherente con el entorno de propagación.

De esta manera, al tomar en cuenta el escenario genérico modelado con varias combinaciones se puede analizar el modelamiento y obtener matemáticamente ecuaciones que representen mejor el sistema de comunicaciones, igualmente, se debe analizar los límites y la funcionalidad de las ecuaciones obtenidas puesto que al igual que ocurrió en este trabajo se puede obtener nuevas aproximaciones que representen de mejor manera el desempeño del modelo a plantear.

### **Trabajos futuros**

Existen diferentes caminos a tomar para tener diferentes modelamientos de sistemas de comunicaciones, partiendo de un escenario genérico como el que actualmente se analizó.

Se propone modelar un sistema de comunicaciones donde:

- El emisor como el receptor cuenten con varias antenas y analizar el comportamiento de la RIS.
- Analizar diferentes tipos de canales en el sistema de comunicación, como por ejemplo canales con desvanecimiento.
- Comprobar el comportamiento de otros tipos de modulación para el análisis del BER en el sistema de comunicaciones.
- Analizar el desempeño del sistema en diferentes entornos de propagación, así como diferentes métricas que permitan apreciar la funcionalidad de un sistema de comunicaciones asistido por RIS en varios entornos.

## Bibliografia

- Alam, S. (2008). *On Effect of Additive White Gaussian Noise ( AWGN ) on the Transmitted*.
- Alghamdi, R., Alhadrami, R., Alhothali, D., Almorad, H., Faisal, A., Helal, S., Shalabi, R., Asfour, R., Hammad, N., Shams, A., Saeed, N., Dahrouj, H., Al-Naffouri, T. Y., & Alouini, M. S. (2020). Intelligent Surfaces for 6G Wireless Networks: A Survey of Optimization and Performance Analysis Techniques. *IEEE Access*, 8, 202795–202818.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031959>
- Basar, E. (2019). Transmission through Large Intelligent Surfaces: A New Frontier in Wireless Communications. *2019 European Conference on Networks and Communications, EuCNC 2019*. <https://doi.org/10.1109/EuCNC.2019.8801961>
- Basar, E., Di Renzo, M., De Rosny, J., Debbah, M., Alouini, M. S., & Zhang, R. (2019). Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Access*, 7, 116753–116773. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935192>
- Boulogeorgos, A. A. A., Alexiou, A., & Renzo, M. Di. (2022). Outage Performance Analysis of RIS-Assisted UAV Wireless Systems Under Disorientation and Misalignment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(10), 10712–10728.  
<https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3187050>
- Chiani, M., Dardari, D., & Simon, M. K. (2003). New exponential bounds and approximations for the computation of error probability in fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2(4), 840–845. <https://doi.org/10.1109/TWC.2003.814350>
- Dubendorf, V. A. (2003). *Wireless Data Technologies* (Vol. 1). John Wiley & Sons.
- Gawas, A. (2015). An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and*

*Communication*, 3(5), 3130–3133.

[https://www.academia.edu/download/48663522/An\\_Overview\\_on\\_Evolution\\_of\\_Mobile\\_Wireless\\_Communication\\_Networks-\\_1G-6G.pdf](https://www.academia.edu/download/48663522/An_Overview_on_Evolution_of_Mobile_Wireless_Communication_Networks-_1G-6G.pdf)

Hassouna, S., Jamshed, M. A., Rains, J., Kazim, J. ur R., Rehman, M. U., Abualhayja, M., Mohjazi, L., Cui, T. J., Imran, M. A., & Abbasi, Q. H. (2023). A survey on reconfigurable intelligent surfaces: Wireless communication perspective. *IET Communications*, 17(5), 497–537. <https://doi.org/10.1049/CMU2.12571>

Ijala, A. D., Thomas, S., Oshiga, O., Hussein, S. U., Karataev, T., & Osanaiye, O. (2021). A Review of Vision and Challenges of the 6G Wireless Networks. *2021 1st International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science, ICMEAS 2021*. <https://doi.org/10.1109/ICMEAS52683.2021.9692366>

Jha, K. R., & Sharma, S. K. (2021). Multifunctional Antennas for 4G/5G Communications and MIMO Applications. *Multifunctional Antennas and Arrays for Wireless Communication Systems*, 279–320. <https://doi.org/10.1002/9781119535096.CH8>

Jian, M., Alexandropoulos, G. C., Basar, E., Huang, C., Liu, R., Liu, Y., & Yuen, C. (2022). Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Overview of hardware designs, channel models, and estimation techniques. *Intelligent and Converged Networks*, 3(1), 1–32. <https://doi.org/10.23919/ICN.2022.0005>

Jorswieck, E. A., & Boche, H. (2007). Outage probability in multiple antenna systems. *European Transactions on Telecommunications*, 18(3), 217–233. <https://doi.org/10.1002/ETT.1135>

Kachhavay, M., & Thakare, A. (2014). 5G technology-evolution and revolution. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 3(3), 1080–1087.

