

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

## **PROYECTO DE TITULACIÓN:**

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

**Autores:** Salazar Argoti Irina Isabel

**Director del Proyecto:** Ing. Olmedo Cifuentes Gonzalo Olmedo



# AGENDA

---

---

1.- INTRODUCCIÓN

---

2.- OBJETIVOS

---

3.- FUNDAMENTO TEÓRICO

---

4.- MODELAMIENTO DEL SISTEMA

---

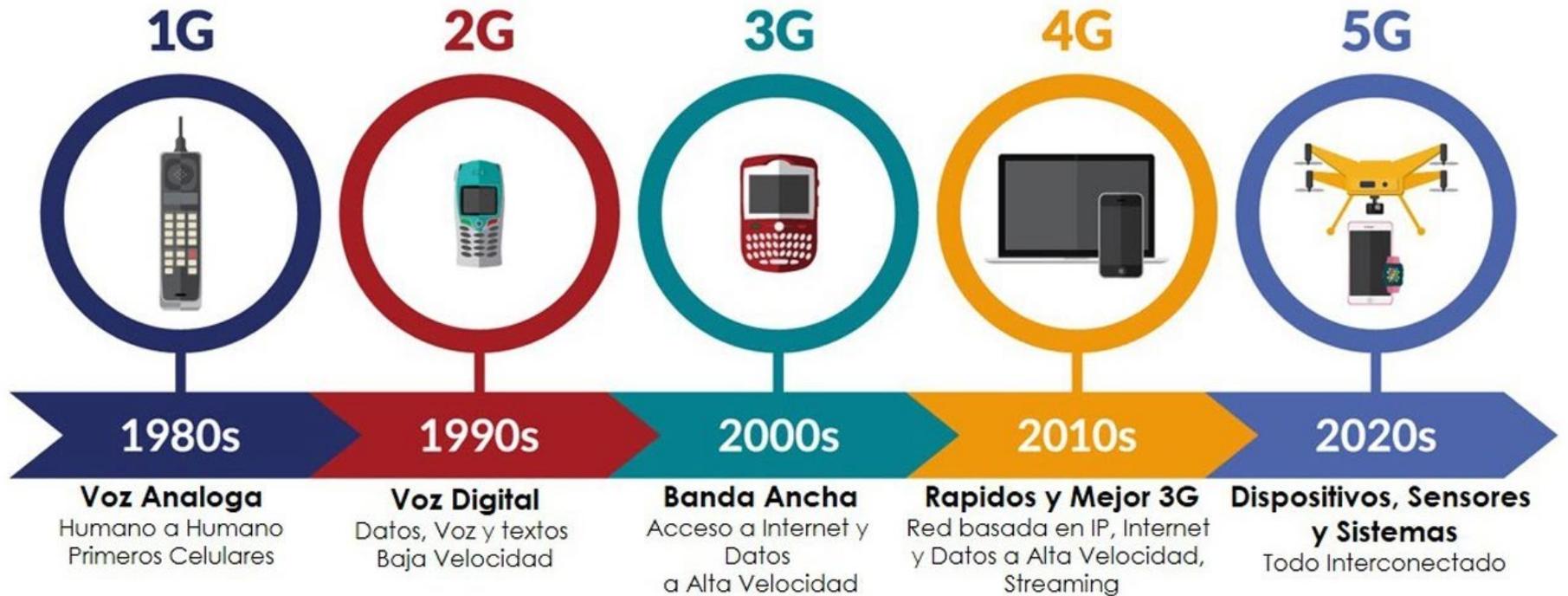
5.- ANALISIS DE RESULTADOS

---

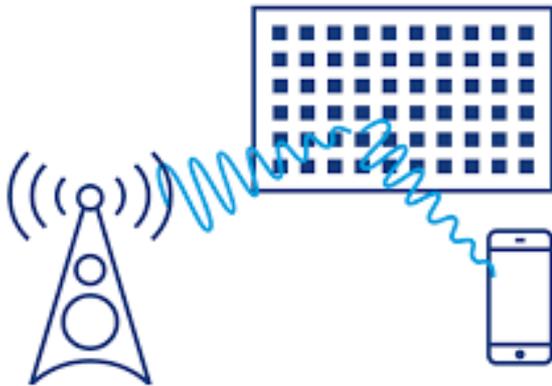
6.- CONCLUSIONES , RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---





Superficies Inteligentes o Metasuperficies: son estructuras pasivas y reconfigurables compuestas por una matriz de elementos pequeños y controlables. Estos elementos pueden manipular la fase, la amplitud y la polarización de las ondas electromagnéticas que inciden en ellos.



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

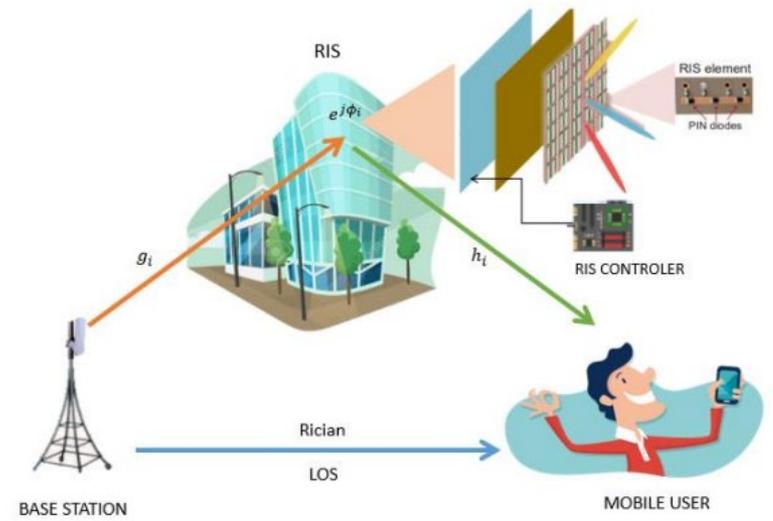
 Grandes  
 Superficies  
 Inteligentes  
 (LIS -  
 "Large  
 Intelligent  
 Surface")





Debido a la acelerada evolución de la tecnología, en la actualidad, vemos dispositivos de muy alta gama con acceso a una red inalámbrica, por esto se ha visto la necesidad de mejorar la comunicación inalámbrica comparado a su última versión implementada.

