

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **COMUNICACIONES 6G ASISTIDAS POR SUPERFICIES INTELIGENTES RECONFIGURABLES**

**Simulación de Comunicaciones Inalámbricas Asistidas por  
Superficies Inteligentes Reconfigurables con Errores de Fase vs.  
Comunicaciones Inalámbricas Asistidas por Relays**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**EDUARDO RAFAEL FLORES LEÓN**

**eduardo.flores01@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: JOSÉ DAVID VEGA SÁNCHEZ**

**jose.vega01@epn.edu.ec**

**DMQ, marzo 2024**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, EDUARDO RAFAEL FLORES LEÓN declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

**EDUARDO RAFAEL FLORES LEÓN**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por EDUARDO RAFAEL FLORES LEÓN, bajo mi supervisión.

**JOSÉ DAVID VEGA SÁNCHEZ**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

EDUARDO RAFAEL FLORES LEÓN

JOSÉ DAVID VEGA SÁNCHEZ

## **DEDICATORIA**

Dedicada con profundo amor y gratitud a mis padres, Eduardo y Katy, cuyo incansable sacrificio y apoyo incondicional han estado detrás de cada logro en mi vida. Su amor inquebrantable y sus consejos sabios han sido el faro que me ha guiado a lo largo de este viaje académico. A Karo, mi compañera de viaje y amiga fiel, quien compartió cada desafío y triunfo conmigo, su apoyo incondicional y su presencia constante han sido una bendición. Y a mí mismo, por la perseverancia, la pasión y el compromiso que he dedicado a este trabajo.



## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, cuya presencia y guía han sido la luz que ha iluminado cada paso de este viaje académico. Su infinita sabiduría y amor han sido mi sostén en los momentos de incertidumbre y dificultad, brindándome fuerza y esperanza para alcanzar mis metas.

A mis amados padres, Eduardo y Katy, les debo todo. Su inquebrantable apoyo, sacrificio y amor incondicional han sido el fundamento sobre el cual he construido mi camino universitario. Desde el primer día, su constante aliento y motivación han sido mi impulso para perseverar, incluso en los momentos más desafiantes. Sus valores, enseñanzas y ejemplo han moldeado mi carácter y me han inspirado a superar obstáculos con determinación y gratitud. Este logro es también suyo; su dedicación y sacrificio son la base sobre la cual se erige mi éxito.

A mi amigo Carlos, a pesar de la distancia física, su constante apoyo y ánimo fueron invaluable durante este proceso.

A Karolina, por ser mi compañera de viaje en esta travesía académica, que con su apoyo y aliento hicieron más llevadera cada etapa, especialmente durante este tramo final de recorrido universitario.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer al Dr. José David Vega por su invaluable orientación y colaboración en la elaboración de este trabajo. Sin el respaldo de todas estas personas extraordinarias, este logro no hubiera sido posible. ¡Gracias!

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4.1 Perspectiva en las Comunicaciones Móviles partiendo de 5G hasta 6G.....	3
1.4.1.1 Limitaciones de 5G .....	3
1.4.1.2 Tecnologías y Oportunidades en 6G .....	4
1.4.2 Factores que Afectan las Comunicaciones Inalámbricas .....	5
1.4.2.1 Propagación Multitrayecto.....	5
1.4.2.2 Desvanecimiento.....	7
1.4.2.3 Desvanecimiento a Gran Escala .....	7
1.4.2.4 Desvanecimiento a Pequeña Escala .....	8
1.4.2.5 Distribución Rayleigh en Desvanecimiento a Pequeña Escala.....	8
1.4.2.6 Distribución Rician en Desvanecimiento a Pequeña escala .....	9
1.4.3 Indicadores de Rendimiento para un Sistema de Comunicación Inalámbrico	
10	
1.4.3.1 SINR.....	10
1.4.3.2 Tasa de Datos Promedio Alcanzable .....	10
1.4.3.3 Eficiencia Energética.....	10
1.4.4 Fundamentos de la Tecnología Relay .....	11
1.4.4.1 Relay en Modo: Decodificación y Reenvío.....	11
1.4.4.2 Aplicaciones en la Red 5G .....	13
1.4.5 Fundamentos de la RIS .....	13
1.4.5.1 Introducción en la RIS.....	13
1.4.5.2 Errores de Fase en la RIS.....	15
2 METODOLOGÍA.....	16
2.1 Preliminares .....	16
2.2 Diagramas de Flujo.....	17

2.3	Configuración inicial.....	18
2.4	Ganancias del Canal y Generación del Desvanecimiento a Gran Escala .....	20
2.5	Introducción de los Errores de Fase .....	21
2.6	Introducción del Desvanecimiento a Pequeña Escala .....	22
2.7	Ruido AWGN .....	23
2.8	Potencia de Transmisión Requerida .....	24
2.8.1	Caso SISO .....	24
2.8.2	Caso RIS.....	25
2.8.3	Caso Relay DF.....	25
2.9	Cálculo de la Eficiencia Energética.....	27
3	RESULTADOS numéricos y discusiones .....	31
3.1	Escenarios de simulación .....	31
3.2	Análisis de Métricas de Desempeño.....	32
3.2.1	Potencia de Transmisión Requerida .....	32
3.2.2	Análisis de la Eficiencia Energética .....	37
4	Conclusiones y recomendaciones.....	42
4.1	Conclusiones .....	42
4.2	Recomendaciones .....	44
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46
6	ANEXOS.....	49
	ANEXO I.....	49

## RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en la comparación de desempeño de red de un sistema de comunicaciones inalámbrico asistido por Superficies Inteligentes Reconfigurables (RIS, del inglés Reconfigurable Intelligent Surface) con Errores de Fase y un sistema de comunicaciones inalámbrico asistido por Relay, a través de simulación Monte Carlo en MATLAB. El sistema de modelo para ambos escenarios está compuesto de tres nodos principales, a saber, i) transmisor, ii) RIS o Relay y iii) receptor. Los canales asumidos en los modelos de sistema son de tipo Rayleigh (en enlaces sin línea de vista) y tipo Rician (en enlaces con línea de vista). Las métricas utilizadas para comprar el desempeño de red entre ambas tecnologías son potencia de transmisión requerida y eficiencia energética. Dichas métricas de desempeño son presentadas a través de una serie de curvas de rendimiento que permitan caracterizar a cada uno de los sistemas, definiendo así, cuál es la tecnología que dependiendo de las circunstancias se pueda acoplar mejor al medio y presentar un mejor rendimiento en la red. En el análisis de resultados, se discute la importancia de considerar un gran número de elementos reflectantes que conforman a la RIS para obtener desempeños superiores a tecnologías tradicionales, tales como el Relay.

**PALABRAS CLAVE:** Superficies Inteligentes Reconfigurables, Relay Decode-and-Forward, Eficiencia Energética, Comunicaciones Inalámbricas, Errores de Fase.

## ABSTRACT

This work focuses on the comparison of the network performance of a wireless communications system assisted by Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) with Phase Errors and a wireless communications system assisted by Relay through Monte Carlo simulation in MATLAB. The system model for both scenarios is composed of three main nodes, namely, i) transmitter, ii) RIS or Relay, and iii) receiver. The channels assumed in the system models are Rayleigh type (on links without a line of sight) and Rician type (on links with a line of sight). The metrics used to compare network performance between both technologies are the required transmission power and energy efficiency. These performance metrics are presented through a series of performance curves that allow each of the systems to be characterized. Thus, it is essential to define which technology, depending on the circumstances, can best fit the considered environment and present better network performance. Finally, the analysis of results discusses the importance of considering a large number of reflective elements that make up the RIS to obtain superior performance than traditional technologies, such as Relay.

**KEYWORDS:** Reconfigurable Intelligent Surfaces, Decode-and-Forward (DF) Relaying, Energy Efficiency, Wireless Communications, Phase Errors.

# 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la red móvil 5G (del inglés, fifth generation), ha sido implementado en numerosos países y la cantidad de personas que utilizan el 5G ha crecido de manera significativa en los últimos años. La red 5G, a diferencia de las generaciones previas que se enfocaban principalmente en mejorar la capacidad de las redes, el 5G va más allá al expandir los servicios de comunicación móvil no solo entre personas, sino también entre objetos y de los consumidores a las industrias específicas. Esto implica una amplia escala potencial de suscripciones móviles que va más allá de los simples miles de millones de la población mundial, permitiendo una interconectividad casi ilimitada entre seres humanos, máquinas y objetos [1].

Para la siguiente década, la idea de las comunicaciones 6G (del inglés, sixth generation) toma fuerzas dentro de la comunidad científica e industria. En esta se buscará corregir las limitaciones inherentes presentes en 5G por medio del uso de los siguientes conceptos: trasladar la comunicación a bandas más altas de frecuencia (ondas milimétricas y THz). Así como también, la generación de ambientes radioeléctricos inteligentes a través de superficies reconfigurables RIS, del inglés, Reconfigurable Intelligent Surface y la eliminación de las tradicionales estructuras celulares, conocida como MIMO libre de celdas (CFMIMO, del inglés cell free multiple-input multiple output) [2].

Recientemente, varias tecnologías están emergiendo como candidatas para 6G. En ellas la estructura de la antena en un sistema de comunicación inalámbrica se puede considerar como el componente clave en la arquitectura de red y será el factor determinante que permitirá que las redes 6G alcancen desempeños muy superiores a la red 5G [2]. Dentro de estas tecnologías podemos destacar RIS, la cuál es una superficie plana compuesta por numerosos elementos reflectantes pasivos de bajo costo. A diferencia de las tecnologías actuales de amplificación de la señal en la obstrucción del medio entre transmisor (TX) y receptor (RX) en enlaces inalámbricos, la RIS modifica de manera proactiva el canal inalámbrico entre Tx/Rx mediante una reflexión inteligente y altamente controlable de las señales que inciden en la superficie inteligente. A través de una adecuada configuración de la formación de haces pasiva, la señal reflejada por RIS puede sumarse constructivamente a las señales provenientes de otras rutas, aumentando así la potencia de la señal recibida en el receptor, o sumarse destructivamente para cancelar señales no deseadas, como interferencias [3].

Con los antecedentes previos, en este trabajo se simulará en el entorno de MATLAB dos sistemas de comunicaciones inalámbricas, a saber, i) un sistema inalámbrico asistido por

RIS asumiendo errores de fase y ii) un sistema inalámbrico asistido por la tecnología de Relay. Se realizará comparaciones entre ambos sistemas de comunicación utilizando métricas como la potencia de transmisión variando la distancia y la eficiencia energética variando la tasa alcanzable. Así, mediante el análisis de ambos casos, se podrá concluir mediante resultados la efectividad de la RIS vs. la tecnología Relay ampliamente utilizada en la actualidad.

## **1.1 Objetivo general**

Simular y comparar la eficiencia espectral y el desempeño de una comunicación inalámbrica asistida por Relays vs. una comunicación asistida por una Superficie Inteligente Reconfigurable asumiendo errores de fase.

## **1.2 Objetivos específicos**

- 1.2.1 Investigar el concepto y funcionamiento de las superficies inteligentes reconfigurables en las comunicaciones inalámbricas, así como también describiendo su arquitectura.
- 1.2.2 Analizar la parte matemática y el uso de Relays en las comunicaciones inalámbricas y comprender las ventajas y limitaciones de esta tecnología.
- 1.2.3 Implementar un modelo de sistema inalámbrico para su simulación en MATLAB que integre superficies inteligentes reconfigurables con errores de fase vs. comunicaciones asistidas por Relays.
- 1.2.4 Comparar y analizar en los sistemas de comunicación inalámbricas asistidos por superficies inteligentes reconfigurables con errores de fase vs. las comunicaciones asistidas por Relays mediante el uso de las métricas de desempeño tales como: potencia de transmisión con su distancia, eficiencia energética y tasa media alcanzable de datos.

## **1.3 Alcance**

El alcance de este componente es realizar una simulación en MATLAB de comunicaciones inalámbricas asistidas por RIS asumiendo errores de fase de reflexión en la RIS hacia el Rx. Además, se asumen todos los canales Tx-RIS y RIS-Rx experimenten desvanecimiento tipo Rayleigh independiente e idénticamente distribuidos; y que todos los nodos de la red poseen una única antena. El enlace entre Tx-Rx se asume bloqueado debido a la obstrucción existente de edificios, árboles, etc. En este componente, la tecnología RIS es

comparada en desempeño con la tecnología del Relay, el cual trabaja bajo el modo Decode-and-Forward. El objetivo es investigar cuantos elementos de la RIS son necesarios en el sistema de modelo propuesto para que esta nueva tecnología supere el desempeño del Relay en términos de algunas métricas de desempeño que se detalla a continuación. Para el análisis de desempeño del sistema se examinará la potencia transmitida vs. distancia y la eficiencia energética vs. la tasa de capacidad alcanzable, variando el número de elementos en la RIS y asumiendo diferentes tipos de errores de fases en el RIS.

## **1.4 Marco Teórico**

### **1.4.1 Perspectiva en las Comunicaciones Móviles partiendo de 5G hasta 6G.**

A lo largo del mundo existen países donde la tecnología 5G no ha sido implementada en su totalidad en su primera fase. Sin embargo, en los últimos años, a través de la colaboración entre la academia y la industria ya se ha comenzado a dar una idea de cómo será la siguiente generación de red móvil 6G. En particular, las investigaciones se enfocan en las nuevas tecnologías habilitantes (por ejemplo, superficies inteligentes reconfigurables, sistemas con antenas fluidas, comunicaciones holográficas) que serán el pilar fundamental del desarrollo de 6G [4]. Cabe mencionar que el estado de arte de estas tecnologías se encuentra en su infancia, por lo que, una adecuada investigación de las mismas favorecerá a su implementación y su aceptación comercial en futuras redes móviles [5].

Las futuras redes móviles de próxima generación se caracterizarán por la heterogeneidad y la flexibilidad para satisfacer las necesidades dinámicas de las aplicaciones en constante evolución. Específicamente, 6G prioriza un servicio instantáneo, único y escalable con latencias extremadamente bajas y velocidades ultra-altas que cambiarán de forma rotunda la manera de comunicarnos y acceder a diferentes tipos de servicios (por ejemplo, salud, seguridad). Las aplicaciones de consumo actuales, como la transmisión de vídeo de alta calidad, la navegación web y la voz, se convertirán en características estándar de todas las redes futuras. Las redes móviles de próxima generación deben estar preparadas para proporcionar un mayor nivel de servicio y ser capaces de hacer frente al comportamiento impredecible de aplicaciones exigentes, lo que se convertirá en un factor clave en el éxito de la implementación y el despliegue de la futura red celular [6].

#### **1.4.1.1 Limitaciones de 5G**

La densificación se presenta como un componente fundamental de la red 5G con un despliegue masivo de células pequeñas. No obstante, los beneficios derivados de este



despliegue, que incluyen una mejora en la cobertura y mayores velocidades de transferencia de datos, evidencian rendimientos decrecientes a medida que se implementan más células pequeñas. Esto principalmente debido a los aumentos significativos en los costos de infraestructura [7]. Para contrarrestar esto, se ha considerado la agregación de portadoras, que posibilita atender a los usuarios con más de una portadora para proporcionar un ancho de banda superior. Para tolerar el uso de las diferentes bandas de frecuencia, los usuarios finales necesitan migrar de hardware [8].

Una solución alternativa para dicho problema es la red de acceso de radio en la nube (del inglés, Cloud Radio Access Network, C-RAN) como parte central de la red 5G. Sin embargo, a medida que las redes experimentan un crecimiento exponencial, se vuelve más claro que la infraestructura basada únicamente en la nube centralizada resulta insuficiente, demandando la incorporación de procesamientos en la niebla (del inglés, Fog Computing) y en los nodos de borde. Por otro lado, la seguridad de la información en las tecnologías clave de la red 5G no está completamente desarrollada para implementarse a gran escala. En particular, en los nuevos entornos de red tal como las redes definidas por software (del inglés, Software Defined Network, SDN), donde faltan mecanismos para verificar la confianza entre las aplicaciones. Otro ejemplo se presenta en la virtualización de funciones de red (del inglés, Network Function Virtualization, NFV) donde los atacantes pueden dirigirse a componentes a nivel de software, como el gestor de infraestructura virtual, generando registros falsos que limiten el funcionamiento efectivo de la NFV [9].

Como se mencionó previamente, la red móvil 5G busca comunicaciones ultrarrápidas y de baja latencia (del inglés, Ultra-High Reliability & Low Latency, URLLC). Aunque esta característica solo está presente en la sección de borde de la red, careciendo una integración real en toda su infraestructura [10]. Las redes heterogéneas (del inglés, Heterogeneous Network, HetNets) también constituye un elemento crucial en 5G. Sin embargo, en la actualidad, estas redes solo son del tipo terrestre. Asimismo, es fundamental destacar que en la red móvil 5G existen ataques de denegación de servicio (del inglés, Denial of Service, DoS) y amenazas que ponen en riesgo su disponibilidad [11]. Detallar y mejorar estas cuestiones se torna esencial en el diseño de redes móviles futuras, especialmente a medida que estas crecen en escala, abarcando redes con miles de millones de nodos/usuarios.