<https://www.academia.edu/download/33363004/V3I3201499a91.pdf>

- Kudathanthirige, D., Gunasinghe, D., & Amarasuriya, G. (2020). Performance Analysis of Intelligent Reflective Surfaces for Wireless Communication. *IEEE International Conference on Communications, 2020-June*. <https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9148760>
- Liaskos, C., Nie, S., Tsioliaridou, A., Pitsillides, A., Ioannidis, S., & Akyildiz, I. (2018). A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces. *IEEE Communications Magazine*, 56(9), 162–169. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700659>
- Liberti, J., & Rappaport, T. (1999). *Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/553614>
- Lin, S., Zou, Y., Zhu, J., Guo, H., Li, B., & Xie, F. (2021). Outage Probability Analysis of RIS-assisted Wireless Powered Multi-user Communications. *13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2021*. <https://doi.org/10.1109/WCSP52459.2021.9613340>
- Makarfi, A. U., Rabie, K. M., Kaiwartya, O., Badarneh, O. S., Li, X., & Kharel, R. (2020). Reconfigurable Intelligent Surface Enabled IoT Networks in Generalized Fading Channels. *IEEE International Conference on Communications, 2020-June*. <https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9148610>
- Markosyan, M. v., Safin, R. T., Artyukhin, V. v., & Satimova, E. G. (2018). Determination of the  $E_b / N_0$  Ratio and Calculation of the Probability of an Error in the Digital Communication Channel of the IP-Video Surveillance System. , " *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, 2018*, 173–176. <https://csit.am/2017/Proceedings/TN/TN3.pdf>
- Mitra, P., Bhattacharjee, R., Chatterjee, T., De, S., Karmakar, R., Ghosh, A., & Adhikari, T. (2021). Towards 6G Communications: Architecture, Challenges, and Future Directions. 12

*International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 1–7. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9580084/>

Mukhopadhyay, S., Agarwal, V., & ... S. S. (2016). A study on wireless communication networks based on different generations. *International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER)*, 2, 300–304. [https://www.researchgate.net/profile/Shameek-Mukhopadhyay/publication/303819327\\_A\\_Study\\_On\\_Wireless\\_Communication\\_Networks\\_Based\\_On\\_Different\\_Generations/links/575a9c3608aed884620d7c30/A-Study-On-Wireless-Communication-Networks-Based-On-Different-Generations.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Shameek-Mukhopadhyay/publication/303819327_A_Study_On_Wireless_Communication_Networks_Based_On_Different_Generations/links/575a9c3608aed884620d7c30/A-Study-On-Wireless-Communication-Networks-Based-On-Different-Generations.pdf)

Naqvi, S. I., Naqvi, A. H., Arshad, F., Riaz, M. A., Azam, M. A., Khan, M. S., Amin, Y., Loo, J., & Tenhunen, H. (2019). An Integrated Antenna System for 4G and Millimeter-Wave 5G Future Handheld Devices. *IEEE Access*, 7, 116555–116566. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936513>

Nguyen, B. C., Hoang, T. M., Dung, L. T., & Kim, T. (2021). On Performance of Two-Way Full-Duplex Communication System with Reconfigurable Intelligent Surface. *IEEE Access*, 9, 81274–81285. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086067>

Pei, X., Yin, H., Tan, L., Cao, L., Li, Z., Wang, K., Zhang, K., & Bjornson, E. (2021). RIS-Aided Wireless Communications: Prototyping, Adaptive Beamforming, and Indoor/Outdoor Field Trials. *IEEE Transactions on Communications*, 69(12), 8627–8640. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3116151>

Reicino Prieto, C. R. (2017). *Implementación de arreglos de antenas multibanda para la Quinta Generación Móvil* [Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas]. <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7884/Carlos%20Rafael%20Reicino%20Prieto..pdf?sequence=1&isAllowed=n>

- Sikri, A., Mathur, A., & Kaddoum, G. (2022). Performance of RIS-Aided Wireless Systems in the Presence of Mobile Interferers. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, 2022-September*, 427–431.  
<https://doi.org/10.1109/PIMRC54779.2022.9977997>
- Thirumavalavan, V. C., & Jayaraman, T. S. (2020). BER Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Downlink Power Domain NOMA System. *2020 International Conference on COMMunication Systems and NETWORKS, COMSNETS 2020*, 519–522.  
<https://doi.org/10.1109/COMSNETS48256.2020.9027303>
- Wang, T., Badiu, M. A., Chen, G., & Coon, J. P. (2021). Outage Probability Analysis of RIS-Assisted Wireless Networks with von Mises Phase Errors. *IEEE Wireless Communications Letters*, 10(12), 2737–2741. <https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3113830>
- Wu, Q., Guan, X., & Zhang, R. (2022). Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Energy and Information Transmission: An Overview. *Proceedings of the IEEE*, 110(1), 150–170.  
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3121790>
- Wu, Q., Zhang, S., Zheng, B., You, C., & Zhang, R. (2021). Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial. *IEEE Transactions on Communications*, 69(5), 3313–3351. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3051897>
- Yu, X., Xu, D., Sun, Y., Ng, D. W. K., & Schober, R. (2020). Robust and Secure Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38(11), 2637–2652. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007043>