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



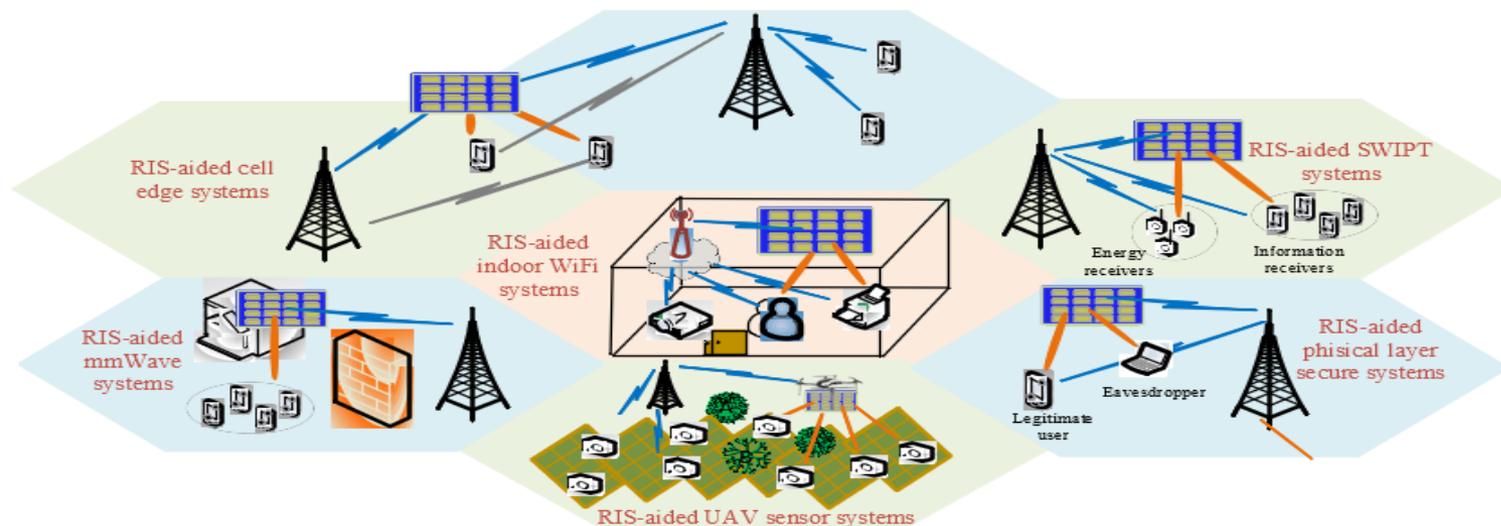
## Objetivo General

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

## Objetivos Específicos

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

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



Característica	Descripción
Función principal	Controlar la reflexión de las ondas electromagnéticas para optimizar las comunicaciones inalámbricas.
Tipo de tecnología	Superficies reflectantes inteligentes con arreglo de antenas.
Componentes	Reflectores inteligentes, antenas, circuitos de control.
Cobertura	Depende de la cantidad y disposición de los reflectores y antenas.
Capacidad de transmisión	Aumenta la calidad y eficiencia de las comunicaciones inalámbricas
Interferencia	Puede mitigar la interferencia electromagnética entre dispositivos
Eficiencia energética	Puede mejorar la eficiencia al optimizar la calidad de señal
Adaptabilidad	Capacidad de adaptarse a cambios en el entorno y condiciones de la señal
Aplicaciones potenciales	Mejora la comunicación inalámbrica en áreas densamente pobladas
Integración	Puede integrarse en infraestructuras de comunicación inalámbrica existentes
Desafíos técnicos	Diseño y optimización de algoritmos de control para ajustar la reflexión de las ondas. Abordar la compatibilidad y costos en la integración con dispositivos y sistemas existentes



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



Aspecto	LIS (Grande Superficie Inteligente)	RIS (Superficie Reflectante Inteligente)
Funcionalidad.	Control de la reflexión de las ondas electromagnéticas para optimizar las comunicaciones inalámbricas. Refleja y dirige las ondas electromagnéticas para mejorar las comunicaciones inalámbricas.	
Medio de transmisión.	Comunicación inalámbrica. Utiliza ondas electromagnéticas para la transmisión de señales.	
Componentes	Está compuesta por elementos pasivos, como antenas, que pueden ajustar sus propiedades de reflexión.	
Ancho de banda	Alto, mayor capacidad de transmisión de datos. Ofrece un alto ancho de banda y capacidad de transmisión.	Puede ser alto o variable según la configuración. Puede mejorar la capacidad y el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas.
Cobertura.	Al ser grande, puede tener una cobertura significativa para influir en la propagación de señales., especialmente en entornos exteriores y grandes distancias.	Depende de la cantidad y disposición de los reflectores. Puede mejorar la cobertura en áreas con mala señal o con interferencia.
Interferencia.	Baja, menor susceptibilidad a interferencias.	Puede mitigar la interferencia entre dispositivos. Puede ayudar a reducir la interferencia y mejorar la calidad de las señales.
Eficiencia energética.	Al optimizar la reflexión de señales, puede mejorar la eficiencia energética en sistemas de comunicación inalámbrica.	Puede contribuir a una mayor eficiencia energética al mejorar la calidad de las señales y reducir transmisiones repetidas.