#### **1.4.1.2 Tecnologías y Oportunidades en 6G**

A primera vista, puede considerarse que la red móvil 6G será una evolución de sus predecesoras 5G, por ejemplo, pasar de comunicaciones por ondas milimétricas a

comunicaciones por Tera Hertz [12]. No obstante, nuevas necesidades de los usuarios y casos de uso completamente nuevos, junto con tendencias emergentes para redes para 2030 pueden plantear desafíos más complejos en las redes móviles de siguiente generación. La red 6G plantea adoptar paradigmas de comunicación radicalmente nuevos en la capa física, nunca antes vistos en las redes móviles convencionales [4]. En este contexto, una tecnología revolucionaria se centra en controlar la reflexión, dispersión y refracción de las ondas electromagnéticas al incidir en superficies planas. En otras palabras, se busca la manipulación de la propagación de la señal por el medio inalámbrico, con el fin de mejorar la calidad del servicio y/o la velocidad alcanzable. Este control del canal inalámbrico permite que aparezcan nuevas técnicas basados en la modulación inteligente, como la modulación basada en medios, la modulación por dispersión espacial y la modulación por índice de haz [13]. Todas estas se basan en cambios en los patrones de las señales recibidas, aprovechando antenas o dispersores reconfigurables para transmitir información adicional en entornos con amplia dispersión [14].

Basado en lo anterior, la tecnología conocida como RIS emergió en los recientes años para permitir el control del ambiente de propagación con el objetivo de optimizar la calidad de la señal recibida en un receptor deseado. En particular, RIS se basa en una extensa cantidad de componentes/antenas semi-pasivos que modifican la fase de la señal que incidente sobre la misma sin la necesidad de contar con numerosas cadenas de radio frecuencia (del inglés, radio frequency, RF) para decodificar/codificar y posteriormente retransmitir la señal, tal como la hace la tecnología conocida como Relay [15].

La red 6G busca obtener una velocidad de transmisión de datos ultrarrápida, eficiencia energética, cobertura y conectividad globales. Así como también una fiabilidad extraordinariamente alta y super bajas latencias; todas estas representan un conjunto de requisitos esenciales en la red móvil de próxima generación [16]. En este sentido, mediante la utilización de la tecnología RIS, el canal inalámbrico por primera vez entra en el diseño de la red como un todo, a diferencia de las redes móviles previas (por ejemplo, 5G) que utilizaban técnicas para mitigar los efectos del canal. En otras palabras, el canal inalámbrico en 6G será tratado como un aliado y no como un ente al cual combatir. Estas características únicas de RIS permiten el incremento de la tasa de datos y eficiencia energética desde el punto de vista de la no necesidad del uso de enormes cantidades de cadenas de RF.

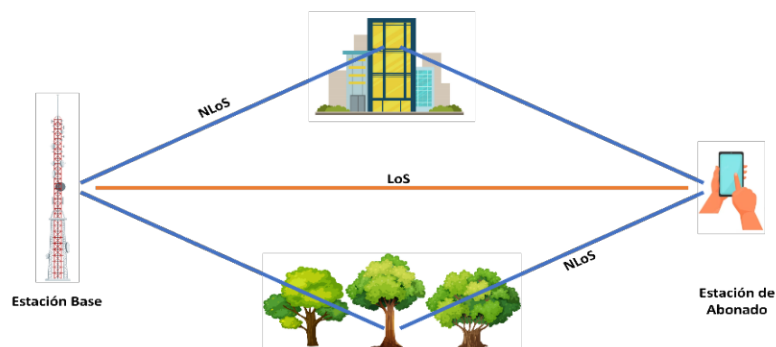
## **1.4.2 Factores que Afectan las Comunicaciones Inalámbricas**

### **1.4.2.1 Propagación Multitrayecto**

La propagación multitrayecto en las comunicaciones inalámbricas se produce cuando las señales llegan a una antena a través de más de un camino. Los caminos pueden entregar la señal en diferentes momentos. La propagación multitrayecto es causada por el difracción, la reflexión o la refracción de la señal al entrar en contacto con partes de la atmósfera (como conductos atmosféricos y la ionosfera), cuerpos de agua, características geológicas como montañas y edificaciones, provocando interferencias y atenuación de la señal [17].

Entre el Tx y el Rx se pueden presentar dos tipos de trayectorias que serán descritas a continuación (ver Figura 1.1):

- LoS (del inglés, Line-of-Sight), lo que implica que existe una línea de visión entre el Tx y Rx. Esto es posible cuando no hay obstrucción entre la estación base y las estaciones de abonado tanto fijas como móviles. Al tener una baja atenuación, ofrece una mayor intensidad de señal [18].
- NLoS (del inglés, Non-Line-of-Sight), implica que existen estructuras naturales o estructuras hechas por el ser humano obstaculizan el camino entre la estación base y las estaciones de abonado. En el camino, la señal experimenta atenuaciones, reflexiones, difracciones y dispersión [18].



**Figura 1.1** Trayectorias LoS y NLoS en base a [19].

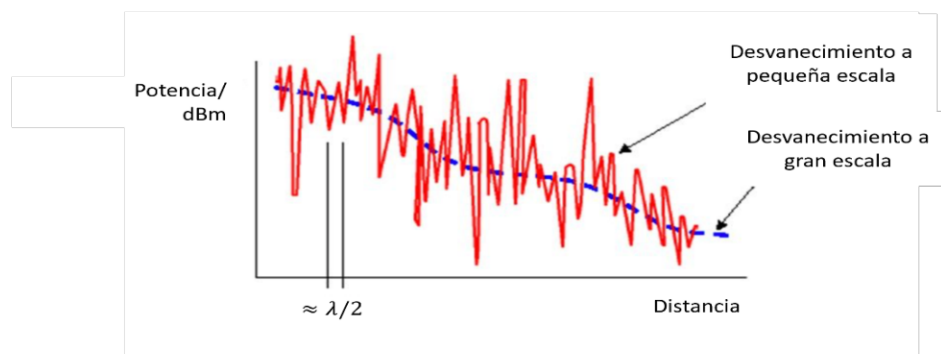
Para explicar a detalle lo que ocurre en la trayectoria NLoS se deben tener claros los siguientes conceptos:

- Reflexión: Cuando una señal impacta contra un objeto más grande que su longitud de onda, dependiendo del medio, la señal puede rebotar en otra dirección [19].
- Dispersión: Ocurre cuando la señal incide en un objeto de dimensiones iguales o menores a la longitud de onda de la señal. Esto provoca que la energía de la misma se propague en diferentes direcciones [19].

### 1.4.2.2 Desvanecimiento

La variación temporal en la potencia de la señal recibida debido a cambios en el medio de transmisión o en las rutas se denomina desvanecimiento. Este fenómeno está influenciado por diversos factores, como se mencionó anteriormente. En entornos fijos, el desvanecimiento se ve afectada por condiciones atmosféricas como la lluvia o los relámpagos. En entornos móviles, la atenuación está relacionada con obstáculos en la ruta que cambian con el tiempo, generando efectos de transmisión complejos en la señal emitida [20].

Fenómenos como la propagación multitrayecto, reflexión, difracción, dispersión y absorción resultan en la disminución de la señal que se propaga a través del aire y pueden categorizarse de la siguiente manera: gran y pequeña (ver Figura 1.2) [21].



**Figura 1.2** Desvanecimiento a Gran y Pequeña escala en base a [22].

### 1.4.2.3 Desvanecimiento a Gran Escala

Este tipo de desvanecimiento se presenta cuando el abonado recorre grandes distancias, es decir, la distancia entre la estación base y la estación de abonado es más grande. Presenta la característica de ser a largo plazo y lento. La intensidad de la señal recibida disminuye conforme la distancia se incrementa, ocasionada por la pérdida de trayectoria u obstáculos en el camino, como edificios, vegetación y montañas. Fenómenos atmosféricos, tales como la lluvia, la nieve y el granizo, también influyen en este desvanecimiento; además, el fenómeno de sombra (del inglés, shadowing) representa otro desafío bien reconocido [23]. Este fenómeno puede ser representado a través de una distribución log-normal ya que tiene carácter estadístico. A continuación, se detallará las causas principales de las previamente mencionadas:

- **Path-Loss:** Al español corresponde a las pérdidas por trayectoria. Involucra el decrecimiento de la potencia de la señal en función de la distancia, teniendo una relación directamente proporcional [24]. Se tiene una variedad de modelos especificados en la normativa 3GPP (del inglés, 3rd Generation Partnership Project) que detallan las pérdidas por trayectoria presentes en la Tabla 5.1 en Anexo I. En este caso se utilizan los modelos determinísticos de propagación en ambientes urbanos y exteriores:

$$PL = G_1 + G_2 - 28 - 20 \log_{10}(f_c) - 22 \log_{10}(d) \quad \text{para LoS} \quad (1.1)$$

$$PL = G_1 + G_2 - 22.7 - 26 \log_{10}(f_c) - 36.7 \log_{10}(d), \quad \text{para NLoS} \quad (1.2)$$

Dónde,  $f_c$  corresponde a la frecuencia de corte,  $d$  corresponde a la distancia entre Tx y Rx,  $G_1$  corresponde a la ganancia de la antena transmisora y  $G_2$  corresponde a la ganancia de la antena receptora

- **Shadowing:** Al español corresponde a sombra. Se refiere a la variación en la potencia de la señal recibida causada por la presencia de objetos que obstruyen la trayectoria de propagación entre el Tx y el Rx. Estas oscilaciones se observan en las potencias medias locales, es decir, promedios a corto plazo [24].

#### 1.4.2.4 Desvanecimiento a Pequeña Escala

En situaciones de desvanecimiento a escala reducida, la señal experimenta alteraciones tanto en su amplitud como en su frecuencia. Dos fenómenos asociados con este desvanecimiento son el efecto Doppler y el desvanecimiento multitrayecto. En el efecto multitrayecto, la señal recorre diversos trayectos entre el Tx y el Rx debido a reflexiones y refracciones al toparse con obstáculos, provocando la recepción de versiones alteradas de la señal, cada una con distintas amplitudes y fases. Simultáneamente, el efecto Doppler se manifiesta debido al movimiento relativo entre el Tx y el Rx, lo que ocasiona una fluctuación en la frecuencia de la señal recibida [21][25].

#### 1.4.2.5 Distribución Rayleigh en Desvanecimiento a Pequeña Escala

Rayleigh se origina principalmente debido a la recepción multitrayecto [26]. Este modelo estadístico describe cómo el entorno de propagación afecta una señal. Es un modelo válido para propagación de señales en la troposfera, la ionosfera y en entornos urbanos densamente construidos. Se aplica con mayor precisión cuando no existe línea de visión directa entre el transmisor y el receptor [27].

La Función de Densidad de Probabilidad (del inglés, Probability Density Function, PDF) de Rayleigh está dada por [28]:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} & \text{si } 0 \leq r \leq \infty \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

dónde,  $r$  corresponde a la envolvente de la señal recibida y  $\sigma$  corresponde al valor RMS (del inglés, Root Mean Square) de la señal recibida.

#### 1.4.2.6 Distribución Rician en Desvanecimiento a Pequeña escala

Es similar con el modelo de Rayleigh, con la excepción de que se presenta un componente dominante fuerte. Este componente predominante es una señal estacionaria (que no sufre desvanecimiento) y se conoce comúnmente como el componente de línea de vista [26].

PDF de Rician, matemáticamente está dada por [28]:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) & \text{si } 0 \leq r \leq \infty \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

dónde,  $A$  corresponde a la amplitud pico de la señal dominante y  $I_0(\cdot)$  corresponde a la función modificada de Bessel de orden cero.

#### 1.4.2.7 Ruido AWGN

AWGN (del inglés, Additive White Gaussian Noise) es un modelo de ruido fundamental utilizado en la teoría de la información y los sistemas de comunicación para representar el efecto de numerosos procesos aleatorios que pueden corromper las señales. Se caracteriza por tres propiedades fundamentales: se añade a la señal original, distorsionando su contenido; su densidad espectral de potencia es constante en todas las frecuencias, lo que significa que afecta a todas las frecuencias por igual; y su distribución de amplitud sigue una distribución gaussiana (normal) con media cero y varianza constante [29]. La potencia del ruido ( $\sigma^2$ ) se encuentra definido matemáticamente por:

$$\sigma^2 = kTN_F A_B, \quad (1.5)$$

dónde,  $k$  corresponde a la constante de Boltzmann ( $1.3806485279 \times 10^{-23} \left[ \frac{\text{Joule}}{\text{°K}} \right]$ ),  $T$  corresponde a la temperatura ambiente medida en grados Kelvin,  $N_F$  (del inglés, Noise Figure) es la figura de ruido representada en Watts y  $A_B$  es el ancho de banda.

### 1.4.3 Indicadores de Rendimiento para un Sistema de Comunicación Inalámbrico

Para este trabajo se tendrán en cuenta las siguientes métricas para evaluar el desempeño de un sistema de comunicaciones:

#### 1.4.3.1 SINR

El SINR (Relación Señal-Ruido e Interferencia) evalúa la calidad de la señal al comparar la fuerza de la señal deseada con la interferencia y el ruido no deseados. Los operadores de redes móviles buscan maximizar el SINR ya sea mediante la transmisión con mayor potencia o minimizando la interferencia y el ruido [30].

$$SINR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{\sigma^2 + I} \right), \quad (1.6)$$

dónde,  $P$  corresponde a la potencia de la señal transmitida e  $I$  corresponde a la potencia de interferencia.

En la teoría de las comunicaciones, el Límite de Shannon representa el ancho de banda máximo teórico de un canal y está vinculado al SINR. Por lo tanto, optimizar el SINR conlleva a tasas de datos pico superiores y menos pérdidas de datos [30].

#### 1.4.3.2 Tasa de Datos Promedio Alcanzable

Esta medida es adecuada para aplicaciones dónde Tx conoce el estado del canal (del inglés, Channel State Information, CSI). Con esto, el Tx puede ajustar la tasa de transmisión ( $R$ ) para evitar interrupciones en la comunicación (asegurarse de que  $C < R$ , dónde  $C$  denota la capacidad del canal). Adicionalmente, busca transmitir la máxima capacidad, es decir,  $C \cong R$ . En función de lo anterior, esta métrica calcula el promedio de la cantidad de información transmitida, garantizando que no exista corte o sea imperceptible. Desde el punto de vista matemático, la tasa media alcanzable normalizada con el ancho de banda se expresa como [31]:

$$\bar{C} = E[\log_2(1 + SNR)], \quad (1.7)$$

dónde,  $E(\cdot)$  corresponde a la esperanza matemática y  $SNR = \frac{P}{\sigma^2}$  (del inglés, Signal-to-Noise-Ratio) corresponde a la relación señal y ruido.

#### 1.4.3.3 Eficiencia Energética

Se relaciona con la energía consumida para la transmisión o recepción de datos. Se puede expresar como la relación entre la tasa de transferencia de datos y el consumo de energía.

Por ejemplo, una eficiencia energética de 30 bits/J significa que se transmiten 30 bits por cada Joule (J) de energía consumida. Además, la eficiencia energética en sistemas inalámbricos se convierte en un factor clave para la reducción del consumo de energía y los costos operativos. Además, contribuye a mitigar el impacto ambiental asociado con estos sistemas. Los factores que pueden afectar la eficiencia energética son [32]: niveles de potencia de transmisión, rendimiento del receptor y tecnología utilizada. Es así, que la eficiencia energética (denotada por EE) puede ser expresada [33]:

$$EE = \frac{A_{BR}}{P}. \quad (1.8)$$

#### **1.4.4 Fundamentos de la Tecnología Relay**

El uso de Relays surgió como una estrategia prometedora para extender el alcance de una red celular sin generar costos adicionales asociados a la infraestructura cableada de retroceso. Es así, que la tecnología de Relay ha ganado reconocimiento en la concepción y ejecución de redes celulares [34].

Explorando un esquema tradicional de Relay de dos etapas, este puede funcionar como un enlace de unión entre el enlace de retroceso, que es la conexión entre la estación base (del inglés, Base Station, BS) y el Relay; y el enlace de acceso, que es la conexión entre el Relay y el equipo de usuario (del inglés, User Equipment, UE). Desde la perspectiva de la BS, se puede percibir al Relay como un UE, mientras que los UEs ven al Relay como una BS. La introducción del Relay tiene el propósito de mejorar las condiciones de propagación del canal tanto en los enlaces de retroceso como en los de acceso, en comparación con el enlace directo entre la BS y el UE, siempre y cuando la implementación del Relay sea adecuada [35].

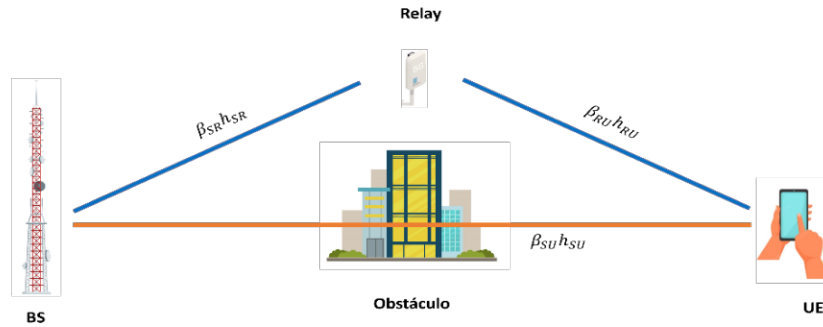
Existen dos modos clásicos de procesamiento: Relay de amplificación y reenvío (del inglés, Amplify-and-Forward, AF) y Relay de decodificación y reenvío (del inglés, Decode-and-Forward, DF).