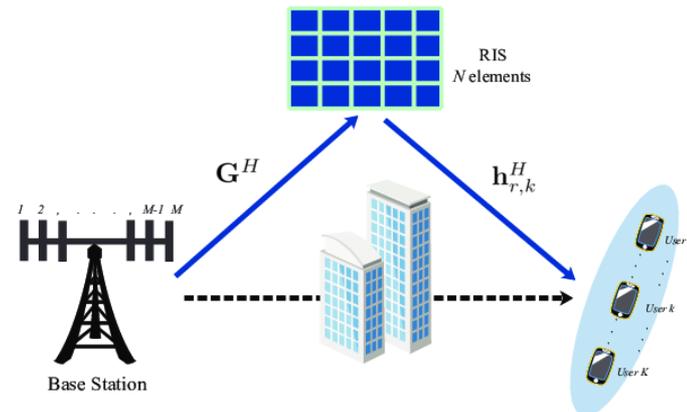


Aspecto	LIS (Grande Superficie Inteligente)	RIS (Superficie Reflectante Inteligente)
Adaptabilidad	Capacidad de adaptarse a cambios en el entorno y condiciones de la señal	Flexibilidad para reconfigurar y ajustar la superficie según necesidades de comunicación
Aplicaciones potenciales	Mejorar la cobertura de redes inalámbricas en grandes espacios, comunicaciones en entornos industriales o urbanos, y aplicaciones de Internet de las cosas (IoT).	Mejora de la calidad y eficiencia de comunicación inalámbrica en áreas densamente pobladas
Integración	Puede integrarse en infraestructuras de comunicación existentes	
Desafíos técnicos	Optimización de la eficiencia y uniformidad de la reflexión. Mitigación de interferencias y garantía de alta confiabilidad en los sistemas de comunicación óptica	Diseño y optimización de algoritmos de control para ajustar la reflexión de las ondas. Abordar la compatibilidad y costos en la integración con dispositivos y sistemas existentes
Flexibilidad	Permite una mayor flexibilidad y adaptabilidad en la configuración de la red.	Ofrece flexibilidad en términos de dirección y ajuste de la reflexión de las ondas.

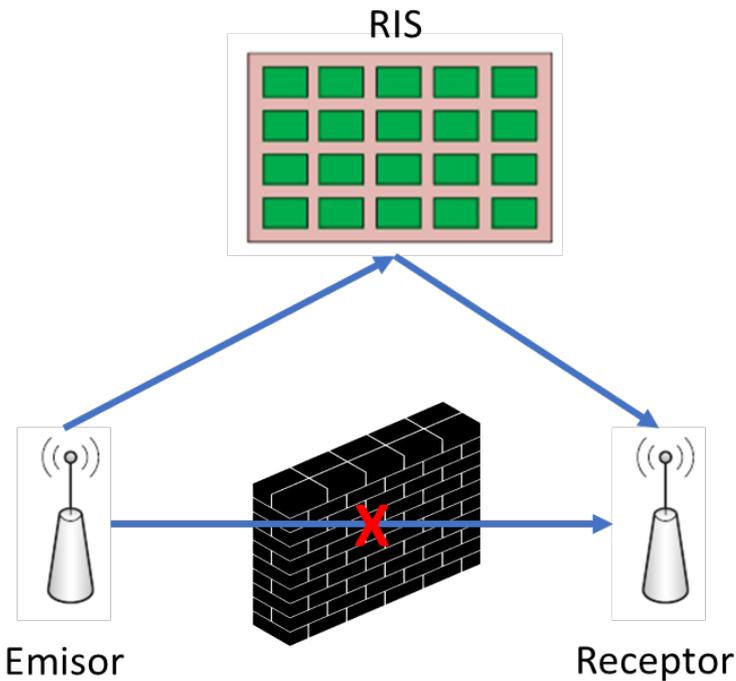


Se procede con un análisis detallado del proceso de diseño del sistema de comunicaciones respaldado por RIS. La evaluación de este diseño se lleva a cabo en función de dos parámetros clave: la potencia de fallo de transmisión (outage) y la probabilidad de error de bit. Esta evaluación se efectúa mediante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

Una gráfica que ilustra la relación entre el número de elementos presentes en la Superficie Inteligente Reconfigurable (RIS) y la potencia de fallo de transmisión (outage).



Una segunda gráfica que muestra cómo varía la potencia de transmisión en relación con la probabilidad de error de bit (BER).

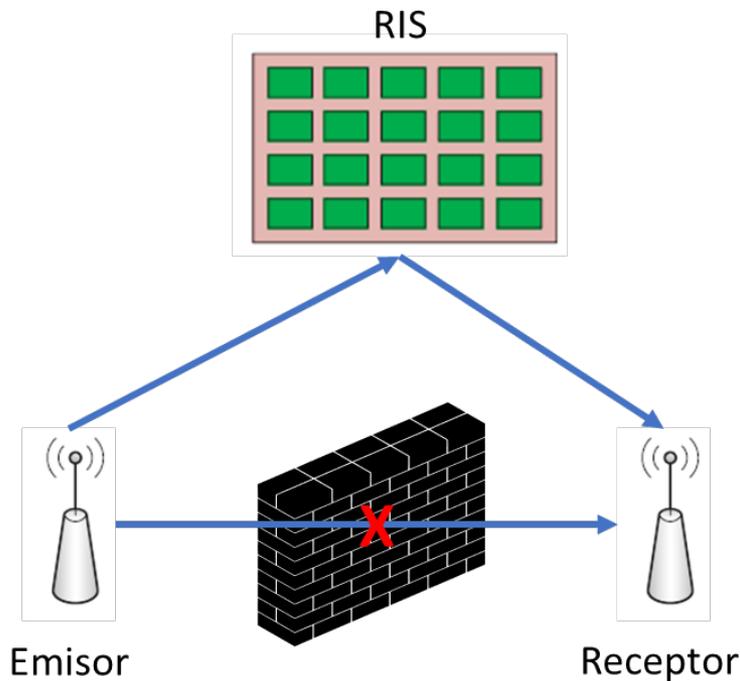


La señal transmitida es afectada por los canales, donde inciden la potencia promedio  $\sqrt{P_r}$  y el ruido AWGN  $n$ .