##### **1.4.4.1 Relay en Modo: Decodificación y Reenvío**

Es el método más utilizado para el procesamiento de la señal en Relays. En este caso, los Relays DF detectan los datos de la señal de origen, decodifican esta señal y luego envían la señal regenerada hacia su destino. En este caso no existe degradación de la relación señal a ruido ya que la misma fue amplificada en el Relay. Sin embargo, también existe una amplificación del ruido, por lo que los errores que se generan en el Relay también se dirigen hacia el destino. Además, este tipo de Relays generan una latencia adicional debido



a la operaciones de modulación-demodulación y codificación-decodificación que se realiza en el dispositivo [35].



**Figura 1.3** Escenario de análisis del Relay, basado en [33].

En base a la Figura 1.3 se tiene como escenario utilizado un sistema de comunicación SISO (del inglés, Single-Input-Single-Output), el cual corresponde a un sistema donde todos los nodos están equipados con una única antena. En la Figura 1.3, se puede observar que el modelo de sistema está conformado por una BS, el Relay como un elemento de redirección de la señal y por un UE. Al considerar su modo de trabajo más común, la transmisión se divide en dos fases de igual tamaño. En la primera, la BS transmite la señal de información hacia el UE, mientras que en la segunda el BS trasmite al Relay, el cual retransmite la señal hacia el UE. Basado en lo anterior, las señales en recepción pueden ser expresadas como:

$$y_{1U} = \beta_{SU}h_{SU}\sqrt{P}S + \sigma^2_{1U} \quad (1.9)$$

$$y_{1R} = \beta_{SR}h_{SR}\sqrt{P}S + \sigma^2_{1R}, \quad (1.10)$$

dónde,  $\beta_{SU}$  y  $\beta_{SR}$  corresponden a las pérdidas por trayectoria de los enlaces BS-UE y BS-Relay, respectivamente. Adicionalmente,  $h_{SU}$  y  $h_{SR}$  corresponden a los canales entre BS-UE y BS-Relay, respectivamente. Además,  $s$  es la señal de información y  $\sigma^2_{1U}$  corresponde a la potencia de ruido entre Tx y Rx. El Relay utiliza la señal recibida en  $y_{1R}$  para decodificar la información y transmitirla nuevamente en la segunda fase y  $\sigma^2_{1R}$ , hace referencia a la potencia de ruido entre Tx y Relay para cada uno de los casos respectivos. Por lo que, la señal recibida en el UE por parte del Relay, está dada por:

$$y_{2U} = \beta_{RU}h_{RU}\sqrt{P_1}S + \sigma^2_{2U}, \quad (1.11)$$

dónde,  $\beta_{RU}$  corresponde a la pérdida por trayectoria en el enlace Relay-UE. Además,  $h_{RU}$  corresponde al canal entre Relay-UE,  $P_1$  corresponde al valor de la potencia de transmisión del Relay y finalmente  $\sigma^2_{2U}$  hace referencia a la potencia de ruido entre Relay y Rx. Es así, que la tasa máxima alcanzable, denotada por R, es dada por [33]:

$$R_{DF} = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \min \left( \frac{P|h_{SR}|^2}{\sigma_{1R}^2}, \frac{P|h_{SU}|^2}{\sigma_{1U}^2} + \frac{P_1|h_{RU}|^2}{\sigma_{2U}^2} \right) \right), \quad (1.12)$$

dónde,  $|\cdot|$  denota valor absoluto. Finalmente, la potencia de la señal transmitida, se encuentra dada por [33]:

$$P_{DF} = \begin{cases} (2^{2R_{DF}} - 1) \frac{\sigma^2}{\beta_{SU}} & \text{si } \beta_{SU} > \beta_{SR} \\ (2^{2R_{DF}} - 1) \frac{(\beta_{SR} + \beta_{RU} - \beta_{SU})\sigma^2}{2\beta_{RU}\beta_{SR}} & \text{si } \beta_{SU} \leq \beta_{SR}. \end{cases} \quad (1.13)$$

#### 1.4.4.2 Aplicaciones en la Red 5G

En situaciones de alta movilidad, ofrecen una cobertura continua para usuarios en constante movimiento. Asimismo, mejoran la calidad de la señal en áreas densamente pobladas, como estadios, conciertos y centros comerciales [36].

En aplicaciones críticas en términos de latencia, garantizan una comunicación de baja latencia en escenarios como la realidad virtual, la automatización industrial y los vehículos autónomos. Su capacidad para procesar y retransmitir la señal de radio en proximidad al usuario final disminuye considerablemente la latencia [37].

En lo que respecta a las comunicaciones sostenibles, reducen el consumo energético de la red inalámbrica. Pueden alimentarse mediante fuentes renovables como energía solar o eólica, disminuyendo la dependencia de la red eléctrica y reduciendo la huella de carbono de la infraestructura inalámbrica [38].

#### 1.4.5 Fundamentos de la RIS

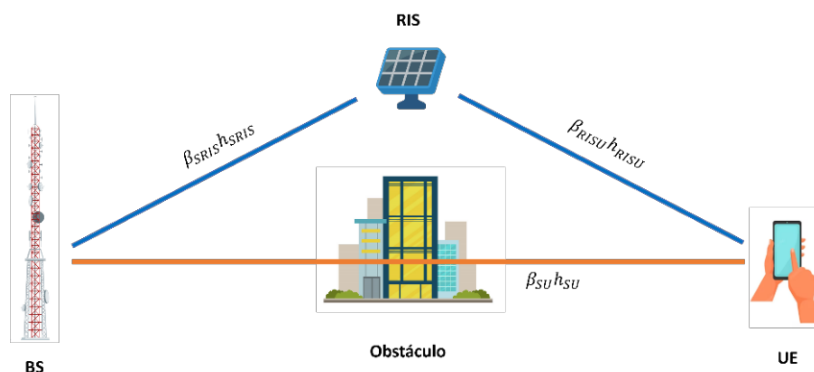
##### 1.4.5.1 Introducción en la RIS

En el estado del arte, RIS también es conocido como IRS (en inglés, Intelligent Reflecting Surfaces) [39] o como LIS (del inglés, Large Intelligent Surface) [40]. La tecnología RIS es una superficie plana conformada por un gran número de elementos/antenas semi-pasivos reflectivos que en conjunto tienen la capacidad de cambiar la fase a la señal que incide sobre dicha superficie para direccionarla hacia un destino deseado. Este tipo de tecnología puede estar conformada por más de una capa, no necesariamente una. Se acostumbra a que la capa que se encuentra en la parte exterior se encuentre conformada por elementos pasivos reflectivos estampados en un dieléctrico. La capa que se encuentra en la parte intermedia está conformada por elementos que retengan energía y reduzcan sus pérdidas, por lo cual, se acostumbra utilizar una sección de cobre. La capa que se encuentra en la parte interna tiene la función de ajustar el coeficiente de reflexión de cada elemento de la RIS [41].

La RIS refleja la señal que incide en ellas, presentando variaciones controladas en el cambio de fase y amplitud de la señal [42]. Así se consigue que la señal reflejada por la RIS cree un beamforming con sus distintos elementos hacia el usuario final, aportando positivamente al momento de decodificar la señal [41].

Debido a su capacidad de alterar el ambiente de comunicaciones inalámbricas proactivamente, este tipo de tecnología se ha vuelto de interés en la investigación de comunicaciones inalámbricas para solventar una diversidad de retos que se han presentado en las demandas de las comunicaciones inalámbricas [43]. Algunas de las múltiples ventajas de la utilización de las RIS serán descritas a continuación:

- Fácil despliegue: Pueden ser implementada en edificios, paredes, plataformas aéreas, vehículos, e incluso ropa de peatones; esta y otras formas se pueden implementar debido a su bajo costo [44].
- Incremento en la eficiencia espectral: Compensan la potencia perdida en transmisiones a largas distancias. Al tener un entorno inalámbrico definido por Software, mejora la relación SINR [45] en su escenario (ver Figura 1.4).
- Cuidado del medio ambiente: A diferencia del uso de los Relays, la RIS usa un desplazamiento de fase, como ya se mencionó anteriormente, en lugar de amplificación de potencia. Es así, que las RIS tienen una mayor eficiencia energética [33].
- Compatibilidad: Soportan la transmisión full-duplex y full-band debido a que solo reflejan la onda electromagnética, además, las redes que utilizan RIS son compatibles con el hardware y estándares que se encuentran en el mercado [46].



**Figura 1.4** Escenario de uso de la RIS, basado en [33].

A partir de la Figura 1.4, se observa un sistema inalámbrico asistido por la tecnología RIS, el cual se compone de un BS, equipado con una antena, la RIS con N elementos

reconfigurables para redireccionar la señal y el UE que posee una única antena. La señal recibida en el UE puede ser descrita por:

$$y_{RIS} = \sqrt{\beta_{SRIS}\beta_{RISU}}\left(\sum_{i=1}^N h_{SRIS}e^{j\theta_i}h_{RISU} + \sqrt{\beta_{SU}}h_{SU}\right)s + \sigma^2, \quad (1.14)$$

dónde,  $\beta_{SRIS}$ ,  $\beta_{RISU}$  y  $\beta_{SU}$  corresponden a las pérdidas por trayectoria de los enlaces BS-RIS, RIS-UE y BS-UE, respectivamente. Así mismo,  $h_{SRIS}$ ,  $h_{RISU}$  y  $h_{SU}$  denotan los canales a corta escala entre la BS-RIS, RIS-UE y BS-UE, respectivamente. Además,  $\theta_i$  es la fase inducida por la RIS en la señal incidente, y  $j$  corresponde al complejo imaginario que representa  $\sqrt{-1}$ . A partir de la formulación en (1.13), se puede expresar el canal equivalente simplificado visto por el receptor, por lo que, se obtiene:

$$h_{eq} = \sqrt{\beta_{SRIS}\beta_{RISU}}\sum_{i=1}^N h_{SRIS}e^{j\theta_i}h_{RISU} + \sqrt{\beta_{SU}}h_{SU}. \quad (1.15)$$

Cuando se presenta una trayectoria LoS el valor de  $\beta = 0$ , si la trayectoria es NLoS  $\beta \neq 0$ . Es así, que la tasa máxima alcanzable utilizando RIS, denotada por  $R_{RIS}$ , es dada por [33]:

$$R_{RIS}(N) = \frac{1}{2}\log_2\left(1 + \frac{P(\sqrt{\beta_{SU}} + N\alpha\sqrt{\beta_{RIS}})^2}{\sigma^2}\right), \quad (1.16)$$

dónde,  $N$  es el número de elementos de la RIS,  $\alpha$  es el coeficiente de reflexión de amplitud fija. Además,  $\sqrt{\beta_{RIS}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^N |h_{SRIS}|_n |h_{RISU}|_n$ . Finalmente, la potencia de la señal transmitida, se encuentra dada por [33]:

$$P_{RIS}(N) = (2^{R_{RIS}} - 1) \frac{\sigma^2}{(\sqrt{\beta_{SU}} + N\alpha\sqrt{\beta_{RIS}})^2}. \quad (1.17)$$

#### 1.4.5.2 Errores de Fase en la RIS

Con fines de cálculos, los canales presentes:  $h_{SU}$ ,  $h_{SRIS}$  y  $h_{RISU}$  pueden ser expresados en coordenadas polares:

$$h_{SRIS} = |h_{SRIS}|e^{j\angle(h_{SRIS})}, h_{RISU} = |h_{RISU}|e^{j\angle(h_{RISU})}, h_{SU} = |h_{SU}|e^{j\angle(h_{SU})}, \quad (1.18)$$

dónde,  $\angle(\cdot)$  es el ángulo formado. Es así, que en función de los ángulos por parte de cada canal se puede expresarla fase inducida como  $\theta_i = \angle(h_{SU}) - \angle(h_{SRIS}) - \angle(h_{RISU})$ . Hay que notar que se ha tomado estos valores de forma estratégica para eliminar las fases inducidas por los canales, consiguiendo tener un aporte constructivo a la señal. No obstante, este es un caso ideal, ya que en el análisis real se presentan factores limitantes como el hardware y la estimación parcial del canal. Estos factores originan un error de fase en cada elemento, el cual será denotado con  $\varphi_i$ . Es así, que la expresión real de la fase inducida corresponde:

$$\theta_i = -\angle(h_{SU}) - \angle(h_{SRIS}) - \angle(h_{RISU}) + \varphi_i. \quad (1.19)$$

Ahora, sustituyendo (1.19) en (1.15), se obtiene que,

$$h_{eq} = \sqrt{\beta_{SRIS}\beta_{RISU}} \sum_{i=1}^N |h_{SRIS}| |h_{RISU}| e^{j(\angle(h_{SRIS}) + \angle(h_{RISU}) - \angle(h_{SRIS}) - \angle(h_{RISU}) + \varphi_i)} + |h_U| e^{j\angle(h_U)}$$

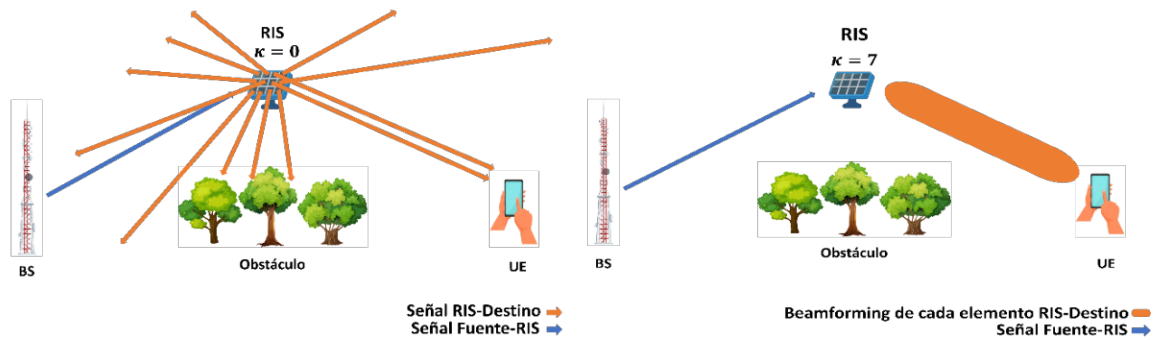
$$h_{eq} = \sqrt{\beta_{SRIS}\beta_{RISU}} \sum_{i=1}^N |h_{SRIS}| |h_{RISU}| e^{j\varphi_i} + |h_{SU}|. \quad (1.20)$$

Por otro lado, el error de fase  $\varphi_i$  puede ser descrito utilizando una distribución de Von Mises, que es una función de probabilidad descrita de la siguiente forma [47]:

$$p(r) = \frac{e^{\kappa \cos(r)}}{2\pi I_0(\kappa)}, \quad (1.21)$$

dónde,  $\kappa$  representa la concentración de la distribución. Para el caso de estudio del trabajo,  $\kappa$  es el valor de la magnitud del error de fase de cada uno de los elementos de la RIS. Es decir, al momento de realizar un análisis de este valor, a menor  $\kappa$  se tiene una equivocación mayor en la configuración de los elementos de elementos de la RIS. Opuestamente, a mayor valor de  $\kappa$  se tiene un menor error de configuración (ver figura 1.5). Con base a estos hallazgos, se puede expresar la SNR recibida por el UE del sistema asistido por RIS a través de:

$$\gamma = \frac{P |h_{eq}|^2}{\sigma^2}. \quad (1.22)$$



**Figura 1.5** Mayores errores de fase en la RIS (Izquierda) y menores errores de fase en la RIS (Derecha).

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Preliminares

En esta sección se detallará la metodología a utilizar para simular los dos escenarios de este estudio correspondientes a: la comparación de la potencia de transmisión y la comparación de eficiencia energética entre los sistemas inalámbricos asistidos por RIS y DF asumiendo un modelo SISO para ambos. Para este fin, se utilizará el software de

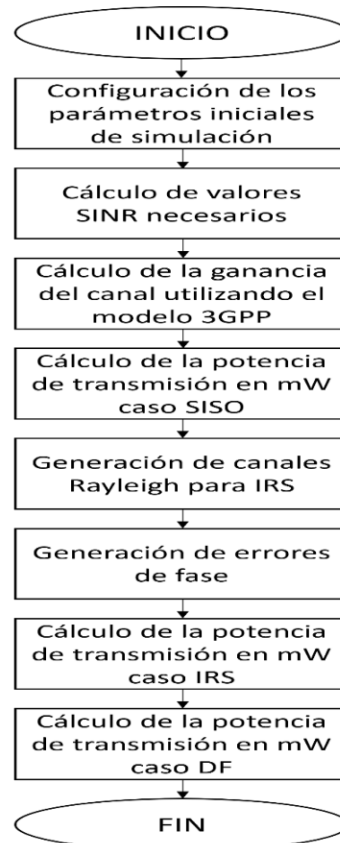
simulación MATLAB en su versión R2023b. Con fines ilustrativos, se incluirá en esta sección diagramas de flujo correspondientes a la metodología utilizada para la obtención de los resultados a través de los scripts de MATLAB. Además, se mostrará una tabla con la descripción de los parámetros y variables iniciales, junto a sus respectivos fragmentos de código. De esta manera, se podrá tener una mejor comprensión del trabajo realizado en cada uno de los scripts.