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

Para el desarrollo del sistema se parte del SNR recibido por el usuario, mismo que esta determinado por:

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

**Cálculo de la relación señal a ruido Maximizada**

El valor de SNR maximizado está definido por:

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

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

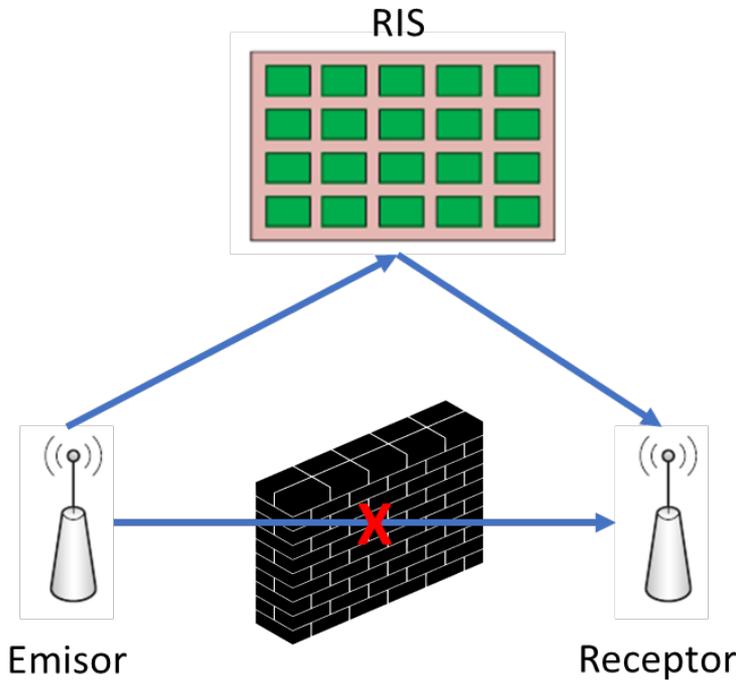
**Cálculo de la probabilidad de outage**

- Análisis de valor medio

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

- Análisis de varianza.

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



Para facilitar los cálculos se asigna la constante

$b \Rightarrow \frac{P_r}{\sigma_n^2}$  y dado lo mencionado anteriormente

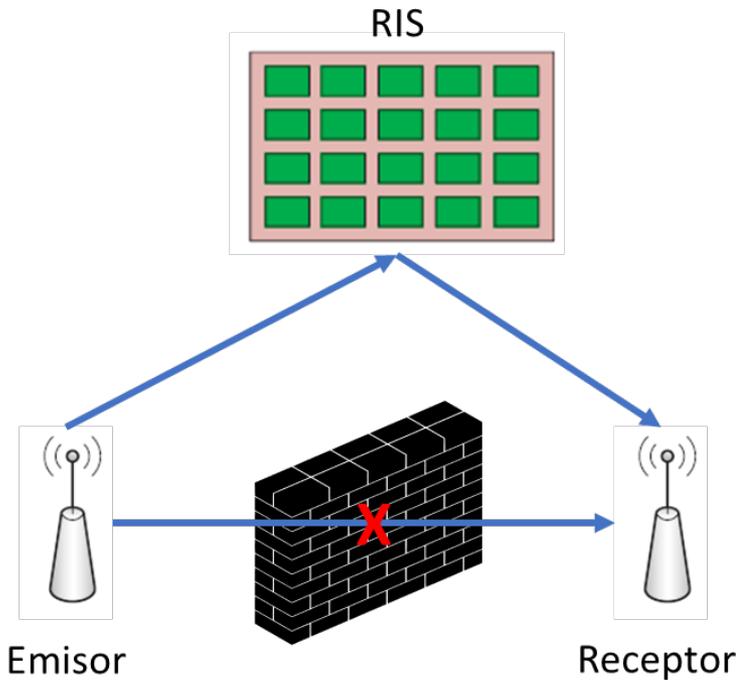
también se puede asignar  $x \Rightarrow \sum_{n=1}^N h_n g_n$  por ser una variable aleatoria de tipo gaussiana. Entonces el SNR se obtiene  $\gamma = bx^2$ , conociendo que la PDF de una gaussiana es:

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

$$x \Rightarrow -\infty < x < \infty$$

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

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



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

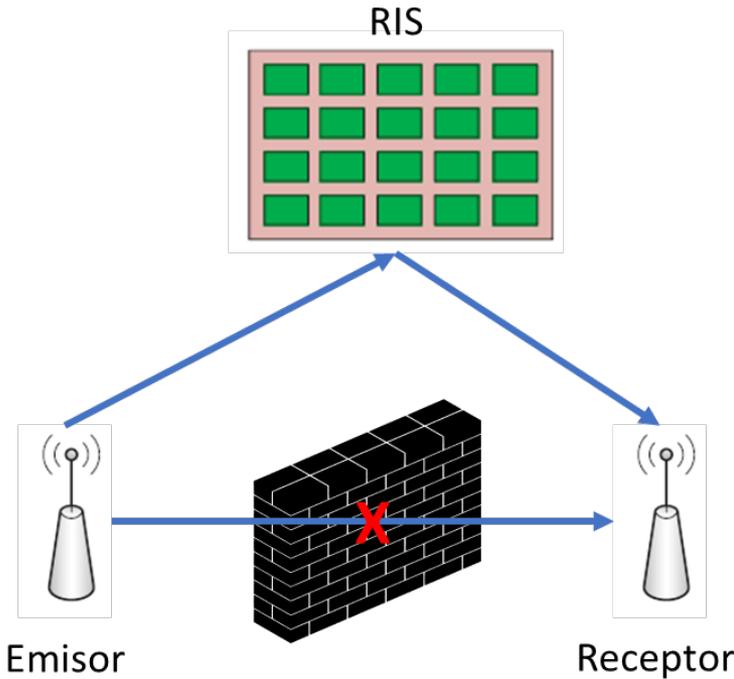
$$\frac{\text{Erf} \left[ \frac{\sqrt{2^R - 1} - \sqrt{b}\mu}{\sqrt{2}\sqrt{b}\zeta^2} \right] + \text{Erf} \left[ \frac{\sqrt{2^R - 1} + \sqrt{b}\mu}{\sqrt{2}\sqrt{b}\zeta^2} \right]}{2}$$