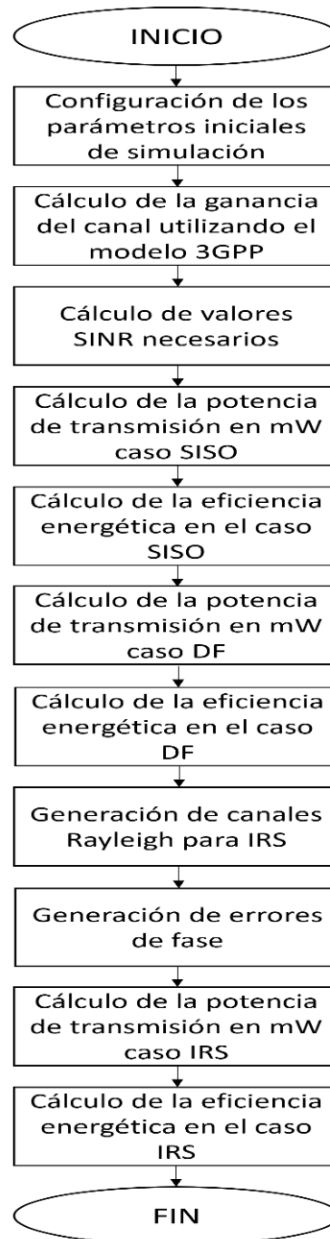
Para este componente se usará dos scripts, los cuales mostrarán los resultados correspondientes a:

- Potencia de transmisión de los casos SISO, DF Relay y Sistemas asistidos por RIS en función de la distancia.
- La eficiencia energética que se medirá en función de bits por joule con respecto a la tasa de transmisión.

## 2.2 Diagramas de Flujo

A continuación, se procederá a describir el procedimiento utilizado para generar el código correspondiente, mediante el uso de diagramas de flujo.





**Figura 2.1.** Diagramas de flujo correspondientes al análisis de la potencia de transmisión (arriba) y a la eficiencia energética (abajo).

### 2.3 Configuración inicial

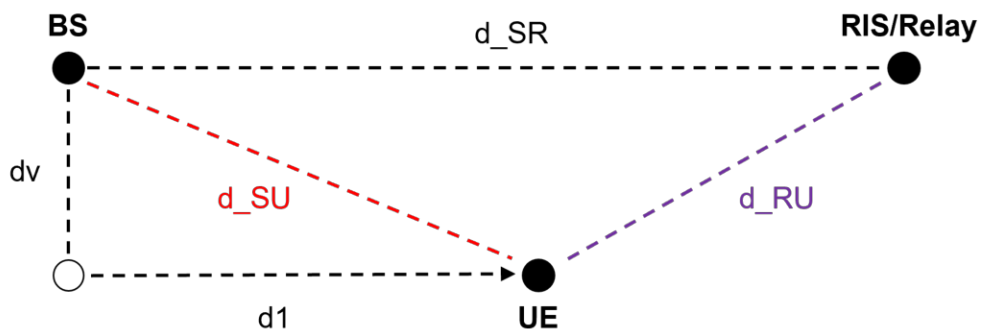
En la Tabla 2.1 se encuentran definidas las variables utilizadas como parámetros iniciales para la programación de cada uno de los casos junto a sus respectivas definiciones.

**Tabla 2.1.** Parámetro Iniciales

Parámetro	Definición
Nsim	Número de muestras utilizadas para la simulación

Fc	Valor de la frecuencia de operación del sistema
AB	Ancho de banda
NF_dB	Figura del Ruido
sigma2	Potencia del Ruido
antennaGainS	Gancia de la BS
antennaGainR	Ganancia del Relay/IRS
antennaGainU	Ganancia del UE
alpha	Coefficiente de amplitud para los elementos de la RIS
NRIS	Número de elementos que conforman la RIS
Rbar	Valores de la tasa
Ps	Potencia disipada en el hardware del transceptor de la fuente
Pd	Potencia disipada en el hardware del transceptor de destino
Pe	Potencia disipada por elemento en la RIS (mW)
Pe	Potencia disipada en el hardware del transceptor del Relay
nu	Eficacia del amplificador de potencia en la fuente
d_SR	Distancia entre la Fuente y el Relay/RIS
dv	Distancia mínima entre el destino y el RIS/Relay
d1	Valor correspondiente a d1 del sistema propuesto (ver Figura 2.4)
d_SU	Distancia entre el Tx y el Rx
d_RU	Distancia entre el RIS/Relay y el destino
Kappa	Parámetro $\kappa$ en Von Mises
SINR	Valor del SINR correspondiente a SISO/RIS
SINR_DF	Valor del SINR correspondiente a Relay en modo DF

Para continuar, en la Figura 2.2 se detalla el sistema propuesto para calcular las distancias pertinentes entre cada uno de los nodos de nuestro sistema de comunicaciones.



**Figura 2.2.** Representación del sistema de comunicaciones propuesto.



## 2.4 Ganancias del Canal y Generación del Desvanecimiento a Gran Escala

A partir de las expresiones matemáticas previamente formuladas en (1.1) y (1.2), en la Figura 2.2, se muestra las funciones implementadas para realizar el cálculo de las pérdidas por trayecto para escenarios LoS y NLoS. En las fórmulas implementadas, se tiene como parámetro de entrada la distancia que existe entre los nodos a analizar (denotado por  $d$ ).

```
%Definición de funciones de ganancia del canal basadas en 3GPP Urban Micro
% d se medirá en metros y las ganancias serán agregadas posteriormente
pathloss_3GPP_LOS = @(d) db2pow(-28-20*log10(Fc)-22*log10(d));
pathloss_3GPP_NLOS = @(d) db2pow(-22.7-26*log10(Fc)-36.7*log10(d));
```

**Figura 2.3.** Desvanecimiento a gran escala basado en el modelo 3GPP.

Posteriormente, se deben tener en cuenta las ganancias de las antenas que conforman los nodos para el análisis. A continuación, en la Figura 2.3 se brindarán los detalles de una posible configuración de ganancias en los nodos de interés, la cual, fue utilizada para la simulación de este trabajo.

```
%Ganancias conversion a lineal
antennaGainS = db2pow(5); %Fuente
antennaGainR = db2pow(5); %Repetidor/RIS
antennaGainU = db2pow(0); %Destino
```

**Figura 2.4.** Valores escalares de la ganancia de las antenas.

```
%Definir distancias en la configuración de la simulación
d_SR = 80; %Distancia entre la fuente y el RIS/relay
dv = 10; %Distancia mínima entre el destino y el RIS/relay

%Cálculo de la distancia entre el origen y el destino
d_SD = sqrt(d1^2+dv^2);

%Cálculo de la distancia entre el RIS/relay y el destino
d_RD = sqrt((d1-d_SR)^2+dv^2);
```

**Figura 2.5.** Distancias existentes entre nodos del sistema.

Para el primer caso de análisis de este trabajo, se tiene que el valor correspondiente a  $dv$  se lo mantendrá constante en 10 metros, es decir, que siempre la distancia mínima entre BS-UE corresponderá a este valor. Se debe tener en cuenta que las distancias BS-Relay

y BS-RIS serán las mismas, representadas por  $d_{SR}$ , fijadas en un valor de 40 metros. Adicionalmente, los valores de  $d_1$  serán variados para observar los cambios de comportamiento de los diferentes sistemas.

Por otra parte, para el segundo caso de análisis de este trabajo, se llevará el análisis utilizando valores fijos de estas distancias. Es así, que en la Figura 2.5. se observa un ejemplo de cómo se calculan las distancias en función del sistema propuesto.

```
%Cálculo de la ganancia del canal utilizando el modelo 3GPP y ganancia de
%antenas
betaSR = pathloss_3GPP_LOS(d_SR)*antennaGainS*antennaGainR;
betaRU = pathloss_3GPP_LOS(d_RU)*antennaGainR*antennaGainU;
betaSU = pathloss_3GPP_NLOS(d_SU)*antennaGainS*antennaGainU;
```

**Figura 2.6.** Desvanecimiento a gran escala perteneciente a cada uno de los enlaces entre nodos.

Continuando con el sistema de comunicaciones descrito en la Figura 2.4 con los valores calculados en la Figura 2.5 se obtiene el valor correspondiente al Path Loss total de cada enlace presente en los nodos en la Figura 2.6. Es decir, para el caso que utilizamos Relay o RIS tendremos calculados los enlaces: BS-RIS/Relay y RIS/Relay-UE. En cambio, para el caso SISO se tendrá que calcular para el enlace entre BS-UE.

Finalmente, para tener el cálculo completo de la ganancia del canal y generación del desvanecimiento a gran escala, se deben tener en cuenta los parámetros tanto de la Figura 2.2 como de la Figura 2.3, lo cual da como resultado las ecuaciones detalladas en la Figura 2.6. Como se puede apreciar, se introdujeron las variables BetaSR, BetaRU y BetaSU (se debe tener en cuenta que el Relay/RIS se encuentran representados por la letra R), las cuales se refieren al desvanecimiento a gran escala de la BS-RIS/Relay, RIS/Relay-UE y BS-UE respectivamente.

Es importante tener en cuenta que, los valores correspondientes a Path Loss se los suele trabajar en forma de decibelios (dB). Sin embargo, para el caso de este trabajo y como se lo pude apreciar en las Figuras 2.2-2.3, se trabajará estos resultados de forma escalar y lineal.

## 2.5 Introducción de los Errores de Fase

Para poder introducir los errores de fase, se utilizó la función de Von Mises que representa a una función de probabilidad, la cual es caracterizada por la flexibilidad para obtener el valor correspondiente al error de fase en la RIS. Para poder calcular los errores de fase,

cómo se puede observar en la Figura 2.7, se tiene que la función requiere de tres parámetros de entrada, los cuales son: NRIS representará el número de elementos), Nsim y  $\kappa$ , los cuales ya han sido previamente descritos en la sección 2.3.

```
function vm_samples = vonMisesSim(NRIS,Nsim,kappa)
    x=linspace(-pi,pi,Nsim);
    vm=exp(kappa*cos(x))/(2*pi*besseli(0,kappa));
    cdf=cumsum(vm*(x(2)-x(1)));
    cdf_uniform=rand(NRIS,Nsim);
    %vm_samples=interp1(cdf,x,cdf_uniform);
    vm_samples=interp1(cdf,x,cdf_uniform,'linear',pi);
end
```

**Figura 2.7.** Definición de la función de probabilidad de Von Mises.

Es así, que esta función debe ser integrada en el cálculo correspondiente a la RIS dentro de cada uno de los scripts. En la Figura 2.8 se brinda un ejemplo de la utilización de la función dentro del programa.

```
% Error de Fase en RIS
kappa=7;
ang_error=vonMisesSim(1,Nsim,kappa).';
```

**Figura 2.8.** Ejemplo del uso de la función de Von Mises.

## 2.6 Introducción del Desvanecimiento a Pequeña Escala

Para poder introducir el desvanecimiento a pequeña escala, la función de Matlab randn(.) es utilizada. Esta función genera números aleatorios con distribución normal estándar. Al multiplicar este comando por una parte real y una imaginaria ambas normalizadas y considerando media cero y varianza en la unidad se obtiene el canal de desvanecimiento tipo Rayleigh. Estos comandos se utilizan para generar coeficientes de desvanecimiento del sistema SISO (ver Figura 2.9) y de los sistemas RIS/Relay (ver Figura 2.10). Además, para obtener la media ganancia del canal se eleva cada coeficiente de canal al cuadrado y posteriormente se los promedia.

```
%Canal directo
h_SU=sqrt(betaSU)*(1/sqrt(2))*(randn(Nsim,1)+1i*randn(Nsim,1));
h_SU=mean(abs(h_SU).^2);
```

**Figura 2.9.** Modelo del canal sistema SISO.

```

%Canales Rayleigh para Relay
h_SR_relay=sqrt(betaSR)*(1/sqrt(2))*(randn(Nsim,1)+1i*randn(Nsim,1));
h_SR_relay=mean(abs(h_SR_relay).^2);
h_RU_relay=sqrt(betaRU)*(1/sqrt(2))*(randn(Nsim,1)+1i*randn(Nsim,1));
h_RU_relay=mean(abs(h_RU_relay).^2);

%Canales Rayleigh para RIS
h_SR_RIS=sqrt(betaSR)*(1/sqrt(2))*(randn(Nsim,1)+1i*randn(Nsim,1));
%h_SR_RIS=mean(abs(h_SR_RIS).^2);
h_RU_RIS=sqrt(betaRU)*(1/sqrt(2))*(randn(Nsim,1)+1i*randn(Nsim,1));
%h_RU_RIS=mean(abs(h_RU_RIS).^2);

```

**Figura 2.10.** Modelos de canal para el sistema asistido por Relay o RS.

Como se puede apreciar en la Figura 2.10 se tiene que para los canales Rayleigh utilizados en la RIS no se aplica el último paso detallado de la potencia de cada uno de los elementos y el promedio. Esto se debe a que para poder introducir los errores de fase se trabajará con un canal equivalente siguiendo a la ecuación (1.20) previamente mencionado, el cual estará denotado por  $h_{eq\_RIS}$ . En base a lo anterior, en la Figura 2.11 se detalla el código utilizado para encontrar el canal equivalente, el cual está conformado por los factores de desvanecimiento tanto a corta como a gran escala, así también, el error de fase calculado con Von Mises.

```

%Canal equivalente RIS
heq_RIS=abs(h_SR_RIS).*abs(h_RU_RIS).*exp(1i*(ang_error));
h_RIS=mean(heq_RIS.^2);

```

**Figura 2.11.** Modelo del canal equivalente de la RIS.

## 2.7 Ruido AWGN

Para poder determinar el rendimiento de nuestro sistema, es necesario determinar el ruido AWGN. Para este cálculo se tomará en cuenta los siguientes valores:  $T=290^{\circ}K$ ,  $NF_{dB}=10$  y  $AB=10$  [MHz], cuyos datos se han asumido en base al estándar 3GPP. Es así, que en la Figura 2.12 se pueden apreciar todos los parámetros utilizados y el cálculo de la potencia del ruido, la cual, será transformada a escala lineal.

```

%Frecuencia de la portadora en GHz
Fc = 3;

%Ancho de banda
AB = 10e6;

%Figura del Ruido en dB
NF_dB = 10;

%Cálculo de la potencia del ruido en dBm
sigma2_dB = -174 + 10*log10(AB) + NF_dB;
sigma2 = db2pow(sigma2_dB); %transformación a Watt

```

**Figura 2.12.** Cálculo de la Potencia del Ruido.

## 2.8 Potencia de Transmisión Requerida

### 2.8.1 Caso SISO

Para calcular la potencia de transmisión requerida en los casos SISO, RIS y DF, primeramente, se calcular la SINR de los casos previamente definidos. Cabe mencionar que por simplicidad en la notación se usa SINR en todos los casos, sin embargo, para el caso SISO es la SNR. Se introducirán dos variables: una correspondiente para realizar el análisis de los casos SISO y RIS que será SINR; y otra que corresponderá para el caso del Relay DF que será SINR\_DF. En la Figura 2.13 se detallará el código utilizado para generar estas dos variables que serán utilizadas para los casos.

```

%Cálculo los valores SINR necesarios
SINR = 2^(R(ind))-1; %SISO y RIS
SINR_DF = 2^(2*R(ind))-1; %DF relaying

```

**Figura 2.13.** Cálculo de los valores SINR.

Es importante tener en cuenta que, este proceso se lo realiza ya dentro de un bucle del tipo for; motivo por el cual aparece la variable ind que se aprecia en la Figura 2.13. corresponde el índice de cada iteración del bucle. El bucle mencionado recorrerá los valores pertenecientes a la tasa configurada que será mencionada posteriormente.