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

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

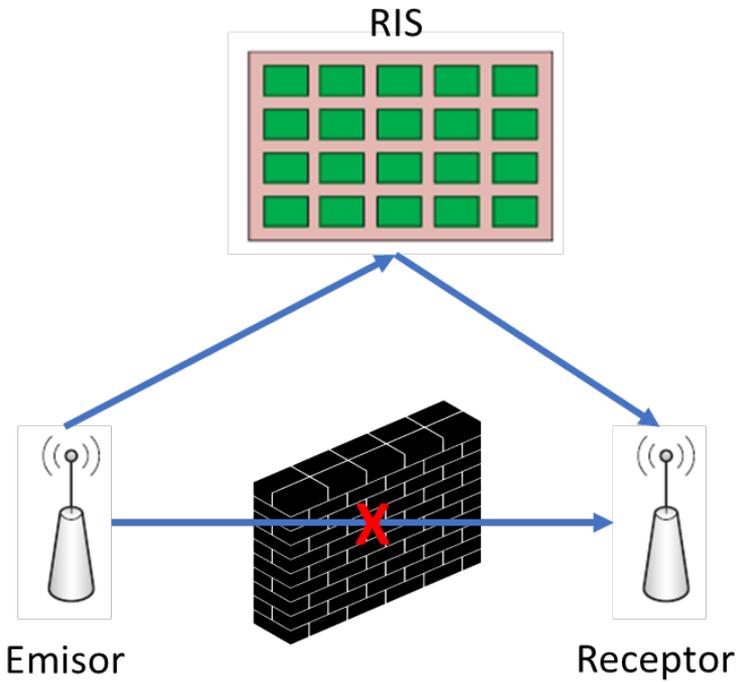
$$\bar{p}_b = \int_0^{+\infty} P_b(\gamma) f(\gamma) d\gamma$$

Cálculo de la probabilidad de error de bit – BER



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

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



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

Debido a la naturaleza de la integral anterior, se encuentra que no es posible encontrar una expresión cerrada, por lo que se recurre a realizar la aproximación de esta, para esto se hace uso de la aproximación propuesta por (Chiani et al., 2003), donde la función de error complementario se puede aproximar  $erfc(x) \approx$

$$\frac{1}{6}e^{-\gamma} + \frac{1}{2}e^{-\frac{4\gamma}{3}} \quad (\text{Chiani et al., 2003, Ec. 14})$$

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



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

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

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



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

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

Los parámetros de entrada y sus valores son referencias de un sistema de comunicaciones genérico y no obedecen a un escenario en particular. Esto debido a que el simulador desarrollado puede ser utilizado en cualquier escenario. De igual manera, la variación en los valores de cada parámetro detallado posteriormente, son valores arbitrarios que permiten demostrar la validez matemática de las ecuaciones obtenidas en el capítulo anterior.

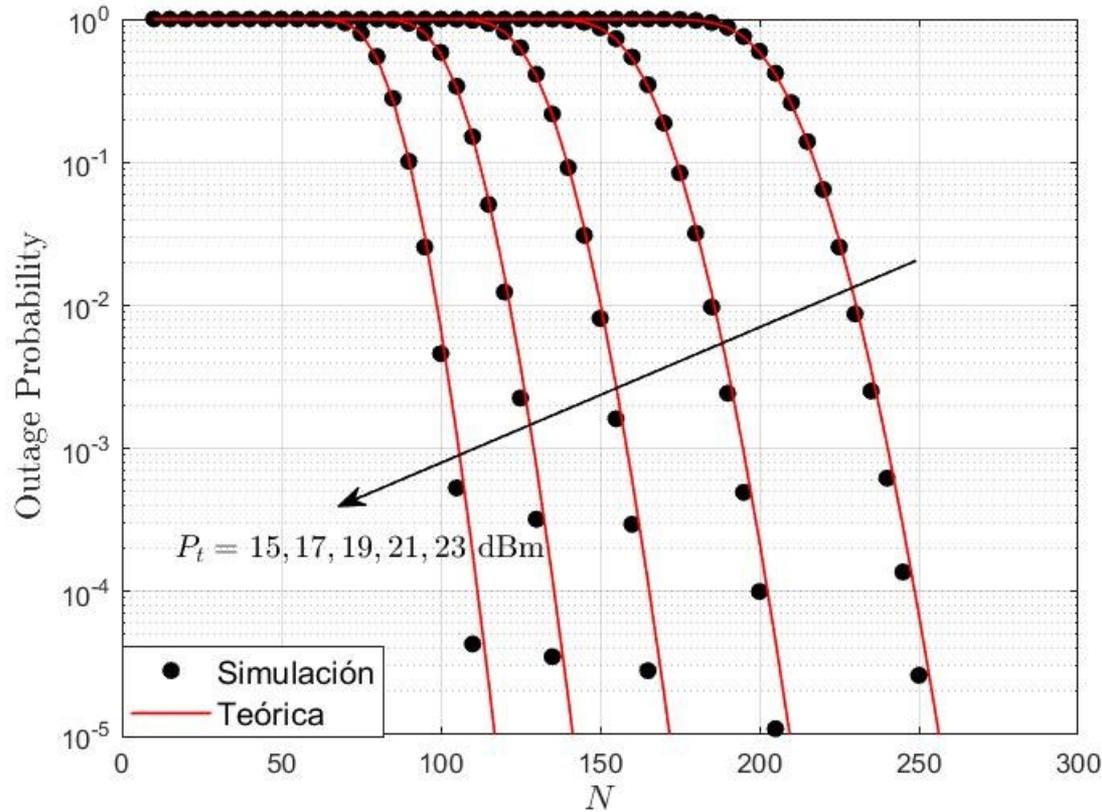


Referente a el análisis de rendimiento del sistema con la métrica de OP, al parámetro variable en todos los casos es N, que representa el número de elementos de RIS y varía entre 10 y 300. Para el resto de los parámetros, se determina un valor de entrada descritos en la Tabla