Es así, que ya obtenidos los valores correspondientes a la potencia del ruido (ver Figura 2.12) y al SINR (ver Figura 2.13) se procederá a calcular la potencia. Como primera parte, se procederá a calcular la potencia de transmisión requerida para el caso SISO, que se tomará como un modelo de comparación. Es así, que sigue la siguiente expresión [33]:

$$P_{SISO} = (2^R - 1) \frac{\sigma^2}{h_{SU}}. \quad (2.1)$$



Ahora, realizando la comparación entre la ecuación (2.1) y la Figura 2.13, se puede observar que lo contenido dentro del paréntesis corresponde a nuestro valor de SINR, y el bucle que se recorre representa a los valores de tasas esperados. Por lo que, recopilando toda la información, se expresa potencia de transmisión requerida del caso SISO en la Figura 2.14.

```
P_SISO(k) = SINR*sigma2/h_SU; %Potencia
```

**Figura 2.14.** Potencia de transmisión requerida caso SISO.

### 2.8.2 Caso RIS

Aquí, se procederá a calcular la potencia de transmisión requerida en el caso de la RIS. Como se puede apreciar en la Figura 2.13, se utilizará la misma sección de código del SINR que se utilizó en el caso SISO. Adicionalmente, también se incluirá el valor de la potencia del ruido calculado en la Figura 2.12. Es así, que se utilizará la ecuación (1.17) en la Figura 2.15, para implementar la expresión correspondiente al cálculo de la potencia de transmisión requerida en la RIS.

```
%Cálculo de la potencia de transmisión en mW en el caso de RIS  
P_RIS(k,:) = SINR*sigma2./(sqrt(h_SU) + NRIS*alpha*sqrt(h_RIS)).^2;
```

**Figura 2.15.** Potencia de transmisión requerida caso RIS.

### 2.8.3 Caso Relay DF

Finalmente, se procederá a calcular la potencia de transmisión requerida en el caso del Relay DF. Como se puede apreciar en la Figura 2.13, para esta sección se utilizará la segunda variable del código que corresponde a SINR\_DF. Adicionalmente, también se incluirá el valor de la potencia del ruido calculado en la Figura 2.12. Sin embargo, para los canales, dentro de este caso, no se dispone de un canal equivalente como en el caso RIS, por lo tanto, se tomarán los canales correspondientes de la Figura 2.10. Como se puede apreciar en la ecuación (1.13), para el caso Relay DF, se tienen dos diferentes casos para el cálculo de la potencia de transmisión, que se utilizarán dependiendo de la condición mencionada. Es así que, teniendo estas consideraciones, se empleó una sentencia if para verificar el cumplimiento de condiciones para el uso o no de cada ecuación como se puede apreciar en la Figura 2.16.

```

%Cálculo de la potencia de transmisión en mW en el caso del método
if betaSR>=betaSU
    P_DF(k) = SINR_DF*sigma2*(h_SR_relay+h_RU_relay-h_SU)/(2*h_RU_relay*h_SR_relay);
    powerFractionRelay(k,ind) = 2*(h_SR_relay-h_SU)/(h_SR_relay+h_RU_relay-h_SU);
else
    P_DF(k) = SINR_DF*sigma2/h_SU;
    powerFractionRelay(k,ind) = 0;
end

```

**Figura 2.16.** Potencia de transmisión requerida caso Relay DF.

Es importante mencionar, que en el cálculo de las potencias de las Figuras 2.14, 2.15 y 2.16, estos valores presentan un índice k, esto se debe a que en el primer caso de estudio de este trabajo se tiene una serie de valores correspondientes a d1 para realizar el análisis, y este cálculo de potencias se encuentra en un bucle for que recorre cada uno de los diferentes valores otorgados a d1. Para el caso de esta parte del trabajo, en la Figura 2.17 se detallan los valores utilizados.

```

%Definir el rango de valores d1 en la configuración de la simulación
d1range = 40:100;

```

**Figura 2.17.** Valores para el análisis de la distancia d1.

Por otro lado, como parámetros también de entrada para el análisis se considera aquellos introducidos en la Figura 2.18, donde se han incluido el número de elementos en la RIS, y los valores de la tasa de transmisión consideradas, las cuales corresponden al valor del bucle que se mencionó en la Figura 2.13.

```

%Definir el rango de diferentes números de elementos de reflexión en el RIS
NRIS = [100 200 600];
%NRIS = [400];

%Establecer el rango de valores de la tasa
R = [2 6];
%Rbar = [4];

```

**Figura 2.18.** Parámetros de la RIS y tasas de transmisión a analizar.

Como parte final de la primera parte del trabajo, se procedió a implementar una sección de código que permite analizar y calcular el número necesario de elementos reflectantes en la RIS para conseguir una potencia de transmisión más baja que el caso del Relay DF. Para esto, en la Figura 2.19 se detalla el código implementado que realiza la comparación y cálculo de elementos.

```

%Cálculo del número de elementos reflectantes necesarios para
%conseguir una potencia de transmisión más baja con IRS que DF
%relaying
if d1 == d_SR

    rho = P_DF(k)/sigma2;

    Nmin(ind) = sqrt((sqrt(1+rho*2*betaRD*betaSR/(betaSR+betaRD- ...
        betaSD))-1)/(rho*betaSR*betaRD))-sqrt(betaSD/(betaSR*betaRD)));

end

```

**Figura 2.19.** Estimación de número de elementos mínimos en la RIS para tener una potencia de transmisión más baja que el Relay DF.

## 2.9 Cálculo de la Eficiencia Energética

Para el segundo caso de estudio de este trabajo, se decidió evaluar y comparar la eficiencia energética en los escenarios SISO, RIS y Relay en operación DF. A diferencia del anterior caso, el análisis no se lo realizará con respecto a una distancia que varía sus valores, sino, la eficiencia energética será calculado en base a las tasas de transmisión alcanzables. Para esto, este caso de estudio se vale del anterior caso realizado con respecto a la potencia de transmisión, utilizando el valor correspondiente de cada escenario y calculando su eficiencia energética en base a los mismos.

Es así, que siguiendo la ecuación (1.8), para el valor del ancho de banda se ha tomado el valor de 10 MHz, el cual corresponde al valor obtenido del estándar 3GPP y que ya fue previamente descrito en la Figura 2.12.

Continuando, se procederá a definir los valores de la tasa alcanzable. Como ya se mencionó previamente, el cálculo de la eficiencia energética se lo realizará en función del valor de la tasa alcanzable. Por lo cual, ese valor corresponderá a un vector que recorrerá una serie de valores tal como se muestra en la Figura 2.20.

```

%Establecer el rango de valores de la tasa
R = [0.01 0.1:0.1:10];

```

**Figura 2.20.** Rango de valores de la tasa.

Como se puede apreciar en la Figura anterior, la tasa iniciara con un valor próximo al cero, que, para nuestro caso de estudio, se utilizó el valor de 0.01. Luego, el valor tomará un salto hacia el valor de 0.1 y se generará el vector desde este valor hasta una tasa de 10, todo configurado para que recorra pasos de 0.1 en cada salto. Cabe mencionar que estos valores de tasa se encuentran medidos en  $\left[ \text{bit}/\text{s} \right]$ .



Como última parte de la eficiencia energética, se tiene que calcular la potencia total que involucra a cada uno de los nodos. Para esto, primero se empezará por definir los parámetros de entrada correspondientes al consumo de potencia en el sistema de comunicaciones.

```
%Configuración de los parámetros relacionados con el consumo de potencia
%del circuito
Ps = 100; %Potencia disipada en el hardware del transceptor de la fuente
Pd = 100; %Potencia disipada en el hardware del transceptor de destino
Pe = 5; %Potencia disipada por elemento en la RIS (mW)
Pr = 100; %Potencia disipada en el hardware del transceptor del relay
nu = 0.5; %Eficacia del amplificador de potencia en la fuente
```

**Figura 2.21.** Parámetros de potencia del sistema de comunicaciones.

En la Figura 2.21. se puede apreciar que existen un total de cuatro variables que involucran la potencia que es disipada por elementos de Hardware en cada uno de los nodos. En la Figura 2.4, se tiene un total de tres nodos principales, los cuales corresponden a la BS, UE y el uso de la RIS/Relay, es así que, si separamos el Relay y la RIS para poder realizar el análisis, se obtienen las cuatro variables de disipación de potencia por hardware. Por lo tanto, las variables Ps, Pd, Pe y Pr corresponde a BS, UE, RIS y Relay respectivamente. Es importante recalcar que estos valores se encuentran en mW. Luego, se tiene una variable un que representa a la eficacia de los amplificadores, ya que dentro del sistema de comunicaciones que se nos presenta, existe amplificación tanto en la parte de la BS, como en la de las tecnologías RIS y Relay DF. Se utiliza esta variable ya que no toda la potencia es consumida por el sistema, sino que la potencia originalmente calculada se puede disipar por diferentes factores. Es así, que en la Figura 2.21, se aprecia que el factor al ser igual a 0.5 implica que solo la mitad de la potencia se utiliza para la comunicación y el resto se disipa.

Los valores correspondientes a las distancias que existen entre nodos (ver Figura 2.4.) y como ya se mencionó previamente, tienen un valor fijo, por lo cual en la Figura 2.22, se puede observar la configuración y cálculo de cada uno de ellos.

```
%Definir distancias en la configuración de la simulación
d_SR = 40; %Distancia entre la fuente y el RIS/relay
dv = 10; %Distancia mínima entre el destino y el RIS/relay
%Definición de los valores de D1
d1 = 40;
%Cálculo de la distancia entre el origen y el destino
d_SU = sqrt(d1^2+dv^2);
%Cálculo de la distancia entre el RIS/relay y el destino
d_RU = sqrt((d1-d_SR)^2+dv^2);
```

**Figura 2.22.** Distancias utilizadas para la simulación.

Complementando estos parámetros, con la potencia de transmisión que se describió en la sección previa, ahora es posible realizar el cálculo de la eficiencia energética para cada escenario. Empezando por el escenario de SISO se implementó el código de la Figura 2.23, el cual, sigue la formulación matemática dada en la ecuación (1.8).

```
%Cálculo de la eficiencia energética en el caso de SISO (el factor 1000
%es usado para convertir mW en W)
EE_SISO(ind) = 1000*AB*R(ind)/(P_SISO/nu + Ps + Pd);
```

**Figura 2.23.** Eficiencia Energética caso SISO.

Como se puede notar en la Figura 2.23, se multiplica por un factor de 1000 para pasar de mW a W, este proceso se lo realizará en cada una de las eficiencias energéticas. Adicionalmente, el escenario SISO al solo involucrar dos nodos (BS y UE) solo utiliza la potencia disipada por estos mismos al calcular la potencia total.

Luego, en el escenario del Relay DF se implementó la Figura 2.24, de manera similar a lo realizado en el caso SISO.

```
%Cálculo de la eficiencia energética en el caso de DF del Relay (el
%factor 1000 es usado para convertir mW en W)
EE_DF(ind) = 1000*AB*R(ind)/(P_DF/nu + Ps/2 + Pd + Pr);
```

**Figura 2.24.** Eficiencia Energética caso Relay DF.

En el caso del Relay DF, se puede observar que existen tres nodos (BS, Relay y UE), por lo cual, existen tres elementos de disipación de potencia. Para este escenario, la fuente solo se encuentra activa durante la mitad del tiempo, por lo cual, es que se toma su valor de disipación a la mitad.

Finalmente, para el escenario de la RIS, se deberá empezar por asumir que  $\beta_{RIS}$  es una constante independiente del número de elementos que la conforman. Es así, para una tasa de datos media dada, denotada por  $\bar{R}$ , el número de elementos de la RIS puede ser optimizada mediante la siguiente expresión.

$$N^{opt} = \sqrt[3]{\frac{(2\bar{R}-1)\sigma^2}{\alpha^2\beta_{RIS}P_e}} - \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{\beta_{SD}}{\beta_{RIS}}} \quad (2.2)$$

Y la solución a la ecuación (2.2) se obtiene de  $\frac{\partial}{\partial B} P_{total}^{RIS}(N) = 0$ . Es así, que la ecuación pasa a ser implementada en código como se puede apreciar en la Figura 2.25.

```
%Cálculo del número de elementos reflectantes que minimizan la potencia
Nopt(ind) = (2*SINR*sigma2/(alpha^2*betaSR*betaRU*Pe))^(1/3) - ...
sqrt(betaSU/(betaSR*betaRU))/alpha;
```

**Figura 2.25.** Cálculo de elementos reflectantes que minimizan la potencia.

El número óptimo de elementos en la ecuación (2.2) no suele ser un número entero, por lo que el verdadero óptimo es el número entero mayor o menor más cercano. El óptimo también puede ser negativo, por lo que el caso SISO con  $N = 0$  es el verdadero óptimo. Es así, que para realizar la corrección de los valores negativos se implementó el código de la Figura 2.26.

```
if Nopt(ind)<0
    Nopt(ind) = 0;
end
```

**Figura 2.26.** Corrección del óptimo negativo.

Con el valor óptimo encontrado de elementos, se procederá a calcular el valor de la potencia y la eficiencia energética como se puede apreciar en la Figura 2.27.

```
%Cálculo de la potencia de transmisión en mW en el caso de RIS
%utilizando al ecuación 18
P_RIS = SINR*sigma2./(sqrt(h_SU) + Nopt(ind)*alpha*sqrt(h_RIS)).^2;
%Cálculo de la eficiencia energética en el caso RIS (el factor 1000 es
%usado para convertir mW en W)
EE_RIS(ind) = 1000*AB*R(ind)/(P_RIS/nu + Ps + Pd + Nopt(ind)*Pe);
```

**Figura 2.27.** Potencia de transmisión y Eficiencia Energética caso RIS.

A partir de 2.27, es evidente que se aplica la disipación, se aplican la disipación correspondiente a tres nodos (BS, UE y cada uno de los elementos de la RIS).

### **3 RESULTADOS NUMÉRICOS Y DISCUSIONES**

Dentro del presente capítulo, se detallarán los resultados obtenidos a través de simulaciones de un sistema de comunicaciones inalámbrico asistido por RIS con errores de fase junto con un sistema de comunicaciones inalámbricas asistido por Relays. Como punto de referencia, dentro de los dos casos previos se incluirá el análisis de un sistema de comunicaciones SISO con fines comparativos de desempeño. Se empezará por analizar las curvas de potencia de transmisión requerida en función de la distancia, comparando los tres casos propuestos. La importancia de examinar este parámetro de las tecnologías radica en el rendimiento del sistema, los costos de implementación y adicionalmente la eficiencia energética. Como segundo punto de análisis se tendrá en cuenta la eficiencia energética de cada uno de los casos en función de la tasa de datos alcanzable. Dado que la eficiencia energética se encuentra en función de la potencia de transmisión requerida, los beneficios de analizar este factor corresponden a reducir los costos de operación buscando obtener la mayor tasa de datos alcanzable. Además, se busca tener un menor impacto con el medio ambiente, ya que los sistemas de comunicaciones inalámbricas consumen una gran cantidad de energía, por lo que la mejora de la eficiencia energética puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

#### **3.1 Escenarios de simulación**

Dentro de los dos escenarios de simulación presentes en este trabajo se utilizarán funciones implementadas por MATLAB y funciones creadas con el propósito específico de recrear el sistema de comunicaciones inalámbrico asistido por RIS con errores de fase y el sistema de comunicaciones inalámbrico asistido por Relay. Estos sistemas se encuentran conformados principalmente por tres partes o nodos: Tx, Rx y RIS o Relay, dependiendo de la tecnología utilizada. Los canales correspondientes a Tx-RIS o Tx-Relay y RIS-Rx o Relay-Rx, son modelados con un desvanecimiento del tipo Rayleigh, en base a lo establecido en el protocolo 3GPP para un ambiente Micro Urbano. Para el escenario SISO tradicional, se modela el canal a pequeña escala Tx-Rx utilizando un desvanecimiento del tipo Rician y el de gran escala en base a la normativa 3GPP.

Para el caso de la tecnología Relay, como se mencionó previamente, se lo utilizará en su modo de operación DF. Para el caso de la tecnología RIS, su análisis se basa en el número de elementos reflectantes que la conforman, incluyendo los errores de fase, el cual es controlado a través del parámetro  $\kappa$ . Luego, para descubrir el potencial de las tecnologías investigadas, se modificará la tasa alcanzable y la distancia entre cada uno de los nodos.

Cabe mencionar que, a través de la modificación de los parámetro previamente mencionados se puede abarcar una amplia diversidad de alternativas en las condiciones de cada uno de los sistemas y cómo las mismas afectan en el rendimiento de cada una de las tecnologías. En el caso de la tecnología RIS, la presencia de los errores de fase toman vital importancia para la caracterización y optimización de este tipo de tecnología, ya que su configuración permitirá que la RIS pueda o no superar a las tecnologías predecesoras, en este caso, la del Relay.

A continuación, en la Tabla 3.1 se detallarán los parámetros que serán fijos dentro de los dos escenarios de simulación.