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



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

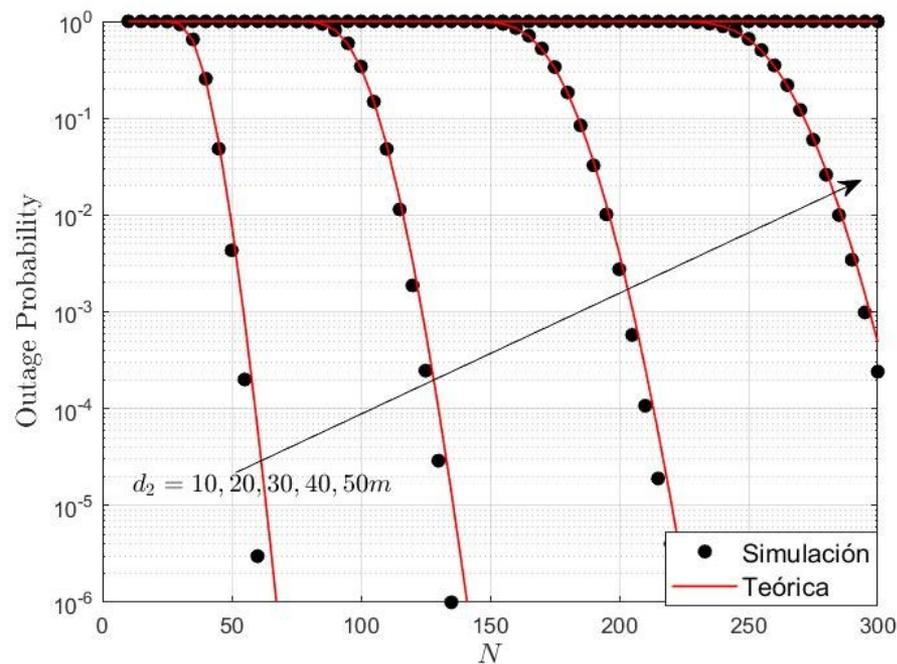
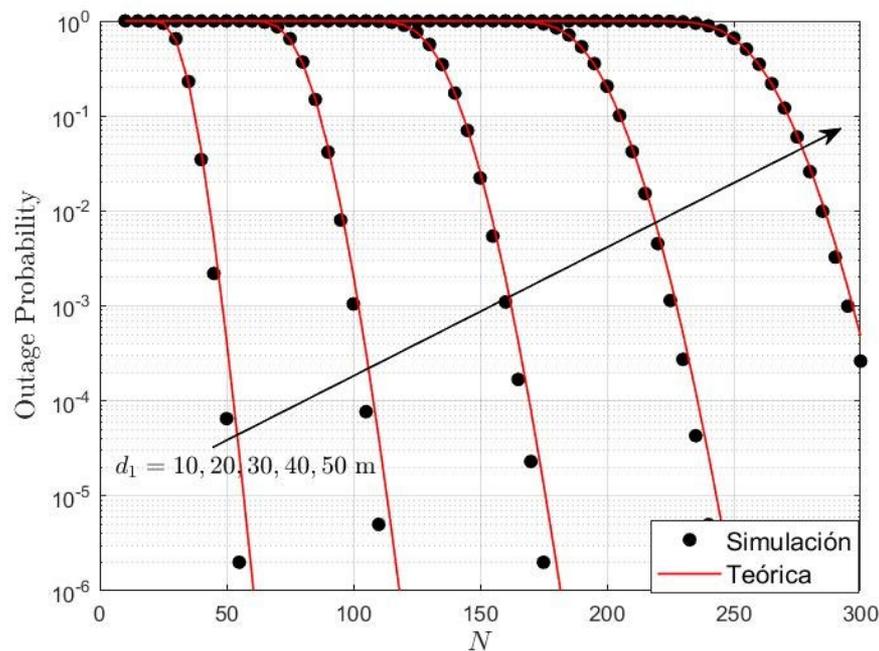