**Tabla 3.2.** Definición de parámetros iniciales

<b>Parámetro</b>	<b>Definición</b>
Nsim	3e5
Fc	3 GHz
AB	10e6 Hz
NF_dB	10 dB
sigma2_dB	-94 dB
antennaGainS	5 dB
antennaGainR	5 dB
antennaGainU	0 dB
alpha	1
Ps	100 mW
Pd	100 mW
Pe	5 mW
Pe	100 mW
nu	0.5 mW
d_SR	40 m
dv	10 m

## **3.2 Análisis de Métricas de Desempeño**

### **3.2.1 Potencia de Transmisión Requerida**

Dentro de la presente sección, las simulaciones brindarán un conjunto de curvas de desempeño, obtenidas según la modificación de los parámetros detallados en la Tabla 3.2. En las Figuras a analizar se presentarán los resultados para el caso SISO, el Relay en

modo de operación DF (sin selección de modo) y la RIS conformada por elementos reflectantes. Adicionalmente, a la RIS se le incluirá un error de fase constante para el análisis. Con la modificación de cada uno de los parámetros mencionados, se podrá observar el rendimiento de cada uno de los casos presentes en distintos escenarios, pudiendo así, analizar cuál resultado el más óptimo bajo las condiciones de análisis. Es así, que se decidió modificar los siguientes parámetros:

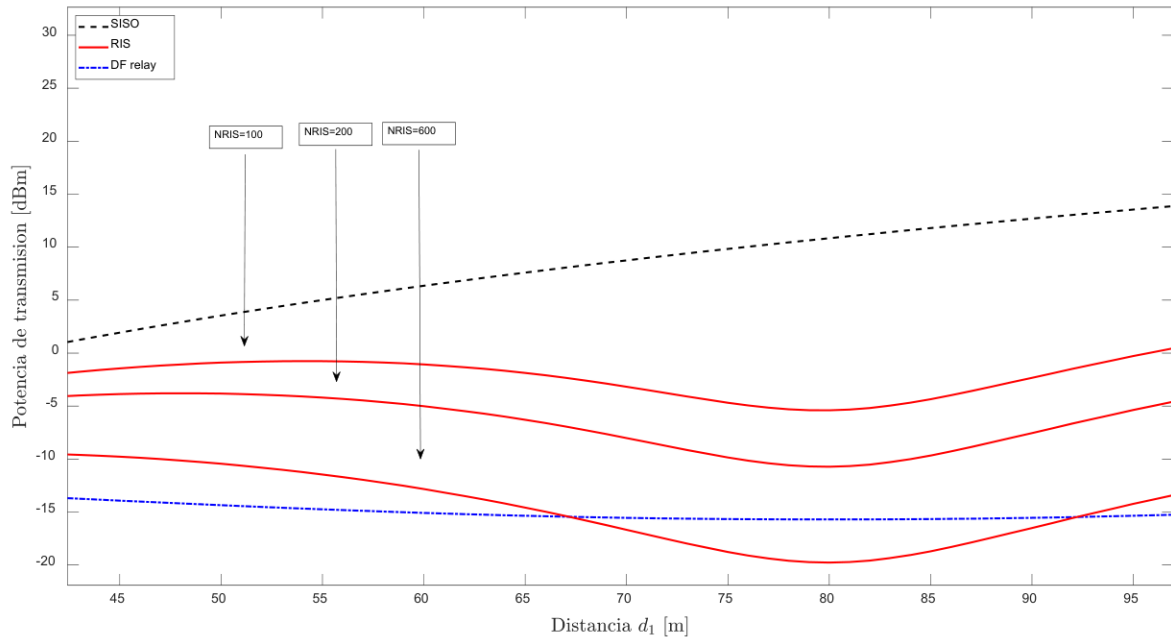
**Tabla 3.2.** Modificación de parámetros en la Potencia de Transmisión requerida

Tasa de Transmisión Requerida [bits/Hz]	Tipo de Error de Fase	Distancia $d_1$ [m]	Número de Elementos en la RIS	Path Loss
$\bar{R} = 2$	Error Fijo $\kappa = 7$	40: 100	100, 200, 600	$\beta_1 = \text{NLoS}$ $\beta_2 = \text{LoS}$ $\beta_3 = \text{LoS}$
$\bar{R} = 6$	Error Fijo $\kappa = 7$	40: 100	100, 200, 600	$\beta_1 = \text{NLoS}$ $\beta_2 = \text{LoS}$ $\beta_3 = \text{LoS}$
$\bar{R} = 4$	Error Variable $\kappa = 0,1,3,5,7$	40: 100	400	$\beta_1 = \text{NLoS}$ $\beta_2 = \text{LoS}$ $\beta_3 = \text{LoS}$

A partir de las configuraciones de la Tabla 3.2, se obtuvieron 3 Figuras diferentes que serán analizadas a continuación:

- **Primer Escenario**

Para este primer escenario de análisis, se puede apreciar que la tasa de transmisión corresponde a un valor de  $R = 2$  [bits/Hz], el error de fase se mantendrá fijo en un valor de  $\kappa = 7$ , correspondiendo a un valor alto como se mencionó en el Capítulo 1 de sus ventajas. Finalmente, se tendrán tres números diferentes de elementos reflectantes correspondientes a NRIS = 100, 200 y 600. Es así, que al realizar la simulación se obtuvieron las siguientes curvas.



**Figura 3.1.** Potencia de Transmisión Requerida con una  $R = 2$  [bits/Hz] y error de fase constante.

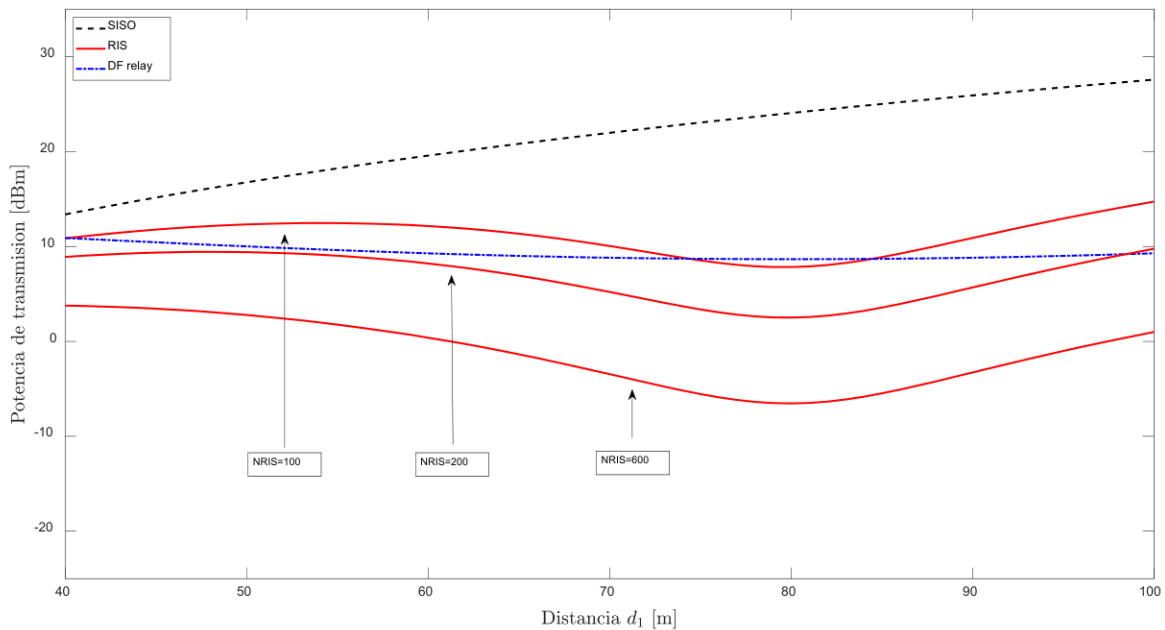
Para las curvas obtenidas en la Figura 3.1, se puede apreciar que dentro del caso SISO requiere la mayor potencia de transmisión requerida de todos los casos. Además, se puede apreciar que hasta una distancia de 67 metros (m), el uso de la tecnología Relay en modo DF utiliza la menor cantidad de potencia de transmisión requerida de todas las tecnologías, sin importar el número de elementos reflectantes analizados en la RIS. Posteriormente, entre las distancias de 67 y 92 m, se puede observar que la tecnología RIS con NRIS = 600 elementos utiliza la mínima potencia de transmisión de todos las tecnologías. Luego, a partir de los 92 m el Relay vuelve a ser el más bajo. Se debe tener en cuenta que la potencia de transmisión requerida para el caso de la tecnología RIS disminuye a medida que el número de elementos reflectantes de la misma incrementa. Por otra parte, la tecnología Relay en modo DF se puede ver que tiene un menor valor mientras más cerca se encuentre la fuente del destino.

Adicionalmente, cuando la distancia tiene un valor de 80 m (este valor corresponde cuando  $d_1$  es igual a la distancia entre la fuente y la RIS, ver Figura 2.2), se presenta el valor mínimo de potencia para todos los casos de la RIS. Sin embargo, dentro del código implementado, se calcula cuál es el número mínimo de elementos para tener un mejor rendimiento que la tecnología Relay en modo DF, obteniéndose así que a este valor de distancia se necesitaría un mínimo de NRIS = 317 elementos en la RIS para tener una menor potencia de transmisión requerida.



- **Segundo Escenario**

Para este segundo escenario de análisis, se puede apreciar que la tasa de transmisión corresponde a un valor de  $R = 6$  [bits/Hz], el error de fase se mantendrá fijo en un valor de  $\kappa = 7$  y tres números diferentes de elementos reflectantes correspondientes a NRIS = 100, 200 y 600. Es así, que al realizar la simulación se obtuvieron las siguientes curvas.



**Figura 3.2.** Potencia de Transmisión Requerida con una  $R = 6$  [bits/Hz] y error de fase constante.

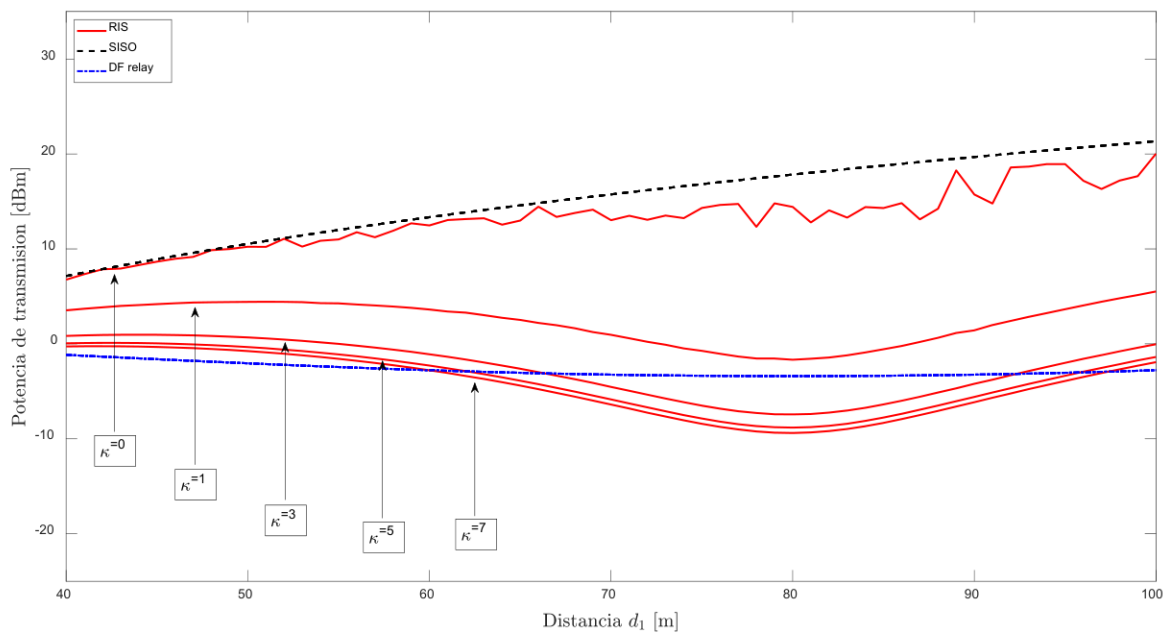
Para las curvas obtenidas en la Figura 3.2, se puede identificar que dentro del caso SISO se requiere la mayor potencia de transmisión requerida, al igual que el primer escenario. Así mismo, se puede apreciar que la tecnología RIS con NRIS = 600 elementos siempre tiene la potencia de transmisión requerida más baja de todos los casos. Para el caso de la RIS con NRIS = 200 elementos, comparándola con la tecnología Relay y el caso SISO, presenta la potencia de transmisión más baja hasta la distancia de 98.5 m. Posteriormente, la tecnología Relay pasa a tener ligeramente una menor potencia de transmisión. Finalmente, para el caso de la RIS con NRIS = 100 elementos, se puede observar que presenta la menor potencia de transmisión entre los 74 y 85 m, teniendo una valor ligeramente menor al del Relay. De igual forma que en el primer escenario, se debe tener en cuenta que la potencia de transmisión requerida para el caso de la tecnología RIS disminuye a medida que el número de elementos reflectantes de la misma incrementa. Por otro lado, cuando la distancia tiene un valor de 80 m, se presenta el valor mínimo de potencia para todos los casos de la RIS. Calculando cuál es el número mínimo de elementos para tener un mejor rendimiento que la tecnología Relay en modo DF, se obtuvo



que para este valor de distancia se necesitaría un mínimo de NRIS = 77 elementos para tener una menor potencia de transmisión requerida.

- **Tercer escenario**

Para este tercer escenario y último de análisis de esta sección, se puede apreciar que la tasa de transmisión corresponde a un valor de  $R = 4$  [bits/Hz], el número de elementos reflectantes que conforman la RIS corresponden a NRIS = 400 y el error de fase se variará con los valores correspondientes a  $\kappa = 0, 1, 3, 5$  y  $7$ , analizando así la influencia de los errores de fase presentes en este tipo de tecnología. Es así, que al realizar la simulación se obtuvieron las siguientes curvas.



**Figura 3.3.** Potencia de Transmisión Requerida con una  $R = 4$ [bits/Hz] y error de fase variable.

Para las curvas representadas en la Figura 3.3, se puede distinguir que al igual que los dos escenarios anteriores, el caso SISO es el que requiere una mayor potencia de transmisión requerida. Sin embargo, se tiene que para el caso de la RIS cuando su error de fase es de  $\kappa = 0$ , se requiere de la segunda cantidad más alta de potencia de transmisión requerida, siendo muy ligeramente menor a la del caso SISO. Esto se debe a que, en este caso, la RIS no consigue efectuar el beamforming, por lo que la señal retransmitida por la RIS se dirige hacia muchas direcciones, no solo hacia el destino. Luego, al incrementar el valor de  $\kappa = 1$  se puede visualizar una mejoría ya que se tiene una mejor redirección, reduciendo la potencia de transmisión requerida. Sin embargo, esto no es suficiente para poder superar a la tecnología Relay en modo DF lo cual es el objetivo principal de este trabajo.

Continuando con un valor de  $\kappa = 3$ , la tecnología RIS presenta ligeramente una mayor potencia de transmisión requerida hasta los 67 m, dónde en este valor tienen el mismo requerimiento que la tecnología Relay. A partir de este valor, hasta los 92 m, la tecnología RIS presentará la mínima potencia de transmisión requerida de todos los casos, logrando superar así al Relay. Luego de los 92 m, presenta ya un mayor requerimiento de potencia.

Finalmente, para los valores de  $\kappa = 5,7$  se realizará un análisis en conjunto, ya que las curvas de los mismos se encuentran muy cercanos entre sí. La tecnología RIS presenta ligeramente una mayor potencia de transmisión requerida hasta aproximadamente los 60 m, dónde en este valor tienen el mismo requerimiento que la tecnología Relay. A partir de este valor, hasta los 95 m, la tecnología RIS presentará la mínima potencia de transmisión requerida de todos los casos, logrando superar así al Relay. Luego de los 95 m, presenta ya un mayor requerimiento de potencia.

Se tomó como referencia analizar hasta un  $\kappa = 7$ , porque en este valor ya se consigue casi de forma perfecta el efecto de beamforming, por lo que, incrementar este valor no produciría cambios relevantes para el análisis de la RIS.

### 3.2.2 Análisis de la Eficiencia Energética

Dentro de la presente sección, las simulaciones brindarán un conjunto de curvas de desempeño, obtenidas según la modificación de los parámetros detallados en la Tabla 3.3. Dentro de la Figuras a analizar se presentarán los resultados para el caso SISO, el Relay en modo de operación DF (sin selección de modo) y la RIS conformada por elementos reflectantes. Adicionalmente, a la RIS se le incluirá un error de fase constante para el análisis. Con la modificación de cada uno de los parámetros mencionados, se podrá observar el rendimiento de cada uno de los casos presentes en distintos escenarios, pudiendo así, analizar cuál resultado el más óptimo bajo las condiciones de análisis. Es así, que se decidió modificar los siguientes parámetros:

**Tabla 3.3.** Modificación de parámetros en la Eficiencia Energética

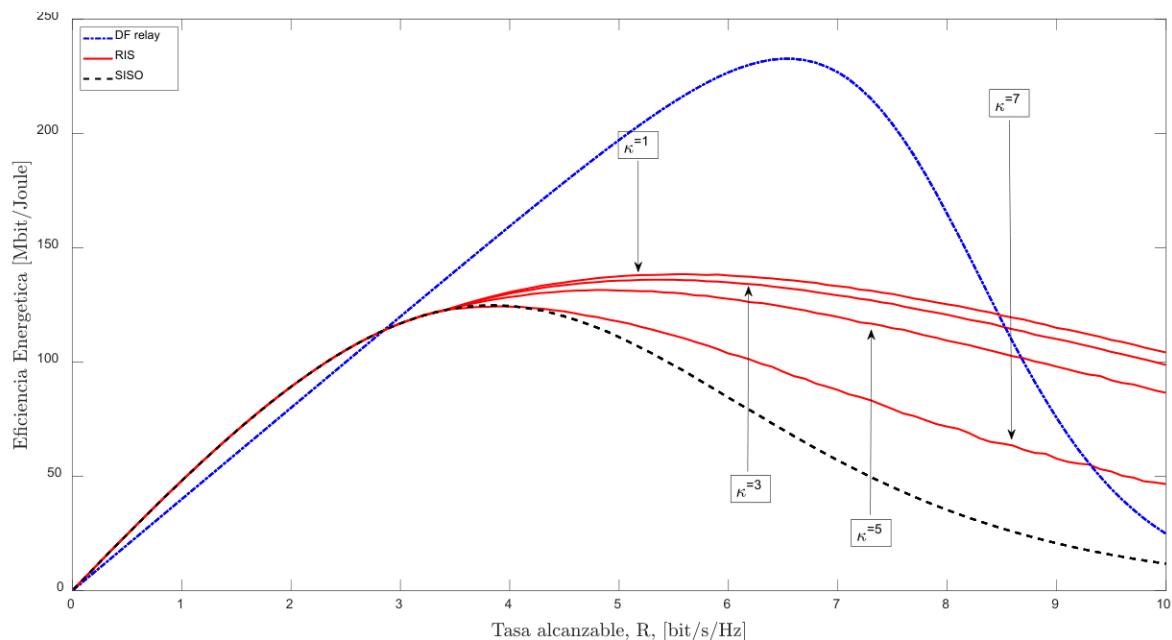
Tasa de Transmisión Requerida [bits/Hz]	Tipo de Error de Fase	Distancia $d_1$ [m]	Path Loss
$\bar{R} = [0.01$ $0.1:0.1:10]$	Error Variable $\kappa = 1,3,5,7$	80	$\beta_1 = \text{NLoS}$ $\beta_2 = \text{LoS}$ $\beta_3 = \text{LoS}$

$\bar{R} = [0.01$ 0.1:0.1:10]	Error Variable $\kappa = 1,3,5,7$	50	$\beta_1 = \text{NLoS}$ $\beta_2 = \text{LoS}$ $\beta_3 = \text{LoS}$
$\bar{R} = [0.01$ 0.1:0.1:10]	Error Variable $\kappa = 1,3,5,7$	5	$\beta_1 = \text{NLoS}$ $\beta_2 = \text{LoS}$ $\beta_3 = \text{LoS}$

Como se puede apreciar en la Tabla 3.3, no se modifica el número de elementos reflectantes en la RIS intencionalmente. Esto se debe a que este valor será calculado dentro del script, utilizando la sección presente en la Figura 2.25. Es así, con las modificaciones de la Tabla 3.3, se obtuvieron 3 Figuras diferentes que serán analizadas a continuación:

- **Primer escenario**

Para este primer escenario de análisis, se puede apreciar que la tasa de transmisión requerida corresponde a un valor variable desde  $R = 0.01$  hasta los  $R = 10$  [bits/Hz], el error de fase el error de fase se variará con los valores correspondientes a  $\kappa = 1, 3, 5$  y  $7$ . Finalmente, un valor de la distancia  $d_1 = 80$  m, teniendo el mismo valor que la distancia que existe entre TX-RIS o Relay. Es así que se obtuvo:



**Figura 3.4.** Eficiencia energética a una distancia  $d_1 = 80$  m y error de fase variable.

Como se puede apreciar en la Figura 3.4, se tiene que tanto el caso SISO como el caso de la tecnología RIS con todos sus valores de error de fase presentan la mayor eficiencia

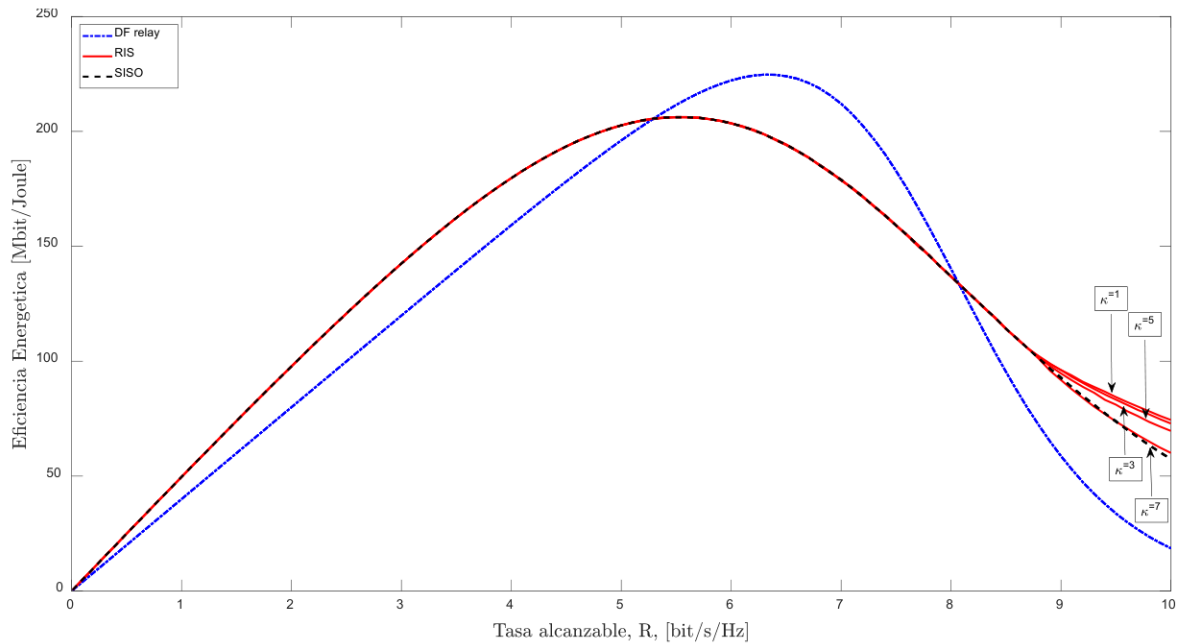
energética hasta el valor de  $R = 2.85$ . Luego, a partir de este valor el caso SISO tiene la menor eficiencia energética de todas las tecnologías. Además, a partir del valor de tasa previamente mencionada, la tecnología Relay tiene la mayor eficiencia energética de todas las tecnologías, superando a las demás holgadamente.

Sin embargo, la tecnología encuentra su valor máximo de eficiencia energética a la tasa de  $R = 6.6$ , a partir de este valor, su eficiencia energética empieza a caer muy bruscamente a medida que incrementa la tasa. De igual forma, para el caso SISO se puede observar que alcanza su máxima eficiencia energética a la tasa de  $R = 3.8$ , luego empieza a decaer progresivamente. Finalmente, para el caso de la tecnología RIS, presenta cuatro máximos al tener cuatro errores de fase en cada análisis.

Se puede apreciar en la Figura 3.4 que la tecnología RIS cuando alcanza su máximo, procede a decaer, pero muy ligeramente en comparación a los otros casos de análisis. Para cuando  $\kappa = 1$  se puede observar que tiene la menor eficiencia energética de todos los casos de la RIS, lo cual resulta obvio, ya que el reenvío de la señal presenta errores altos. Aquí su pico máximo se encuentra igual que el caso SISO, sin embargo, iguala la eficiencia energética del Relay a una tasa de  $R = 9.34$  para luego en tasas más altas tener la eficiencia energética más alta de los tres casos. Ahora, cuando  $\kappa = 3$  se tiene que alcanza su pico a una tasa de  $R = 5$  y tiene la más alta eficiencia energética de los 3 casos en tasas de  $R = 8.68$  o superiores. Finalmente, para el caso de  $\kappa = 5,7$  se tiene que presenta su máximo a una tasa de  $5.4$ , con la diferencia que el  $\kappa = 5$  tiene la mayor eficiencia energética a partir de tasas de  $R = 8.53$  y el  $\kappa = 7$  de tasas superiores a  $R = 8.47$ .

- **Segundo escenario**

Para este segundo escenario de análisis, se puede apreciar que la tasa de transmisión corresponde a un valor variable desde  $R = 0.01$  hasta los  $R = 10$  [bits/Hz], el error de fase el error de fase se variará con los valores correspondientes a  $\kappa = 1, 3, 5$  y  $7$ . Finalmente, un valor de la distancia  $d_1 = 50$  m, este valor se lo tuvo en cuenta para identificar la influencia de los errores de fase en el gráfico, ya que para valores menores se vuelve imperceptible la influencia de los mismos como se lo verá en el tercer escenario. Es así, que con estas configuraciones se obtuvo la siguiente figura:



**Figura 3.5.** Eficiencia energética a una distancia  $d_1 = 50$  m y error de fase variable.

Como se puede apreciar en la Figura 3.5, se tiene que tanto el caso SISO como el caso de la tecnología RIS con todos sus valores de error de fase presentan la mayor eficiencia energética hasta el valor de tasa de  $R = 5.3$ . A diferencia del primer escenario, se puede observar que los casos SISO y RIS mantienen los mismos valores hasta llegar a tasas más altas, teniendo su pico máximo a una tasa de  $R = 5.6$ .

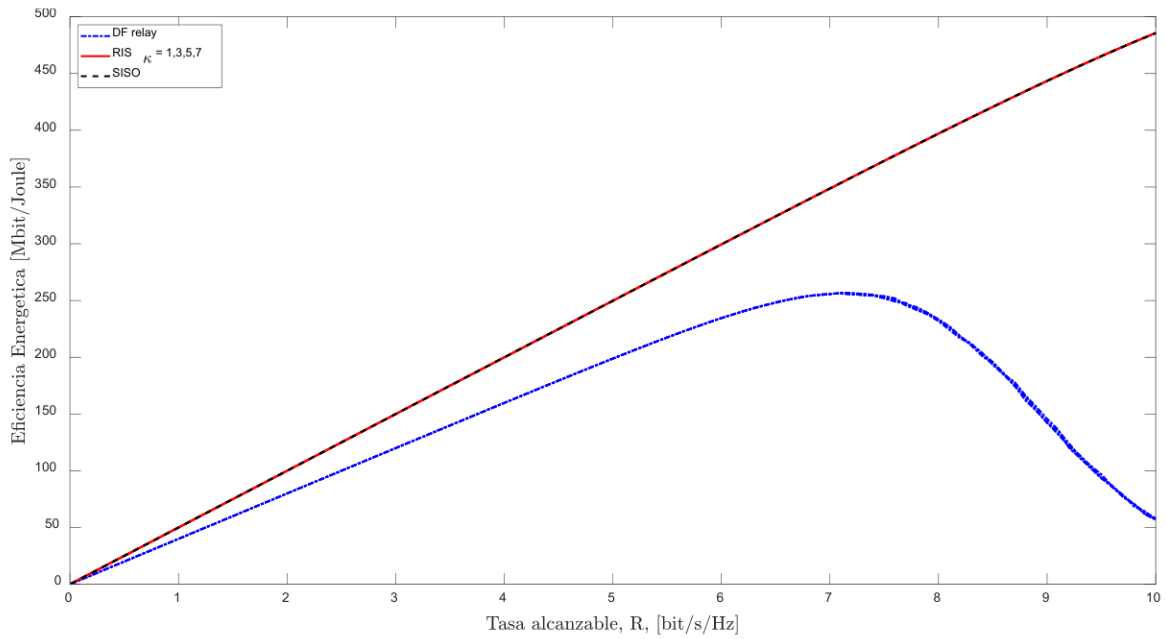
A partir del valor de tasa de  $R = 5.3$  hasta el valor de  $R = 8.07$  la tecnología Relay tendrá la mayor Eficiencia Energética, con un valor máximo a una tasas de  $R = 6.3$ . Adicionalmente, presenta valores muy similares de eficiencia energética en todo los valores de tasa.

Finalmente, para el caso de la tecnología RIS, tiene un comportamiento similar a la SISO hasta el valor de tasa de  $R = 8.7$ . A partir de este valor, ya comienzan a existir variaciones a ser analizadas dependiendo del error de fase. Como primera parte, para  $\kappa = 1$  se puede apreciar que siempre tiene un comportamiento similar al del caso SISO, siendo el peor comportamiento en términos de eficiencia energética de la RIS. Posteriormente, cuando  $\kappa = 3, 5, 7$  se puede observar que a partir de la tasa de  $R = 8.7$  presentan la mejor eficiencia energética de todos los casos, sin presentar mucha variación.

- **Tercer Escenario**

Para este tercer escenario de análisis, se puede apreciar que la tasa de transmisión corresponde a un valor variable desde  $R = 0.01$  hasta los  $R = 10$  [bits/Hz], el error de fase el error de fase se variará con los valores correspondientes a  $\kappa = 1, 3, 5$  y  $7$ . Finalmente,

un valor de la distancia  $d_1 = 5$  m, este valor corresponde a una distancia muy cercana entre Tx y Rx. Es así, que con estas configuraciones se obtuvo la siguiente figura:



**Figura 3.6.** Eficiencia energética a una distancia  $d_1 = 5$  m y error de fase variable

Como se puede apreciar en la Figura 3.6, para se tiene que el caso SISO y la tecnología RIS presentan los valores más altos de eficiencia energética a todas las tasas a la par. Caso contrario es el de la tecnología Relay, que para este valor de distancia pequeño ocupa el peor de los tres casos, teniendo la eficiencia energética más baja con su máximo a la tasa de  $R = 7.2$ .

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- La comparación entre las tecnologías RIS y los Relay, se llevó a cabo para abordar la necesidad de tecnologías de comunicación inalámbrica eficientes y de alto rendimiento en las redes modernas y futuras. La justificación detrás de este trabajo se deriva de la creciente demanda de tasas de datos elevadas y conectividad confiable, lo que hace necesario explorar soluciones novedosas como RIS para satisfacer estos requisitos.
- Al comparar las tecnologías RIS con el Relay, el estudio identificó los escenarios y condiciones específicos en los que RIS puede superar las técnicas de reenvío tradicionales. Esta investigación es crucial para orientar el diseño e implementación de futuras redes inalámbricas, asegurando un rendimiento óptimo y una utilización eficiente de los recursos.
- Se realizó un análisis detallado del número requerido de elementos reflectantes en la RIS para superar el rendimiento del reenvío, el estudio tuvo como objetivo proporcionar una comprensión integral de los desafíos y oportunidades prácticas en el aprovechamiento de RIS para una comunicación inalámbrica mejorada. Cabe mencionar que el número de elementos reflectantes en la RIS en aplicaciones reales llega al orden de los miles, lo cual permite dilucidar la mejoría en comparación al Relay.
- La investigación se motivó por la necesidad de evaluar el impacto de la relación SINR y el número de elementos en la elección entre las tecnologías RIS con respecto al Relay. Al investigar la influencia de la relación SINR y el número de elementos en el rendimiento de RIS, en contraste con el Relay, el estudio pretende ofrecer una orientación para que los planificadores y operadores de redes puedan determinar el enfoque de comunicación más adecuado en función de regímenes específicos de SINR y limitaciones de recursos. Este análisis es crucial para optimizar la implementación y operación de sistemas inalámbricos en entornos diversos.
- La comparación entre RIS y el Relay se llevó a cabo para abordar las implicaciones prácticas de la minimización de la potencia de transmisión bajo restricciones de tasa. Al examinar la potencia de transmisión requerida para cada configuración de comunicación, el estudio tuvo como objetivo proporcionar conocimientos prácticos

sobre la eficiencia energética y la gestión de la potencia de las tecnologías RIS y de Relay.

- Al implementar errores de fase se pudo corroborar la teoría que a un mayor valor de  $\kappa$  se obtendrá un mejor rendimiento de la RIS, ya que se disminuyen los errores de fase. Sin embargo, se pudo apreciar al momento de realizar las simulaciones que al utilizar valores superiores a  $\kappa = 7$  ya no se obtenía una mejora significativa en los resultados de simulación, por lo cual, el valor mencionado resulta el escenario más adecuado para los análisis.