Parámetro	Valor
$P_t$	15, 17, 19, 21, 23 dBm



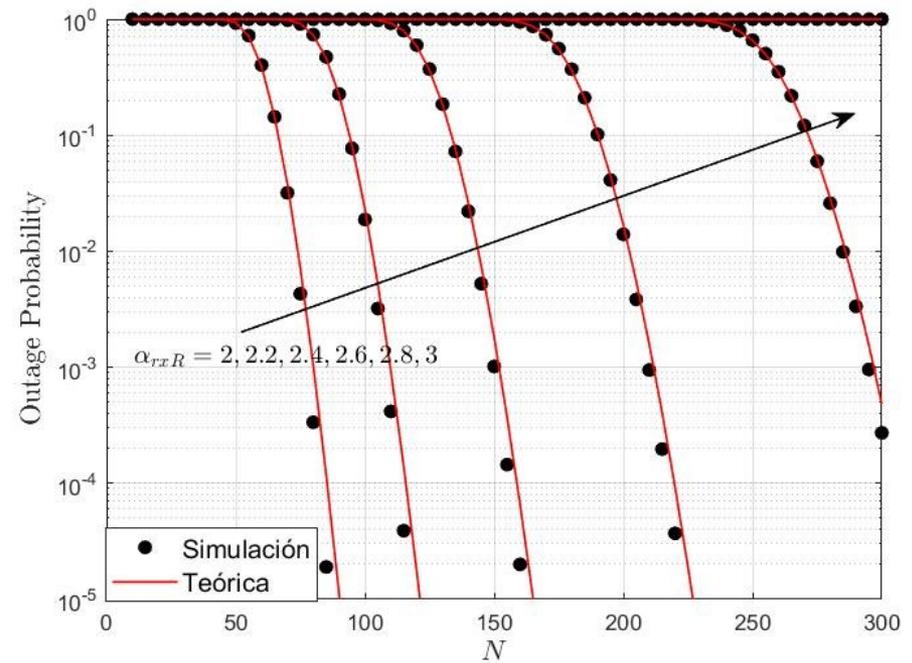
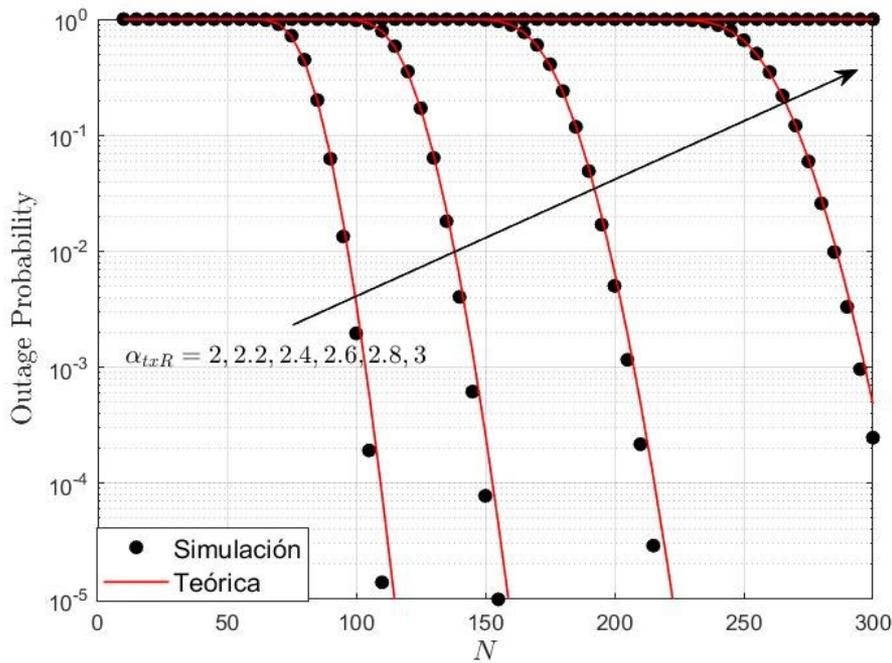
Probabilidad de outage (OP) en función de  $N$ , parametrizado por la distancia  $d_1$  y  $d_2$ .

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



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

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



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

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



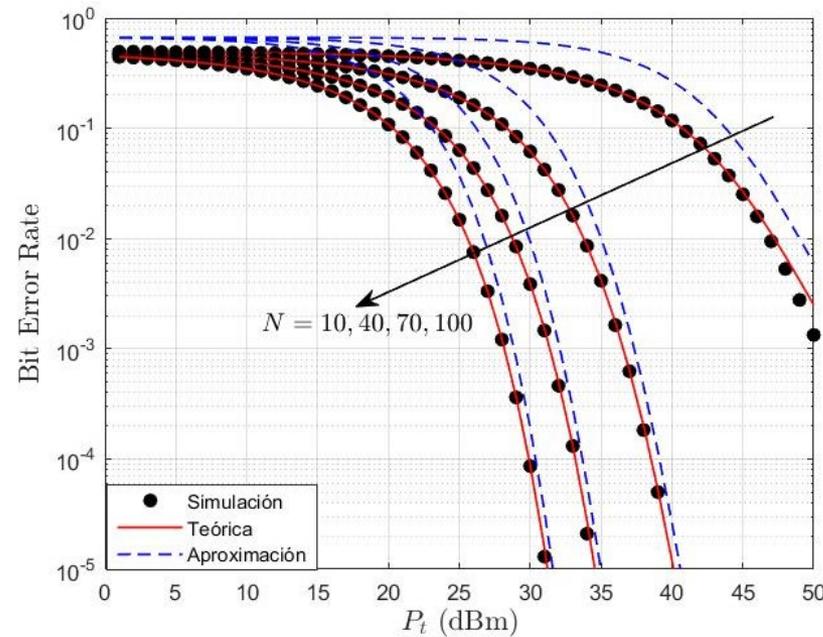
Para el análisis BER, utilizamos la modulación BPSK para lograr un modelo simplificado de comunicación. En este caso también se cambiaron los parámetros uno por uno en un rango definido. En general, el parámetro  $P_t$  que es la potencia transmitida varía entre 1 y 50 dBm, este rango es seleccionado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