## 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda investigar más sobre las consideraciones prácticas de implementación y despliegue de las RIS en escenarios reales de comunicación inalámbrica. Una investigación futura debe centrarse en realizar pruebas de campo y estudios experimentales para evaluar el rendimiento de la tecnología RIS en entornos diversos, considerando factores como la propagación multipath, la interferencia y la movilidad. Esto proporcionará información con mayor veracidad sobre la viabilidad y los desafíos prácticos de integrar RIS en redes inalámbricas operativas, guiando el desarrollo de estrategias de implementación y arquitecturas de sistemas robustos.
- Los trabajos futuros tienen como adicional explorar las posibles sinergias entre la tecnología RIS y las técnicas avanzadas de procesamiento de señales, como el MIMO masivo y el beamforming. Al integrar RIS con métodos avanzados de procesamiento de señales, los investigadores pueden detallar los beneficios combinados de estas tecnologías para mejorar la eficiencia espectral, la cobertura y el rendimiento general de la red. Esta exploración contribuirá al desarrollo de soluciones de comunicación integradas que aprovechen las fortalezas de RIS y el procesamiento de señales avanzado para lograr capacidades de comunicación inalámbrica superiores.
- Se recomienda realizar análisis de costo-beneficio y evaluaciones económicas exhaustivas de la implementación de la tecnología RIS en comparación con los enfoques de reenvío tradicionales, como por ejemplo el caso del Relay. La investigación futura debe considerar los gastos de capital y operativos asociados con la implementación de RIS, incluidos los costos de hardware, consumo de energía y mantenimiento. Al cuantificar las implicaciones económicas de adoptar RIS, los interesados pueden tomar decisiones informadas sobre la rentabilidad y la viabilidad a largo plazo de integrar RIS en infraestructuras de comunicación inalámbrica. Este análisis será fundamental para guiar las decisiones de inversión y las estrategias de adopción de tecnología en la industria de las telecomunicaciones.
- Los trabajos futuros pueden centrarse en desarrollar algoritmos adaptativos e inteligentes para optimizar la configuración y operación de RIS en entornos de comunicación dinámicos y en evolución. Al diseñar algoritmos de control adaptativos y técnicas basadas en aprendizaje automático, los investigadores

pueden permitir que RIS se adapte de manera autónoma a sus propiedades reflectantes y capacidades de beamforming en respuesta a las condiciones del canal cambiantes, los requisitos del usuario y la dinámica de la red.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, y H. D. Schotten, «The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey», *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 334-366, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3057679.
- [2] M. Matthaiou, O. Yurduseven, H. Q. Ngo, D. Morales-Jimenez, S. L. Cotton, y V. F. Fusco, «The Road to 6G: Ten Physical Layer Challenges for Communications Engineers», *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, n.º 1, pp. 64-69, ene. 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2000208.
- [3] Q. Wu y R. Zhang, «Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network». arXiv, 30 de agosto de 2019. Accedido: 27 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1905.00152>
- [4] W. Saad, M. Bennis, y M. Chen, «A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems», *IEEE Network*, vol. 34, n.º 3, pp. 134-142, may 2020, doi: 10.1109/MNET.001.1900287.
- [5] F. Bouhafs, A. Raschellà, M. Mackay, y F. Den Hartog, «A Spectrum Management Platform Architecture to Enable a Sharing Economy in 6G», *Future Internet*, vol. 14, n.º 11, p. 309, oct. 2022, doi: 10.3390/fi14110309.
- [6] B. Madani y M. Ndiaye, «Autonomous Vehicles Delivery Systems Classification: Introducing a TSP With a Moving Depot», en *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, Manama, Bahrain: IEEE, abr. 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICMSAO.2019.8880379.
- [7] A. I. Salameh y M. El Tarhuni, «From 5G to 6G—Challenges, Technologies, and Applications», *Future Internet*, vol. 14, n.º 4, p. 117, abr. 2022, doi: 10.3390/fi14040117.
- [8] Nidhi, A. Mihovska, y R. Prasad, «Overview of 5G New Radio and Carrier Aggregation: 5G and Beyond Networks», en *2020 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Okayama, Japan: IEEE, oct. 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/WPMC50192.2020.9309496.
- [9] I. Farris, T. Taleb, Y. Khettab, y J. Song, «A Survey on Emerging SDN and NFV Security Mechanisms for IoT Systems», *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, n.º 1, pp. 812-837, 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2862350.
- [10] K. Samdanis y T. Taleb, «The Road beyond 5G: A Vision and Insight of the Key Technologies», *IEEE Network*, vol. 34, n.º 2, pp. 135-141, mar. 2020, doi: 10.1109/MNET.001.1900228.
- [11] L. Fang, B. Zhao, Y. Li, Z. Liu, C. Ge, y W. Meng, «Countermeasure Based on Smart Contracts and AI against DoS/DDoS Attack in 5G Circumstances», *IEEE Network*, vol. 34, n.º 6, pp. 54-61, nov. 2020, doi: 10.1109/MNET.021.1900614.
- [12] E. Basar, «Reconfigurable Intelligent Surface-Based Index Modulation: A New Beyond MIMO Paradigm for 6G», *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, n.º 5, pp. 3187-3196, may 2020, doi: 10.1109/TCOMM.2020.2971486.
- [13] E. Basar, «Media-Based Modulation for Future Wireless Systems: A Tutorial», *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, n.º 5, pp. 160-166, oct. 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800568.
- [14] E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, Y. Xiao, y H. Haas, «Index Modulation Techniques for Next-Generation Wireless Networks», *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16693-16746, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2737528.
- [15] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, y R. Zhang, «Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753-116773, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935192.
- [16] N. Rajatheva *et al.*, «Scoring the Terabit/s Goal: Broadband Connectivity in 6G». arXiv, 21 de febrero de 2021. Accedido: 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/2008.07220>

- [17] «Multipath Propagation», Semiconductor Engineering. Accedido: 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://semiengineering.com/knowledge\\_centers/communications-io/communications-systems/wireless/multipath-propagation/](https://semiengineering.com/knowledge_centers/communications-io/communications-systems/wireless/multipath-propagation/)
- [18] «LOS vs NLOS | Difference between LOS and NLOS wireless channels». Accedido: 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LOS-vs-NLOS-wireless-channel.html>
- [19] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, 2. ed., 18. printing. en Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2009.
- [20] «Fading basics | types of Fading in wireless communication». Accedido: 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.rfwireless-world.com/Articles/Fading-basics-and-types-of-fading-in-wireless-communication.html>
- [21] E. T. Affonso, R. D. Nunes, R. L. Rosa, G. F. Pivaro, y D. Z. Rodriguez, «Speech Quality Assessment in Wireless VoIP Communication Using Deep Belief Network», *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77022-77032, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2871072.
- [22] «Fading: An introduction to large scale fading · Wireless Lab IIT-M». Accedido: 30 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://varun19299.github.io/ID4100-Wireless-Lab-IITM/posts/1-large-scale-fading/>
- [23] J. D. Gibson, Ed., *The communications handbook*, 2. ed. en The electrical engineering handbook series. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002.
- [24] V. Garg, *Wireless Communications & Networking*. Elsevier, 2010.
- [25] «Modern Wireless Communications by Simon Haykin & Michael Moher.pdf». Accedido: 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://yfy2006.free.fr/etude/enseignement/Modern%20Wireless%20Communications%20by%20Simon%20Haykin%20&%20Michael%20Moher.pdf>
- [26] A. Alimohammad, S. F. Fard, B. F. Cockburn, y C. Schlegel, «Compact Rayleigh and Rician fading simulator based on random walk processes», *IET Commun.*, vol. 3, n.º 8, p. 1333, 2009, doi: 10.1049/iet-com.2008.0297.
- [27] Y. R. Zheng y Chengshan Xiao, «Simulation models with correct statistical properties for rayleigh fading channels», *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, n.º 6, pp. 920-928, jun. 2003, doi: 10.1109/TCOMM.2003.813259.
- [28] A. Chehri, H. Mouftah, y W. Farjow, «Indoor Cooperative Positioning Based on Fingerprinting and Support Vector Machines», en *Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking, and Services*, P. Sénac, M. Ott, y A. Seneviratne, Eds., en Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, pp. 114-124. doi: 10.1007/978-3-642-29154-8\_10.
- [29] J. G. Proakis y M. Salehi, *Digital communications*, 5th ed. Boston: McGraw-Hill, 2008.
- [30] «What is SINR (Signal to Interference & Noise Ratio)? ISCO International», ISCO. Accedido: 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://iscointl.com/sinr-optimization/>
- [31] X. Kang, Y.-C. Liang, A. Nallanathan, H. K. Garg, y R. Zhang, «Optimal power allocation for fading channels in cognitive radio networks: Ergodic capacity and outage capacity», *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, n.º 2, pp. 940-950, feb. 2009, doi: 10.1109/TWC.2009.071448.
- [32] «IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems», *IEEE Std 802.16-2009 (Revision of IEEE Std 802.16-2004)*, pp. 1-2080, may 2009, doi: 10.1109/IEEESTD.2009.5062485.
- [33] E. Björnson, Ö. Özdogan, y E. G. Larsson, «Intelligent Reflecting Surface Versus Decode-and-Forward: How Large Surfaces are Needed to Beat Relaying?», *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, n.º 2, pp. 244-248, feb. 2020, doi: 10.1109/LWC.2019.2950624.

- [34]K. Loa *et al.*, «IMT-Advanced Relay Standards», *IEEE Communications Magazine*, 2010.
- [35]G. Noh, H. Chung, y I. Kim, «Mobile Relay Technology for 5G», *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, n.º 3, pp. 6-7, jun. 2020, doi: 10.1109/MWC.2020.9116079.
- [36]N. Nomikos, D. N. Skoutas, y P. Makris, «Relay selection in 5G networks», en *2014 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Nicosia, Cyprus: IEEE, ago. 2014, pp. 821-826. doi: 10.1109/IWCMC.2014.6906462.
- [37]A. El Gamal, J. Mammen, B. Prabhakar, y D. Shah, «Optimal Throughput–Delay Scaling in Wireless Networks—Part II: Constant-Size Packets», *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, n.º 11, pp. 5111-5116, nov. 2006, doi: 10.1109/TIT.2006.883548.
- [38]N. Nomikos, T. Charalambous, I. Krikidis, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas, y M. Johansson, «Buffer-aided successive opportunistic relaying with inter-relay interference cancellation», en *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, London: IEEE, sep. 2013, pp. 1316-1320. doi: 10.1109/PIMRC.2013.6666343.
- [39]Q. Wu y R. Zhang, «Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, n.º 1, pp. 106-112, ene. 2020, doi: 10.1109/MCOM.001.1900107.
- [40]D. J. Villarreal, D. Quintero, y R. D. Gregg, «A Perturbation Mechanism for Investigations of Phase-Dependent Behavior in Human Locomotion», *IEEE Access*, vol. 4, pp. 893-904, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2535661.
- [41]C. Pan *et al.*, «Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions», *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, n.º 6, pp. 14-20, jun. 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2001076.
- [42]Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You, y R. Zhang, «Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial», *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, n.º 5, pp. 3313-3351, may 2021, doi: 10.1109/TCOMM.2021.3051897.
- [43]Z. Yang, B. Wu, K. Zheng, X. Wang, y L. Lei, «A Survey of Collaborative Filtering-Based Recommender Systems for Mobile Internet Applications», *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3273-3287, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2573314.
- [44]N. S. Perović, M. D. Renzo, y M. F. Flanagan, «Channel Capacity Optimization Using Reconfigurable Intelligent Surfaces in Indoor mmWave Environments», en *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, jun. 2020, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICC40277.2020.9148781.
- [45]Y. Liu *et al.*, «Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities», *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 23, n.º 3, pp. 1546-1577, 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3077737.
- [46]S. Zhou, W. Xu, K. Wang, M. Di Renzo, y M.-S. Alouini, «Spectral and Energy Efficiency of IRS-Assisted MISO Communication With Hardware Impairments», *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, n.º 9, pp. 1366-1369, sep. 2020, doi: 10.1109/LWC.2020.2990431.
- [47]«Probability distributions > Continuous univariate distributions > von Mises distribution». Accedido: 31 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.statsref.com/HTML/von\\_mises.html](https://www.statsref.com/HTML/von_mises.html)
- [48]Arnaud, «Symmetric vs Asymmetric encryption: What's the difference?», Mailfence Blog. Accedido: 30 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://blog.mailfence.com/symmetric-vs-asymmetric-encryption/>

## 6 ANEXOS

### ANEXO I

Tabla 5.1. Desvanecimiento a Gran Escala del modelo 3GPP

Escenario	Path loss [dB] Nota: $f_c$ está dada en GHz y la distancia en metros	Shadow fading std [dB]	Rango de aplicación y altura de las antenas
LOS	$PL = 22.0 \log_{10}(d) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c)$	$\sigma = 3$	$10 \text{ m} < d_1 < d'_{BP}{}^{1)}$
	$PL = 40 \log_{10}(d_1) + 7.8 - 18 \log_{10}(h'_{BS}) - 18 \log_{10}(h'_{UT}) + 2 \log_{10}(f_c)$	$\sigma = 3$	$d'_{BP} < d_1 < 5000 \text{ m}^{1)}$ $h_{BS} = 10 \text{ m}^{1)}, h_{UT} = 1.5 \text{ m}^{1)}$
NLOS	<b>Manhattan grid layout:</b> $PL = \min(PL(d_1, d_2), PL(d_2, d_1))$ where $PL(d_k, d_l) =$ $PL_{LOS}(d_k) + 17.9 - 12.5n_j + 10n_j \log_{10}(d_l) + 3 \log_{10}(f_c)$ and $n_j = \max(2.8 - 0.0024d_k, 1.84)$ y $PL_{LOS}$ es la pérdida de trayectoria del escenario UMi LOS y $k, l \in \{1, 2\}$ .	$\sigma = 4$	$10 \text{ m} < d_1 + d_2 < 5000 \text{ m}$ , $w/2 < \min(d_1, d_2)$ <sup>2)</sup> $w = 20 \text{ m}$ (street width) $h_{BS} = 10 \text{ m}$ , $h_{UT} = 1.5 \text{ m}$ Cuando $0 < \min(d_1, d_2) < w/2$ , el LOS PL is aplicado.
	<b>Hexagonal cell layout:</b> $PL = 36.7 \log_{10}(d) + 22.7 + 26 \log_{10}(f_c)$	$\sigma = 4$	$10 \text{ m} < d < 2000 \text{ m}$ $h_{BS} = 10 \text{ m}$ $h_{UT} = 1-2.5 \text{ m}$
Urban Micro (UMi) O-to-I	$PL = PL_b + PL_{tw} + PL_{in}$ <b>Manhattan grid layout (<math>\theta</math> known):</b> $\begin{cases} PL_b = PL_{B1}(d_{out} + d_{in}) \\ PL_{tw} = 14 + 15(1 - \cos(\theta))^2 \\ PL_{in} = 0.5d_{in} \end{cases}$ <b>For hexagonal layout (<math>\theta</math> unknown):</b> $PL_{tw} = 20$ , otros valores siguen siendo los mismos.	$\sigma = 7$	$10 \text{ m} < d_{out} + d_{in} < 1000 \text{ m}$ , $0 \text{ m} < d_{in} < 25 \text{ m}$ , $h_{BS} = 10 \text{ m}$ , $h_{UT} = 3(n_{FI} - 1) + 1.5 \text{ m}$ , $n_{FI} = 1$ , Explanations: ver <sup>3)</sup>

Urban Macro (UMa)	LOS	$PL = 22.0 \log_{10}(d) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL = 40.0 \log_{10}(d_1) + 7.8 - 18.0 \log_{10}(h'_{BS}) - 18.0 \log_{10}(h'_{UT}) + 2.0 \log_{10}(f_c)$	$\sigma = 4$  $\sigma = 4$	$10 \text{ m} < d < d'_{BP}{}^{1)}$  $d'_{BP} < d < 5\,000 \text{ m}^1)$ $h_{BS} = 25 \text{ m}^1, h_{UT} = 1.5 \text{ m}^1)$
	NLOS	$PL = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2) \log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS})) (\log_{10}(d) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2 (\log_{10}(11.75 h_{UT}))^2 - 4.97)$	$\sigma = 6$	$10 \text{ m} < d < 5\,000 \text{ m}$ $h = \text{avg. altura del edificio}$ $W = \text{ancho de la calle}$ $h_{BS} = 25 \text{ m}, h_{UT} = 1.5 \text{ m}, W = 20 \text{ m}, h = 20 \text{ m}$ Rangos de aplicación: $5 \text{ m} < h < 50 \text{ m}$ $5 \text{ m} < W < 50 \text{ m}$ $10 \text{ m} < h_{BS} < 150 \text{ m}$ $1 \text{ m} < h_{UT} < 10 \text{ m}$
Suburban Macro (SMa, optional)	LOS	$PL_1 = 20 \log_{10}(40\pi d f_c / 3) + \min(0.03 h^{1.72}, 10) \log_{10}(d) - \min(0.044 h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log_{10}(h) d$ $PL_2 = PL_1 (d_{BP}) + 40 \log_{10}(d/d_{BP})$	$\sigma = 4$  $\sigma = 6$	$10 \text{ m} < d < d_{BP}{}^4)$  $d_{BP} < d < 5\,000 \text{ m}$ $h_{BS} = 35 \text{ m}, h_{UT} = 1.5 \text{ m}, W = 20 \text{ m}, h = 10 \text{ m}$ (Los rangos de aplicación de $h, W, h_{BS}, h_{UT}$ son los mismos como en UMa NLOS)
	NLOS	$PL = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2) \log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS})) (\log_{10}(d) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2 (\log_{10}(11.75 h_{UT}))^2 - 4.97)$	$\sigma = 8$	$10 \text{ m} < d < 5\,000 \text{ m}$ $h_{BS} = 35 \text{ m}, h_{UT} = 1.5 \text{ m}, W = 20 \text{ m}, h = 10 \text{ m}$ (Los rangos de aplicación de $h, W, h_{BS}, h_{UT}$ son los mismos como en UMa NLOS)
Rural Macro (RMa)	LOS	$PL_1 = 20 \log_{10}(40\pi d f_c / 3) + \min(0.03 h^{1.72}, 10) \log_{10}(d) - \min(0.044 h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log_{10}(h) d$ $PL_2 = PL_1 (d_{BP}) + 40 \log_{10}(d/d_{BP})$	$\sigma = 4$  $\sigma = 6$	$10 \text{ m} < d < d_{BP}, {}^4)$  $d_{BP} < d < 10\,000 \text{ m}, h_{BS} = 35 \text{ m}, h_{UT} = 1.5 \text{ m}, W = 20 \text{ m}, h = 5 \text{ m}$ (Rangos de aplicación de $h, W, h_{BS}, h_{UT}$ son los mismos que UMa NLOS)

NLOS	$PL = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2) \log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS})) (\log_{10}(d) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2 (\log_{10}(11.75 h_{UT}))^2 - 4.97)$	$\sigma = 8$	$10 \text{ m} < d < 5\,000 \text{ m}$ , $h_{BS} = 35 \text{ m}$ , $h_{UT} = 1.5 \text{ m}$ , $W = 20 \text{ m}$ , $h = 5 \text{ m}$ (Los rangos de aplicación de $h$ , $W$ , $h_{BS}$ , $h_{UT}$ son los mismos que UMa NLOS)
------	---	--------------	--