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



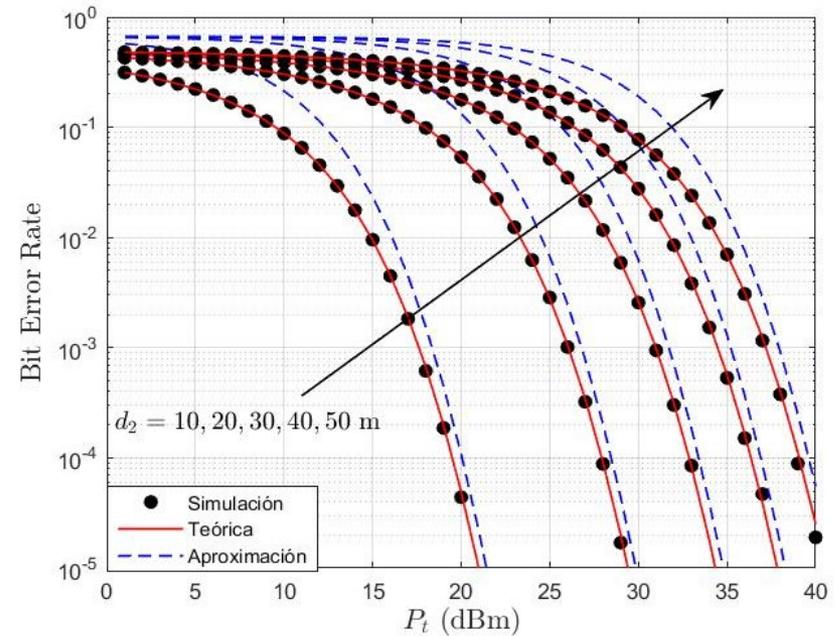
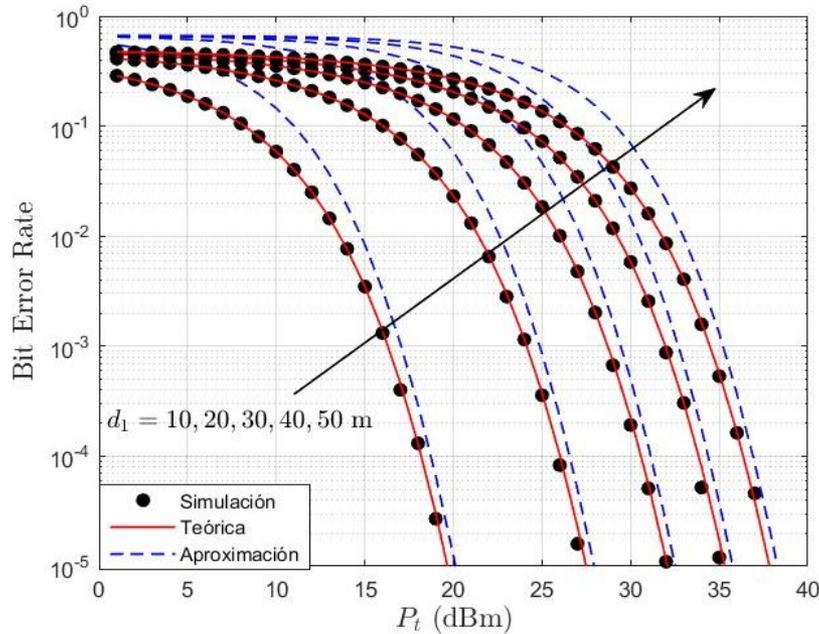
La probabilidad de error de bit (BER) en función de  $P_t$ , parametrizada por el número de elementos de la RIS  $N$ .

Parámetro	Valor
$N$	10, 40, 70, 100



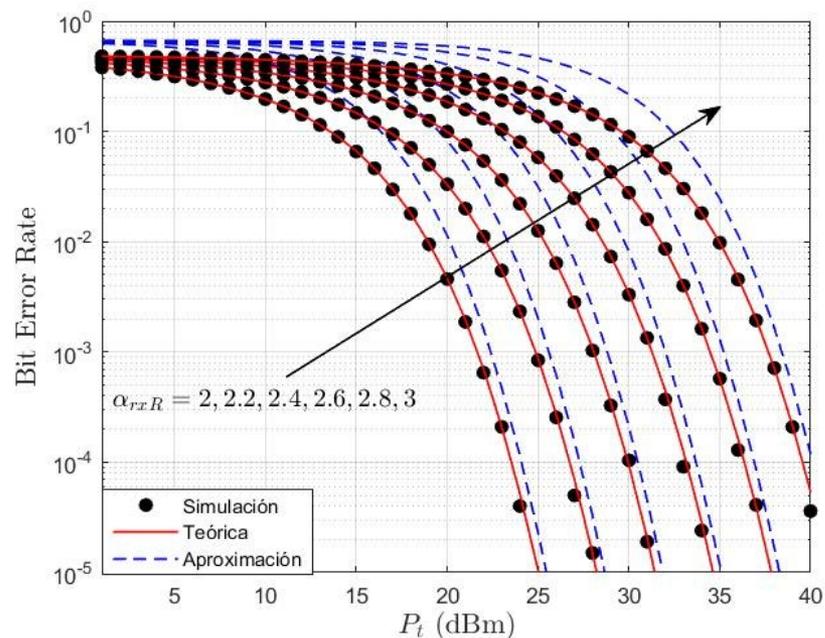
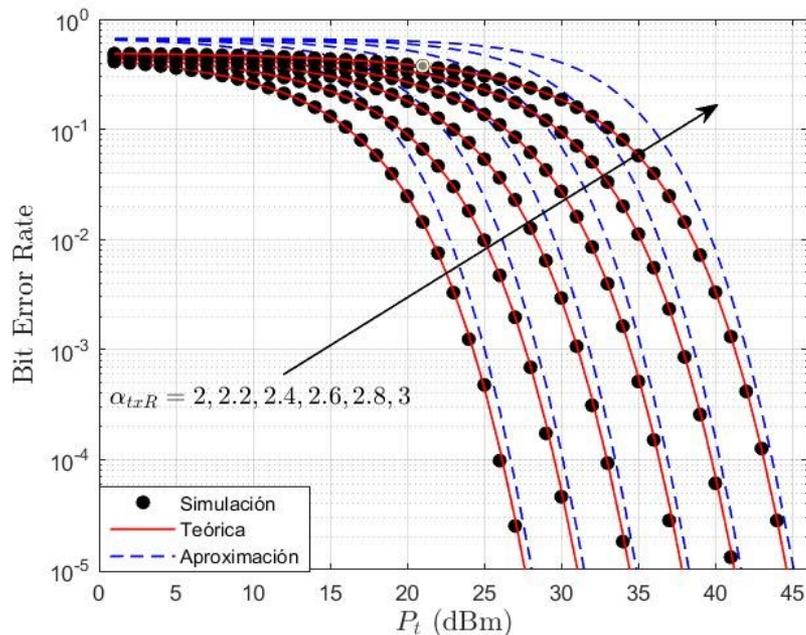
La probabilidad de error de bit (BER) en función de  $P_t$ , parametrizada por la distancia  $d_1$  y  $d_2$ .

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



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

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



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



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

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

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

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

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

# Recomendaciones

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

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

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

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

Se propone modelar un sistema de comunicaciones donde:

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

**GRACIAS POR  
SU ATENCIÓN**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA