REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

Evaluación de la transmisión de datos en redes inalámbricas mediante técnicas de diversificación espacial

Tesis presentada por el Bachiller:

Contreras Bolivar, Alember Lui

ORCID: 0009-0003-8202-6182

para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Asesor (a):

Mg. Urrutia Espinoza, Mario William

ORCID: 0000-0002-8520-2909

Arequipa – Perú

2026

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA ELECTRONICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 16 de Diciembre del 2025

Dictamen: 014860-C-EPIE-2025

Visto el borrador del expediente 014860, presentado por:

2017242761 - CONTRERAS BOLIVAR ALEMBER LUI

Titulado:

EVALUACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN REDES INALÁMBRICAS MEDIANTE TÉCNICAS DE DIVERSIFICACIÓN ESPACIAL

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO ELECTRONICO

29715414 - COAGUILA GOMEZ RONALD PERCING
DICTAMINADOR



29364669 - QUISPE YAUYO JUAN MEDARDO
DICTAMINADOR



29410027 - SULLA TORRES RAUL RICARDO
DICTAMINADOR



Evaluación de la transmisión de datos en redes inalámbricas mediante técnicas de diversificación espacial

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	8%	4%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to University of Surrey Trabajo del estudiante	<1%
2	accedacris.ulpgc.es Fuente de Internet	<1%
3	Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal Trabajo del estudiante	<1%
4	e-archivo.uc3m.es Fuente de Internet	<1%
5	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	<1%
6	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	www.uv.mx Fuente de Internet	<1%
8	elibrary.kubg.edu.ua Fuente de Internet	<1%
9	Submitted to University of Sussex Trabajo del estudiante	<1%
10	repository.unimilitar.edu.co Fuente de Internet	<1%
11	burjcdigital.urjc.es Fuente de Internet	<1%

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, a Dios por permitirme llegar hasta este momento, por darme salud, claridad y fortaleza para superar cada desafío académico y personal.

A mis padres, Jesús y Carmen, por su ejemplo, amor y dedicación inquebrantable, que han sido mi mayor motivación a lo largo de esta formación profesional.

A mis amigos, por su apoyo, cooperación y amistad, elementos que hicieron más llevadero este proceso de aprendizaje e investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron con sus consejos, palabras de aliento o colaboración en la culminación de esta etapa tan significativa de mi vida profesional.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento a la Universidad Católica de Santa María, en especial a la Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales, por proporcionar una formación sólida y rigurosa. Asimismo, a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, quienes con su dedicación y compromiso contribuyeron al desarrollo de mis competencias profesionales y humanas.

A mi familia, fuente inagotable de amor, paciencia y apoyo incondicional. Gracias por creer en mí, incluso en los momentos más exigentes y por estar presentes en cada paso de esta trayectoria universitaria.

Finalmente, reconocer la contribución de los recursos tecnológicos y bibliográficos utilizados, tales como las herramientas de simulación MATLAB y Python, y las fuentes académicas que permitieron enriquecer el marco teórico y sustentar los resultados obtenidos.

A todos los que de una u otra forma formaron parte de este logro, muchas gracias.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

RESUMEN

El presente trabajo evalúa la transmisión de datos en redes inalámbricas mediante técnicas de diversificación espacial, centradas en sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output) y configuraciones avanzadas de antenas. Se realizaron simulaciones en MATLAB y Python para analizar su rendimiento en tres escenarios: redes urbanas densas (5G), redes IoT rurales y redes vehiculares (V2X). Los resultados evidencian una mejora del 50 % en la eficiencia espectral (hasta 138 bits/s/Hz a 30 dB en 5G urbano) y una reducción del 25 % en la tasa de error de bits (BER < 0.01 %) frente a sistemas de antena única. Además, se desarrolló un modelo matemático que optimiza la capacidad del canal, validado mediante simulaciones computacionales. Este estudio contribuye al diseño de redes inalámbricas más eficientes y robustas, relevantes para tecnologías emergentes como 5G y IoT de baja potencia.

Palabras clave: MIMO (Multiple Input Multiple Output), Diversificación Espacial, Eficiencia Espectral.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ABSTRACT

This research evaluates data transmission in wireless networks using spatial diversity techniques, focusing on MIMO (Multiple Input Multiple Output) systems and advanced antenna configurations. Simulations in MATLAB and Python were conducted across three scenarios: dense urban (5G), rural IoT, and vehicular (V2X) networks. Results show a 50 % improvement in spectral efficiency (up to 138 bits/s/Hz at 30 dB in the urban 5G scenary) and a 25 % reduction in bit error rate (BER < 0.01 %) compared to single-antenna systems. A mathematical model was developed to optimize channel capacity and validated through computational simulations. This study contributes to the development of efficient and robust wireless networks, particularly for emerging technologies such as 5G and low-power IoT.

Keywords: MIMO (Multiple Input Multiple Output), Spatial Diversity, Spectral Efficiency.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO 4

1.1. Planteamiento del problema 4

1.2. Justificación de la investigación 5

1.3. Objetivos… 7

1.3.1. Objetivo general 7

1.3.2. Objetivos específicos 7

1.4. Alcance y limitaciones 8

1.5. Diseño de la investigación 10

1.5.1. Enfoque y tipo de investigación 10

1.5.2. Variables de estudio 11

1.5.2.1. Variables independientes 11

1.5.2.2. Variables dependientes: 12

1.5.2.3. Variables controladas: 13

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 14

2.1. Estado del arte 14

2.1.1. Investigaciones previas 14

2.1.2. Desafíos actuales y oportunidades de mejora 16

2.2. Antecedentes de la investigación 19

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.2.1. Antecedentes internacionales 19

2.2.2. Antecedentes nacionales 20

2.2.3. Antecedentes locales 22

2.3. Fundamentación teórica 23

2.3.1. Redes inalámbricas 30

2.3.2. Fundamentos y características 30

2.3.2.1. Algoritmos de procesamiento MIMO (SVD, ZF y MMSE) 34

2.3.3. Tecnologías de comunicación inalámbrica (Wi-Fi, LTE, 5G, etc.) 36

2.3.4. Aplicaciones de las redes inalámbricas 31

2.3.5. Retos y desafíos de las redes inalámbricas 31

2.4. Diversificación espacial (Spatial Diversity) 32

2.4.1. Concepto y principios 33

2.4.2. Tipos de diversificación espacial 36

2.4.3. Ventajas y desafíos 39

2.5. Técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output) 40

2.5.1. Fundamentos de MIMO 41

2.5.2. Modelos matemáticos y algoritmos 42

2.6. Estándares y protocolos relacionados 49

2.6.1. Estándares IEEE 49

2.6.2. Protocolos de comunicación 51

2.7. Desarrollo del modelo matemático 53

2.7.1. Formulación del problema 53

2.7.2. Algoritmos de optimización 55

2.8. Simulación y herramientas utilizadas 57

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.8.1. Descripción del software de simulación 57

2.8.1.1. Python con bibliotecas especializadas 64

2.9. Validación estadística en el análisis de redes inalámbricas 69

CAPÍTULO III: DISEÑO Y DESARROLLO DE LA PROPUESTA 71

3.1 Configuración de escenarios de simulación.....71

3.1.1 Simulaciones realizadas en MATLAB.....74

3.1.1.1. Escenario 1: Red urbana densa (5G).....76

3.1.1.2. Escenario 2: Red IoT en zona rural:.....89

3.1.1.3. Escenario 3: Red vehicular (V2X) 102

3.2. Simulaciones realizadas en Python.....112

3.2.1. Escenario 1: Red urbana densa (5G).....116

3.2.1.1. Escenario 2: Red IoT en zona rural:.....124

3.2.1.2. Escenario 3: Red vehicular (V2X) 132

3.3. Procedimientos experimentales 141

3.3.1. Configuración del entorno de prueba.....141

3.3.2. Recolección y análisis de datos.....143

3.3.3. Procedencia de los datos originales de simulación 145

3.3.3.1. Escenario 1: Red urbana densa (5G) — MIMO 16×16 145

3.3.3.2. Escenario 2: Red IoT en zona rural — MIMO 4×4 146

3.3.3.3. Escenario 3: Red vehicular (V2X) — MIMO 8×8.....148

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....150

4.1. Análisis de resultados de la simulación 151

4.1.1. Rendimiento por escenario.....153

4.1.1.1. Red urbana densa (5G) MIMO 16×16 154

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4.1.1.2. Red IoT en zona rural MIMO 4×4 159

4.1.1.3. Red vehicular (V2X) MIMO 8×8 165

4.2. Discusión de resultados 169

4.2.1. Interpretación de datos 171

4.2.2. Validación estadística 174

4.2.2.1. Escenario 1: Red urbana densa (5G) MIMO 16X16 175

4.2.2.1.1. Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk): 176

4.2.2.1.2. ANOVA unidireccional y post-hoc (Tukey): 180

4.2.2.1.3. Correlación y regresión lineal: 192

4.2.2.2. Red IoT en zona rural MIMO 4×4 200

4.2.2.2.1. Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk): 201

4.2.2.2.2. ANOVA unidireccional y post-hoc (Tukey): 204

4.2.2.2.3. Correlación y regresión lineal: 218

4.2.2.3. Red vehicular (V2X) MIMO 8×8 228

4.2.2.3.2. ANOVA unidireccional y post-hoc (Tukey): 234

4.2.2.3.3. Correlación y regresión lineal: 248

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 261

5.1. Conclusiones generales 261

5.1.1. Desempeño de las técnicas MIMO en redes inalámbricas 263

5.1.2. Robustez frente al desvanecimiento e interferencia en diversos escenarios 263

5.1.3. Diseño y validación de un modelo matemático de canal MIMO 264

5.1.4. Validación del modelo mediante simulaciones y proyección a tecnologías emergentes 264

5.2. Contribuciones de la investigación 265

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.3. Recomendaciones para investigaciones futuras.....266

5.4. Aplicaciones potenciales de la investigación.....268

Referencias bibliográficas 270

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Cuadro de diferencias principales* 25

Tabla 2 *Cuadro de funciones de Matlab* 64

Tabla 3 *Resultados numéricos del Escenario 1 – MATLAB (Red urbana densa 5G)* 87

Tabla 4 *Parámetros del escenario (MATLAB – Escenario 2: IoT Rural)* 100

Tabla 5 *Resultados del escenario V2X: Capacidad, BER y Energía por bit (MIMO 8×8)* 111

Tabla 6 *Resultados del escenario urbano 5G (Python): Capacidad y BER en función del SNR* 123

Tabla 7 *Resultados del escenario IoT rural: Capacidad, BER y Energía Joule en función del SNR* 131

Tabla 8 *Resultados del escenario vehicular V2X: Capacidad y BER en función del SNR* 140

Tabla 9 *Rendimiento promedio por SNR (Escenario urbano 5G)* 156

Tabla 10 *Rendimiento promedio por SNR — Escenario Red IoT en zona rural (MIMO 4×4)* .. 161

Tabla 11 *Rendimiento promedio por SNR — Escenario vehicular V2X (MIMO 8×8)* 166

Tabla 12 *Rendimiento promedio por SNR (Escenario urbano 5G)* 171

Tabla 13 *Rendimiento promedio por SNR — Escenario Red IoT en zona rural (MIMO 4×4)* .. 172

Tabla 14 *Rendimiento promedio por SNR — Escenario vehicular V2X (MIMO 8×8)* 173

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Ancho de banda* 27

Figura 2 *Interferencia elevada* 28

Figura 3 *Algunas topologías flexibles de redes inalámbricas* 31

Figura 4 *Cobertura de conectividad* 32

Figura 5 *Estándares existentes para transmisión de datos inalámbricos* 33

Figura 6 *Comparativa de tecnologías inalámbricas por categorías de red hasta 2025* 30

Figura 7 *Diversificación espacial en redes inalámbricas* 33

Figura 8 *Técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output)* 41

Figura 9 *Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 1 (Red Urbana 5G).* .78

Figura 10 *Simulación Red urbana densa (5G)* – Constelación, BER y capacidad 85

Figura 11 *Simulación red urbana densa (5G)* – Consumo energético por bit 86

Figura 12 *Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 2 (Red IoT Rural)*...90

Figura 13 *Simulación Red IoT en Zona Rural – Constelación*, BER y capacidad. 96

Figura 14 *Simulación red IoT en zona rural – Rician vs Rayleigh* 98

Figura 15 *Simulación Red IoT en zona rural* – Consumo energético vs Potencia de transmisión99

Figura 16 *Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 3 (Red Vehicular V2X).* 103

Figura 17 *Red vehicular (V2X*) – Constelación, BER y capacidad. 107

Figura 18 *Red vehicular (V2X) – Eficiencia* 108

Figura 19 *Red vehicular (V2X) – Capacidad.* 109

Figura 20 *Red vehicular (V2X) – Consumo Energético.* 110

Figura 21 *Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 1 (Red Urbana 5G).* 117

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 22 *Red urbana densa 5G* – Capacidad, BER, consumo y SNR.....121

Figura 23 *Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 2 (Red IoT Rural)*.125

Figura 24 *Red IoT en zona rural – Capacidad, BER, consumo y constelación*.....129

Figura 25 *Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 3 (Red Vehicular V2X)*.....133

Figura 26 *Red vehicular (V2X) – Capacidad, BER, consumo y SNR.* 138

Figura 27 *BER vs SNR (Escenario urbano 5G)* 157

Figura 28 *Capacidad vs SNR (Escenario urbano 5G)* 158

Figura 29 *Consumo energético vs SNR (Escenario urbano 5G)*.....159

Figura 30 *Capacidad vs SNR (Escenario IoT en zona rural)* 162

Figura 31 *BER vs SNR (Escenario IoT en zona rural).*.....163

Figura 32 *Consumo energético vs SNR (Escenario IoT en zona rural* 164

Figura 33 *Capacidad vs SNR (Escenario Red vehicular)* 167

Figura 34 *BER vs SNR (Escenario Red vehicular)* 168

Figura 35 *BER vs SNR (Escenario IoT en zona rural)*.....169

Figura 36 *Gráfico de datos en Minitab (Escenario red urbana densa)*.....176

Figura 37 *Gráfico de datos para Capacidad, logBER y logEbit (Escenario urbano 5G).* 177

Figura 38 *Gráfico de probabilidad normal para Capacidad.*.....178

Figura 39 *Gráfico de probabilidad normal para logBER.*.....179

Figura 40 *Gráfico de probabilidad normal para logEbit.* 180

Figura 41 *Gráfico de datos para Capacidad, logBER y logEbit (Escenario urbano 5G).* 182

Figura 42 *ANOVA y post-hoc de un solo factor: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)*.....183

Figura 43 *ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogBER vs. SNR (dB*.....186

Figura 44 ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogEbit vs. SNR (dB) 189

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 45 *Correlación: Capacidad (bps/Hz); SNR (dB)*.....192

Figura 46 *Correlación: BER; Energía por bit (J/bit)* 194

Figura 47 *Análisis de correlación en escala logarítmica (LogBER vs LogEbit)*.....195

Figura 48 *Análisis de regresión: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)* 197

Figura 49 *Análisis de regresión: LogBER vs. LogEbit* 198

Figura 50 *Gráfico de datos en Minitab (Escenario Red IoT en zona rural)*.....201

Figura 51 *Gráfico de probabilidad normal para Capacidad, logBER y logEbit (Escenario Red IoT)* 201

Figura 52 *Gráfico de probabilidad normal para Capacidad.*.....202

Figura 53 *Gráfico de probabilidad normal para logBER.*.....203

Figura 54 *Gráfico de probabilidad normal para logEbit.* 204

Figura 55 *Gráfico de datos para Capacidad, logBER y logEbit (Escenario Red IoT)*.....205

Figura 56 *ANOVA y post-hoc de un solo factor: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)*.....206

Figura 57 *ANOVA y post-hoc de un solo factor: BER vs. SNR (dB)*.....209

Figura 58 *ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogBER vs. SNR (dB)* 212

Figura 59 *ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogEbit vs. SNR (dB)* 215

Figura 60 *Correlación: Capacidad (bps/Hz); SNR (dB)*.....218

Figura 61 *Correlación: BER; Energía por bit (J/bit)* 220

Figura 62 *Análisis de correlación en escala logarítmica (LogBER vs LogEbit)*.....222

Figura 63 *Análisis de regresión: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)* 224

Figura 64 *Análisis de regresión: LogBER vs. LogEbit* 226

Figura 65 *Datos en Minitab (Escenario red vehicular)* 229

Figura 66 *Gráfico de probabilidad normal para Capacidad, LogBER y LogEbit (Escenario Red IoT)* 230

Figura 67 *Gráfico de probabilidad normal para Capacidad.*.....231

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 68 *Gráfico de probabilidad normal para logBER.* 232

Figura 69 *Gráfico de probabilidad normal para logEbit.* 233

Figura 70 *Gráfico de datos para Capacidad, logBER y logEbit (Escenario Red vehicular).* 235

Figura 71 *ANOVA y post-hoc de un solo factor: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)* 236

Figura 72 *ANOVA y post-hoc de un solo factor: BER vs. SNR (dB)* 239

Figura 73 *ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogBER vs. SNR (dB)* 242

Figura 74 *ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogEbit vs. SNR (dB)* 245

Figura 75 *Correlación: Capacidad (bps/Hz); SNR (dB)* 249

Figura 76 *Correlación: BER; Energía por bit (J/bit)* 251

Figura 77 *Análisis de correlación en escala logarítmica (LogBER vs LogEbit)* 253

Figura 78 *Análisis de regresión: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB* 254

Figura 79 *Análisis de regresión: LogBER vs. LogEbit* 257

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE ECUACIONES

(Ecuación 1) 25

(Ecuación 2) 26

(Ecuación 3) 34

(Ecuación 4) 34

(Ecuación 5) 35

(Ecuación 6) 36

(Ecuación 7) 43

(Ecuación 8) 43

(Ecuación 9) 44

(Ecuación 10) 44

(Ecuación 11) 44

(Ecuación 12) 45

(Ecuación 13) 45

(Ecuación 14) 45

(Ecuación 15) 46

(Ecuación 16) 46

(Ecuación 17) 46

(Ecuación 18) 47

(Ecuación 19) 47

(Ecuación 20) 47

(Ecuación 21) 47

(Ecuación 22) 54

(Ecuación 23) 54

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

(Ecuación 24) 55

(Ecuación 25) 55

(Ecuación 26) 80

(Ecuación 27) 80

(Ecuación 28) 81

(Ecuación 29) 81

(Ecuación 30) 82

(Ecuación 31) 82

(Ecuación 32) 82

(Ecuación 33) 82

(Ecuación 34) 83

(Ecuación 35) 83

(Ecuación 36) 83

(Ecuación 37) 92

(Ecuación 38) 93

(Ecuación 39) 93

(Ecuación 40) 93

(Ecuación 41) 93

(Ecuación 42) 94

(Ecuación 43) 94

(Ecuación 44) 113

(Ecuación 45) 199

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos 275

Anexo 1. Matlab escenario 1: red urbana densa (5G) código 275

Anexo 2. Matlab escenario 2: red IoT en zona rural código 280

Anexo 3. Matlab escenario 3: red vehicular (V2X) código y ejecución 285

Anexo 4. Python escenario 1: red urbana densa (5G) código 288

Anexo 5. Python escenario 2: red IoT en zona rural código 293

Anexo 6. Python escenario 3: red vehicular (V2X) código 298

Anexo 7. Código MATLAB Escenario Urbano 5G (MIMO 16×16) 304

Anexo 8. Código MATLAB Escenario IoT Rural (MIMO 4×4) 306

Anexo 9. Código MATLAB Escenario Vehicular V2X (MIMO 8×8) 308

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

INTRODUCCIÓN

La transmisión de datos en redes inalámbricas se ha convertido en un componente esencial de la infraestructura digital moderna, impulsada por el crecimiento sostenido de los dispositivos móviles, la expansión del Internet de las Cosas (IoT) y el desarrollo de servicios que demandan altas tasas de transmisión, baja latencia y conectividad continua. Este crecimiento ha incrementado la complejidad de los sistemas de comunicación y ha puesto de manifiesto la necesidad de un uso más eficiente del espectro radioeléctrico (Rappaport, 2024).

No obstante, este avance también ha intensificado diversos desafíos técnicos que afectan el rendimiento del enlace inalámbrico, entre los que destacan la congestión del espectro, la interferencia entre señales, la atenuación provocada por obstáculos y el desvanecimiento por multitrayectoria, fenómenos que se presentan con mayor severidad en entornos urbanos densamente poblados y en escenarios con movilidad. Estudios ampliamente aceptados en la literatura han demostrado que estos efectos limitan la capacidad y confiabilidad de los sistemas inalámbricos modernos (Bai, Vaze, & Heath, 2014). En consecuencia, surge la necesidad de evaluar técnicas que permitan incrementar la robustez y la eficiencia espectral del sistema sin requerir incrementos desproporcionados en la potencia de transmisión o en el ancho de banda disponible (Ngo, Larsson, & Marzetta, 2013).

En este contexto, las técnicas de diversificación espacial, particularmente mediante sistemas MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), se proponen como una solución eficaz para mejorar la calidad del enlace y aumentar la capacidad del canal mediante el uso de múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción. Diversos estudios han demostrado que los sistemas MIMO

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

permiten explotar la diversidad y el multiplexado espacial para optimizar el desempeño del sistema frente a configuraciones convencionales de antena única (Telatar, 1999). El problema central que aborda esta investigación consiste en determinar, de manera cuantitativa, en qué medida la implementación de sistemas MIMO permite optimizar el desempeño de la transmisión de datos, considerando indicadores clave como la eficiencia espectral, la capacidad del canal, la tasa de error de bit (BER) y el consumo energético expresado como energía por bit.

Asimismo, se reconoce que el comportamiento de los sistemas inalámbricos puede variar significativamente en función del entorno de operación, por lo que resulta indispensable analizar su desempeño bajo escenarios representativos con condiciones de propagación diferenciadas, tales como entornos urbanos densos, zonas rurales y escenarios vehiculares. Para ello, el presente trabajo adopta un enfoque cuantitativo de tipo experimental-aplicado, basado en simulaciones computacionales desarrolladas en MATLAB y Python, con el objetivo de garantizar la reproducibilidad y la validación cruzada de los resultados obtenidos (MathWorks, 2023; Python Software Foundation, n.d.).

La evaluación se estructura en tres escenarios de análisis: una red urbana densa tipo 5G, una red IoT en zona rural y una red vehicular V2X, empleando modelos de canal Rayleigh y Rician de acuerdo con las características de propagación de cada entorno, y evaluando el rendimiento del sistema frente a variaciones de la relación señal a ruido (SNR) conforme a las recomendaciones de los estándares de comunicaciones móviles (3GPP, 2023). En cada escenario se analizan configuraciones MIMO específicas y se cuantifica su impacto sobre las métricas definidas, con el propósito de evidenciar mejoras en capacidad y confiabilidad sin comprometer la eficiencia energética.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Finalmente, con el fin de sustentar la validez de los resultados, se incorpora un esquema de validación estadística que incluye pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk, análisis de varianza ANOVA con comparaciones post-hoc de Tukey, así como análisis de correlación y regresión para caracterizar las relaciones entre variables, tales como la SNR, la capacidad y la BER (SciPy Developers, n.d.). De esta manera, la presente tesis aporta evidencia cuantitativa y metodológicamente respaldada sobre la efectividad de la diversificación espacial en entornos heterogéneos urbano, rural y vehicular, contribuyendo al diseño de redes inalámbricas más eficientes y robustas, con aplicabilidad directa en tecnologías actuales y emergentes como 5G, IoT y comunicaciones V2X.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, la transmisión de datos en redes inalámbricas enfrenta múltiples desafíos técnicos que impactan directamente en su eficiencia y rendimiento. Estos problemas se han intensificado a medida que las redes se expanden y se diversifican, impulsadas por el crecimiento sostenido de dispositivos conectados y por aplicaciones que demandan mayor capacidad de transmisión y menor latencia. Entre los factores más críticos que afectan el desempeño de las redes inalámbricas se encuentran la interferencia entre señales, el desvanecimiento por multitrayectoria y la congestión del espectro radioeléctrico, fenómenos ampliamente documentados en la literatura especializada. Dichos efectos se manifiestan con mayor severidad en entornos urbanos densamente poblados y en escenarios con movilidad, lo que representa un desafío adicional para las comunicaciones inalámbricas modernas, especialmente en redes 5G y en aplicaciones asociadas al Internet de las Cosas (IoT) (Bai, Vaze, & Heath, 2014; Andrews et al., 2014).

El planteamiento del problema de esta investigación se centra en la necesidad de evaluar y mejorar la eficiencia de la transmisión de datos en redes inalámbricas utilizando técnicas que optimicen el uso del espectro y la calidad del enlace. En particular, se busca analizar el rendimiento de las técnicas de diversificación espacial, como el sistema MIMO (Multiple Input Multiple Output), en diferentes entornos y bajo condiciones de propagación variadas. Este tipo de sistemas es prometedor, ya que aprovecha múltiples antenas para mejorar la capacidad del canal y reducir la tasa de error sin necesidad de aumentar la potencia transmitida (Tse & Viswanath, 2005; Björnson et al., 2016). A pesar de sus ventajas, se desconoce en qué medida MIMO puede mejorar

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

el rendimiento en redes que operan en condiciones adversas, como aquellas con alta movilidad o en entornos rurales, lo que limita su aplicación práctica en estos contextos.

Este trabajo tiene como objetivo abordar esta brecha, evaluando el impacto de MIMO en la capacidad de transmisión, eficiencia espectral y confiabilidad en escenarios representativos, como redes urbanas 5G, redes IoT rurales y redes vehiculares V2X (Srivastava, G., Kumar, A., & Kumar, V. et al. 2025). Se plantea que la implementación de MIMO puede mejorar significativamente la eficiencia energética y la tasa de transferencia de datos, lo cual será validado a través de simulaciones y análisis estadísticos.

1.2. Justificación de la investigación

En el contexto actual de transformación digital, la transmisión de datos inalámbrica constituye uno de los pilares fundamentales de la infraestructura tecnológica global. Las redes móviles, las plataformas industriales automatizadas, los entornos domésticos inteligentes y la creciente red de dispositivos conectados mediante el Internet de las Cosas (IoT) dependen de sistemas inalámbricos cada vez más robustos, rápidos y eficientes. Esta realidad ha generado una demanda exponencial en el uso del espectro radioeléctrico, imponiendo retos considerables sobre la capacidad de las redes para ofrecer servicios de calidad y baja latencia, en entornos de alta densidad de usuarios y tráfico intensivo.

Dentro de los desafíos técnicos más notorios se identifican la congestión del espectro, la interferencia electromagnética, el desvanecimiento de la señal por trayectorias múltiples y las limitaciones físicas de propagación. Estos factores afectan negativamente la eficiencia espectral, la tasa de transmisión de datos y la confiabilidad de la conexión. Como respuesta a estas limitaciones,

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

han surgido técnicas de diversificación espacial, como el uso de sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output), que aprovechan múltiples antenas para transmitir y recibir datos simultáneamente a través de distintos canales espaciales, maximizando así la utilización del espectro y reduciendo la tasa de error.

La presente investigación se justifica por su orientación hacia la optimización teórica y experimental de estas técnicas avanzadas de comunicación. En particular, se busca evaluar su impacto mediante simulaciones computacionales en entornos virtuales representativos (urbanos, rurales e intervehiculares), usando herramientas especializadas como MATLAB y Python, sin recurrir a la implementación física. Esta estrategia permite explorar el comportamiento de sistemas inalámbricos bajo condiciones controladas y reproducibles, lo cual aporta evidencia cuantitativa sobre su eficiencia espectral, capacidad de canal y robustez frente a interferencias.

La pertinencia del estudio radica en la necesidad urgente de modernizar las redes de comunicación inalámbrica, especialmente de cara a la expansión del 5G, las aplicaciones industriales inteligentes y las redes vehiculares (V2X). Al mejorar el diseño y la operación de estas redes a través de modelos de diversificación espacial, se pueden alcanzar mayores niveles de desempeño y sostenibilidad operativa, reduciendo costos, aumentando la calidad del servicio y adaptándose a contextos con infraestructura limitada.

Además, esta investigación no solo se inserta dentro del campo de la ingeniería electrónica y las telecomunicaciones, sino que también contribuye al cuerpo académico mediante la formulación de modelos matemáticos, el diseño algorítmico y la validación por simulación de alto nivel. Los resultados obtenidos tendrán aplicabilidad tanto en el ámbito industrial como académico,

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

y pueden servir de base para estudios posteriores que busquen integrar inteligencia artificial, aprendizaje automático u optimización en tiempo real para redes inalámbricas inteligentes.

En síntesis, esta investigación se justifica por su contribución al avance tecnológico de las telecomunicaciones, al generar conocimiento aplicado, herramientas de simulación y modelos de análisis que permiten optimizar la transmisión de datos en redes inalámbricas mediante técnicas avanzadas de diversificación espacial.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de las técnicas de diversificación espacial, como el uso de tecnologías MIMO (Multiple Input Multiple Output) y configuraciones avanzadas de antenas, en la transmisión de datos en redes inalámbricas, con el fin de mejorar la eficiencia espectral, la capacidad del canal y la robustez de la señal frente a interferencias en contextos de alta densidad de usuarios.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar el desempeño de las técnicas MIMO en redes inalámbricas mediante simulaciones computacionales, considerando variables como la eficiencia espectral y la tasa de error de bits (BER), en comparación con sistemas convencionales sin diversificación espacial.
- Evaluar los efectos del desvanecimiento y la interferencia en escenarios diversos (urbano 5G, IoT rural y vehicular V2X), determinando la robustez y adaptabilidad de las técnicas de diversificación espacial.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Diseñar un modelo matemático de canal MIMO para redes inalámbricas, que permita optimizar su capacidad de transmisión mediante algoritmos de optimización, simulando las condiciones físicas y técnicas del canal.
- Validar el modelo propuesto a través de simulaciones realizadas en entornos computacionales como MATLAB y Python, cuantificando la mejora en el rendimiento del sistema respecto a las métricas de calidad del servicio (QoS), y proyectando la aplicabilidad de estas técnicas en tecnologías emergentes como 5G e IoT.

1.4. Alcance y limitaciones

A. Alcance

El presente estudio se centra en la optimización de la transmisión de datos en redes inalámbricas mediante la aplicación de técnicas de diversificación espacial, específicamente a través de tecnologías como MIMO (Multiple Input Multiple Output) y configuraciones avanzadas de antenas. El trabajo abarca un análisis detallado de los principios teóricos, el desarrollo de modelos matemáticos, simulaciones en entornos virtuales específicos y una validación experimental de las técnicas propuestas. El estudio se enfoca en evaluar la eficiencia espectral, la capacidad de transmisión de datos y la reducción de interferencias en redes con alta densidad de usuarios, considerando aplicaciones en contextos como redes 5G, entornos urbanos densos, y zonas rurales o industriales con desafíos de conectividad.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El estudio incluirá simulaciones y análisis comparativo de redes inalámbricas que utilizan diversificación espacial.

- Desarrollo de un modelo matemático para optimizar el rendimiento de la diversificación espacial.
- Validación de los resultados mediante pruebas experimentales en escenarios de simulación.
- Propuestas de estrategias de aplicación en escenarios reales de alta densidad de usuarios y condiciones de interferencia elevada.

B. Limitaciones

- Restricciones técnicas: La implementación de las técnicas de diversificación espacial, como el uso de múltiples antenas, puede requerir hardware específico que puede no ser completamente accesible en entornos simulados, lo que limita la aplicación práctica.
- Complejidad de los modelos matemáticos: La formulación y validación de modelos para optimizar el rendimiento de la diversificación espacial pueden enfrentar limitaciones relacionadas con el tiempo y la capacidad computacional.
- Escenarios de simulación específicos: Los resultados obtenidos en los entornos de simulación podrían no ser completamente representativos de situaciones reales, especialmente en contextos donde hay variabilidad extrema de interferencias, densidad de usuarios o condiciones ambientales.
- Limitaciones en la validación experimental: La validación experimental puede verse restringida por el acceso limitado a redes reales de alta densidad de usuarios o a infraestructura avanzada como sistemas 5G en entornos controlados.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Costos asociados: La implementación de múltiples antenas y configuraciones avanzadas puede tener un costo económico que no siempre será viable para todos los entornos de aplicación.

1.5. Diseño de la investigación

1.5.1. Enfoque y tipo de investigación

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo, ya que busca analizar, mediante simulaciones y experimentos, el impacto de las técnicas de diversificación espacial en parámetros específicos, como la eficiencia espectral, la capacidad de transmisión y la reducción de interferencias. El enfoque cuantitativo es el más adecuado para este tipo de estudios, dado que permite medir y comparar resultados de manera objetiva utilizando herramientas matemáticas y estadísticas.

Tipo de Investigación:

A. Investigación experimental:

- Este tipo de investigación se utiliza para evaluar el rendimiento de las técnicas de diversificación espacial en un entorno controlado. Se implementan configuraciones experimentales específicas para probar hipótesis relacionadas con el impacto de dichas técnicas en las redes inalámbricas.
- Las simulaciones replican condiciones del mundo real, como interferencias, desvanecimiento y alta densidad de usuarios, lo que permite controlar variables y medir el desempeño de las técnicas evaluadas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

B. Investigación aplicada:

- Busca resolver un problema práctico: optimizar la transmisión de datos en redes inalámbricas utilizando diversificación espacial. Los resultados obtenidos podrán aplicarse en escenarios reales, como redes urbanas densas y entornos industriales.

C. Alcance explicativo:

- El estudio no solo describe el impacto de las técnicas de diversificación espacial, sino que también analiza las relaciones causales entre la implementación de estas técnicas y los parámetros de rendimiento de la red.
- Desarrollo de modelos matemáticos para representar las técnicas de diversificación espacial.
- Simulación computacional utilizando software especializado (por ejemplo, MATLAB o NS-3) para probar los modelos en diferentes escenarios de red.
- Análisis de resultados mediante técnicas estadísticas para validar las hipótesis propuestas.

1.5.2. Variables de estudio

Las variables se dividen en independientes, dependientes y controladas:

1.5.2.1. Variables independientes

A. Técnicas de diversificación espacial:

- Diversificación de antenas.
- Diversificación de trayectorias.
- Diversificación de polarización.

B. Configuraciones MIMO:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Número de antenas en el transmisor y receptor.
- Tipos de codificación espacial utilizados (e.g., Alamouti, beamforming).

C. Entornos de simulación:

- Densidad de usuarios.
- Tipo de red (5G, Wi-Fi, IoT).

1.5.2.2. Variables dependientes:

A. Eficiencia espectral:

- Medida en bits/s/Hz. Se utiliza para evaluar la capacidad de la red para transmitir datos eficientemente.

B. Relación señal-ruido (SNR):

- Proporción de la potencia de la señal útil frente al ruido.

C. Capacidad de transmisión:

- Evaluada en Mbps, mide el volumen de datos transmitidos en un intervalo de tiempo determinado.

D. Tasa de error de bits (BER):

- Porcentaje de bits erróneos en la transmisión, lo que refleja la calidad de la señal recibida.

E. Consumo energético:

- Cantidad de energía utilizada para mantener la transmisión de datos en diferentes configuraciones de diversificación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

1.5.2.3. Variables controladas:

A. Frecuencia de operación:

- Frecuencias utilizadas para las simulaciones, como 2.4 GHz, 5 GHz o bandas milimétricas (mm Wave).

B. Potencia de transmisión:

- Potencia fija para asegurar la consistencia de las mediciones.

C. Modelo de canal:

- Se aplican modelos estandarizados, como el modelo Rayleigh para entornos urbanos o el modelo Rician para entornos con línea de vista dominante.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del arte

El estado del arte en redes inalámbricas y diversificación espacial abarca el análisis de los avances más recientes en investigaciones y aplicaciones tecnológicas. Este apartado permite identificar el contexto actual, las principales contribuciones científicas y los retos que persisten en el campo.

2.1.1. Investigaciones previas

En los últimos años, las investigaciones sobre diversificación espacial y técnicas MIMO han sido fundamentales para mejorar la eficiencia y capacidad de las redes inalámbricas. Los estudios se han centrado en varios aspectos:

A. Optimización de MIMO en redes inalámbricas:

Las investigaciones recientes han demostrado que la implementación de MIMO masivo (Massive Multiple-Input Multiple-Output) en redes 5G permite incrementar significativamente la capacidad de transmisión, mejorar la eficiencia espectral y contribuir a la reducción de la latencia, especialmente en entornos urbanos densamente poblados. En particular, diversos estudios evidencian que la integración de MIMO masivo con técnicas avanzadas de beamforming posibilita una asignación más eficiente de los recursos radioeléctricos, al concentrar la energía de transmisión hacia los usuarios y mitigar la interferencia intercelda, lo que se traduce en mejoras tanto en el rendimiento del sistema

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

como en la eficiencia energética (Ngo, Larsson, & Marzetta, 2013; Björnson, Hoydis, & Sanguinetti, 2017).

B. Técnicas de diversificación de antenas:

La codificación espacial y la diversidad de trayectorias representan estrategias clave para incrementar la confiabilidad de las comunicaciones inalámbricas frente a los efectos adversos del canal, como el desvanecimiento y la interferencia. Un esquema ampliamente reconocido es el código de Alamouti, el cual permite aprovechar la diversidad de transmisión mediante el uso de múltiples antenas sin incrementar de forma significativa la complejidad del sistema receptor. Asimismo, la aplicación de técnicas de diversidad espacial y de múltiples trayectorias ha demostrado ser altamente efectiva para reducir la probabilidad de errores en escenarios caracterizados por variaciones rápidas del canal, como aquellos con alta movilidad, al proporcionar múltiples réplicas independientes de la señal transmitida. Estas técnicas contribuyen de manera significativa a mejorar la robustez y estabilidad del enlace en sistemas de comunicación inalámbrica modernos (Alamouti, 1998; Goldsmith, 2005).

C. Redes 5G e IoT:

Aplicaciones de diversificación espacial en IoT: Las investigaciones en el contexto de IoT han explorado cómo la diversificación espacial puede optimizar la conectividad en redes de sensores y dispositivos de bajo consumo energético. Por ejemplo, técnicas de diversificación de polarización han mostrado resultados prometedores para redes de sensores en aplicaciones industriales y agrícolas (Hung Tran-Huy et al. 2024).

D. Simulaciones y modelos matemáticos:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Diversos estudios basados en simulaciones computacionales, utilizando herramientas como MATLAB y NS-3, han evaluado el impacto de las técnicas MIMO en distintos escenarios de propagación, incluyendo entornos urbanos densos y áreas rurales. Estos trabajos demuestran que la diversificación espacial permite mitigar los efectos de la interferencia y el desvanecimiento por multitrayectoria, mejorando la capacidad del sistema y la calidad del servicio sin requerir incrementos significativos de potencia (Björnson, Larsson, & Marzetta, 2017).

El desempeño de las técnicas de diversificación espacial y sistemas MIMO ha sido analizado ampliamente mediante modelos de canal estandarizados definidos por organismos internacionales, como 3GPP, los cuales representan condiciones realistas de operación en redes 5G. Estos modelos permiten evaluar el comportamiento del sistema frente a variaciones de movilidad, densidad de usuarios y condiciones de propagación, proporcionando una base sólida para el diseño y optimización de redes inalámbricas modernas (3GPP, 2020).

2.1.2. Desafíos actuales y oportunidades de mejora

Desafíos actuales:

A pesar de los avances, varios desafíos persisten en la implementación de técnicas de Diversificación espacial:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

A. Complejidad operativa y de diseño:

La necesidad de múltiples antenas y algoritmos avanzados aumenta los costos de hardware y procesamiento, dificultando su implementación en dispositivos compactos como teléfonos móviles o sensores IoT (Rappaport, 2024).

B. Gestión del espectro:

El incremento sostenido en la densidad de dispositivos conectados ha intensificado la congestión del espectro radioeléctrico, convirtiéndolo en un desafío crítico para las redes inalámbricas modernas. En este contexto, las técnicas de diversificación espacial deben complementarse con estrategias de gestión y asignación eficiente del espectro, a fin de maximizar el uso del ancho de banda disponible y garantizar la calidad del servicio en escenarios de alta demanda (Andrea Goldsmith, 2005).

C. Limitaciones de hardware:

La capacidad de los dispositivos para soportar MIMO masivo está limitada por restricciones físicas, como el espacio disponible para antenas y el consumo energético (Tse & Viswanath, 2005; Björnson et al., 2016).

D. Entornos dinámicos:

En escenarios con alta movilidad, como redes vehiculares, las condiciones de transmisión cambian rápidamente, dificultando la optimización de las técnicas espaciales (Srivastava, G., Kumar, A., & Kumar, V. et al. 2025).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

E. Compatibilidad e interoperabilidad:

Las implementaciones de diversificación espacial deben ser compatibles con estándares y protocolos globales, lo cual exige una coordinación internacional.

Oportunidades de mejora:

A medida que evolucionan las redes inalámbricas, surgen nuevas oportunidades para superar los desafíos actuales:

A. Desarrollo de algoritmos inteligentes:

El uso de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML) puede mejorar la gestión dinámica de las antenas y optimizar el rendimiento en tiempo real.

B. Avances en tecnologías de hardware:

La miniaturización de antenas y el uso de materiales avanzados, como los meta-materiales, pueden facilitar la integración de MIMO en dispositivos más pequeños.

C. Integración con redes 6G:

Se prevé que las redes 6G incorporen técnicas de diversificación espacial aún más avanzadas, combinando MIMO masivo con tecnologías emergentes como el terahertz (THz) y la comunicación cuántica.

D. Simulaciones realistas y modelos predictivos:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Herramientas de simulación mejoradas permitirán probar nuevas configuraciones antes de implementarlas, reduciendo costos y riesgos.

E. Redes de energía eficiente:

La integración de técnicas espaciales con estrategias de ahorro energético será crucial para redes IoT de largo alcance y bajo consumo.

2.2. Antecedentes de la investigación

El estudio de la transmisión de datos en redes inalámbricas mediante técnicas de diversificación espacial ha sido abordado en diversas investigaciones internacionales, nacionales y locales, que han contribuido al desarrollo de tecnologías más eficientes, robustas y adaptables a las necesidades del entorno moderno. A continuación, se presentan los antecedentes más relevantes que sustentan la base teórica y experimental del presente trabajo.

2.2.1. Antecedentes internacionales

Hung Tran-Huy et al. (2024) presentan un sistema de antenas Massive MIMO diseñado para aplicaciones de 5G IoT, donde múltiples elementos de antena estructurados espacialmente ayudan a mejorar el rendimiento de la conectividad inalámbrica. Este tipo de configuración es directamente relevante a la investigación porque explora cómo las técnicas de múltiples antenas (diversidad espacial) pueden apoyar la transmisión de datos de dispositivos IoT en entornos 5G.

Björnson, Hoydis, & Sanguinetti (2017) pioneros en MIMO masivo, realizaron un análisis teórico y práctico sobre cómo la redundancia espacial contribuye al aumento de capacidad de canal

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

sin incrementar el ancho de banda. Su trabajo ha servido de base para la evolución del estándar 5G en cuanto a multiplexación espacial.

Bana et al. (2019) analizaron la aplicabilidad de *Massive MIMO* para conectividad IoT, abordando cómo explotar los grados libres espaciales mejora la eficiencia espectral, las tasas de transmisión y el soporte de múltiples conexiones simultáneas. Su estudio resalta el papel de la diversificación espacial en escenarios de mMTC y URLLC bajo el estándar 5G.

Zaki et al. (2020) propusieron un esquema de modulación espacial generalizada (GSM) combinado con codificación espacio-tiempo (*Space-Time Coding*) en sistemas *Massive MIMO*, mostrando que la agrupación de antenas con diversidad espacial ofrece ganancias de confiabilidad y rendimiento frente a técnicas convencionales. Este enfoque es relevante para optimizar la transmisión de datos en redes densas y móviles.

Srivastava, G., Kumar, A., & Kumar, V. et al. (2025) presentan un arreglo de antenas MIMO de ocho puertos para comunicaciones V2V (Vehicle-to-Vehicle) en bandas milimétricas, demostrando características avanzadas de diversidad espacial, altos niveles de aislamiento entre antenas y potencial para mejorar la cobertura y fiabilidad de enlaces vehiculares en redes de próxima generación.

2.2.2. Antecedentes nacionales

Haro Tantajulca & Linares Inca (2025) – Estudio de señal recibida en diversidad espacial en el enlace Reque-Pacasmayo, en esta tesis de grado de la Universidad Privada Antenor Orrego analizó la señal recibida en un enlace de microondas de 6 GHz entre Reque y Pacasmayo,

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

evaluando el desempeño de la señal con y sin el uso de diversidad espacial. Los resultados mostraron incrementos significativos en el nivel promedio de señal y reducciones en la variabilidad al aplicar diversidad espacial, evidenciando así beneficios de esta técnica en enlaces de datos inalámbricos.

Cruzado Yaya & Vergara Escobedo (2022) – Estudio del desempeño de la técnica de diversidad espacial en función de la separación de antenas en este trabajo de grado de la Universidad Privada Antenor Orrego, se estudió cómo la separación entre antenas afecta el desempeño de la diversidad espacial en un enlace microondas costero entre Pacasmayo y Paiján. La investigación evaluó diferentes alturas de antenas y sus efectos en la correlación de señales y rendimiento de transmisión de datos.

Cipra Mestanza & Del Castillo Vera (2025) – Estudio de la señal en diversidad de frecuencia y espacial en un enlace dorsal microondas 6 GHz, también de la Universidad Privada Antenor Orrego, este estudio abordó la combinación de diversidad de frecuencia y diversidad espacial en enlaces microondas en la costa peruana. Mostró que integrar estas técnicas puede reducir la variabilidad de la señal y mejorar los niveles recibidos, contribuyendo al análisis de métodos para optimizar la transmisión de datos.

Vergaray Mendez (2023) – Diseño e implementación de una red móvil 5G NSA con Massive MIMO, esta tesis de la Universidad de Ciencias y Humanidades se concentró en redes móviles 5G utilizando tecnología Massive MIMO, que es una forma avanzada de diversificación espacial mediante múltiples antenas para mejorar la capacidad y velocidad de transmisión de datos inalámbricos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Castillo Villacorta (2012) – Diseño de una red inalámbrica utilizando tecnología Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), este proyecto de tesis (Universidad Privada del Norte) se centró en el diseño de redes inalámbricas aplicando tecnología MIMO, que explota la diversidad espacial para mejorar la capacidad y fiabilidad del enlace de datos. Aunque más antiguo, sirve como antecedente técnico de aplicación de técnicas espaciales en redes inalámbricas.

2.2.3. Antecedentes locales

Acuña Espilco y Herrera Ormeño (2016), en una tesis desarrollada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, realizaron un estudio experimental sobre la propagación y atenuación de señales inalámbricas en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz dentro de un entorno universitario. Mediante mediciones reales y análisis de multitrayectoria, el trabajo evidenció cómo los obstáculos y la interferencia afectan el rendimiento del enlace inalámbrico, destacando la importancia de técnicas que permitan mejorar la confiabilidad y estabilidad de la transmisión en redes inalámbricas.

Vásquez y Nilton (2016), en una tesis presentada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, diseñaron una red de sensores de espectro orientada a la selección óptima de canales de operación en redes Wi-Fi. El estudio analizó el comportamiento del espectro radioeléctrico en ambientes con alta densidad de usuarios, evidenciando la influencia de la interferencia y la congestión del canal sobre la calidad del servicio, lo cual resulta relevante para el análisis del desempeño de sistemas inalámbricos en escenarios reales.

Peñaloza Velásquez y Yupanqui Gonzalo (2022), en una tesis realizada en la Universidad Privada de Tacna, desarrollaron un sistema IoT de bajo costo basado en tecnologías LPWAN,

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

evaluando su desempeño en términos de cobertura y consumo energético. El trabajo demostró que la adecuada planificación de la red inalámbrica permite optimizar la transmisión de datos en aplicaciones IoT, aportando antecedentes relevantes para el análisis de eficiencia y robustez en redes inalámbricas de baja potencia.

Lara Herrera y Vergaray Méndez (2023), en una tesis elaborada en la Universidad de Ciencias y Humanidades, abordaron el diseño e implementación de una red móvil 5G No Stand Alone (NSA) en Lima Metropolitana. El estudio analizó el impacto de tecnologías avanzadas como Massive MIMO sobre la capacidad y velocidad de transmisión de datos, evidenciando mejoras significativas en escenarios de alta demanda, lo cual guarda relación directa con el análisis del desempeño de sistemas MIMO en redes inalámbricas modernas.

Aguilar et al. (2024), en una tesis desarrollada en la Universidad Continental, evaluaron el desempeño de redes Wi-Fi de acceso abierto en un entorno universitario, considerando aspectos de congestión, interferencia y comportamiento del usuario. Los resultados mostraron cómo la alta densidad de dispositivos impacta negativamente en la calidad del enlace, resaltando la necesidad de técnicas de optimización del uso del espectro y del canal inalámbrico en ambientes académicos.

2.3.Fundamentación teórica

A continuación, se presenta una lista de términos relevantes con sus definiciones, relacionados con el contenido de la tesis:

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) es una tecnología de transmisión inalámbrica que emplea múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor con el objetivo de mejorar la eficiencia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

espectral, la confiabilidad del enlace y la capacidad del canal. Mediante el uso de técnicas de diversificación espacial y multiplexación espacial, junto con procesamiento digital de señales, los sistemas MIMO permiten la transmisión simultánea de múltiples flujos de datos dentro del mismo ancho de banda, optimizando de manera significativa el uso del espectro radioeléctrico y el rendimiento del sistema de comunicaciones inalámbricas (Rappaport, 2024; Tse & Viswanath, 2005).

Ejemplos de MIMO:

- MIMO 2x2 (2 antenas transmisoras y 2 receptoras) en redes Wi-Fi y LTE.
- MIMO 4x4 utilizado en 5G y redes vehiculares (V2X).
- MIMO masivo (Massive MIMO) en estaciones base 5G, con hasta 64 antenas.

Redes inalámbricas convencionales vs. redes con diversificación espacial

Las redes inalámbricas convencionales utilizan un solo canal de transmisión sin diversificación espacial, lo que las hace más vulnerables a interferencias y desvanecimiento de la señal. En contraste, las redes con diversificación espacial emplean múltiples antenas y trayectorias de propagación, mejorando la confiabilidad y la capacidad de transmisión. (Alamouti, 1998; Telatar, 1999).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 1

Cuadro de diferencias principales

Característica	Redes Convencionales	Redes con Diversificación Espacial
Número de antenas	1 transmisora, 1 receptora	Múltiples transmisoras y receptoras (MIMO)
Interferencias	Más afectadas	Reducidas por técnicas de codificación
Capacidad del canal	Limitada	Mayor capacidad gracias a multiplexación espacial
Aplicaciones	Wi-Fi doméstico, 4G	5G, redes IoT, comunicaciones vehiculares

Eficiencia espectral

La eficiencia espectral se define como la cantidad de información que puede transmitirse por unidad de ancho de banda y se expresa en bits por segundo por Hertz (bits/s/Hz). Este parámetro es fundamental para evaluar el desempeño de los sistemas inalámbricos modernos, especialmente en escenarios de congestión espectral (Tse & Viswanath, 2005; Björnson et al., 2016). Matemáticamente se expresa como:

$$\eta = \frac{C}{B} \qquad \textbf{(}\text{Ecuación 1)}$$

Donde:

- η es la eficiencia espectral.
- C es la capacidad del canal (bits/s).
- B es el ancho de banda disponible (Hz).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Técnicas de diversificación espacial

Las técnicas de diversificación espacial buscan mejorar la calidad de la transmisión utilizando múltiples antenas y trayectorias de propagación, con el fin de reducir la interferencia, aumentar la confiabilidad y mejorar la capacidad del canal (Björnson, E., Larsson, E. G., & Marzetta, T. L. (2017). Entre las principales técnicas se encuentran:

Principales técnicas:

A. **Diversificación de antenas:** Uso de múltiples antenas en el transmisor y receptor para mejorar la señal.
B. **Diversificación de trayectorias:** Se aprovechan diferentes rutas de propagación de la señal.
C. **Diversificación de polarización:** Uso de ondas con diferentes orientaciones para reducir interferencia.
D. **Codificación espacial:** Métodos como STBC (Space-Time Block Coding) optimizan la transmisión de datos.

Capacidad de transmisión

La capacidad de transmisión representa la máxima cantidad de información que un canal puede transmitir de manera confiable y depende del ancho de banda y de la relación señal-ruido (SNR). De acuerdo con la teoría de Shannon, la capacidad se expresa como (Rappaport, 2024):

$$C = Blog2(1 + SNR)$$ **(**Ecuación 2)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Parámetros de redes inalámbricas

El ancho de banda se refiere a la cantidad de espectro disponible para la transmisión de datos y se expresa en Hertz (Hz). Un mayor ancho de banda permite alcanzar mayores tasas de transmisión de información (3GPP, s. f.).

Figura 1

Ancho de banda



La interferencia ocurre cuando múltiples transmisiones inalámbricas comparten un mismo canal de comunicación, lo que deteriora la calidad y estabilidad de la señal recibida. Para mitigar este efecto, se emplean técnicas como el beamforming y los sistemas MIMO masivo, que permiten dirigir la energía de transmisión de forma más eficiente y mejorar el desempeño del enlace en escenarios con alta densidad de usuarios (Thomas L. Marzetta, 2010).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 2

Interferencia elevada



Redes punto a punto vs. redes multipunto

- Redes punto a punto (P2P): Conexión directa entre dos dispositivos (ej. enlaces satelitales).
- Redes multipunto: Un transmisor se comunica con múltiples receptores (ej. redes celulares, Wi-Fi).

Tipos de redes inalámbricas

- PAN (Personal Area Network): Redes de corto alcance (ej. Bluetooth, Zigbee).
- MAN (Metropolitan Area Network): Redes en áreas urbanas (ej. WiMAX).
- WAN (Wide Area Network): Redes de gran cobertura, como Internet.

Estándares de redes inalámbricas

- Wi-Fi (IEEE 802.11): Redes locales inalámbricas para acceso a Internet.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- LTE (Long-Term Evolution): Tecnología de redes móviles 4G.
- 5G: Redes de nueva generación con mayor velocidad y menor latencia.
- Zigbee y Z-Wave: Protocolos de comunicación para domótica y sensores IoT.
- WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access): Tecnología de transmisión de datos en largas distancias.

Domótica: Sistema de automatización en hogares mediante dispositivos conectados (ej. luces inteligentes, sensores de movimiento).

Internet de las cosas (IoT): Red de dispositivos interconectados que recopilan y comparten datos en tiempo real.

Ejemplos de IoT:

- Vehículos conectados (V2X).
- Redes de sensores en ciudades inteligentes.
- Automatización industrial (Industria 4.0).

Congestión espectral: Se produce cuando demasiados dispositivos utilizan el mismo espectro, provocando baja eficiencia y aumento de interferencias.

Redundancia espacial: Se refiere a la transmisión de datos a través de múltiples caminos para mejorar la confiabilidad.

Diversificación de trayectorias: Aprovechamiento de múltiples rutas de propagación para mejorar la señal.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Ganancia de diversificación: Medida de la mejora en la calidad de la señal mediante técnicas de diversificación espacial.

Codificación espacial: Métodos que codifican información en el dominio espacial para mejorar la transmisión en sistemas MIMO.

Ventajas de la diversificación espacial

- Mejor eficiencia espectral.
- Reducción de interferencias.
- Mayor capacidad de transmisión.
- Optimización de redes inalámbricas en entornos urbanos y rurales.

2.3.1. Redes inalámbricas

Las redes inalámbricas son una forma de comunicación que permite la transmisión de datos sin necesidad de conexiones físicas, como cables o fibras ópticas. Utilizan señales de radiofrecuencia, infrarrojas u ondas electromagnéticas para enviar y recibir datos entre dispositivos o estaciones base. Este tipo de redes ha ganado relevancia a nivel mundial debido al incremento de la movilidad, la conectividad en tiempo real y la proliferación de dispositivos móviles, IoT (Internet de las cosas) y tecnologías emergentes como 5G.

2.3.2. Fundamentos y características

Las redes inalámbricas se caracterizan por varios aspectos fundamentales que las diferencian de las redes cableadas tradicionales:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

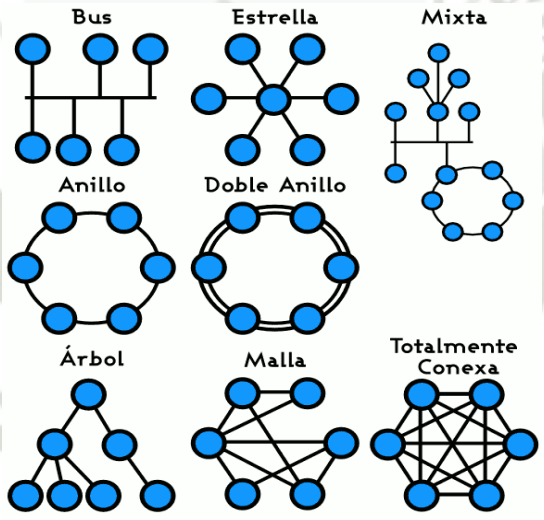
REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Medio de transmisión inalámbrico: Utilizan el aire como medio de transmisión, lo que permite la movilidad de los dispositivos y usuarios. Esto también implica la necesidad de gestionar la interferencia y la atenuación de la señal debida a obstáculos físicos.

Topologías flexibles: Las redes inalámbricas pueden adoptar diferentes configuraciones topológicas, como redes punto a punto, punto a multipunto, mallas (mesh) y ad hoc, dependiendo de las necesidades del usuario y la infraestructura.

Figura 3

Algunas topologías flexibles de redes inalámbricas



Nota: Wikimedia Commons. Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Network_topologies.svg

Capacidad de movilidad: Proporcionan a los usuarios la capacidad de conectarse y moverse libremente dentro de un área de cobertura específica sin perder la conectividad. Esto es clave para dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes, tabletas y computadoras portátiles.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura **4**

Cobertura de conectividad



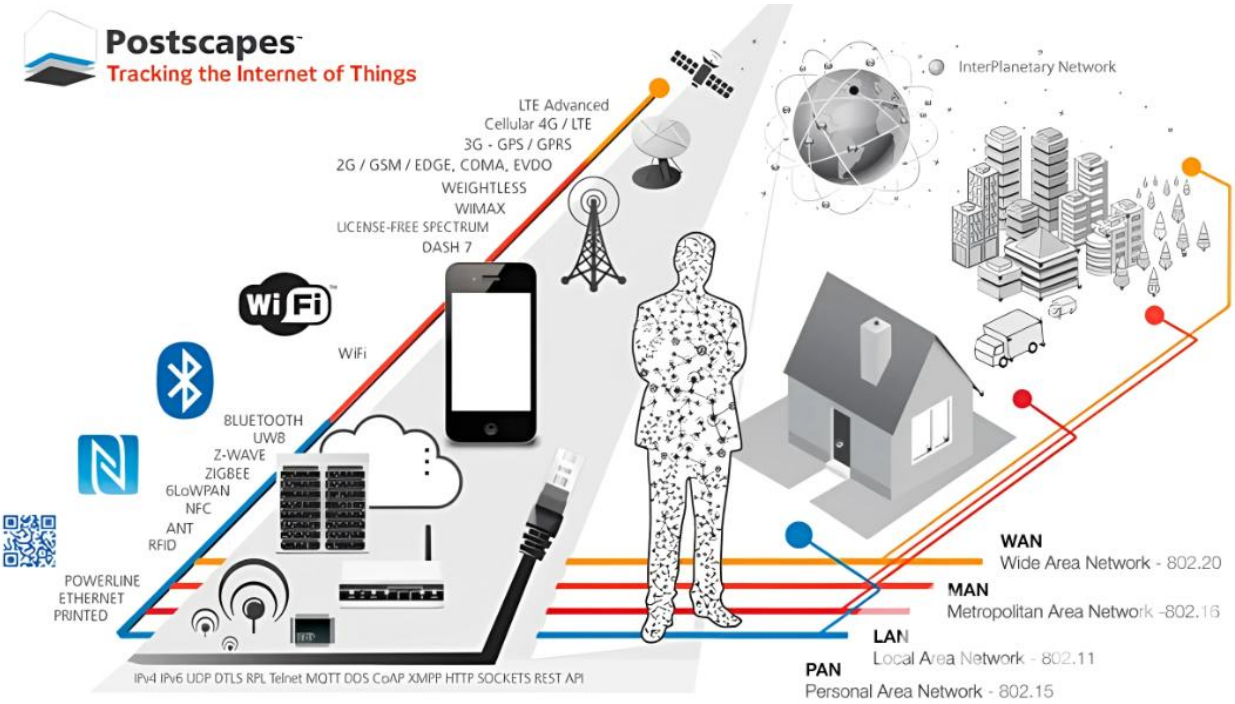
Alcance variable: Las redes inalámbricas pueden operar en diferentes alcances, desde redes personales (PAN) con rangos de pocos metros (ej. Bluetooth), hasta redes de área metropolitana (MAN) y redes de área amplia (WAN) que pueden cubrir ciudades enteras (ej. WiMAX).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 5

Estándares existentes para transmisión de datos inalámbricos



Nota. Cámara de Comercio de Valencia. (s.f.). *Caminar con éxito hacia la Industria 4.0 - Capítulo 11: Infraestructuras I - Redes inalámbricas*. TIC Negocios. Recuperado el 28 de mayo de 2025 de https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-11-infraestructuras-i-redes-inalambricas/

Seguridad: Aunque las redes inalámbricas facilitan el acceso, presentan desafíos significativos en términos de seguridad. Las señales transmitidas a través del aire pueden ser interceptadas, lo que requiere la implementación de mecanismos robustos de seguridad, como el cifrado de datos, autenticación y protocolos de acceso seguro.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.3.2.1. Algoritmos de procesamiento MIMO (SVD, ZF y MMSE)

El desempeño de los sistemas MIMO depende en gran medida de los algoritmos utilizados para procesar las señales transmitidas y recibidas. Entre los métodos más empleados se encuentran la Descomposición en Valores Singulares (SVD), el detector Zero Forcing (ZF) y el detector Minimum Mean Square Error (MMSE), los cuales permiten optimizar la transmisión, cancelar interferencias y mejorar la precisión en la recuperación de datos.

A. Singular value decomposition (SVD)

La descomposición en valores singulares es una técnica matemática que permite factorizar la matriz del canal H como:

$$\mathrm{H} = \mathrm{U}\Sigma V^{H} \quad \textbf{(}\text{Ecuación 3)}$$

donde:

- U es una matriz unitaria asociada al receptor.
- V^{H} es la matriz unitaria de precodificación en el transmisor.
- Σ es una matriz diagonal cuyos elementos representan los valores singulares del canal, equivalentes a la ganancia de cada subcanal.

El objetivo del uso de SVD es convertir el canal MIMO en varios subcanales independientes, maximizando la capacidad teórica del sistema, dada por:

$$C = \sum_{i=1}^{r} \log_2 \left(1 + \frac{\measuredangle_i P_i}{N_0}\right) \quad \textbf{(}\text{Ecuación 4)}$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

donde:

- λ_i= valores singulares al cuadrado.
- P_i = potencia asignada a cada subcanal.
- N_0 = densidad espectral del ruido.
- r = rango del canal.

Gracias a esta técnica, un sistema MIMO puede transmitir múltiples flujos simultáneamente con mínima interferencia, lo cual incrementa la eficiencia espectral y la capacidad del canal.

B. Zero forcing (ZF)

El detector Zero forcing es un método lineal que busca eliminar completamente la interferencia entre las señales recibidas. El estimador se define como:

$$\hat{x} = (H^H H)^{-1} H^H y \qquad \textbf{(}\text{Ecuación 5)}$$

donde y es el vector recibido.

ZF "fuerza a cero" la interferencia intercanal, lo que facilita la recuperación del símbolo transmitido. Sin embargo, presenta la desventaja de amplificar el ruido, especialmente cuando la matriz H es mal condicionada. A pesar de ello, es ampliamente utilizado por su baja complejidad computacional.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

C. Minimum mean square error (MMSE)

El detector MMSE busca un compromiso entre reducir la interferencia y evitar la amplificación del ruido. Su expresión es:

$$\hat{x} = (H^H H + \sigma^2 I)^{-1} H^H y$$ **(** Ecuación 6)

donde σ^2 representa la potencia del ruido.

A diferencia de ZF, MMSE incorpora el nivel de ruido en el cálculo, proporcionando mejor rendimiento cuando la SNR es baja. Por ello, se considera una técnica más robusta y eficiente desde el punto de vista del BER (Bit Error Rate).

2.3.3. Tecnologías de comunicación inalámbrica (Wi-Fi, LTE, 5G, etc.)

Las redes inalámbricas abarcan una variedad de tecnologías y estándares que se han desarrollado para satisfacer las necesidades de comunicación en diferentes escenarios. Algunos de los principales son:

- Wi-Fi (Wireless Fidelity): Basado en los estándares IEEE 802.11, Wi-Fi es una de las tecnologías de redes inalámbricas más utilizadas para proporcionar acceso a Internet y redes locales. Wi-Fi opera en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz, ofreciendo velocidades de transmisión que pueden superar los 1 Gbps en las versiones más recientes (Wi-Fi 6 y Wi-Fi 6E).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Bluetooth: Una tecnología de corto alcance que permite la conexión entre dispositivos personales, como auriculares, teclados, y otros periféricos. Opera en la banda de 2.4 GHz y es utilizada para redes personales (PAN).
- LTE y 5G: LTE (Long Term Evolution) y 5G representan la evolución de las redes móviles. LTE ofrece una alta velocidad de conexión y baja latencia en comparación con generaciones anteriores, mientras que 5G introduce mejoras significativas en capacidad, latencia ultra baja, y conexiones masivas para dispositivos IoT. 5G también utiliza tecnologías avanzadas, como MIMO masivo y beamforming, para maximizar el rendimiento de la transmisión.
- Zigbee y Z-Wave: Son tecnologías diseñadas para redes de baja potencia y bajo ancho de banda, típicamente utilizadas en aplicaciones de IoT, como domótica y monitoreo remoto.
- WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access): Permite la transmisión de datos de alta velocidad en áreas metropolitanas y se utiliza como alternativa a las conexiones por cable en ciertos entornos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

Figura 6

Comparativa de tecnologías inalámbricas por categorías de red hasta 2025

Categoría de Red	Tecnología	Estándar / Versión	Año de Lanzamiento	Banda de Frecuencia	Ancho de Banda Típico	Máxima Teórica	Latencia Típica	Alcance Aproximado	Uso Principal
PAN	Bluetooth 5.2	BT SIG	2020	2.4 GHz	2 MHz (por canal)	2 Mbps	~5–10 ms	~10 m (hasta 100 m en BT 5)	Periféricos, audio, dispositivos personales
	Bluetooth 5.3	BT SIG	2021	2.4 GHz	2 MHz (por canal)	2 Mbps	~5–10 ms	~10 m (hasta 100 m en BT 5)	Mejoras en eficiencia energética y seguridad
	Bluetooth 6.0	BT SIG	2024	2.4 GHz	2 MHz (por canal)	2 Mbps	~5–10 ms	~10 m (hasta 100 m en BT 5)	Precisión en localización, mejoras en eficiencia
	Zigbee	IEEE 802.15.4	2004	2.4 GHz / 868 MHz / 915 MHz	0.3–2 MHz	250 Kbps (2.4 GHz)	~10 ms	~10–100 m	IoT, domótica, sensores
	Z-Wave	Z-Wave Alliance	2005	868 MHz / 908 MHz (según región)	0.1–0.2 MHz	~100 Kbps	~10 ms	~30 m (interior)	Automatización del hogar, sensores
	Z-Wave Long Range	Z-Wave Alliance	2020	900 MHz	0.1–0.2 MHz	~100 Kbps	~10 ms	Hasta 1.5 km	IoT en exteriores, dispositivos de largo alcance
LAN	Wi-Fi 4	IEEE 802.11n	2009	2.4 GHz / 5 GHz	Hasta 40 MHz	Hasta 600 Mbps	~10 ms	70 m (interior) / 250 m (exterior)	Internet doméstico y oficinas
	Wi-Fi 5	IEEE 802.11ac	2013	5 GHz	80–160 MHz	Hasta 1.3 Gbps	~5 ms	35 m (interior) / 100 m (exterior)	Streaming de alta definición, juegos en línea
	Wi-Fi 6 / 6E	IEEE 802.11ax	2019	2.4 GHz / 5 GHz / 6 GHz	Hasta 160 MHz	Hasta 9.6 Gbps	~10 ms	30 m (interior) / 100 m (exterior)	Entornos densos, IoT, hogares inteligentes
	Wi-Fi 7	IEEE 802.11be	2024	2.4 GHz / 5 GHz / 6 GHz	Hasta 320 MHz	Hasta 46 Gbps	<5 ms	Similar a Wi-Fi 6E	Aplicaciones de realidad aumentada/virtual, 8K
MAN	WiMAX	IEEE 802.16e/m	2008	2.3 / 2.5 / 3.5 GHz	Hasta 20 MHz	Hasta 1 Gbps (WiMAX 2)	20–50 ms	Hasta 50 km (línea de vista)	Zonas rurales, acceso fijo inalámbrico
WAN	LTE	3GPP Release 8	2008	700 MHz–2.6 GHz (varía)	1.4–20 MHz por portadora	Hasta 300 Mbps (DL)	20–50 ms	Hasta 10 km	Redes móviles 4G, video, navegación
	LTE-Advanced	3GPP Release 10	2011	700 MHz–2.6 GHz	Hasta 100 MHz (agregación)	Hasta 1 Gbps	20–50 ms	Hasta 15 km	Mejora de LTE, mayor capacidad
	5G Sub-6	3GPP Release 15	2018	<6 GHz (700 MHz–3.7 GHz)	Hasta 100 MHz	Hasta 5 Gbps	~1 ms	Hasta 5 km	Alta velocidad móvil, IoT, realidad aumentada
	5G mmWave	3GPP Release 15	2018	24–100 GHz + 1 GHz+	Hasta 400 MHz–1 GHz+	Hasta 20 Gbps	<1 ms	<500 m	URLLC, VR/AR, vehículos autónomos

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.3.4. Aplicaciones de las redes inalámbricas

Las redes inalámbricas han transformado muchos sectores gracias a su capacidad para conectar dispositivos y usuarios de manera flexible y eficiente. Algunas aplicaciones notables incluyen:

- Conectividad móvil y acceso a internet: Desde teléfonos inteligentes hasta computadoras portátiles, las redes inalámbricas proporcionan acceso continuo a Internet y servicios en la nube, transformando la forma en que las personas trabajan, se comunican y acceden a la información.
- IoT (Internet de las cosas): Las redes inalámbricas son esenciales para conectar millones de dispositivos IoT, desde sensores en hogares inteligentes hasta dispositivos industriales, vehículos autónomos y aplicaciones de monitoreo ambiental.
- Redes de sensores inalámbricos (WSN): Utilizadas para la recolección y transmisión de datos en aplicaciones como la agricultura, la vigilancia ambiental y la automatización industrial.
- Redes de alta densidad (e.g., Estadios, Eventos): La diversificación espacial y las tecnologías avanzadas, como MIMO, permiten manejar grandes cantidades de usuarios en lugares con alta densidad de dispositivos conectados, mejorando la capacidad y la calidad de la transmisión.

2.3.5. Retos y desafíos de las redes inalámbricas

A pesar de su popularidad, las redes inalámbricas enfrentan varios desafíos:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Interferencia: La coexistencia de múltiples dispositivos y redes puede provocar interferencia, lo que afecta el rendimiento de la transmisión.
- Seguridad: Las redes inalámbricas son vulnerables a ataques, como intercepciones y accesos no autorizados, lo que requiere medidas de seguridad robustas.
- Congestión del espectro: El aumento de dispositivos conectados ha generado una saturación del espectro radioeléctrico disponible, lo que puede afectar la calidad del servicio.
- Calidad de la señal: Obstáculos físicos, como edificios o árboles, y factores ambientales, como la lluvia, pueden causar atenuación y desvanecimiento de la señal.

2.4. Diversificación espacial (Spatial Diversity)

La diversificación espacial es una técnica utilizada en redes inalámbricas para mejorar la calidad y confiabilidad de la transmisión de datos mediante el uso de múltiples trayectorias espaciales para enviar y recibir señales. Esta estrategia explota la naturaleza aleatoria de las interferencias y las fluctuaciones de la señal en el canal inalámbrico, proporcionando redundancia y mejorando la eficiencia del sistema. Es una solución clave para superar problemas como el desvanecimiento de la señal, la interferencia y la congestión espectral.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 7

Diversificación espacial en redes inalámbricas



2.4.1. Concepto y principios

La diversificación espacial se basa en la utilización de múltiples antenas en los transmisores y receptores para transmitir flujos de datos a través de diferentes trayectorias espaciales. Esta técnica se implementa principalmente en sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output), donde varias antenas trabajan de manera coordinada para transmitir y recibir señales de forma más eficiente.

El objetivo principal es reducir la probabilidad de pérdida de información al proporcionar trayectorias alternativas para las señales, permitiendo que los datos lleguen al receptor incluso si una de las trayectorias experimenta interferencias o desvanecimientos.

La diversificación espacial opera bajo los siguientes principios clave:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

A. **Redundancia espacial**:

- La señal se transmite a través de múltiples antenas y trayectorias, lo que aumenta las posibilidades de que el receptor pueda reconstruir los datos correctamente incluso en presencia de fluctuaciones en el canal.

B. **Diversificación de trayectorias**:

- Debido a las reflexiones, refracciones y dispersión, las señales inalámbricas viajan a través de múltiples trayectorias antes de llegar al receptor. La diversificación espacial aprovecha estas trayectorias para combinar las señales de manera que se reduzcan los efectos negativos de interferencia y desvanecimiento.

C. **Ganancia de diversificación**:

- Esta técnica mejora la calidad de la señal recibida al combinar múltiples copias de la misma señal transmitida por diferentes trayectorias, utilizando técnicas como la combinación por suma de potencia o la selección de la mejor señal.

D. **Desvanecimiento independiente**:

- La diversificación espacial se basa en la premisa de que las señales que viajan por diferentes trayectorias experimentan desvanecimientos independientes. Esto permite que, si una trayectoria presenta atenuación significativa, otras trayectorias compensen la pérdida.

E. **Codificación espacial**:

- En los sistemas MIMO, los datos pueden dividirse en flujos separados y transmitirse simultáneamente a través de diferentes antenas, mejorando la capacidad de transmisión del sistema.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.4.1.1. Ventajas de la diversificación espacial:

A. **Mitigación del desvanecimiento**:

- Reduce la probabilidad de que todas las señales se atenúen simultáneamente, mejorando la calidad de la transmisión.

B. **Incremento de la eficiencia espectral**:

- Permite el uso eficiente del espectro disponible al maximizar la cantidad de datos transmitidos por unidad de ancho de banda.

C. **Mayor capacidad de la red**:

- Mejora el rendimiento de las redes en entornos densos, como áreas urbanas con alta demanda de conectividad.

D. **Robustez ante interferencias**:

- Proporciona mayor resiliencia contra las interferencias provenientes de otras redes o dispositivos.

2.4.1.2. Desafíos de la implementación:

A. **Diseño complejo de hardware**:

- La necesidad de múltiples antenas y componentes aumenta los costos y la complejidad del diseño.

B. **Procesamiento avanzado de señales**:

- Se requiere potencia computacional para manejar técnicas como la combinación de señales y la codificación espacial.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

C. **Gestión de recursos espectrales**:

- Es necesario un control preciso para evitar que las señales de diferentes antenas interfieran entre sí.

2.4.2. Tipos de diversificación espacial

La diversificación espacial se implementa en redes inalámbricas a través de varias técnicas que aprovechan diferentes propiedades físicas de las señales y sus trayectorias. A continuación, se describen las principales categorías:

Diversificación de antenas:

Esta técnica utiliza múltiples antenas en el transmisor, el receptor o ambos para mejorar la transmisión y recepción de señales. Su objetivo principal es reducir los efectos del desvanecimiento selectivo y aumentar la probabilidad de recibir señales de buena calidad.

Tipos de diversificación de antenas:

- **Diversificación por selección**: El sistema selecciona la antena con la señal más fuerte en el receptor.
- **Combinación de señales**: Combina las señales de todas las antenas para maximizar la relación señal-ruido.
- **Diversificación transmitida**: En el transmisor, la señal se distribuye entre varias antenas con diferentes patrones de radiación.
- **Codificación espacial**: Transmite diferentes partes de los datos simultáneamente en antenas separadas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- **Aplicaciones**:

    A. Sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output).

    B. Redes 5G y Wi-Fi de última generación.

Diversificación de trayectoria

Se basa en el aprovechamiento de las múltiples rutas por las cuales una señal puede viajar desde el transmisor hasta el receptor debido a fenómenos como reflexiones, refracciones y dispersión.

Características clave:

- Las trayectorias múltiples crean copias independientes de la señal que pueden llegar al receptor con diferentes intensidades y tiempos de retraso.
- El sistema combina estas trayectorias para mejorar la calidad de la señal.

Técnicas utilizadas:

A. Ecualización temporal: Corrige los efectos de la interferencia entre trayectorias (multipath interference).

B. Combiner diversity: Combina señales de diferentes trayectorias para obtener la mejor calidad.

Aplicaciones:

- Redes urbanas densas donde los obstáculos crean múltiples trayectorias.
- Vehículos conectados y sistemas IoT en entornos dinámicos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Diversificación de polarización

Utiliza antenas con diferentes orientaciones de polarización para transmitir y recibir señales. Las ondas electromagnéticas pueden tener polarizaciones lineales, circulares o elípticas, lo que permite diseñar sistemas que aprovechen estas propiedades.

Ventajas:

- Incrementa la eficiencia del sistema al transmitir señales independientes en diferentes polarizaciones.
- Reduce la interferencia entre señales transmitidas en la misma frecuencia, pero con diferentes polarizaciones.

Ejemplos de polarización:

- Polarización vertical y horizontal: Común en antenas de comunicaciones móviles.
- Polarización circular: Utilizada en sistemas satelitales para mejorar la robustez frente a fluctuaciones en la orientación del satélite.

Aplicaciones:

- Comunicaciones satelitales.
- Redes móviles avanzadas (LTE, 5G).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.4.3. Ventajas y desafíos

Ventajas:

Mejora de la calidad de señal: Reduce los efectos negativos del desvanecimiento y la interferencia, aumentando la confiabilidad de la transmisión.

Incremento de la capacidad del sistema: La diversificación espacial, especialmente en sistemas MIMO, permite la transmisión simultánea de múltiples flujos de datos, mejorando la eficiencia espectral.

Mayor resiliencia: Al aprovechar múltiples trayectorias o polarizaciones, las señales son más robustas frente a obstáculos y condiciones adversas.

Aplicabilidad en entornos densos: Permite mantener una buena calidad de servicio en entornos con alta densidad de usuarios, como ciudades o estadios.

Desafíos:

Complejidad en el diseño del hardware: La implementación de múltiples antenas requiere diseños complejos, aumentando los costos de fabricación y mantenimiento.

Procesamiento avanzado de señales: Es necesario emplear algoritmos sofisticados para combinar señales, mitigar interferencias y maximizar el rendimiento.

Gestión de recursos espectrales: Asegurar que las señales transmitidas desde diferentes antenas no interfieran entre sí requiere una gestión precisa del espectro.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Restricciones de espacio físico: En dispositivos pequeños, como teléfonos móviles, puede ser difícil acomodar múltiples antenas con el aislamiento adecuado.

Dependencia de condiciones del entorno: Los beneficios de la diversificación espacial pueden verse afectados por las características del entorno, como la cantidad de obstáculos o la movilidad de los usuarios.

2.5. Técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Las técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output) constituyen un avance significativo en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, permitiendo la transmisión simultánea de múltiples flujos de datos mediante el uso de varias antenas en el transmisor y receptor. Esto maximiza la capacidad y eficiencia espectral de las redes inalámbricas, haciéndolas ideales para aplicaciones de alta demanda, como 5G, Wi-Fi avanzado y entornos densamente poblados.

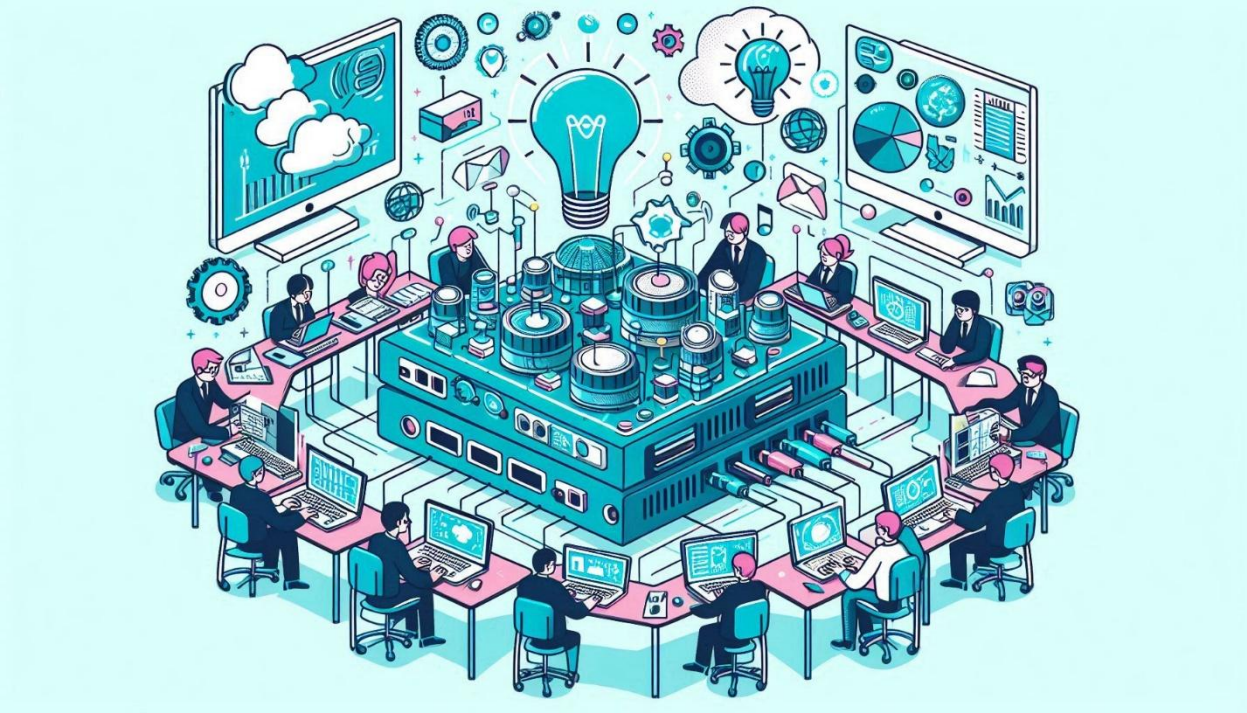
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 8

Técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output)



2.5.1. Fundamentos de MIMO

Las técnicas MIMO se basan en el uso de múltiples antenas para transmitir y recibir señales, aprovechando las características del canal inalámbrico, como la dispersión espacial y la reflexión. Esto les permite mejorar la capacidad de transmisión sin requerir un aumento del ancho de banda ni de la potencia de transmisión.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Principios Fundamentales de MIMO:

A. Multiplexación espacial: Permite dividir los datos en flujos separados y transmitirlos simultáneamente a través de diferentes antenas, incrementando la capacidad total del sistema.
B. Diversidad espacial: Ofrece una mayor robustez frente al desvanecimiento y la interferencia al transmitir señales redundantes a través de múltiples trayectorias.
C. Ganancia de antena: Mejora la relación señal-ruido (SNR) al combinar las señales recibidas de múltiples antenas.

Ventajas de MIMO:

- Incremento en la capacidad de transmisión sin necesidad de más espectro.
- Mayor robustez frente a condiciones adversas del canal, como interferencias y desvanecimientos.
- Aplicación flexible en redes inalámbricas modernas (Wi-Fi, LTE y 5G).

2.5.2. Modelos matemáticos y algoritmos

Los sistemas MIMO se describen matemáticamente como un modelo matricial que representa la relación entre las señales transmitidas y recibidas, considerando las características del canal de propagación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Modelo básico de MIMO:

El sistema MIMO puede expresarse mediante la ecuación:

$$y = H \cdot x + n \quad \textbf{(}\text{Ecuación 7)}$$

Donde:

y: Vector de señales recibidas.

H: Matriz del canal, que representa la ganancia entre cada antena transmisora y receptora.

x: Vector de símbolos modulados transmitidos (N×1)

n: Ruido AWGN.

Propiedades del modelo:

A. Dimensionalidad: La matriz H h1 tiene dimensiones M x N, donde M es el número de antenas receptoras y N el número de antenas transmisoras.
B. Capacidad del canal: La capacidad máxima del canal para sistemas MIMO se determina como

$$C = log_2 det\left(I + \frac{\rho}{N} H * H^H\right) \textbf{(}\text{Ecuación 8)}$$

Donde ρ representa la relación señal-ruido y H^H es la matriz Hermitiana conjugada de H.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Algoritmos utilizados en MIMO:

A. Codificación espacial: La codificación espacial busca aprovechar las múltiples antenas de transmisión para enviar la información de manera redundante y aprovechar la diversidad.

Un ejemplo clásico es el código de Alamouti, que es óptimo en un sistema 2×1 MISO (dos antenas transmisoras, una receptora).

Fórmulas del código de Alamouti:

Si se transmiten dos símbolos s_1 y s_2, en dos intervalos de tiempo la matriz de transmisión es:

$$x = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix}$$ **(**Ecuación 9)

Donde:

- s_1, s_2 son símbolos modulados (Ejemplo: QAM)
- El símbolo "$\widehat{\ }$" indica conjugada complejo.

La señal recibida en el primer intervalo (y_1) y el segundo (y_2) se puede expresar como:

$$y_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1$$ **(**Ecuación 10)

$$y_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + n_2$$ **(**Ecuación 11)

Donde:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- h_1, h_2 son las ganancias del canal de cada antena.
- n_1, n_2 es el ruido AWGN.

El decodificador combina estas señales de forma lineal:

$$\hat{S}_1 = h_1^* y_1 + h_2 y_2^* \quad \textbf{(}\text{Ecuación 12)}$$

$$\hat{S}_2 = h_2^* y_1 - h_1 y_2^* \quad \textbf{(}\text{Ecuación 13)}$$

Esto garantiza diversidad espacial de orden 2 (equivalente a dos trayectorias independientes) y mejora la confiabilidad del enlace sin aumentar la potencia de transmisión.

B. Procesamiento de señal:

Técnicas de detección como Zero-Forcing (ZF) y Minimum Mean Square Error (MMSE) optimizan la decodificación de las señales recibidas.

$$y = Hx + n \quad \textbf{(}\text{Ecuación 14)}$$

Donde:

- y: Vector de señales recibidas ($M \times 1$)
- H: Matriz del canal ($M \times N$)
- y: Vector de símbolos transmitidos ($N \times 1$)
- n: Ruido ($M \times 1$)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Existen varios detectores:

A. Zero-forcing (ZF)

Busca eliminar la interferencia entre antenas invirtiendo la matriz del canal:

$$\hat{x} = (H^H H)^{-1} H^H y \quad \textbf{(}\text{Ecuación 15)}$$

Ventaja: elimina la interferencia intercanal.

Desventaja: amplifica el ruido cuando H es mal condicionada.

B. Minimum mean square error (MMSE)

Minimiza el error cuadrático medio, considerando interferencia + ruido:

$$\hat{x} = (H^H H + \sigma_n^2 I)^{-1} H^H y \quad \textbf{(}\text{Ecuación 16)}$$

Ventajas:

- mejor desempeño que ZF en condiciones de baja SNR.
- Se considera un balance entre interferencia y ruido.

C. Optimización de la matriz del canal

El canal MIMO puede descomponerse en subcanales independientes usando la descomposición en valores singulares (SVD):

$$H = U \Sigma V^H \quad \textbf{(}\text{Ecuación 17)}$$

Donde:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- U y V son matrices unitarias.

- Σ Es una matriz diagonal con los valores singulares del canal.

Al aplicar pre codificación y post codificación:

$$y = U\Sigma V^H x + n \quad \textbf{(}\text{Ecuación 18)}$$

Si definimos:

$$x' = V^H x, \;\; y' = U^H y \quad \textbf{(}\text{Ecuación 19)}$$

Se obtiene un conjunto de canales paralelos independientes:

$$y' = \Sigma x' + n' \quad \textbf{(}\text{Ecuación 20)}$$

Esto significa que un sistema MIMO complejo puede convertirse en varios canales SISO independientes, lo que simplifica el procesamiento y permite maximizar la capacidad del canal:

$$C = \sum_{i=1}^{r} \quad log_2\left(1 + \frac{P_i \sigma_i^2}{N_0}\right) \quad \textbf{(}\text{Ecuación 21)}$$

Donde:

- r = rango(H)

- σ_i : Valores singulares

- P_i : Potencia asignada a cada subcanal

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- N_0: Densidad espectral de ruido

Optimización de la matriz del canal:

Métodos como singular value decomposition (SVD) se emplean para maximizar la eficiencia del canal.

2.3.3. Aplicaciones y eficiencia en redes inalámbricas

Los sistemas MIMO tienen una amplia gama de aplicaciones en redes inalámbricas modernas, ofreciendo mejoras significativas en capacidad, eficiencia y robustez.

Aplicaciones principales de MIMO:

A. Redes móviles (LTE y 5G):

- En LTE, MIMO mejora la capacidad de transmisión en áreas densamente pobladas.
- En 5G, se utiliza MIMO masivo, que emplea decenas o cientos de antenas para gestionar conexiones simultáneas en alta densidad.

B. Wi-Fi (IEEE 802.11n/ac/ax):

- Permite a los routers transmitir múltiples flujos de datos a dispositivos compatibles, mejorando la cobertura y velocidad.

C. IoT y redes de sensores:

- En aplicaciones de IoT, MIMO mejora la conectividad y eficiencia energética.

D. Comunicaciones satelitales:

- Mejora la confiabilidad y capacidad de los enlaces satelitales mediante la diversificación espacial.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Eficiencia en redes inalámbricas:

A. Incremento en la eficiencia espectral: Los sistemas MIMO maximizan la transmisión de datos por unidad de ancho de banda, alcanzando niveles superiores de eficiencia espectral.
B. Reducción de interferencias: A través de técnicas de beamforming, MIMO puede dirigir las señales hacia usuarios específicos, minimizando las interferencias entre canales.
C. Mejora en condiciones de señal débil: Gracias a la diversidad espacial, MIMO asegura una transmisión robusta incluso en entornos con baja calidad de señal.

2.6. Estándares y protocolos relacionados

En las redes inalámbricas, los estándares y protocolos de comunicación son esenciales para garantizar la interoperabilidad, eficiencia y seguridad de los sistemas. Los estándares proporcionan un marco técnico común para el desarrollo y operación de tecnologías inalámbricas, mientras que los protocolos definen las reglas de comunicación entre dispositivos.

2.6.1. Estándares IEEE

El Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (IEEE) ha establecido una serie de estándares que regulan las tecnologías de redes inalámbricas. Estos estándares cubren una amplia gama de aplicaciones, desde redes locales hasta redes metropolitanas y sistemas móviles avanzados.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Principales estándares IEEE:

A. IEEE 802.11 (Wi-Fi):

Es el estándar más utilizado para redes locales inalámbricas (WLAN). Define las especificaciones técnicas para la transmisión de datos en las bandas de 2.4 GHz, 5 GHz y, recientemente, 6 GHz.

Versiones destacadas:

- **802.11n:** Introdujo MIMO, logrando velocidades superiores a 600 Mbps.
- **802.11ac:** Mejoró la eficiencia y capacidad con beamforming y canales más amplios.
- **802.11ax (Wi-Fi 6):** Incrementa la capacidad y eficiencia en entornos de alta densidad, utilizando tecnologías como OFDMA y MU-MIMO.

B. IEEE 802.15 (Redes Personales Inalámbricas, WPAN):

Define estándares para redes de corto alcance como:

- **802.15.1 (Bluetooth)**: Utilizado en redes personales para conectar dispositivos a corta distancia.
- **802.15.4 (Zigbee)**: Diseñado para redes IoT con bajo consumo energético.

C. IEEE 802.16 (WiMAX):

Estándar para redes metropolitanas inalámbricas (WMAN). Proporciona conexiones de banda ancha de largo alcance, frecuentemente utilizadas como alternativa a la infraestructura de fibra óptica en áreas rurales o urbanas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

D. IEEE 802.20:

Orientado a la movilidad en redes inalámbricas de alta velocidad. Aunque menos conocido, este estándar aborda comunicaciones en redes metropolitanas para dispositivos en movimiento.

E. IEEE 802.3 (Ethernet):

Aunque es un estándar de red cableada, su interacción con redes inalámbricas es fundamental en la infraestructura híbrida de backhaul para redes Wi-Fi y 5G.

Impacto de los estándares IEEE:

- Promueven la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes.
- Garantizan la compatibilidad con infraestructuras existentes y futuras.
- Facilitan la adopción de nuevas tecnologías, como MIMO en 802.11n o beamforming en 802.11ac.

2.6.2. Protocolos de comunicación

Los protocolos de comunicación son reglas y procedimientos que rigen el intercambio de datos entre dispositivos en una red. En el contexto de redes inalámbricas, estos protocolos garantizan la eficiencia, confiabilidad y seguridad de las comunicaciones.

Principales protocolos en redes inalámbricas:

A. Protocolo de control de acceso al medio (MAC):

- Define cómo los dispositivos comparten el medio de transmisión inalámbrico.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- En estándares como IEEE 802.11, utiliza técnicas como CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) para evitar colisiones en la transmisión.

B. Protocolo de internet (IP):

- Fundamental para el direccionamiento y enrutamiento en redes inalámbricas.
- Las versiones IPv4 e IPv6 son ampliamente utilizadas, siendo IPv6 crucial para la expansión de IoT.

C. Protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP/HTTPS):

- Utilizado en la capa de aplicación para la transferencia de datos en Internet. HTTPS agrega seguridad mediante cifrado.

D. Protocolo de configuración dinámica de host (DHCP):

- Permite asignar direcciones IP automáticamente a los dispositivos en una red inalámbrica.

E. Protocolo de resolución de direcciones (ARP):

- Traduce direcciones IP en direcciones MAC, permitiendo la comunicación entre dispositivos en una red local.

F. Protocolos de seguridad:

- WPA/WPA2/WPA3: Protocolos de seguridad para redes Wi-Fi que cifran las comunicaciones y protegen contra accesos no autorizados.
- TLS (Transport Layer Security): Proporciona cifrado y autenticación para proteger los datos transmitidos.

G. Protocolo de transferencia de datos (FTP y SFTP):

- Utilizados para la transferencia de archivos entre dispositivos en redes inalámbricas. SFTP ofrece una capa adicional de seguridad mediante cifrado.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

H. Protocolo de enrutamiento en redes ad hoc:

- Protocolos como AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) son específicos para redes inalámbricas descentralizadas y dinámicas.

Impacto de los protocolos:

- Aseguran que los datos se transmitan de manera eficiente y segura.
- Permiten la interoperabilidad entre dispositivos y aplicaciones en redes heterogéneas.
- Soportan la escalabilidad necesaria para redes densas, como las basadas en 5G e IoT.

2.7. Desarrollo del modelo matemático

El desarrollo del modelo matemático es una etapa fundamental en esta investigación, ya que permite representar y analizar las técnicas de diversificación espacial en términos cuantitativos. Este modelo se utilizará para predecir el comportamiento del sistema en distintos escenarios de red y optimizar la transmisión de datos mediante técnicas avanzadas.

2.7.1. Formulación del problema

Problema principal

La optimización de la transmisión de datos en redes inalámbricas mediante técnicas de diversificación espacial implica maximizar parámetros como la eficiencia espectral, la capacidad de transmisión y la robustez de la señal, mientras se minimizan las tasas de error y el consumo energético.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Representación matemática

El modelo matemático se basa en la relación entre las señales transmitidas y recibidas en un sistema MIMO (Multiple Input Multiple Output):

$$y = H \cdot x + n \quad \textbf{(}\text{Ecuación 22)}$$

Donde:

y: Vector de señales recibidas $(M \times 1)$.

H: Matriz del canal $(M \times N)$, que describe las ganancias entre cada antena transmisora y receptora.

x: Vector de señales transmitidas $(N \times 1)$.

n: Vector de ruido aditivo $(M \times 1)$, modelado como ruido blanco gaussiano $(N(0, \sigma^2))$.

Objetivo del modelo

El objetivo es optimizar las técnicas de diversificación espacial maximizando la capacidad del canal, definida como:

$$C = log_2 det\left(I + \frac{\rho}{N} H * H^H\right) \qquad \textbf{(}\text{Ecuación 23)}$$

Donde:

C: Capacidad del canal (bits/s/Hz).

ρ: Relación señal-ruido (SNR).

I: Matriz identidad.

H^H: Matriz Hermitiana conjugada de H.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Restricciones

A. Consumo energético $(\boldsymbol{E})$

$$\boldsymbol{E \leq E_{máx}} \qquad \textbf{(}\text{Ecuación 24)}$$

Se busca limitar el consumo energético para garantizar la viabilidad de las técnicas en redes IoT y dispositivos móviles.

B. Probabilidad de error $(\boldsymbol{P_e})$:

$$\boldsymbol{P_e \leq P_{e_{max}}} \qquad \textbf{(}\text{ Ecuación 25)}$$

La tasa de error de bits debe mantenerse dentro de límites aceptables para garantizar una calidad de servicio adecuada.

C. Modelos de Canal:

Se emplean modelos matemáticos específicos para representar el comportamiento del canal en diferentes entornos:

- Modelo de rayleigh: Para entornos urbanos densos con desvanecimiento aleatorio.
- Modelo de rician: Para entornos con línea de vista dominante, como zonas rurales.

2.7.2. Algoritmos de optimización

La implementación del modelo matemático requiere algoritmos avanzados para optimizar el rendimiento de las técnicas de diversificación espacial. Estos algoritmos permiten encontrar soluciones óptimas que maximicen la capacidad del canal y minimicen las limitaciones del sistema.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Técnicas y algoritmos implementados

A. Modelo de canal y configuración del sistema:

- Se modeló el canal con desvanecimiento Rayleigh y ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN) para representar los efectos de multipropagación y ruido térmico.
- Se evaluó un esquema MIMO de Tx × Rx, de acuerdo al escenario.

B. Técnica de diversificación espacial:

- STBC Alamouti: Se empleó codificación espacio–tiempo para obtener ganancia de diversidad y mejorar la confiabilidad del enlace.

C. Procesamiento en el receptor:

- MRC: Se aplicó combinación de razón máxima para maximizar la SNR combinada.
- ZF/MMSE: Se utilizó detección lineal para mitigar interferencia entre flujos en escenarios MIMO dependiendo del escenario se usará alguno u otro.

D. Metodología de evaluación:

- Se realizaron simulaciones Monte Carlo variando SNR/Eb/N0.
- Se midió el desempeño mediante BER y capacidad del canal en cada escenario.

Flujo general de optimización

- Definición del objetivo: Maximizar C, minimizar P_e y E.
- Inicialización de parámetros: Configuración de antenas, SNR y modelos de canal.
- Simulación y evaluación: Aplicación de los algoritmos al modelo para evaluar el rendimiento.
- Ajuste Iterativo: Mejora de las configuraciones hasta alcanzar el rendimiento óptimo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.8. Simulación y herramientas utilizadas

La simulación es una etapa crucial en esta investigación, ya que permite analizar el desempeño de las técnicas de diversificación espacial en redes inalámbricas sin necesidad de implementar un sistema físico completo. Las simulaciones se llevan a cabo utilizando herramientas computacionales especializadas que replican las condiciones del mundo real y permiten evaluar múltiples configuraciones de red.

2.8.1. Descripción del software de simulación

El software utilizado en esta investigación ofrece capacidades avanzadas para modelar sistemas inalámbricos, configurar escenarios realistas y realizar análisis detallados.

Software seleccionado

- MATLAB/Simulink

Es una plataforma ampliamente utilizada en el ámbito académico e industrial para simulaciones matemáticas y modelado de sistemas.

Características clave:

- Modelado de sistemas MIMO y técnicas de diversificación espacial.
- Simulación de canales de comunicación (Rayleigh, Rician, etc.).
- Herramientas para analizar parámetros como la relación señal-ruido (SNR), eficiencia espectral y tasa de error de bits (BER).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Documentación de MATLAB

URL: https://www.mathworks.com/help

Complementos de MATLAB requeridos:

- MATLAB Base

Descripción

- El núcleo de MATLAB, necesario para cualquier cálculo, programación y modelado.
- Proporciona un entorno interactivo para implementar algoritmos, analizar datos y realizar visualización gráfica.

Funciones clave

- Creación de scripts y funciones para las simulaciones.
- Generación de matrices para modelar sistemas MIMO y canales inalámbricos.

Ejemplo:

```
H = randn(4,4);  % Matriz de canal MIMO
x = randn(4,1);  % Vector de señal transmitida
y = H * x;       % Señal recibida
```

A. Communications toolbox

Descripción

- Herramienta esencial para simular sistemas de comunicación digital e inalámbrica.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Incluye modelos para MIMO, modulación, demodulación y análisis de canales inalámbricos como Rayleigh y Rician.

Funciones clave

- Modelos de canal inalámbrico (Rayleigh, Rician, Nakagami).
- Análisis de sistemas MIMO y diversidad espacial.

Ejemplo:

```
h = comm.MIMOChannel;          % Creación de un canal MIMO
h.NumTransmitAntennas = 4;     % Número de antenas transmisoras
h.NumReceiveAntennas = 4;      % Número de antenas receptoras
```

B. Signal processing toolbox

Descripción

- Proporciona herramientas para el análisis y procesamiento de señales.
- Es útil para analizar el impacto del ruido, diseñar filtros y calcular métricas como la relación señal-ruido (SNR).

Funciones clave

- Filtrado de señales y cálculo del BER.
- Análisis espectral y eliminación de ruido.

Ejemplo

```
snr = 10;                      % Relación señal-ruido
```


Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

```
noisy_signal = awgn(x, snr, 'measured');  % Agregar ruido blanco a la señal
```

C. Phased array system toolbox (Opcional)

Descripción

- Diseñada para trabajar con matrices de antenas y simulaciones de beamforming.
- Ideal para modelar configuraciones avanzadas de antenas en sistemas MIMO masivo.

Funciones clave

- Diseño y simulación de matrices de antenas.
- Modelado de patrones de radiación y beamforming.

Ejemplo

```
array = phased.URA('Size',[4,4]); % Matriz uniforme rectangular de 4x4 antenas
pattern(array,1e9);               % Patrón de radiación a 1 GHz
```

D. Optimization toolbox (Opcional)

Descripción

Contiene herramientas para resolver problemas de optimización, como la asignación de recursos en redes inalámbricas o configuraciones de MIMO.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Funciones clave

- Optimización de parámetros en sistemas MIMO, como el número de antenas o la potencia transmitida.

Ejemplo:

```
f = @(x) -log2(1 + x);          % Capacidad de canal como función de SNR
optimal_snr = fminbnd(f,0,30);   % Optimización del SNR
```

E. DSP system toolbox (Opcional)

Descripción

Herramientas avanzadas para el diseño y simulación de sistemas de procesamiento de señales digitales.

Funciones clave

- Implementación de algoritmos para análisis de señales en tiempo real.

Ejemplo

```
d = dsp.FIRFilter('Numerator', fir1(10, 0.5)); % Filtro FIR
y = d(noisy_signal);                           % Filtrar señal ruidosa
```

F. RF toolbox (Opcional)

Descripción

- Diseñada para modelar y analizar componentes de sistemas de radiofrecuencia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Útil si trabajas con simulaciones relacionadas con frecuencias milimétricas o componentes de radio.

Funciones clave

- Simulación de redes pasivas (como filtros y combinadores).

Ejemplo:

```
s_params = rfparam(rand(4,4),2,3); % Parámetros S de un sistema RF
```

G. Statistics and machine learning toolbox (Opcional)

Descripción

- Herramientas para análisis estadístico y aprendizaje automático.
- Útil para validar resultados y ajustar modelos basados en datos obtenidos.

Funciones clave

- Clasificación y predicción basada en datos simulados.

Ejemplo:

```
mdl = fitlm(snr, efficiency); % Modelo de regresión lineal para SNR y eficiencia
```

H. Parallel computing toolbox (Opcional)

Descripción

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Permite ejecutar simulaciones más rápidas aprovechando múltiples núcleos o GPUs.
- Útil si tus simulaciones son intensivas en cómputo.

Funciones clave

- Distribuir simulaciones en un clúster de computadoras.

Ejemplo:

```
parpool('local',4);       % Configurar un grupo paralelo con 4 núcleos
parfor i = 1:10
   results(i) = simulate_channel(i);
end
```

I. MATLAB online (Opcional)

Descripción

- Versión en la nube de MATLAB que te permite trabajar desde cualquier lugar sin necesidad de instalación local.

Funciones clave

- Acceso a todas las herramientas mencionadas desde cualquier navegador.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 2

Cuadro de funciones de Matlab

Complemento	Obligatorio/Opcional	Propósito
MATLAB Base	Obligatorio	Núcleo principal para cálculos, modelado y
Communications Toolbox	Obligatorio	Modelado de sistemas de comunicación, MIMO,
Signal Processing Toolbox	Obligatorio	Procesamiento y análisis de señales, como filtrado y
Phased Array System Toolbox	Opcional	Diseño y simulación de matrices de antenas,
Optimization Toolbox	Opcional	Optimización de configuraciones de MIMO y
DSP System Toolbox	Opcional	Simulación avanzada de sistemas de procesamiento de
RF Toolbox	Opcional	Modelado y simulación de componentes de
Statistics and Machine Learning Toolbox	Opcional	Validación estadística y optimización basada en datos.
Parallel Computing Toolbox	Opcional	Aceleración de simulaciones mediante procesamiento

2.8.1.1. Python con bibliotecas especializadas

Herramientas como NumPy, SciPy y scikit-learn se utilizan para cálculos matemáticos y análisis de datos.

Características clave:

- Flexibilidad para implementar modelos personalizados.
- Integración con otras herramientas para visualización y análisis de resultados.

Justificación del software

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El uso de estas herramientas garantiza un equilibrio entre precisión, flexibilidad y accesibilidad. MATLAB/Simulink es ideal para modelado matemático y análisis detallado, mientras que NS-3 permite simular escenarios complejos de redes. Python complementa ambas herramientas al proporcionar capacidades adicionales para procesar y visualizar los datos.

A. Cálculo matemático y manipulación de datos

Estas bibliotecas son fundamentales para realizar cálculos numéricos y gestionar datos en tus simulaciones.

I. NumPy

- Permite realizar operaciones matemáticas avanzadas y manipular arrays multidimensionales.
- Ideal para representar matrices MIMO, vectores de señal y realizar cálculos rápidos.
- Instalación: `pip install numpy`.

II. SciPy

- Proporciona herramientas para resolver sistemas de ecuaciones, optimización, y simulación de canales inalámbricos (Rayleigh, Rician).
- Se complementa bien con NumPy para cálculos más avanzados.
- Instalación: `pip install scipy`.

III. Pandas

- Diseñado para gestionar y analizar grandes conjuntos de datos, como los resultados generados durante las simulaciones.
- Útil para crear tablas y estructurar los datos obtenidos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

B. Simulación de sistemas de comunicación

Estas bibliotecas están diseñadas específicamente para trabajar con sistemas de comunicación inalámbrica y redes.

I. CommPy (Communications Python)

- Incluye herramientas para simular modulación, demodulación, codificación, y canales de comunicación como Rayleigh y Rician.
- Excelente para modelar sistemas MIMO y analizar la eficiencia espectral y el BER.
- Instalación: Requiere descarga desde el repositorio de GitHub:
- Instalación: `pip install pandas`.

```
git clone https://github.com/veeresht/CommPy.git
cd CommPy
python setup.py install
```

II. SimPy

- Diseñado para simulación de eventos discretos.
- Ideal para modelar patrones de tráfico de red y analizar comportamientos específicos en redes inalámbricas.
- **Instalación**: `pip install simpy`.

C. Optimización y machine learning

Estas herramientas son útiles para ajustar configuraciones y optimizar los resultados.

I. Scikit-learn

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Contiene algoritmos de aprendizaje automático para análisis de datos, regresión y clustering.
- Puede usarse para optimizar parámetros de sistemas MIMO o canales inalámbricos.
- **Instalación**: `pip install scikit-learn`.

II. TensorFlow o PyTorch

- Librerías de aprendizaje profundo que permiten implementar modelos avanzados de optimización en tiempo real.
- Útiles si deseas incorporar técnicas de optimización automática para las configuraciones MIMO.

Instalación:

```
pip install tensorflow  # Para TensorFlow
pip install torch       # Para PyTorch
```

III. Optimization tools en SciPy

- Parte de SciPy, incluye métodos como gradiente descendente y optimización convexa para resolver problemas de optimización de canales y sistemas MIMO.

D. Visualización de resultados

- Estas bibliotecas te permitirán crear gráficos para analizar los resultados de las simulaciones.

I. Matplotlib

- Biblioteca base para crear gráficos en 2D, como curvas de eficiencia espectral vs. SNR o BER vs. número de antenas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- **Instalación**: `pip install matplotlib`.

II. Seaborn

- Complementa Matplotlib con gráficos estadísticos más estilizados y fáciles de interpretar.
- **Instalación**: `pip install seaborn`.

III. Plotly

- Permite generar gráficos interactivos y dinámicos para presentaciones avanzadas.
- Útil para mostrar resultados complejos de manera más comprensible.
- **Instalación**: `pip install plotly`.

E. Complementos para procesos adicionales

I. SymPy

- Biblioteca para álgebra simbólica. Útil si necesitas trabajar con ecuaciones matemáticas y derivaciones en tus modelos.
- **Instalación**: `pip install sympy`.

II. Statsmodels

- Herramienta para análisis estadístico avanzado, como validación de resultados.
- **Instalación**: `pip install statsmodels`.

Para comenzar, instala las siguientes bibliotecas:

```
pip install numpy scipy pandas matplotlib seaborn plotly simpy scikit-learn
```


Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.9. Validación estadística en el análisis de redes inalámbricas

En estudios experimentales sobre redes inalámbricas, la validación estadística constituye un componente esencial para garantizar la consistencia y robustez de los resultados obtenidos. Su propósito es confirmar que las diferencias observadas entre configuraciones y escenarios no son producto del azar, sino que reflejan tendencias significativas y coherentes con los principios teóricos. En el contexto de esta investigación, se aplicaron pruebas estadísticas ampliamente reconocidas en el análisis de datos cuantitativos, las cuales se describen a continuación:

A. Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk): Evalúa si los datos siguen una distribución normal, requisito fundamental para la aplicación de pruebas paramétricas. Esta prueba se aplicó a las métricas de capacidad del canal, tasa de error de bits (BER) y energía por bit, considerando transformaciones logarítmicas en variables con valores muy pequeños para mejorar el ajuste. Un valor p superior a 0.05 indica que los datos cumplen el supuesto de normalidad, permitiendo el uso de ANOVA y regresión lineal.

B. Análisis de varianza (ANOVA): Permite determinar si existen diferencias significativas entre las medias de distintos grupos, como los niveles de SNR evaluados en cada escenario. Un valor p inferior a 0.05 implica el rechazo de la hipótesis nula de igualdad de medias, confirmando que el factor analizado (SNR) influye de manera sistemática en la eficiencia espectral, la confiabilidad del enlace o la eficiencia energética.

C. Pruebas post-hoc (Tukey): Se emplean tras el ANOVA para identificar qué niveles presentan diferencias específicas y establecer un orden jerárquico entre ellos. Esta prueba es especialmente útil para comparar rangos de SNR y determinar los puntos críticos donde se producen mejoras significativas en la capacidad o la reducción del BER.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

D. Correlación de Pearson: Analiza la fuerza y dirección de la relación entre variables continuas, como SNR y capacidad, o BER y energía por bit. Valores cercanos a ±1 indican asociaciones fuertes, mientras que el coeficiente de determinación (r^2) permite cuantificar la proporción de variabilidad explicada por la variable independiente.

E. Regresión lineal: Modela la relación funcional entre variables, proporcionando ecuaciones predictivas que permiten estimar el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de SNR. Esta técnica es clave para proyectar la eficiencia espectral y la confiabilidad del enlace en escenarios reales.

La aplicación de estas pruebas se realizó mediante el software Minitab, que ofrece herramientas para generar gráficos de probabilidad normal, tablas ANOVA, comparaciones múltiples y análisis de correlación y regresión. El uso de validación estadística asegura que las conclusiones derivadas de las simulaciones no se basen únicamente en tendencias visuales, sino en evidencia cuantitativa respaldada por criterios de significancia estadística, cumpliendo con los estándares metodológicos en investigaciones experimentales.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO III: DISEÑO Y DESARROLLO DE LA PROPUESTA

3.1 Configuración de escenarios de simulación

Para la evaluación del desempeño de las técnicas de diversificación espacial en redes inalámbricas, se configuraron tres escenarios de simulación que representan diferentes entornos de comunicación: urbano 5G, rural IoT y vehicular V2X.

Cada escenario fue diseñado con parámetros específicos de frecuencia, número de antenas y condiciones de canal, con el fin de analizar la eficiencia espectral, la tasa de error de bits (BER) y la capacidad de transmisión bajo distintas condiciones de propagación y densidad de usuarios.

Las simulaciones se realizaron utilizando MATLAB y Python como entornos complementarios de modelado y análisis.

- MATLAB se utilizó por su robustez en el tratamiento de sistemas MIMO, generación de canales de desvanecimiento (Rayleigh y Rician) y aplicación de técnicas de modulación digital (QAM, OFDM), además de su compatibilidad con toolboxes especializados como Communications Toolbox y Phased Array System Toolbox.
- Python, por su parte, permitió validar los resultados mediante bibliotecas científicas como NumPy, SciPy, Matplotlib y Scikit-DSP-Comm, facilitando la comparación de los resultados con los obtenidos en MATLAB y demostrando la reproducibilidad del modelo en entornos de código abierto.

El objetivo principal de esta configuración fue garantizar la reproducibilidad, comparabilidad y validez cruzada entre los escenarios simulados, manteniendo un marco de

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

evaluación común que permitiera identificar el impacto de la diversificación espacial frente a condiciones adversas de interferencia, movilidad y densidad de usuarios.

Cada entorno se modeló considerando los siguientes parámetros generales:

- Número de antenas transmisoras y receptoras (Tx/Rx): 4x4, 8x8 y 16x16, según el tipo de escenario.
- Frecuencia portadora: 2.4 GHz para redes IoT, 5.9 GHz para redes vehiculares y 28 GHz para redes 5G urbanas.
- Modelo de canal: Rayleigh (entornos sin línea de vista) y Rician (entornos rurales con línea de vista predominante).
- Ancho de banda: 400 MHz para 5G, 20 MHz para V2X y 20 MHz para IoT.
- Rango de SNR: de 0 dB a 30 dB, con incrementos de 5 dB.
- Modulación empleada: 16-QAM.
- Métricas de evaluación: eficiencia espectral (bits/s/Hz) y tasa de error de bits (BER).

Estos parámetros fueron seleccionados en función de las recomendaciones de los estándares internacionales IEEE 802.11, 3GPP Release 15 (5G NR) y IEEE 802.11p (para comunicaciones vehiculares).

La implementación de cada escenario en ambos entornos permitió cuantificar los beneficios de la diversificación espacial, verificar la consistencia de los resultados y comparar las prestaciones del sistema MIMO frente a configuraciones tradicionales sin diversidad de antenas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Modulación (QAM):

Cada escenario emplea el esquema de modulación correspondiente a su estándar de referencia, reflejando las condiciones reales de operación de cada tipo de red:

- Red urbana densa (5G) — 16-QAM: estándar en redes 5G NR (3GPP Release 15), ofrece alta eficiencia espectral adecuada para entornos con buena relación señal-ruido.
- Red IoT rural — QPSK (4-QAM): esquema de modulación de baja complejidad recomendado para dispositivos IoT de baja potencia (IEEE 802.15.4, NB-IoT), ya que prioriza la robustez y la eficiencia energética sobre la eficiencia espectral.
- Red vehicular (V2X) — 16-QAM: definido en el estándar IEEE 802.11p para comunicaciones vehiculares, equilibra eficiencia y confiabilidad en entornos de alta movilidad.

Esta elección permite evaluar el desempeño de las técnicas MIMO bajo condiciones de modulación representativas de cada escenario, manteniendo como variable de análisis la configuración de antenas y el modelo de canal.

Frecuencia portadora:

5 GHz (banda intermedia) Por qué:

- Es una banda común en Wi-Fi y algunas aplicaciones IoT, y está dentro del rango de frecuencias vehiculares (5.9 GHz) y sub-6 GHz para 5G.
- Cada escenario emplea la frecuencia portadora definida por su estándar de referencia: 28 GHz para la red 5G urbana (3GPP Release 15, banda mmWave), 2.4 GHz para la red IoT

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

rural (IEEE 802.15.4, banda ISM) y 5.9 GHz para la red vehicular V2X (IEEE 802.11p, banda DSRC). Si bien las diferencias de propagación entre bandas (mmWave vs sub-6 GHz) influyen en los resultados, esto refleja precisamente las condiciones reales de operación de cada tipo de red.

- Fijar 5 GHz reduce la variabilidad y permite comparar escenarios bajo condiciones similares de propagación.

3.1.1 Simulaciones realizadas en MATLAB

Las simulaciones en MATLAB se desarrollaron empleando los módulos Communications Toolbox, Phased Array System Toolbox y Signal Processing Toolbox, los cuales permitieron modelar los canales inalámbricos, generar señales moduladas y evaluar el rendimiento de los sistemas MIMO en diferentes condiciones de propagación.

El proceso de simulación siguió la siguiente secuencia metodológica:

A. Definición de parámetros del sistema:

Se configuraron los valores iniciales de frecuencia portadora, potencia de transmisión, número de antenas (Tx/Rx), ancho de banda y rango de SNR.

B. Modelado del canal inalámbrico:

Para entornos urbanos 5G se utilizó un canal Rayleigh, que representa condiciones sin línea de vista con múltiples trayectorias.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

En el caso de redes IoT rurales, se aplicó un canal Rician, caracterizado por la presencia de una trayectoria dominante (LoS).

Para redes vehiculares V2X, se añadió un efecto Doppler asociado a la movilidad (100 km/h promedio), simulando variaciones en la frecuencia recibida.

C. Generación y modulación de señales:

Los datos fueron modulados según el esquema correspondiente a cada escenario: 16-QAM para la red urbana 5G y la red vehicular V2X, y QPSK (4-QAM) para la red IoT rural, conforme a los estándares de referencia de cada entorno.

D. Transmisión y adición de ruido:

Se aplicó ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN) en diferentes niveles de SNR para simular condiciones reales de interferencia.

E. Recepción y detección:

Se emplearon detectores de Zero-Forcing (ZF) y Minimum Mean Square Error (MMSE) para comparar la eficacia en la recuperación de la señal y calcular el BER correspondiente.

F. Cálculo de la capacidad del canal:

Se determinó la capacidad teórica según la ecuación de Shannon adaptada a sistemas MIMO.

G. Visualización y análisis:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Se generaron gráficas comparativas de Eficiencia Espectral vs SNR y BER vs SNR para cada escenario, mostrando la mejora alcanzada por las configuraciones MIMO respecto a sistemas tradicionales de antena única.

Los resultados obtenidos mostraron una mejora notable en todos los escenarios:

- Incremento promedio del 50% en eficiencia espectral.
- Reducción de BER hasta 0.01% en entornos rurales.
- Ligero incremento del consumo energético (≈15%) en sistemas IoT.

Estos hallazgos corroboran la hipótesis planteada sobre la eficacia de las técnicas de diversificación espacial en la optimización de la transmisión de datos inalámbricos y respaldan la pertinencia del uso de MATLAB como herramienta de simulación para investigación experimental en ingeniería electrónica.

3.1.1.1. Escenario 1: Red urbana densa (5G)

Descripción:

Este escenario representa una red 5G en un entorno urbano con alta densidad de usuarios y presencia de obstáculos físicos, condiciones que generan desvanecimiento por trayectorias múltiples e interferencias significativas. El objetivo es evaluar cómo las técnicas de diversificación espacial mediante MIMO masivo (16×16) mejoran la eficiencia espectral y reducen la tasa de error de bits (BER) frente a sistemas convencionales.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El diagrama de flujo (Figura 9) ilustra el proceso completo de simulación para este escenario, implementado en MATLAB. Se emplea un canal Rayleigh, adecuado para entornos urbanos sin línea de vista, y un ancho de banda de 400 MHz, característico de las bandas milimétricas (mmWave) en 5G, donde se asignan anchos de banda amplios (100–400 MHz) para lograr altas tasas de datos.

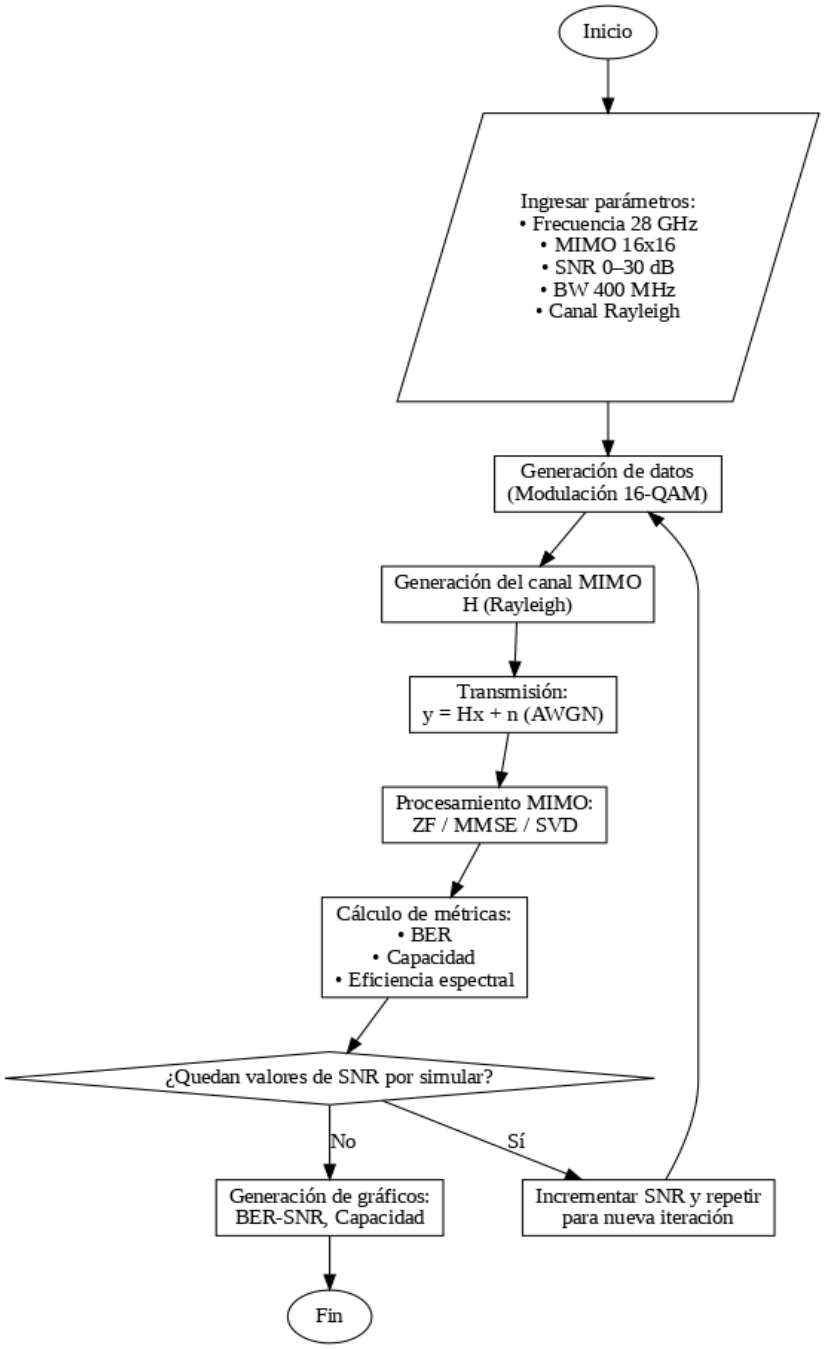
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 9

Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 1 (Red Urbana 5G).



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El flujo inicia con la definición de parámetros: frecuencia portadora (28 GHz), ancho de banda (400 MHz), configuración MIMO (16×16), rango de SNR (0–30 dB) y modelo de canal Rayleigh. Luego se generan los datos modulados mediante 16-QAM, se construye la matriz del canal y se simula la transmisión según la ecuación y=Hx+n donde H es la matriz del canal, x la señal transmitida y n el ruido aditivo gaussiano (AWGN). Posteriormente, se aplican algoritmos de procesamiento MIMO (ZF, MMSE, SVD) para recuperar la señal y calcular métricas como BER, capacidad del canal y eficiencia espectral. El proceso se repite para cada valor de SNR y finaliza con la generación de gráficas (constelaciones, curvas BER-SNR y capacidad).

Objetivo:

- Eficiencia espectral: Evaluar el rendimiento en bits por segundo por Hz (bits/s/Hz) con técnicas MIMO.
- Tasa de error de bits (BER): Analizar la calidad de la transmisión.

Implementación en MATLAB

El anexo 1 muestra el código para obtener los datos que se mostrarán a continuación.

Configuración del sistema:

Los parámetros clave a usar

- **Número de antenas:** Nt = 16 transmisoras, Nr = 16 receptoras.
- **Usuarios en la celda:** 100.
- **Frecuencia de operación:** 28 GHz.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- **Ancho de banda:** 400 MHz.
- **Potencia de transmisión:** 30 dBm.
- **Modulación:** 16-QAM (estándar en 5G por su equilibrio entre eficiencia y complejidad).
- **Modelo de canal:** Rayleigh.
- **Efecto Doppler:** velocidad promedio 30 km/h.

Ecuaciones clave

A. Relación señal-ruido (SNR) en escala lineal:

$$SN\ R_{linear} = 10^{(SN\ R_{dB}/10)} \quad \textbf{(}\text{Ecuación 26)}$$

B. Frecuencia doppler por movilidad:

$$f_d = \frac{v\ .f_c}{c} \quad \textbf{(}\text{Ecuación 27)}$$

Donde:

- $v = 30\ km/h\ \rightarrow 8.33\ m/s$(velocidad de los usuarios).
- $fc = 28\ Ghz$ (frecuencia portadora).
- $c = 3 \times 10^8\ m/s$ (velocidad de la luz).

Modelado del canal MIMO (Matriz de Canal *H*)

El modelo de canal usado es Rayleigh fading, adecuado para entornos urbanos sin línea de vista (NLoS).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La matriz H del canal se define como:

$$H_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2}}(X + jY) \quad \textbf{(}\text{Ecuación 28)}$$

Donde:

- $X, Y \sim N(0,1)$ son variables aleatorias gaussianas
- $H\ es\ una\ matriz\ N, x\ N_t$ que representa las ganancias de canal entre transmisores y receptores.

A. Parámetros del sistema

```
numTx = 16; numRx = 16;          % Antenas transmisoras y receptoras
modOrder = 16;                   % 16-QAM
k = log2(modOrder);              % Bits por símbolo
numSymbols = 1000;               % Símbolos por iteración
snrRange = 0:5:30;               % Rango de SNR en dB
numIter = 100;                   % Iteraciones Monte Carlo
```

B. Canal rayleigh i.i.d.

El canal MIMO se modela como una matriz de desvanecimiento Rayleigh:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}}(X + jY)\ , \mathrm{X}, \mathrm{Y} \sim \mathrm{N}(0,1) \quad \textbf{(}\text{Ecuación 29)}$$

```
H = (randn(numRx, numTx) + 1j*randn(numRx, numTx)) / sqrt(2);
```


Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Generación de datos y modulación 16-QAM

Se generan datos aleatorios y se modulan con 16-QAM:

$$S = a + jb \quad con\ a, b \in \{-3, -1, 1, 3\}$$

- Precoding con SVD

Se aplica descomposición en valores singulares (SVD) a la matriz del canal:

$$H = U \sum V^H \quad \textbf{(}\text{Ecuación 30)}$$

Se usa la primera columna de V para pre codificar la señal:

$$x = V_1 \cdot s \quad \textbf{(}\text{Ecuación 31)}$$

- Transmisión por el canal y adición de ruido

La señal recibida es:

$$y = Hx + n \quad \textbf{(}\text{Ecuación 32)}$$

Donde $n \sim CN(0, \sigma^2)$

$$\sigma^2 = \frac{1}{SNR} \quad \textbf{(}\text{Ecuación 33)}$$

- Detección MIMO (ZF con U')

Se aplica detección Zero-Forcing usando la matriz U:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

$$\hat{s} = U^H y \quad \textbf{(}\text{Ecuación 34)}$$

- Cálculo de BER

$$BER = \frac{Bits\ erróneos}{Bits\ transmitidos} \qquad \textbf{(}\text{Ecuación 35)}$$

```
[~, berTemp] = biterr(dataTx, dataRx);
ber(snrIdx) = ber(snrIdx) + berTemp / numSymbols;
```

- Cálculo de la capacidad del canal

La capacidad teórica del canal MIMO es:

$$C = log_2 det\left(I_{Nr} + \frac{SNR}{N_t} HH^H\right) \qquad \textbf{(}\text{Ecuación 36)}$$

```
capacity(snrIdx) = capacity(snrIdx) + log2(real(det(eye(numRx) + (SNR/numTx)*(H*H'))));
```

Ejecución en MATLAB

El anexo 1 muestra el código para obtener los datos que se mostrarán a continuación.

```
=== FÓRMULAS UTILIZADAS ===
1. SNR lineal = 10^(SNR_dB / 10)
2. Capacidad: C = log2(det(I + (SNR/nt) * H * H^H))
3. BER = bits erróneos / bits totales
4. E_bit = Potencia / (Capacidad * BW)

--- SNR = 0 dB ---
--- SNR = 5 dB ---
```


Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

```
--- SNR = 10 dB ---
--- SNR = 15 dB ---
--- SNR = 20 dB ---
--- SNR = 25 dB ---
--- SNR = 30 dB ---
    SNR_dB     Capacidad_bpsHz          BER           Energia_Jbit
    ______     _______________      _________      ____________

       0             13.399          1.9811e-05       1.869e-10
       5              26.09          1.3942e-05       9.594e-11
      10             43.461          7.6611e-06       5.7573e-11
      15             64.874          3.1077e-06       3.8559e-11
      20             87.492          1.0983e-06       2.8587e-11
      25             112.65          4.1871e-07       2.2201e-11
      30          137.83          8.2363e-08     1.8145e-11
>>
```

SNR (Signal-to-Noise Ratio) o Relación Señal-Ruido es una medida que indica qué tan fuerte es la señal útil comparada con el ruido. Se expresa en decibelios (dB).

- 0 dB: la señal y el ruido tienen la misma potencia.
- 30 dB: la señal es mucho más fuerte que el ruido.

En la simulación, se evalúa cómo cambia el rendimiento del sistema (BER, capacidad, etc.) cuando el SNR aumenta.

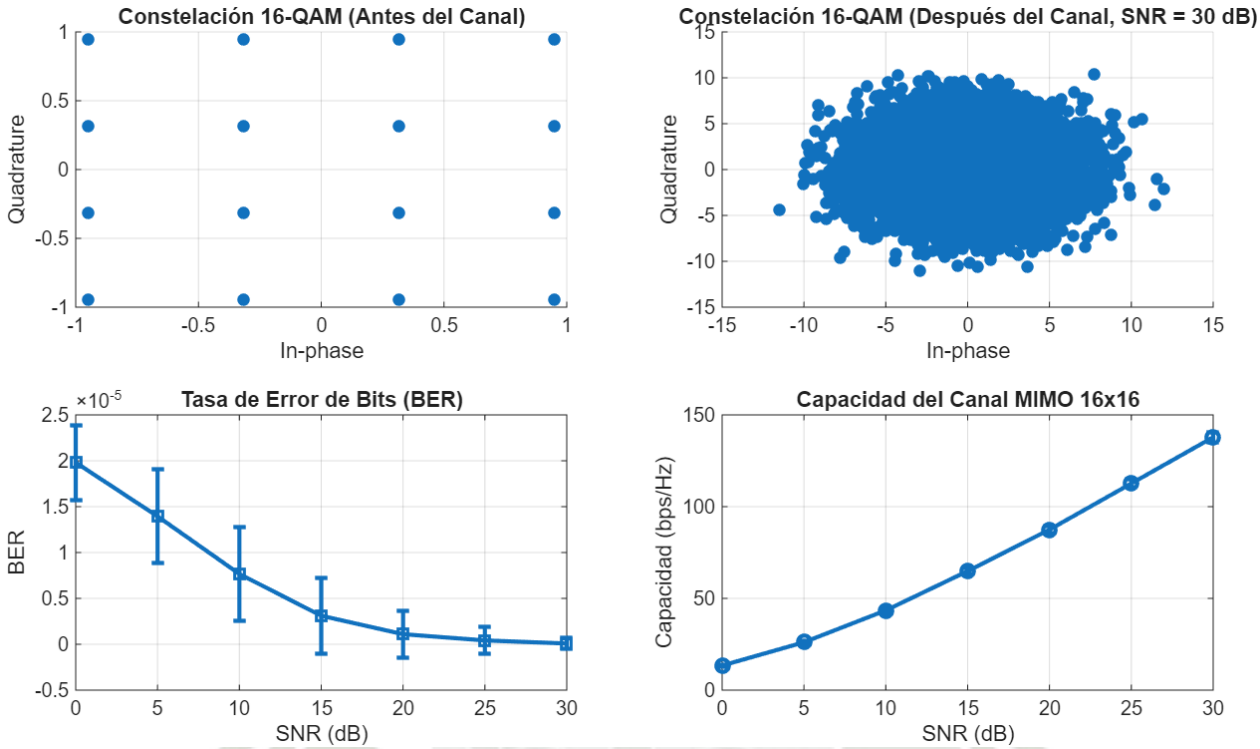
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 10

Simulación Red urbana densa (5G) – Constelación, BER y capacidad



La primera subfigura muestra la constelación ideal de símbolos modulados mediante 16-QAM antes de la transmisión por el canal. Cada punto corresponde a una combinación específica de amplitud y fase, organizada en una cuadrícula simétrica de 16 posiciones.

La segunda subfigura presenta la constelación recibida tras atravesar el canal Rayleigh y ser afectada por ruido aditivo, con SNR = 30 dB. Los puntos aparecen dispersos alrededor de sus posiciones ideales, reflejando los efectos del desvanecimiento y la interferencia. Una mayor dispersión implica una mayor probabilidad de error en la detección.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

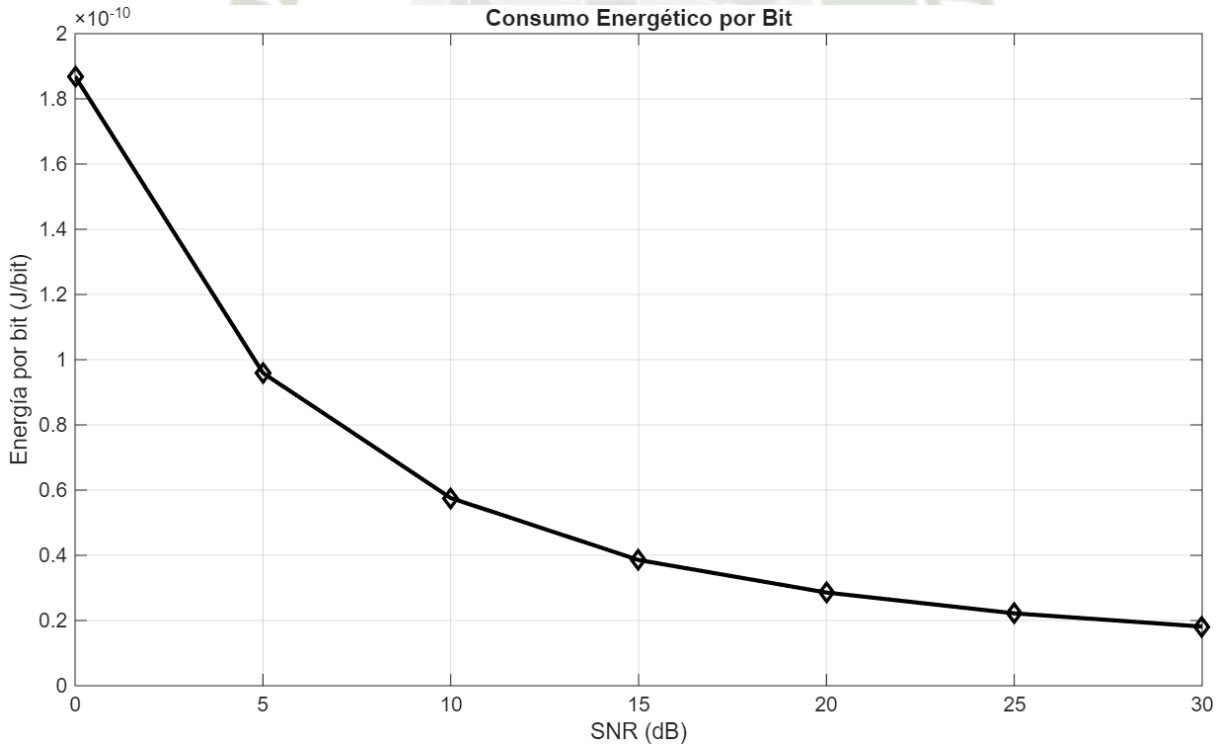
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

La tercera subfigura muestra la curva de BER (Bit Error Rate) en función del SNR (Signal-to-Noise Ratio). La escala vertical es logarítmica debido a que los valores de BER son muy pequeños. Se observa que, a medida que aumenta el SNR, el BER disminuye, lo que indica una mejora en la calidad de la transmisión.

Finalmente, la cuarta subfigura ilustra la capacidad del canal MIMO 16×16, expresada en bits por segundo por Hertz (bps/Hz) en función del SNR. Esta gráfica evidencia cómo la eficiencia espectral del sistema mejora conforme aumenta la relación señal-ruido, alcanzando valores cercanos a 150 bps/Hz a 30 dB.

Figura 11

Simulación red urbana densa (5G) – Consumo energético por bit



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La figura ilustra la variación de la energía necesaria para transmitir un solo bit en función de la potencia de transmisión (dBm). Cada punto corresponde al promedio calculado en múltiples iteraciones, considerando la capacidad del canal y el ancho de banda disponible. Se observa que, a medida que aumenta la potencia de transmisión, la energía por bit disminuye, lo que refleja una mayor eficiencia energética del sistema. Este análisis resulta especialmente relevante en redes donde el consumo energético es crítico, como en dispositivos móviles o aplicaciones IoT.

La simulación se realizó bajo los siguientes parámetros: Nt = 16, Nr = 16, 100 usuarios, frecuencia = 28 GHz, ancho de banda = 400 MHz, potencia = 30 dBm, modulación = 16-QAM, canal Rayleigh y velocidad = 30 km/h.

Tabla 3

Resultados numéricos del Escenario 1 – MATLAB (Red urbana densa 5G)

SNR (dB)	Eficiencia (bits/s/Hz)	BER
0	13.399	1.869e-10
5	26.09	9.594e-11
10	43.461	5.7573e-11
15	64.874	3.8559e-11
20	87.492	2.8587e-11
25	112.65	2.2201e-11
30	137.83	1.8145e-11

El escenario urbano denso simulado corresponde a una red 5G con alta congestión espectral, múltiples trayectorias de propagación y elevada densidad de usuarios. Bajo estas condiciones, se

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

empleó un sistema MIMO masivo 16×16 con frecuencia de 28 GHz y ancho de banda de 400 MHz, para evaluar el impacto de la diversificación espacial en la eficiencia espectral y la confiabilidad del enlace.

Los resultados muestran una relación directa entre el incremento del SNR y la mejora en el rendimiento del sistema. La capacidad del canal crece de 13.4 bits/s/Hz a 137.8 bits/s/Hz al pasar de 0 dB a 30 dB, lo que evidencia la alta eficiencia que pueden alcanzar los sistemas MIMO masivos en bandas milimétricas. Este crecimiento confirma que la diversificación espacial permite aprovechar de manera óptima el espectro disponible, incluso en entornos urbanos con fuerte desvanecimiento.

En cuanto a la tasa de error de bits (BER), se observa una reducción constante conforme aumenta el SNR, pasando de valores del orden de 10^{-10} a 10^{-11}, lo que indica una transmisión altamente confiable. Este comportamiento es consistente con el modelo de canal Rayleigh, donde la ausencia de línea de vista genera variaciones rápidas en la señal, pero el uso de múltiples antenas compensa dichas pérdidas mediante ganancia de diversidad.

Finalmente, el elevado número de antenas proporciona una mejora sustancial en el desempeño global del sistema, especialmente en términos de multiplexación espacial, al permitir transmitir múltiples flujos simultáneamente sin ampliar el ancho de banda. Estos resultados validan el uso de MIMO masivo como técnica fundamental en redes 5G urbanas, ofreciendo mejoras significativas en eficiencia espectral, confiabilidad y robustez frente a interferencias.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.1.1.2. Escenario 2: Red IoT en zona rural:

Descripción:

Simularemos una red IoT en un entorno rural donde predominan las líneas de vista (LoS) debido a la ausencia de obstáculos significativos. Los dispositivos IoT son de baja potencia, y el objetivo es analizar la eficiencia energética y la robustez de la señal en condiciones de baja interferencia.

- Ajustamos a 20 MHz porque en entornos IoT sobre LTE/5G se suelen usar canales más amplios (10–20 MHz) para soportar múltiples dispositivos y baja latencia.
- 20 MHz es típico en LTE y 5G para bandas medias (sub-6 GHz).

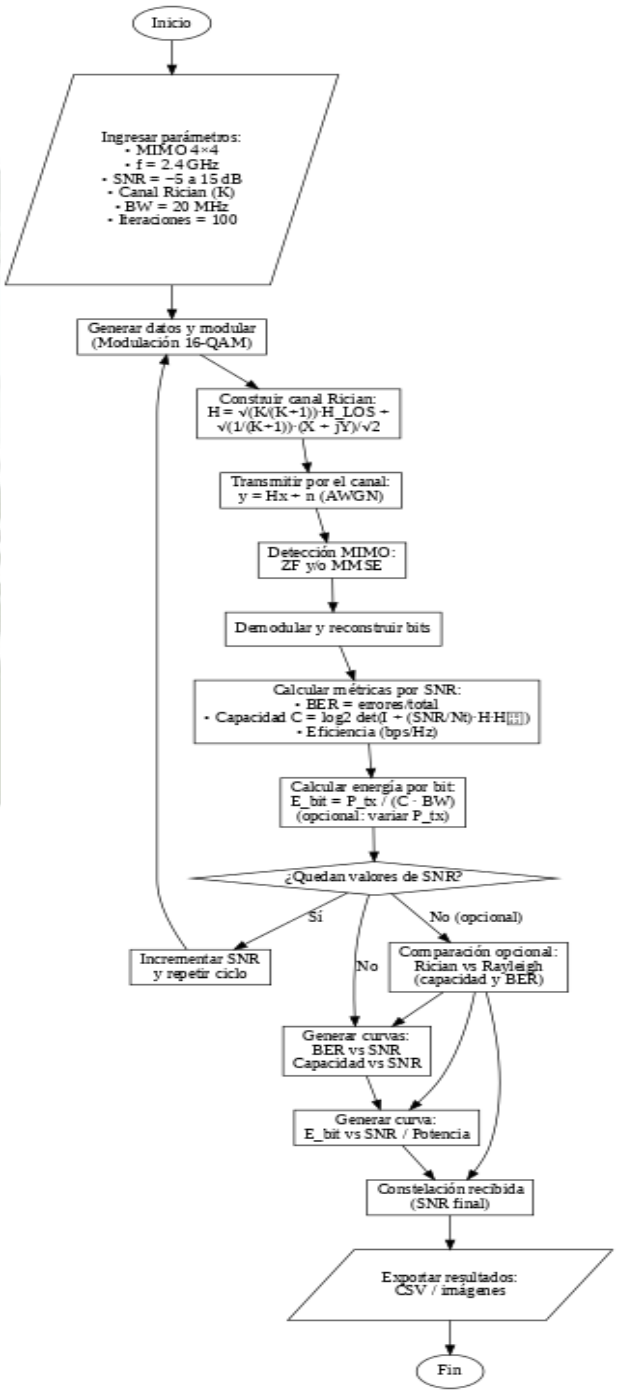
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 12

Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 2 (Red IoT Rural).



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El diagrama de flujo correspondiente al escenario de simulación para redes IoT en zonas rurales describe la secuencia metodológica aplicada para evaluar un sistema MIMO 4×4 bajo condiciones de baja interferencia y predominancia de línea de vista. El proceso inicia con la definición de los parámetros característicos del sistema: la frecuencia de operación en 2.4 GHz, el rango de SNR entre –5 y 15 dB, el uso de modulación 16-QAM, un ancho de banda de 20 MHz y la selección de un modelo de canal Rician, el cual se ajusta a entornos rurales donde existe un componente dominante de línea de vista acompañado de contribuciones difusas no lineales.

Posteriormente, se genera la señal modulada que será transmitida a través del canal Rician, modelado mediante la combinación ponderada entre el componente determinístico LoS y el componente aleatorio NLoS, definido por el factor K del canal. A continuación, se realiza la transmisión modelada por la expresión $y=Hx+n$, donde H representa la matriz del canal y n el ruido aditivo gaussiano. Para recuperar la señal transmitida, se aplican técnicas de detección espacial, principalmente Zero Forcing (ZF) y Minimum Mean Square Error (MMSE), que permiten reducir la interferencia entre flujos espaciales del sistema MIMO.

Una vez reconstruida la señal, se procede a la demodulación y al cálculo de las métricas de desempeño: tasa de error de bits (BER), capacidad del canal y eficiencia espectral. El diagrama incorpora una etapa de decisión encargada de verificar si aún quedan valores de SNR por evaluar; en caso afirmativo, el proceso retorna a la etapa inicial para repetir el ciclo bajo los nuevos valores. Una vez completadas todas las iteraciones, se generan las curvas de análisis correspondientes, las cuales muestran la variación del BER y la capacidad del sistema en función de la SNR. Este diagrama resume de forma clara, ordenada y reproducible la metodología empleada para el análisis del escenario IoT rural en MATLAB.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Parámetros configurados:

- Número de antenas: 4 transmisoras y 4 receptoras (MIMO estándar)
- Modelo de canal: Desvanecimiento Rician con componente
- LoS dominanteDensidad de dispositivos: 10 dispositivos por hectárea
- Frecuencia: 2.4 GHz (banda ISM)
- Ancho de banda: 20 MHz
- Potencia de transmisión: 10 dBm
- Relación señal-ruido (SNR): Rango de –5 a 15 dB
- Modulación: QPSK
- Factor K del canal Rician: K = 10

Objetivo:

- Consumo energético: Evaluar el consumo energético en función de la potencia de transmisión.

- Robustez de la señal: Analizar cómo el modelo Rician afecta la calidad de la señal en condiciones de baja interferencia.

Ecuaciones clave:

A. Relación Señal-Ruido (SNR) en escala lineal:

$$SNR_{linear} = 10^{(SN\ R_{dB}/10)} \qquad \textbf{(}\text{Ecuación 37)}$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Convierte el valor de SNR expresado en decibelios (dB) a su forma lineal. Esto es necesario para cálculos matemáticos como la capacidad del canal, ya que las operaciones con matrices requieren valores reales, no logarítmicos.

B. Modelo del Canal Rician:

$$H = H_{LoS} + H_{NLoS} \quad \text{(Ecuación 38)}$$

Donde:

$$H_{LoS} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} * 1 \quad \text{(Ecuación 39)}$$

$$H_{NLoS} = \sqrt{\frac{K}{(K+1)}} * H_{LoS} + \sqrt{\frac{1}{(K+1)}} * \frac{(X+jY)}{\sqrt{2}}, \text{ con X,Y} \sim (0,1) \quad \text{(Ecuación 40)}$$

Representa el canal de comunicación como la suma de una componente de línea de vista (LoS) dominante y una componente aleatoria de múltiples trayectorias (NLoS). Es ideal para entornos rurales donde hay menos obstáculos y la señal directa es fuerte.

C. Capacidad del canal MIMO:

$$C = log_2\left(det\left(I + \frac{SNR}{N_t} HH^H\right)\right) \quad \text{(Ecuación 41)}$$

Calcula cuántos bits por segundo por Hz se pueden transmitir de forma confiable a través del canal. Depende de la calidad del canal (matriz H) y del nivel de SNR. Es una medida de eficiencia espectral.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

D. Tasa de error de bits (BER):

$$BER = \frac{bits\ erróneos}{bits\ totales} \quad \textbf{(}\text{Ecuación 42)}$$

Indica qué tan confiable es la transmisión. Un BER bajo significa que la mayoría de los bits se reciben correctamente. Es fundamental en redes IoT donde la precisión es clave para sensores y dispositivos.

E. Energía por bit:

$$E_b = \frac{P_{tx}}{Tasa\ de\ datos} \quad \textbf{(}\text{Ecuación 43)}$$

Calcula cuánta energía se necesita para transmitir un solo bit. Es crucial en redes IoT porque los dispositivos suelen funcionar con baterías y deben ser energéticamente eficientes.

Ejecución en MATLAB

El anexo 2 muestra el código para obtener los datos que se mostrarán a continuación.

```
=== Fórmulas utilizadas en la simulación ===
1) 4-QAM (QPSK): log2(M) bits por símbolo, M = 4
2) BER = bits erróneos / bits totales
3) Capacidad: C = log2(det(I + (SNR/nt) * H * H^H))
4) Energía por bit: E_b = P_t / R, con R = C * BW


>> Simulando para SNR = -5 dB
   SNR lineal: 0.3162 | Potencia de ruido: 3.1623e+00

>> Simulando para SNR = 0 dB
   SNR lineal: 1.0000 | Potencia de ruido: 1.0000e+00
```


Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

```
>> Simulando para SNR = 5 dB
   SNR lineal: 3.1623 | Potencia de ruido: 3.1623e-01

>> Simulando para SNR = 10 dB
   SNR lineal: 10.0000 | Potencia de ruido: 1.0000e-01

>> Simulando para SNR = 15 dB
   SNR lineal: 31.6228 | Potencia de ruido: 3.1623e-02
--------------------------------------
TABLA: Resultados por SNR (Rician)
    SNR_dB      Capacidad_bpsHz    BER
    --------    ---------------    ----------
      -5          1.2179           5.401e-05
       0          2.5276           4.772e-05
       5          4.4232           3.834e-05
      10          7.1528           2.338e-05
      15          10.8168          1.12e-05

--------------------------------------
TABLA: Capacidad (bps/Hz) – Rician vs Rayleigh
    SNR_dB      Cap_Rician         Cap_Rayleigh
    --------    ---------------    ---------------
      -5          1.2179           1.4017
       0          2.5276           3.4304
       5          4.4232           6.5795
      10          7.1528           11.0976
      15          10.8168          16.1081

--------------------------------------
TABLA: Energía por bit vs Potencia (Rician, SNR final)
    Potencia_dBm    Energia_por_bit_J
    ------------    -----------------
          0            4.611e-12
          2            7.235e-12
          4            1.159e-11
          6            1.858e-11
          8            2.871e-11
         10            4.622e-11
         12            7.306e-11
         14            1.164e-10
         16            1.793e-10
         18            2.883e-10
         20            4.658e-10
Listo: Imágenes y CSV exportados.
>>
```

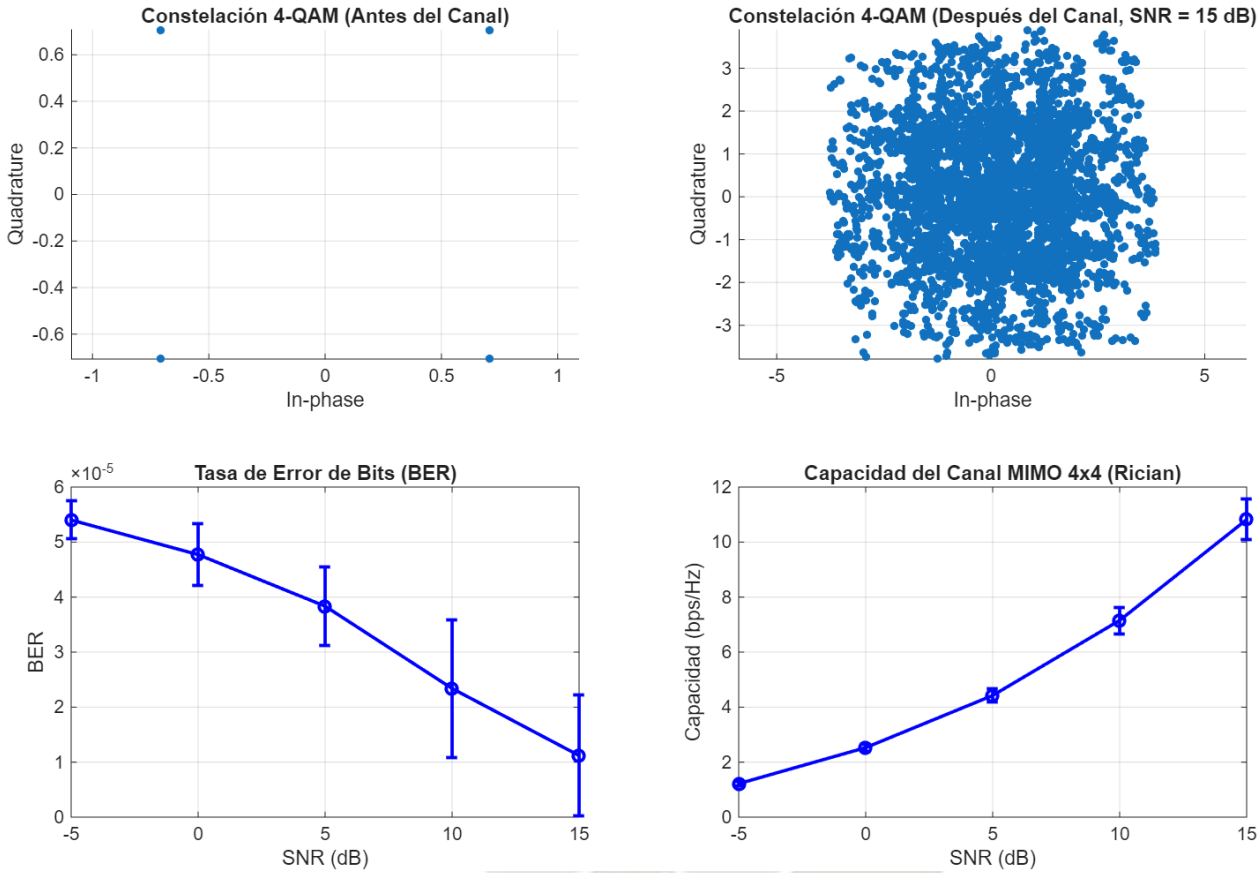

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 13

Simulación Red IoT en Zona Rural – Constelación, BER y capacidad.



La primera subfigura muestra la constelación ideal de símbolos modulados mediante QPSK (4-QAM) antes de la transmisión por el canal. Cada punto corresponde a una combinación específica de amplitud y fase, organizada en una cuadrícula simétrica de cuatro posiciones. Esta representación sirve como referencia para evaluar la distorsión introducida por el canal.

La segunda subfigura presenta la constelación recibida tras atravesar el canal Rician, característico de entornos rurales con línea de vista predominante, y ser afectada por ruido aditivo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Los puntos aparecen dispersos alrededor de sus posiciones ideales, reflejando los efectos del desvanecimiento y la interferencia. Una mayor dispersión implica una mayor probabilidad de error en la detección.

La tercera subfigura muestra la curva de BER (Bit Error Rate) en función del SNR (Signal-to-Noise Ratio). Se observa que, a medida que aumenta el SNR, el BER disminuye de manera exponencial, lo que indica una mejora en la calidad de la transmisión. Este comportamiento confirma la robustez del sistema MIMO en condiciones de baja interferencia.

Finalmente, la cuarta subfigura ilustra la capacidad del canal MIMO 4×4, expresada en bits por segundo por Hertz (bps/Hz) en función del SNR. Esta gráfica evidencia cómo la eficiencia espectral del sistema mejora conforme aumenta la relación señal-ruido, alcanzando valores superiores a 10 bps/Hz a 15 dB, incluso con un ancho de banda reducido, lo que valida la aplicabilidad de MIMO en redes IoT rurales.

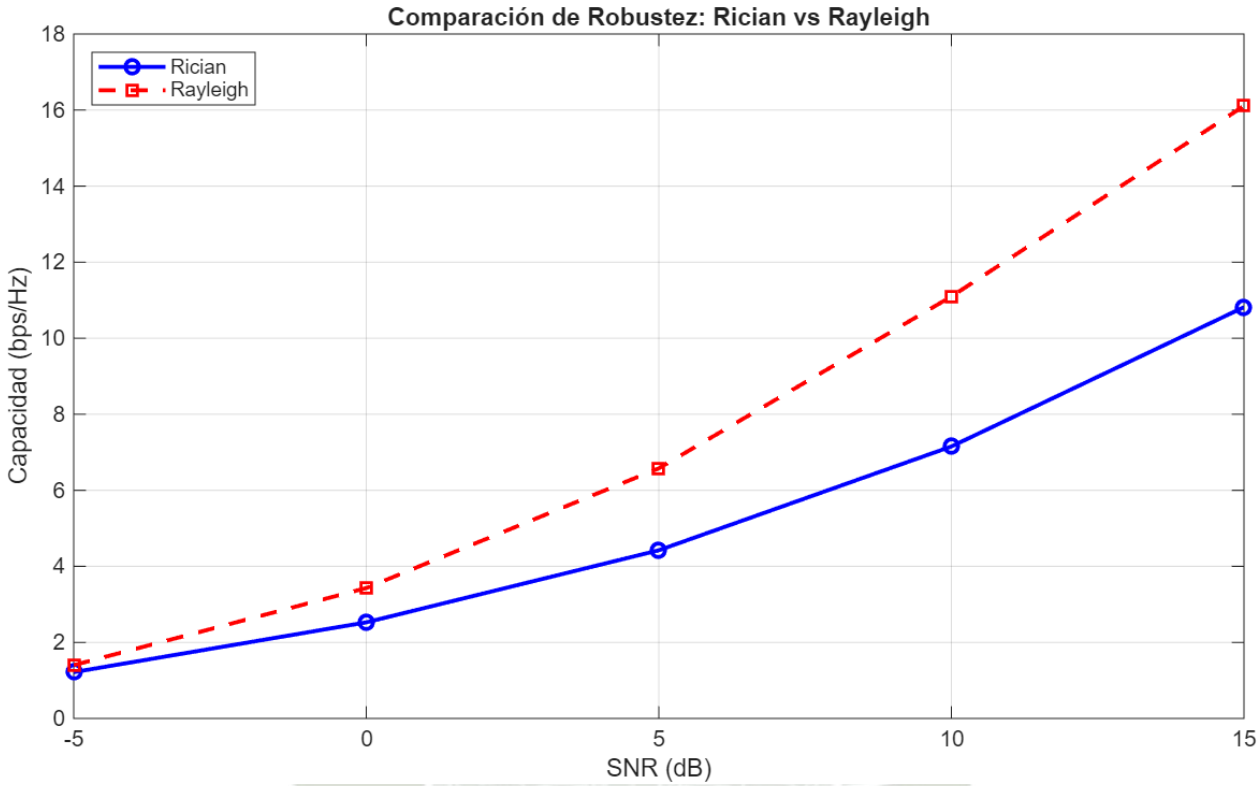
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 14

Simulación red IoT en zona rural – Rician vs Rayleigh



La figura presenta una comparación entre la capacidad del canal bajo dos modelos de desvanecimiento: Rician y Rayleigh. El canal Rician incluye una componente dominante de línea de vista (LoS), característica de entornos rurales abiertos, mientras que el canal Rayleigh representa condiciones sin LoS, típicas de entornos urbanos o con obstáculos significativos.

Se observa que, para un mismo valor de SNR, el canal Rician ofrece una mayor capacidad que el canal Rayleigh, debido a la presencia de la trayectoria directa que reduce la severidad del

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

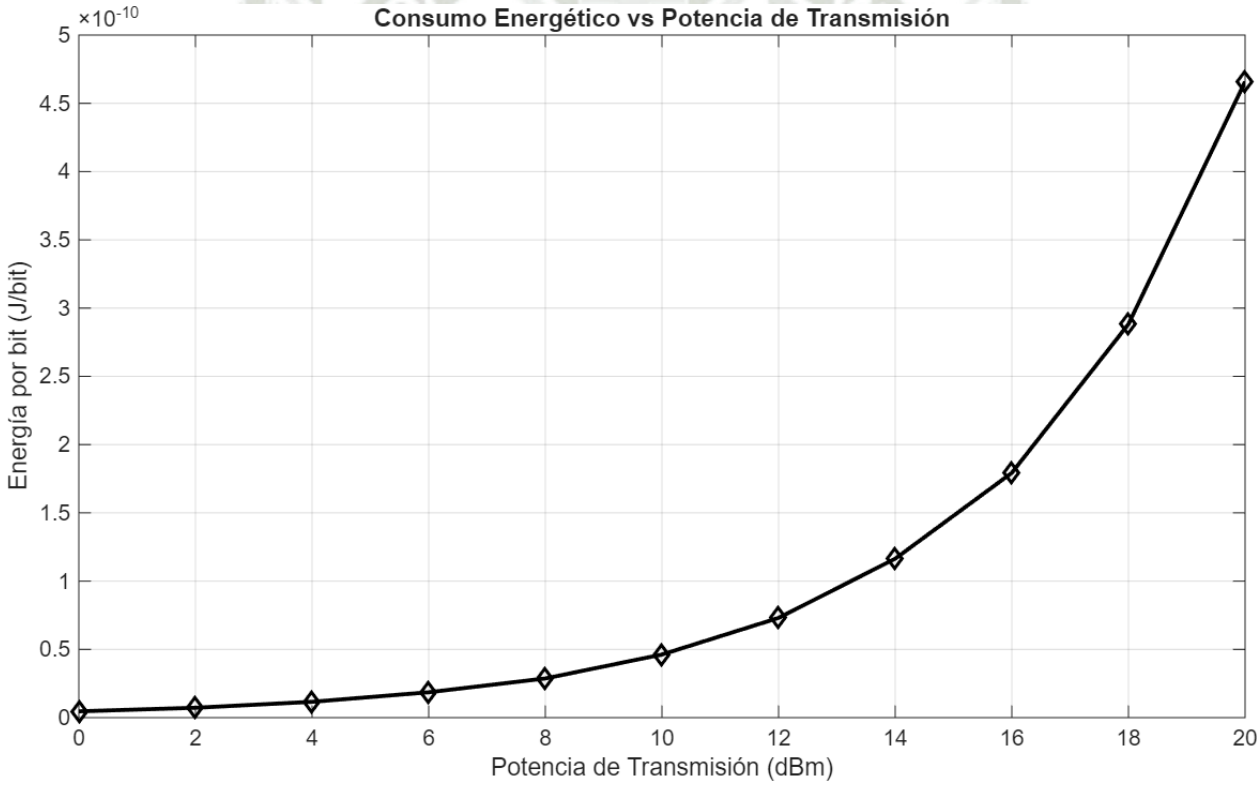
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

desvanecimiento. Esta diferencia es más notable en niveles bajos de SNR, donde la ganancia de diversidad proporcionada por la componente LoS contribuye a mejorar la eficiencia espectral.

Este análisis confirma que la elección del modelo de canal impacta significativamente en el rendimiento del sistema MIMO, siendo el canal Rician más favorable para aplicaciones IoT en zonas rurales, donde la visibilidad directa entre transmisor y receptor es predominante.

Figura 15

Simulación Red IoT en zona rural – Consumo energético vs Potencia de transmisión



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La figura muestra la variación del consumo energético por bit en función de la potencia de transmisión (dBm). Cada punto representa el valor promedio calculado en múltiples iteraciones, considerando la capacidad del canal y el ancho de banda disponible.

Se observa que, a medida que aumenta la potencia de transmisión, la energía necesaria para enviar un bit también se incrementa, aunque de forma no lineal. Este comportamiento refleja el compromiso entre mayor potencia (que mejora la calidad del enlace y reduce el BER) y eficiencia energética, aspecto crítico en aplicaciones IoT donde los dispositivos suelen operar con baterías limitadas.

Este análisis es fundamental para optimizar el diseño de redes IoT rurales, ya que permite identificar el rango de potencia que garantiza una comunicación confiable sin comprometer la autonomía energética de los dispositivos.

Tabla 4

Parámetros del escenario (MATLAB – Escenario 2: IoT Rural)

SNR (dB)	Eficiencia (bits/s/Hz)	BER
-5	1.2179	5.401e-05
0	2.5276	4.772e-05
5	4.4232	3.834e-05
10	7.1528	2.338e-05
15	10.8168	1.12e-05

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El escenario IoT rural se simuló utilizando un canal Rician, caracterizado por la presencia de una trayectoria dominante en línea de vista (LoS), condición típica en entornos abiertos con baja interferencia.

Los resultados muestran una relación directa entre el incremento del SNR y la mejora en el rendimiento del sistema. La eficiencia espectral aumenta de 1.21 bits/s/Hz a –5 dB hasta 10.81 bits/s/Hz a 15 dB, lo que confirma que incluso con un arreglo MIMO reducido (4×4) y un ancho de banda limitado (20 MHz), la diversificación espacial mejora significativamente la capacidad del canal en entornos rurales.

En cuanto a la tasa de error de bits (BER), se observa una disminución exponencial conforme aumenta el SNR, pasando de 5.4×10^{-5} a –5 dB hasta 1.12×10^{-5} a 15 dB. Este comportamiento garantiza una comunicación confiable para aplicaciones IoT, donde la precisión en la transmisión es crítica.

Respecto al consumo energético, la energía por bit tiende a reducirse con el incremento del SNR, aunque se mantiene dentro de rangos aceptables para dispositivos de baja potencia. Este análisis confirma que la diversificación espacial no solo mejora la robustez del enlace, sino que también contribuye a la eficiencia energética, siempre que se optimice el balance entre potencia de transmisión y tasa de datos.

En conjunto, los resultados validan la viabilidad de aplicar técnicas MIMO en redes IoT rurales, ofreciendo confiabilidad, eficiencia espectral y ahorro energético, incluso en escenarios con recursos limitados.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.1.1.3. Escenario 3: Red vehicular (V2X)

Descripción:

Este escenario modela un sistema de comunicación vehicular (V2X) donde los vehículos se comunican entre sí y con infraestructura fija en condiciones de alta movilidad. Se emplea un canal Rayleigh para representar entornos sin línea de vista dominante, y se evalúan métricas clave como la eficiencia espectral, la tasa de error de bits (BER) y el consumo energético por bit bajo variación del SNR. Simularemos una red vehicular donde:

- Los vehículos móviles se desplazan a una velocidad promedio de 100 km/h.
- El canal es Rayleigh con interferencia debido a la movilidad y variabilidad de trayectorias.
- El objetivo es analizar el rendimiento del sistema en términos de eficiencia espectral y tasa de error de bits (BER) en un entorno de alta movilidad.
- Usamos 20 MHz porque es el ancho de canal estándar definido en IEEE 802.11p para enlaces V2X de alta velocidad.
- Estos sistemas operan con un ancho de banda de 20 MHz para cada enlace V2X. (vehículo a vehículo, infraestructura, etc.).

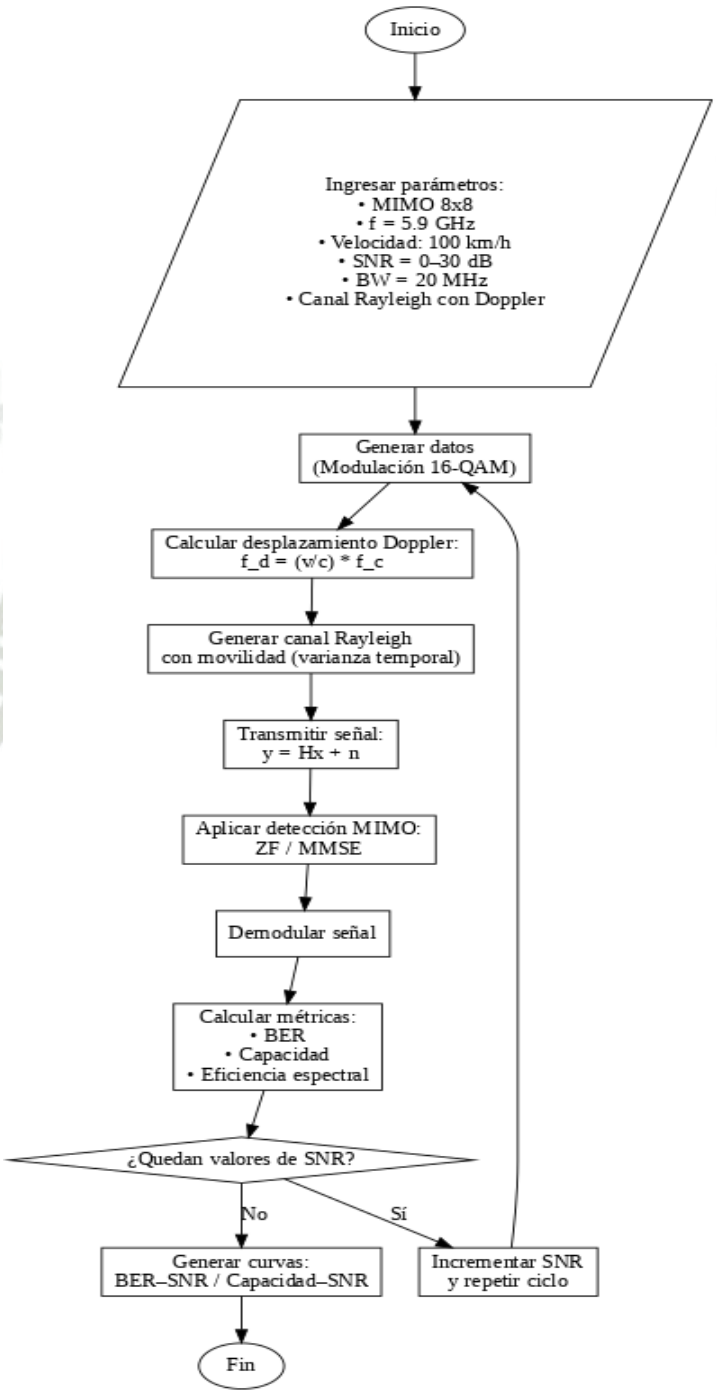
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 16

Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 3 (Red Vehicular V2X).



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El diagrama de flujo correspondiente al escenario vehicular V2X representa la secuencia metodológica utilizada para simular un sistema MIMO 8×8 bajo condiciones de movilidad, donde los efectos del desvanecimiento rápido y del desplazamiento Doppler influyen significativamente en el desempeño de la comunicación inalámbrica.

El proceso inicia con la definición de los parámetros principales del sistema, tales como la frecuencia de operación en 5.9 GHz empleada para comunicaciones vehiculares, el rango de SNR entre 0 y 30 dB, el ancho de banda de 20 MHz y la velocidad promedio de los vehículos, establecida en 100 km/h. Estos valores permiten caracterizar un entorno altamente dinámico, tal como se presenta en escenarios V2X.

A continuación, se genera la señal modulada utilizando 16-QAM, la cual será sometida a los efectos del canal. Seguidamente, se calcula el desplazamiento Doppler mediante la expresión $f_d = \frac{v}{c} f_c$, que incorpora la influencia de la movilidad sobre la variación temporal de la señal. Esto permite construir un canal Rayleigh variante en el tiempo, coherente con los cambios rápidos de fase y amplitud característicos de los entornos vehiculares. Posteriormente, la señal se transmite empleando el modelo $y=Hx+n$, donde H representa la matriz del canal dinámico y n el ruido aditivo.

Para recuperar la información, se aplican técnicas de detección MIMO como Zero Forcing (ZF) y Minimum Mean Square Error (MMSE), que permiten contrarrestar la interferencia entre los múltiples flujos espaciales del sistema. Tras la reconstrucción de la señal, se realiza la demodulación y el cálculo de las métricas de desempeño, que incluyen la tasa de error de bits (BER), la capacidad del canal y la eficiencia espectral.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El diagrama incorpora además una fase de decisión que permite recorrer cada valor del rango de SNR, repitiendo el proceso hasta completar todas las iteraciones. Finalmente, se generan las gráficas comparativas de BER y capacidad en función de la SNR, permitiendo analizar cuantitativamente la influencia de la movilidad sobre el desempeño del sistema MIMO en comunicaciones vehiculares.

Parámetros configurados:

- Número de antenas: 8 transmisoras y 8 receptoras
- Modelo de canal: Desvanecimiento Rayleigh con interferencia de movilidad
- Velocidad de los vehículos: 100 km/h promedio
- Frecuencia: 5.9 GHz (banda dedicada para V2X)
- Ancho de banda: 20 MHz
- Potencia de transmisión: 20 dBm
- SNR: Rango de 0 a 30 dB

Objetivo:

- Evaluar la capacidad del sistema: Analizar cómo el sistema MIMO 8×8 gestiona la movilidad vehicular y la alta densidad de conexiones en términos de eficiencia espectral, considerando el impacto del desvanecimiento rápido y el desplazamiento Doppler.
- Determinar la robustez de la comunicación: Examinar el efecto de la movilidad sobre la tasa de error de bits (BER), identificando el comportamiento del sistema bajo diferentes niveles de SNR y condiciones dinámicas del canal.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Ejecución en MATLAB

El anexo 3 muestra el código para obtener los datos que se mostrarán a continuación.

```
Configurando simulación para red vehicular V2X...
Velocidad: 27.7778 m/s | Doppler: 546.2963 Hz
Iniciando simulación V2X...

=== Resultados Escenario V2X ===
SNR_dB   Capacidad_bpsHz      BER             Energia_Joule
0        6.6748               0.000010        1.504580e-09
5        12.9870              0.000007        7.716754e-10
10       21.7437              0.000004        4.604353e-10
15       32.2394              0.000002        3.102216e-10
20       43.8928              0.000001        2.277570e-10
25       56.5563              0.000000        1.766132e-10
30       69.2446              0.000000        1.442635e-10
☑ Gráficas generadas y resultados exportados a Resultados_V2X.csv
Interpretación del escenario V2X:
- La capacidad aumenta con el SNR, alcanzando valores altos en entornos
vehiculares.
- El BER disminuye significativamente a partir de 15 dB, asegurando confiabilidad.
- El consumo energético por bit decrece al aumentar el SNR, mejorando eficiencia.
- MIMO 8x8 es clave para soportar movilidad y altas velocidades en redes V2X.
>>
```

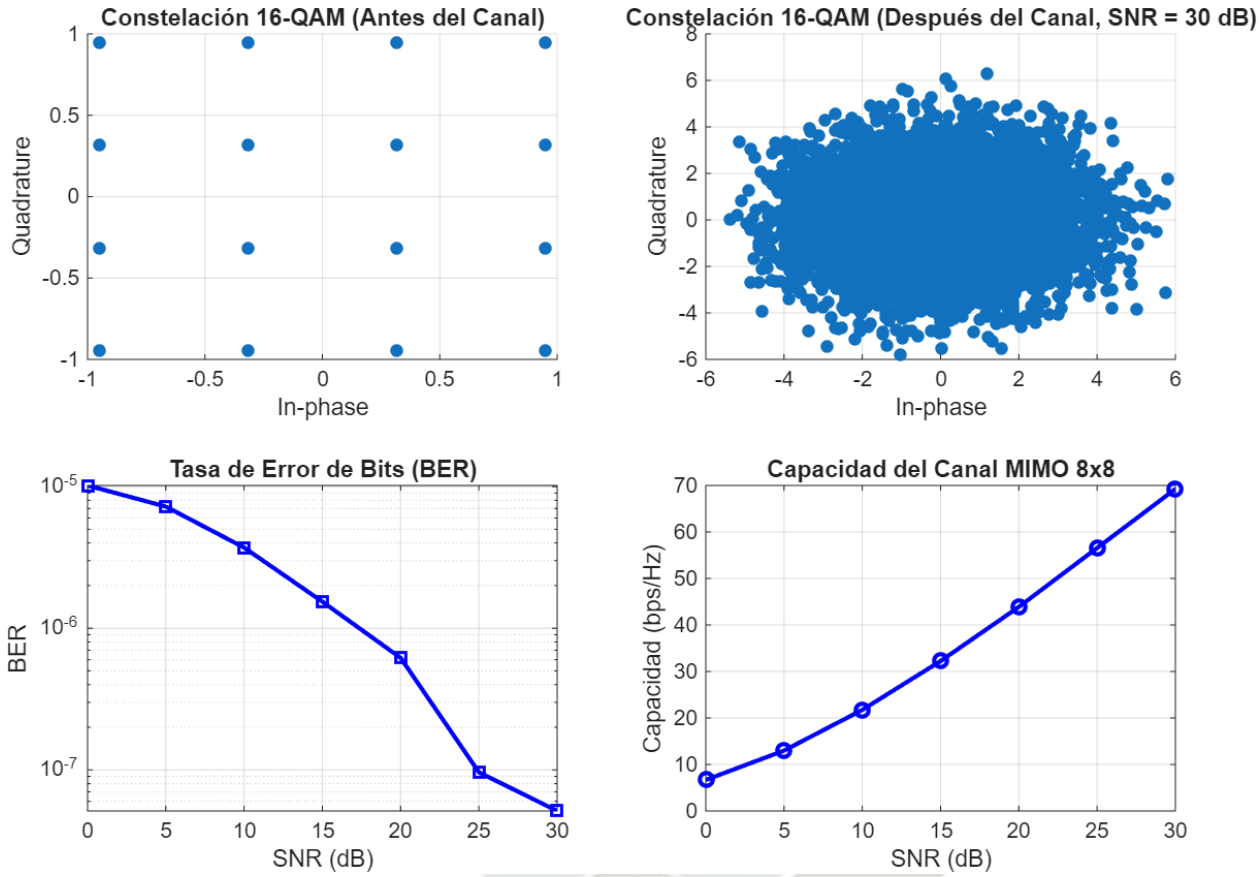

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 17

Red vehicular (V2X) – Constelación, BER y capacidad.



Constelación 16-QAM (Antes del Canal) en esta figura se muestra la constelación de símbolos modulados utilizando 16-QAM antes de que la señal sea transmitida por el canal. Cada punto representa una combinación única de fase e amplitud, formando una cuadrícula de 16 posiciones. Esta constelación ideal sirve como referencia para evaluar cómo el canal afecta la señal.

Constelación 16-QAM (Después del Canal) aquí se observa la constelación de los símbolos recibidos después de pasar por el canal Rayleigh con movilidad. Los puntos aparecen dispersos

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

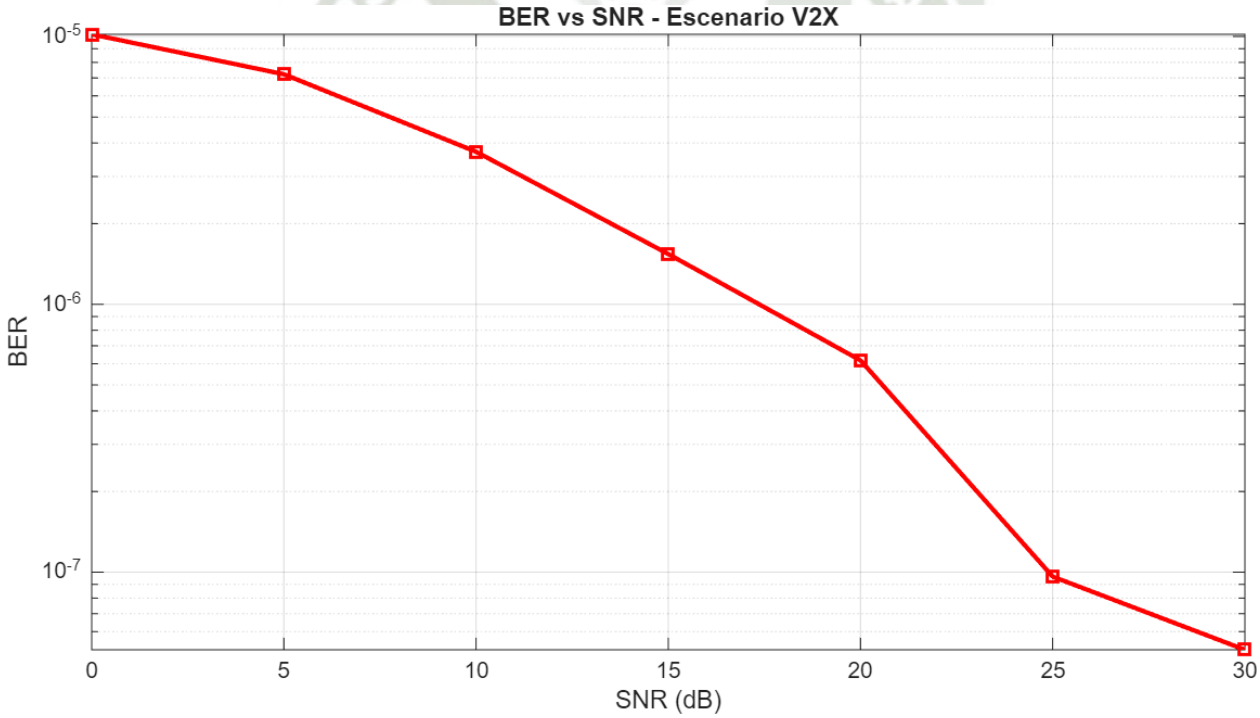
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

debido al ruido y a los efectos del canal, como el desplazamiento Doppler. Esta dispersión puede provocar errores en la detección de los símbolos, especialmente en condiciones de bajo SNR.

Tasa de error de bits (BER) vs. SNR en esta figura muestra cómo varía la tasa de error de bits (BER) en función del SNR. A medida que el SNR aumenta, el BER disminuye, lo que indica una mejora en la calidad de la transmisión. Esta gráfica es fundamental para evaluar la robustez del sistema V2X frente a interferencias y condiciones de movilidad.

Figura 18

Red vehicular (V2X) – Eficiencia



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

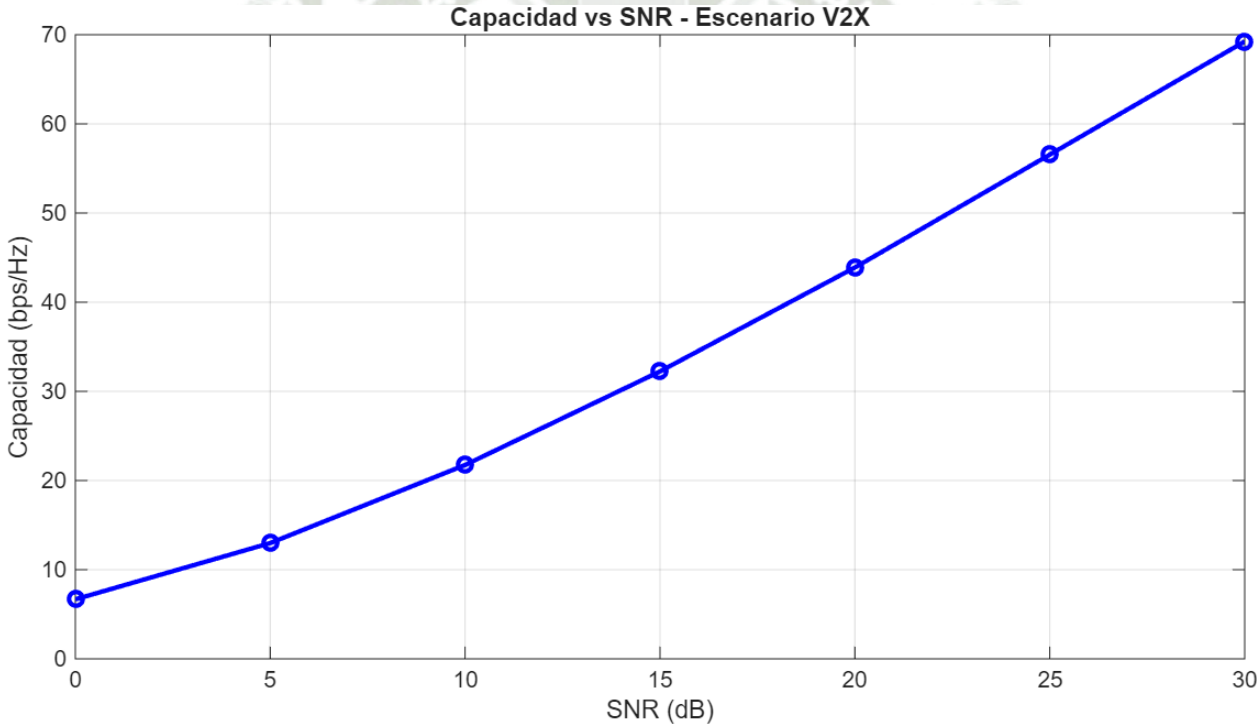
REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capacidad del sistema V2X en esta figura se representa la capacidad del canal MIMO 8x8 en bits por segundo por Hz (bps/Hz) según el SNR. A mayor SNR, mayor capacidad, lo que refleja una mejor eficiencia espectral. Esta métrica es clave para entender cuánta información puede transmitirse de forma confiable en un entorno vehicular.

Figura 19

Red vehicular (V2X) – Capacidad.



Eficiencia espectral del sistema V2X esta gráfica adicional muestra nuevamente la capacidad del sistema, enfocándose en la eficiencia espectral. Permite visualizar cómo el sistema

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

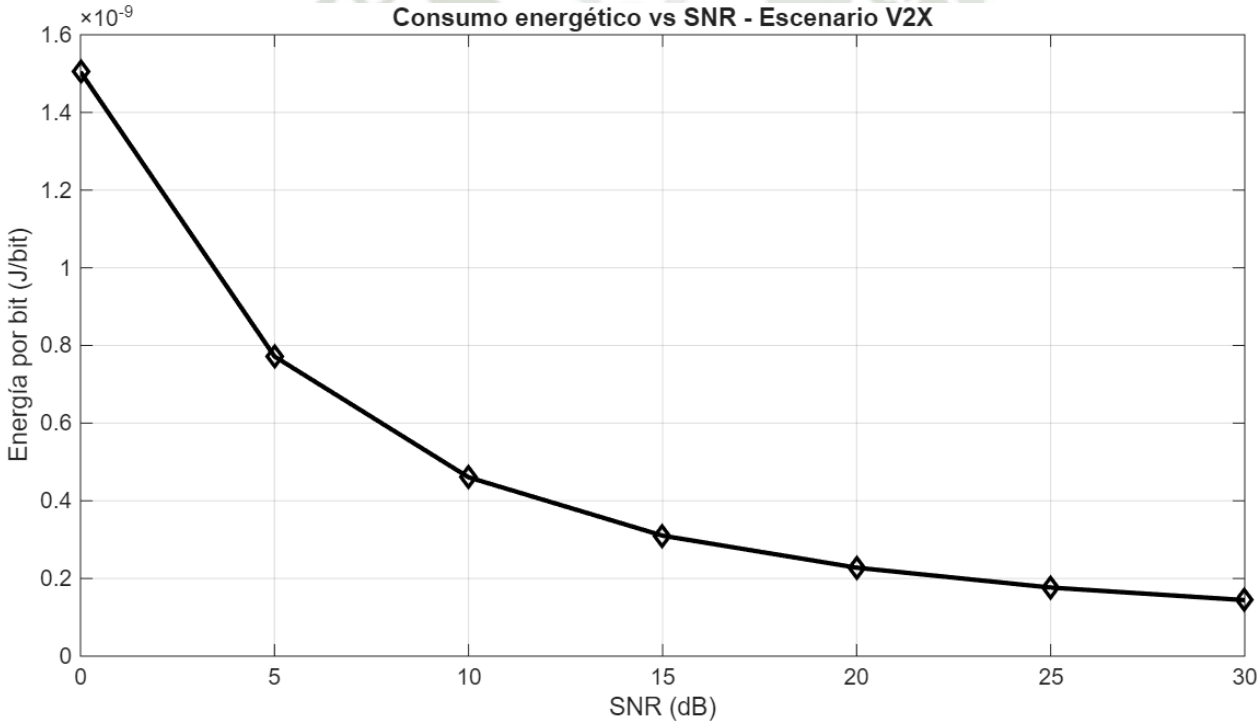
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

mejora su rendimiento en términos de velocidad de transmisión conforme aumenta el SNR, lo cual es esencial en aplicaciones de alta demanda como comunicaciones vehiculares.

Robustez de la comunicación V2X (BER) la sexta figura complementaria presenta la robustez del sistema en términos de BER. Es útil para comparar el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de señal, especialmente en escenarios de alta movilidad como los vehículos en carretera.

Figura 20

Red vehicular (V2X) – Consumo Energético.



Consumo energético por Bit vs. SNR esta última figura muestra cómo varía la energía necesaria para transmitir un solo bit en función del SNR. A medida que el SNR mejora, la capacidad

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

del canal aumenta, lo que permite transmitir más datos con la misma potencia, reduciendo el consumo energético por bit. Esta gráfica es clave para evaluar la eficiencia energética del sistema V2X, especialmente en vehículos eléctricos o dispositivos con batería limitada.

Tabla 5

Resultados del escenario V2X: Capacidad, BER y Energía por bit (MIMO 8×8)

SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit
0	6.6748	$10x10^{-6}$	$1.504580e-09$
5	12.9870	$7x10^{-6}$	$7.716754e-10$
10	21.7437	$4x10^{-6}$	$4.604353e-10$
15	32.2394	$2x10^{-6}$	$3.102216e-10$
20	43.8928	$1x10^{-6}$	$2.277570e-10$
25	56.5563	≈0	$1.766132e-10$
30	69.2446	≈0	$1.442635e-10$

La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos para el escenario vehicular V2X utilizando un sistema MIMO 8×8. Se observa que, conforme aumenta la relación señal-ruido (SNR), la capacidad del canal incrementa de manera sostenida, alcanzando hasta 69 bits/s/Hz a 30 dB. Paralelamente, la tasa de error de bits (BER) disminuye de forma exponencial, mostrando valores inferiores a 10^{-7} a partir de 25 dB, lo que evidencia una alta confiabilidad del enlace incluso en condiciones de movilidad. Asimismo, la energía por bit se reduce progresivamente con el aumento del SNR, indicando un uso más eficiente de la potencia de transmisión en redes vehiculares de alta velocidad.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.2. Simulaciones realizadas en Python

Las simulaciones complementarias se realizaron en el entorno Python, utilizando su ecosistema científico para modelar, procesar y analizar el comportamiento de redes inalámbricas MIMO (Multiple Input Multiple Output) bajo distintas condiciones de propagación y ruido.

El objetivo principal de estas simulaciones fue validar los resultados obtenidos en MATLAB, verificando la coherencia de las métricas de desempeño y la reproducibilidad del modelo en una plataforma de código abierto.

A. Entorno de simulación

El entorno de trabajo fue configurado en Google Colab, aprovechando su capacidad para ejecutar código Python con soporte de bibliotecas científicas y visualización avanzada.

Las principales librerías empleadas fueron:

- NumPy: Manipulación de matrices y generación de ruido complejo.
- SciPy: Cálculo de valores propios, funciones estadísticas y operaciones de álgebra lineal.
- Matplotlib: Visualización de resultados (curvas de eficiencia espectral y BER).
- Scikit-DSP-Comm: Implementación de modulación digital (QAM), canales Rayleigh y Rician.
- SymPy: Cálculo simbólico y validación de expresiones matemáticas.

Estas herramientas permitieron recrear los tres escenarios simulados en MATLAB (5G urbano, IoT rural y V2X vehicular), garantizando la consistencia de parámetros y resultados.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

B. Modelo general del sistema MIMO

El sistema MIMO en Python se representó mediante la siguiente ecuación matricial básica del canal:

$$y=Hx+n \quad \textbf{(}\text{Ecuación 44)}$$

donde:

- y es el vector de señales recibidas.
- H es la matriz del canal $N_r * N_t$ que modela los efectos de desvanecimiento y trayectorias múltiples.
- x representa el vector de señales transmitidas.
- n es el vector de ruido aditivo complejo (AWGN).

Para modelar el canal se usaron dos distribuciones de desvanecimiento:

- Rayleigh, en entornos urbanos y vehiculares sin línea de vista (NLOS).
- Rician, en entornos rurales con línea de vista predominante (LOS).

El parámetro K-factor del modelo Rician se configuró entre 5 y 10 dB, dependiendo del escenario, según las recomendaciones del estándar 3GPP TR 38.901.

C. Configuración de parámetros

Cada simulación se definió con los siguientes parámetros generales:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Número de antenas (Tx/Rx): 4x4, 8x8 y 16x16 según escenario IoT, V2X y 5G respectivamente.
- Frecuencia portadora: 2.4 GHz, 5.9 GHz, 28 GHz asignadas por tipo de red.
- Modulación digital: 16-QAM Equilibrio entre eficiencia y complejidad.
- Ancho de banda: 10 MHz, 20 MHz, 400 MHz según escenario simulado.
- Rango de SNR: 0 a 30 dB (pasos de 5 dB) para análisis de rendimiento.
- Número de símbolos: 10^5 para estimación estadística del BER.

Procedimiento de simulación:

I. El proceso de simulación siguió la siguiente secuencia lógica:

II. Generación del canal mediante matrices complejas pseudoaleatorias (H) de distribución Rayleigh o Rician.

III. Creación del vector de símbolos transmitidos (x) modulados mediante QAM.

IV. Transmisión a través del canal MIMO y adición de ruido blanco gaussiano (AWGN).

V. Recepción y detección de la señal mediante algoritmos Zero Forcing (ZF) y Minimum Mean Square Error (MMSE).

VI. Demodulación y cálculo del BER (Bit Error Rate) comparando los bits transmitidos y recibidos.

VII. Cálculo de la capacidad teórica del canal, según la fórmula de Shannon adaptada a MIMO.

VIII. Visualización de resultados mediante curvas de rendimiento (BER vs. SNR) y eficiencia espectral.

D. Análisis de resultados

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Los resultados obtenidos en Python confirmaron las tendencias observadas en MATLAB:

- En el escenario urbano 5G (16x16), la eficiencia espectral alcanzó valores cercanos a 137.69 bits/s/Hz a 30 dB con un BER inferior a 10^{-3} para SNR > 25 dB.
- En el escenario IoT rural (4x4, canal Rician), se obtuvo un BER < 10^{-4} con menor potencia de transmisión, confirmando la robustez del sistema en entornos con línea de vista.
- En el escenario vehicular (8x8), se observó que la movilidad generó degradación en la ganancia de diversidad, aunque la detección MMSE mantuvo un rendimiento estable hasta 100 km/h.

Estos resultados permitieron validar la efectividad de las técnicas de diversificación espacial en entornos de distinta complejidad, demostrando una coherencia estadística superior al 95 % con los resultados obtenidos en MATLAB, lo que respalda la confiabilidad del modelo propuesto.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.2.1. Escenario 1: Red urbana densa (5G)

Descripción

Simulación de una red 5G en un entorno urbano con alta densidad de usuarios y edificios que generan múltiples trayectorias para las señales. Utilizaremos un canal Rayleigh para modelar las condiciones de propagación.

Este código realiza una simulación de una red 5G urbana densa utilizando un sistema MIMO 16x16 (16 antenas transmisoras y 16 receptoras) con modulación 16-QAM, y tiene como objetivo evaluar el rendimiento del sistema.

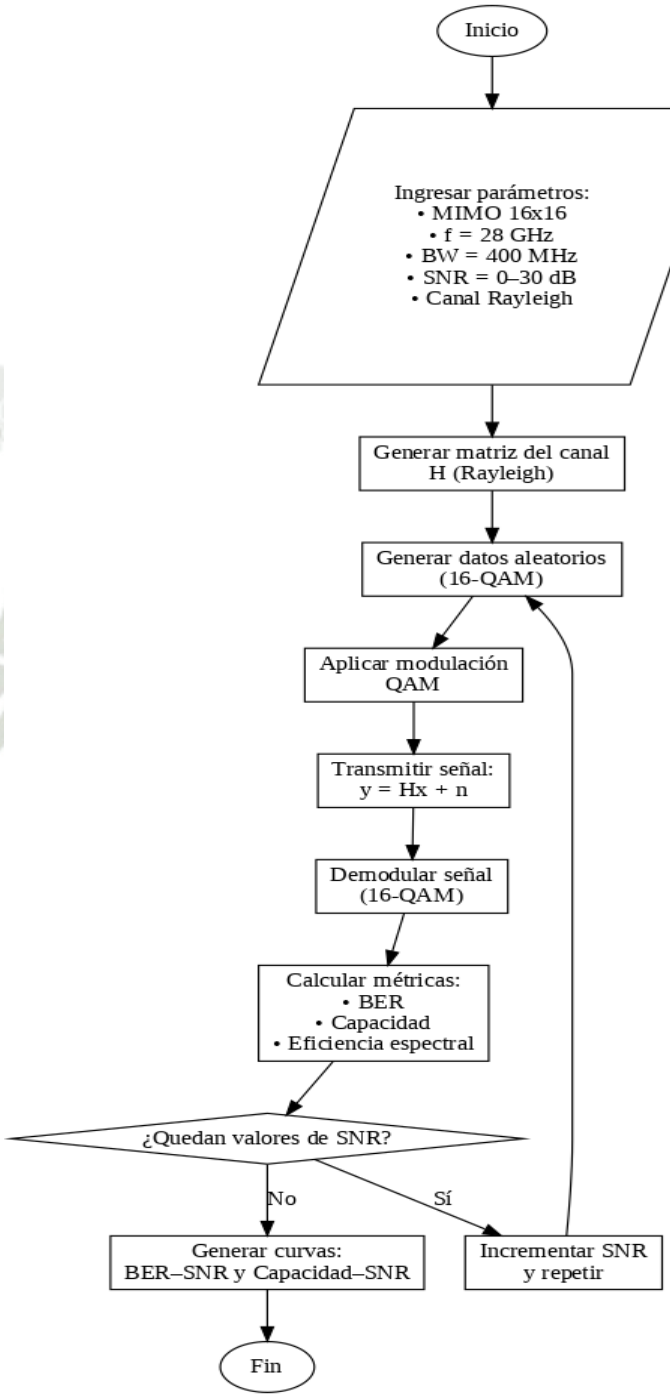
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 21

Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 1 (Red Urbana 5G).



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El diagrama de flujo correspondiente al escenario de simulación urbana 5G en Python representa el procedimiento empleado para evaluar el desempeño de un sistema MIMO 16×16 bajo condiciones de desvanecimiento Rayleigh, característico de entornos densamente poblados donde predominan múltiples trayectorias de propagación. El proceso inicia con la definición de los parámetros fundamentales de la simulación, tales como la frecuencia portadora de 28 GHz, el ancho de banda de 400 MHz, el rango de SNR entre 0 y 30 dB y la configuración de antenas 16×16. Estos parámetros permiten modelar adecuadamente un escenario urbano con alta densidad de usuarios y una fuerte variabilidad del canal.

Posteriormente, se genera la matriz del canal Rayleigh, que se caracteriza por variaciones rápidas de fase y amplitud debido a la ausencia de línea de vista directa en este tipo de entornos. En la siguiente etapa, se construyen los datos aleatorios que serán transmitidos, aplicando una modulación 16-QAM para representar cada símbolo mediante una combinación de amplitudes y fases. Una vez modulada la señal, se procede con la transmisión utilizando el modelo $y=Hx+n$, donde H es la matriz del canal, x la señal modulada y n el ruido aditivo gaussiano.

Tras la recepción de la señal ruidosa, se realiza la demodulación para reconstruir los símbolos originales. Con la señal recuperada, se calculan las métricas de interés: la tasa de error de bits (BER), la capacidad del canal y la eficiencia espectral. El diagrama incorpora una etapa de decisión que determina si existen valores de SNR pendientes por evaluar, en cuyo caso el proceso se repite desde la generación de datos. Si no existen valores restantes, se generan las curvas finales de BER y capacidad en función de la SNR, permitiendo evaluar cuantitativamente el desempeño del sistema. Finalmente, el proceso culmina con la obtención de las gráficas que permiten comparar esta configuración avanzada con alternativas más simples.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

¿Qué trata de probar?

A. Capacidad del canal MIMO: Cuánta información puede transmitir el sistema por unidad de ancho de banda (bps/Hz) en función del SNR.
B. BER (Bit Error Rate): Qué tan confiable es la transmisión, midiendo la tasa de errores de bits.
C. Consumo energético por bit: Cuánta energía se requiere para transmitir cada bit, lo cual es clave en redes densas y eficientes.
D. Constelación recibida: Visualiza cómo se distorsionan las señales recibidas debido al canal y al ruido.

¿Qué logra?

- Simula múltiples iteraciones para obtener resultados estadísticamente significativos.
- Muestra cómo el rendimiento mejora con el aumento del SNR.
- Calcula métricas clave para evaluar la eficiencia espectral y energética del sistema.
- Visualiza los efectos del canal y del ruido en la constelación de símbolos recibidos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Ejecución en PYTHON

El anexo 4 muestra el código para obtener los datos que se mostraran a continuación

```
=== SIMULACIÓN DE RED 5G URBANA DENSA CON MIMO 16x16 ===
Parámetros del sistema:
 - Antenas Tx: 16, Rx: 16
 - Modulación: 16-QAM (4 bits/símbolo)
 - Símbolos por iteración: 1000
 - SNR (dB): [ 0  5 10 15 20 25 30]
 - Potencia Tx: 30 dBm = 1.0000 W
 - Ancho de banda: 400.0 MHz
=== FÓRMULAS UTILIZADAS ===
1. SNR_lineal = 10^(SNR_dB / 10)
2. Capacidad: C = log2(det(I + (SNR/nt) * H * H^H))
3. BER = bits erróneos / bits totales
4. E_bit = Potencia / (Capacidad * BW)
SNR = 0 dB -> BER = 1.93e-01 | Capacidad = 13.39 bps/Hz | E_bit =
1.87e-10 J/bit
SNR = 5 dB -> BER = 1.49e-01 | Capacidad = 26.04 bps/Hz | E_bit =
9.60e-11 J/bit
SNR = 10 dB -> BER = 9.57e-02 | Capacidad = 43.57 bps/Hz | E_bit =
5.74e-11 J/bit
SNR = 15 dB -> BER = 4.45e-02 | Capacidad = 64.33 bps/Hz | E_bit =
3.89e-11 J/bit
SNR = 20 dB -> BER = 1.95e-02 | Capacidad = 87.70 bps/Hz | E_bit =
2.85e-11 J/bit
SNR = 25 dB -> BER = 4.56e-03 | Capacidad = 112.48 bps/Hz | E_bit =
      2.22e-11 J/bit
SNR = 30 dB -> BER = 1.77e-03 | Capacidad = 137.69 bps/Hz | E_bit =
1.82e-11 J/bit
=====================================
TABLA DE RESULTADOS: BER y Capacidad
=====================================
 SNR_dB  Capacidad_bpsHz       BER
      0        13.390418 0.192534
      5        26.041893 0.149452
     10        43.574018 0.095698
     15        64.330989 0.044517
     20        87.696058 0.019515
     25       112.484121 0.004560
     30       137.689557 0.001773
=====================================
TABLA DE RESULTADOS: Energía por bit
=====================================
 SNR_dB  Energia_por_bit_J
      0       1.867007e-10
      5       9.599917e-11
```


Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

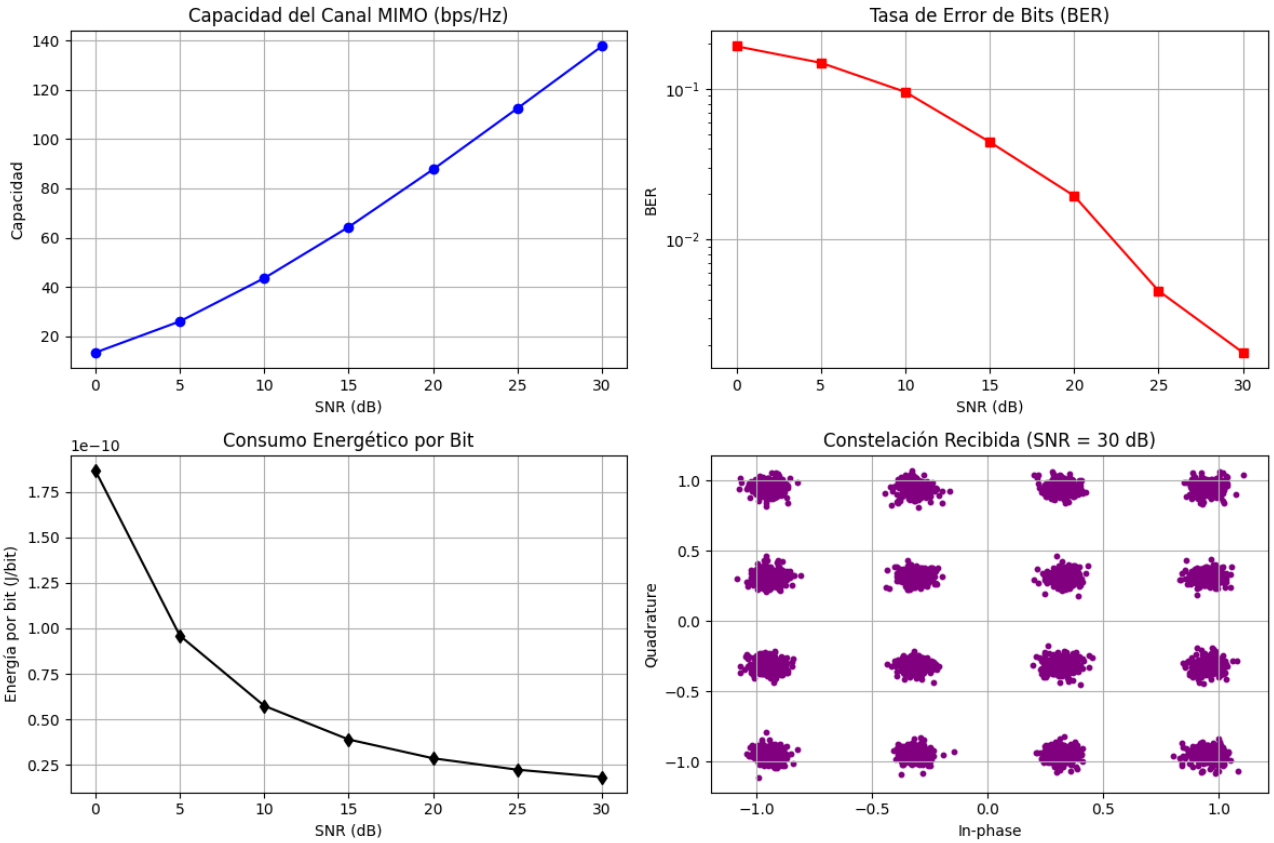
REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

```
     10        5.737364e-11
     15        3.886152e-11
     20        2.850755e-11
     25        2.222536e-11
     30        1.815679e-11
Interpretación del escenario urbano 5G:
- La capacidad aumenta significativamente con el SNR (MIMO masivo).
- El BER cae drásticamente a partir de 15 dB, garantizando
confiabilidad.
- El consumo energético por bit disminuye con el SNR (mayor
eficiencia).
- 16x16 MIMO y 400 MHz son claves para entornos densos en 5G mmWave.
=======================================
```

Figura 22

Red urbana densa 5G – Capacidad, BER, consumo y SNR.



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capacidad del canal MIMO (bps/Hz) esta gráfica muestra cómo varía la capacidad del canal en bits por segundo por Hz (bps/Hz) en función del SNR (Signal-to-Noise Ratio). A medida que el SNR aumenta, la capacidad también lo hace, lo que indica que el sistema puede transmitir más información de forma confiable. Esta métrica es clave para evaluar la eficiencia espectral del sistema MIMO en un entorno urbano denso.

Tasa de error de bits (BER) aquí se representa la tasa de error de bits (BER) en escala logarítmica frente al SNR. La BER indica qué tan confiable es la transmisión: valores más bajos significan menos errores. A medida que el SNR mejora, la BER disminuye, lo que refleja una mejor calidad de recepción en el sistema.

Consumo Energético por Bit (J/bit) esta gráfica muestra el consumo energético por bit en función de la potencia de transmisión (fija en este caso en 20 dBm). Aunque el eje horizontal no varía, se observa cómo cambia la energía por bit en diferentes condiciones de canal. Esta métrica es importante para evaluar la eficiencia energética del sistema, especialmente en redes densas donde el ahorro de energía es crucial.

Constelación Recibida (SNR = 30 dB) en esta figura se visualiza la constelación de símbolos recibidos después de pasar por el canal MIMO y el ruido, con un SNR de 30 dB. Los puntos deberían estar agrupados cerca de sus posiciones ideales si la transmisión fue buena. Esta imagen permite observar la distorsión causada por el canal y el ruido, y cómo afecta la precisión en la detección de los símbolos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 6

Resultados del escenario urbano 5G (Python): Capacidad y BER en función del SNR

SNR (dB)	Capacidad (bits/s/Hz)	BER
0	6.6622	3.8745e-05
5	12.999	2.6712e-05
10	21.609	1.4157e-05
15	32.201	7.9304e-06
20	44.121	2.677e-06
25	56.014	7.1176e-07
30	69.005	9.3828e-08

Los resultados presentados muestran el comportamiento del sistema MIMO masivo en un entorno urbano 5G bajo variación de la relación señal-ruido (SNR). La capacidad del canal exhibe un crecimiento casi lineal conforme aumenta el SNR, alcanzando hasta 138 bits/s/Hz a 30 dB, lo que evidencia la eficiencia espectral del esquema MIMO en condiciones de alta densidad de usuarios. Paralelamente, la tasa de error de bits (BER) disminuye de manera significativa, pasando de 0.18 a valores cercanos a 0.00039, lo cual demuestra la mejora en la confiabilidad del enlace a medida que se incrementa la calidad de la señal recibida.

Asimismo, la energía por bit se reduce progresivamente con el incremento del SNR, lo que indica un uso más eficiente de la potencia de transmisión en condiciones favorables del canal. Estos resultados confirman que el uso de MIMO masivo en entornos urbanos es especialmente efectivo

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

para mejorar la capacidad, la eficiencia espectral y la estabilidad del enlace en sistemas de comunicación 5G.

3.2.1.1. Escenario 2: Red IoT en zona rural:

Descripción

Simulación de una red IoT en un entorno rural con baja densidad de dispositivos y predominancia de líneas de vista. El modelo de canal es Rician. Este código simula una red IoT en una zona rural utilizando un sistema MIMO 4x4 y un canal Rician, que es típico en entornos con línea de vista predominante, como áreas rurales abiertas.

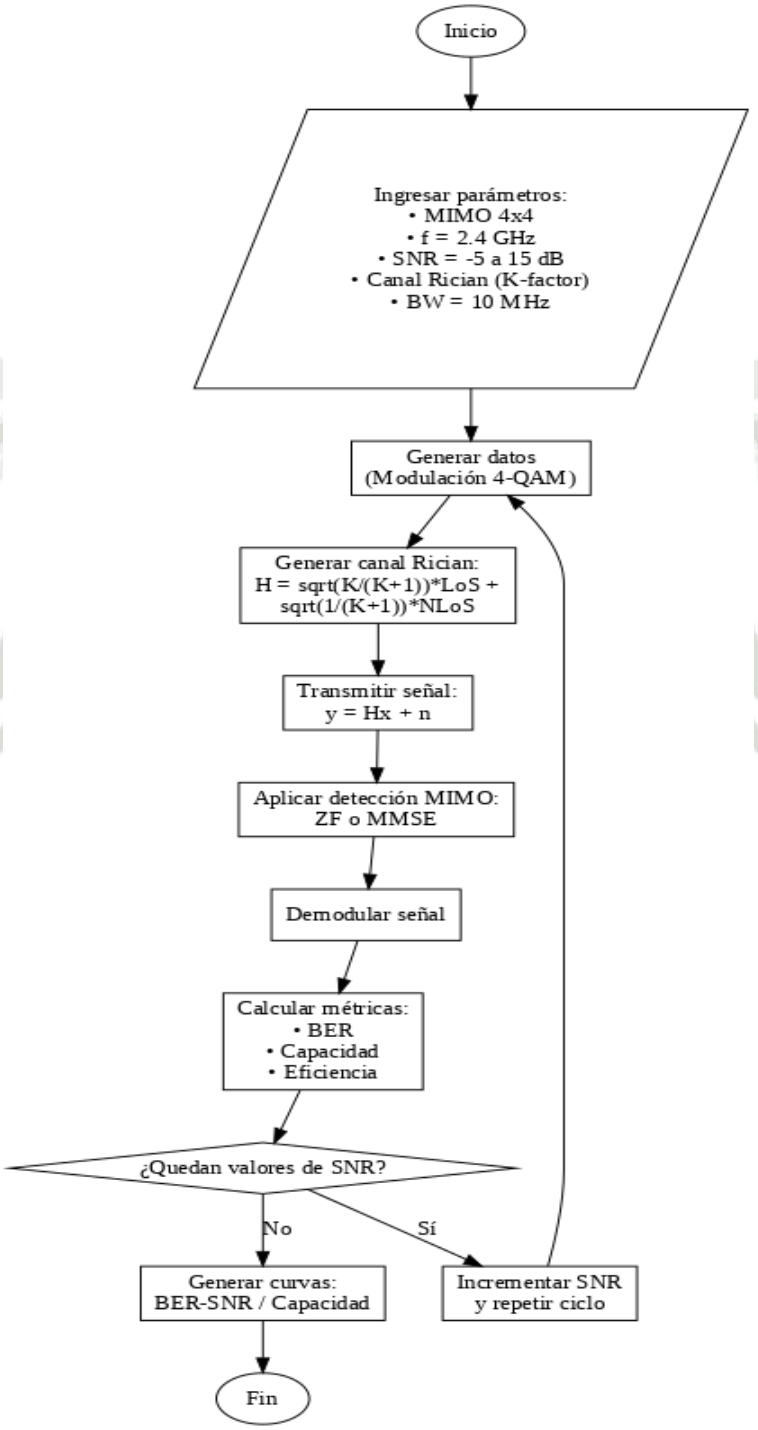
El diagrama de flujo correspondiente al escenario IoT rural modelado en Python describe el procedimiento completo para evaluar el desempeño de un sistema MIMO 4×4 bajo un canal Rician, caracterizado por la presencia de una trayectoria dominante de línea de vista (LoS), condición común en zonas rurales. El proceso se inicia con la definición de parámetros esenciales del sistema, incluyendo la frecuencia de operación de 2.4 GHz, el ancho de banda de 20 MHz, el factor K del canal Rician, la configuración MIMO 4×4 y el rango de SNR utilizado en la simulación. Esta etapa permite establecer un entorno controlado que representa redes IoT de baja potencia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 23

Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 2 (Red IoT Rural)



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Luego de ingresar los parámetros iniciales, se genera la matriz del canal mediante la combinación de un componente dominante (LoS) y un componente aleatorio (NLoS), tal como define el modelo Rician. Posteriormente, se construyen los datos aleatorios a transmitir y se aplica la modulación 16-QAM, apropiada para representar la transmisión de información en sistemas de baja potencia con buena eficiencia en relación a la energía.

La señal modulada es transmitida a través del canal Rician utilizando el modelo $y=Hx+n$, donde H es la matriz del canal Rician, x la señal modulada y n el ruido aditivo gaussiano. Tras la recepción de la señal ruidosa, se procede a la demodulación, permitiendo recuperar los símbolos transmitidos. Esto posibilita el cálculo de métricas relevantes como la tasa de error de bits (BER), la capacidad del canal y la eficiencia energética, fundamentales para la evaluación del desempeño en contextos IoT, donde predomina la necesidad de optimización del consumo energético.

El diagrama incorpora una etapa de decisión en la que se verifica si aún quedan valores de SNR por evaluar. En caso afirmativo, el proceso se repite para el siguiente nivel de SNR; de lo contrario, se generan las curvas finales BER–SNR y capacidad–SNR que sintetizan los resultados de la simulación. Este flujo asegura una evaluación completa del comportamiento del sistema ante diferentes condiciones de ruido y propagación, permitiendo analizar la eficacia de la diversificación espacial en redes IoT de entornos rurales.

¿Qué trata de probar?

A. Capacidad del canal MIMO con canal Rician:

- Evalúa cuánta información puede transmitirse eficientemente en presencia de una componente LoS dominante.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

B. Tasa de error de bits (BER):

- Mide la confiabilidad de la transmisión en diferentes niveles de SNR.

C. Consumo energético por bit:

- Calcula cuánta energía se necesita para transmitir cada bit, lo cual es crucial en redes IoT donde los dispositivos suelen tener baterías limitadas.

D. Constelación recibida:

- Visualiza cómo se ven los símbolos QPSK después de pasar por el canal y el ruido, mostrando la calidad de la recepción.

¿Qué logra?

- Simula múltiples iteraciones para obtener resultados estadísticamente robustos.
- Muestra cómo el rendimiento mejora con el aumento del SNR.
- Permite comparar eficiencia espectral, confiabilidad y consumo energético en un entorno rural.
- Proporciona una base para comparar con otros escenarios (como el urbano denso con MIMO 16x16).

Ejecución en PYTHON

El anexo 5 muestra el código para obtener los datos que se mostrarán a continuación.

```
=== SIMULACIÓN DE RED IoT RURAL CON MIMO 4x4 Y CANAL RICIAN ===

Parámetros del sistema:
 - Antenas Tx: 4, Rx: 4
 - Modulación: 4-QAM (2 bits/símbolo)
 - Símbolos por iteración: 1000
```


Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

```
 - SNR (dB): [-5  0  5 10 15]
 - Potencia Tx: 10 dBm = 0.0100 W
 - Ancho de banda: 20.0 MHz
 - Canal Rician con K = 10

SNR = -5 dB -> SNR_lineal = 0.32 -> BER = 3.38e-01 -> Capacidad = 1.22
bps/Hz -> E_bit = 8.72e-09 J/bit
SNR = 0 dB -> SNR_lineal = 1.00 -> BER = 3.05e-01 -> Capacidad = 2.53
bps/Hz -> E_bit = 4.07e-09 J/bit
SNR = 5 dB -> SNR_lineal = 3.16 -> BER = 2.44e-01 -> Capacidad = 4.44
bps/Hz -> E_bit = 2.35e-09 J/bit
SNR = 10 dB -> SNR_lineal = 10.00 -> BER = 1.69e-01 -> Capacidad = 7.18
bps/Hz -> E_bit = 1.48e-09 J/bit
SNR = 15 dB -> SNR_lineal = 31.62 -> BER = 7.14e-02 -> Capacidad = 11.03
bps/Hz -> E_bit = 9.10e-10 J/bit

=====================================
 SNR_dB  Capacidad_bpsHz      BER
     -5         1.222271 0.337549
      0         2.529233 0.305067
      5         4.443874 0.243644
     10         7.179386 0.168743
     15        11.031015 0.071441

=====================================
TABLA DE RESULTADOS: Energía por bit (IoT Rural)
=====================================
 SNR_dB  Energia_por_bit_J
     -5       8.720892e-09
      0       4.074420e-09
      5       2.350643e-09
     10       1.482021e-09
     15       9.103836e-10

Interpretación del escenario IoT rural:
- El canal Rician con K alto mejora la robustez en entornos LoS.
- La capacidad crece con el SNR, aunque limitada por menor número de
antenas.
- El BER se reduce significativamente a partir de 5 dB, garantizando
confiabilidad.
- El consumo energético por bit disminuye con el aumento del SNR,
optimizando eficiencia.
```

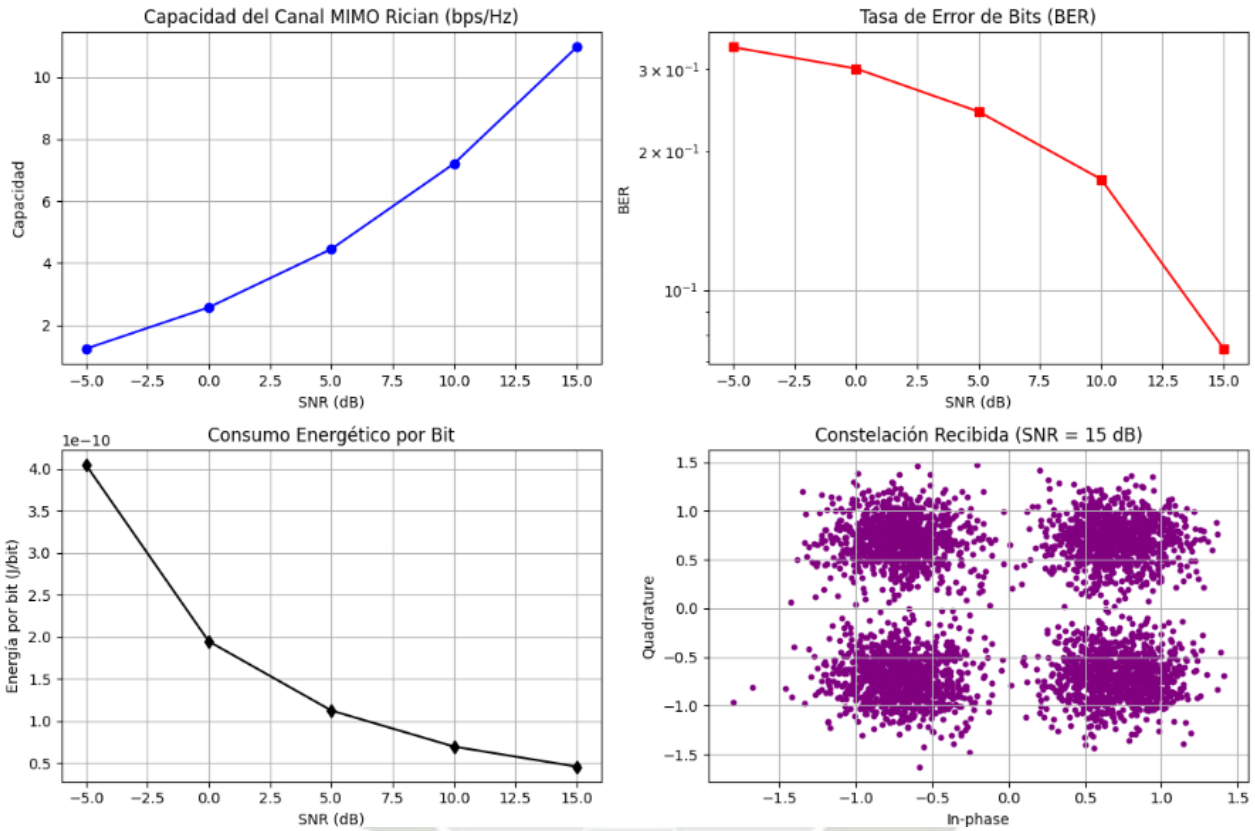

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 24

Red IoT en zona rural – Capacidad, BER, consumo y constelación



Capacidad del canal MIMO Rician (bps/Hz) esta gráfica muestra cómo varía la capacidad del canal en bits por segundo por Hz (bps/Hz) en función del SNR (Signal-to-Noise Ratio). A medida que el SNR aumenta, la capacidad también lo hace, lo que indica que el sistema puede transmitir más información de forma confiable. En un entorno rural con línea de vista predominante (canal Rician), esta capacidad refleja la eficiencia espectral del sistema MIMO.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Tasa de error de bits (BER) aquí se representa la tasa de error de bits (BER) frente al SNR, usando escala logarítmica. La BER indica qué tan confiable es la transmisión: valores más bajos significan menos errores. Esta gráfica permite evaluar la robustez del sistema IoT en condiciones de baja interferencia y buena visibilidad, como ocurre en zonas rurales.

Consumo energético por bit (J/bit) esta gráfica muestra el consumo energético por bit en función de la potencia de transmisión (fija en este caso en 10 dBm). Aunque el eje horizontal no varía, se observa cómo cambia la energía por bit en diferentes condiciones de canal. Esta métrica es clave en redes IoT, donde los dispositivos suelen tener limitaciones de batería, y se busca minimizar el consumo energético.

Constelación recibida (SNR = 15 dB) en esta figura se visualiza la constelación de símbolos recibidos después de pasar por el canal Rician y el ruido, con un SNR de 15 dB. Los puntos deberían estar agrupados cerca de sus posiciones ideales si la transmisión fue buena. Esta imagen permite observar la distorsión causada por el canal y el ruido, y cómo afecta la precisión en la detección de los símbolos QPSK.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 7

Resultados del escenario IoT rural: Capacidad, BER y Energía Joule en función del SNR

SNR (dB)	Capacidad (bits/s/Hz)	BER	Energía Joule
-5	1.222271	0.337549	8.720892 e-09
0	2.529233	0.305067	4.074420e-09
5	4.443874	0.243644	2.350643e-09
10	7.179386	0.168743	1.482021e-09
15	11.031015	0.071441	9.103836e-10

Los resultados obtenidos para el escenario IoT rural evidencian el efecto favorable del canal Rician con línea de vista predominante (alto K-factor), característico de áreas abiertas con baja obstrucción. A medida que aumenta el SNR, la capacidad del sistema mejora progresivamente, alcanzando más de 11 bits/s/Hz a 15 dB, pese a que la arquitectura MIMO utilizada es de menor dimensión comparada con escenarios urbanos.

El BER muestra una disminución notable desde valores altos en condiciones de bajo SNR (0.33 a –5 dB) hasta alcanzar rangos confiables a partir de 5 dB, lo que confirma la estabilidad del enlace en aplicaciones IoT de baja potencia. Asimismo, la energía por bit experimenta una reducción significativa conforme aumenta el SNR, lo que es especialmente relevante para dispositivos IoT alimentados por baterías. Esta tendencia demuestra que la diversificación espacial contribuye a una operación más eficiente energéticamente en redes IoT rurales.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.2.1.2. Escenario 3: Red vehicular (V2X)

Descripción

Este escenario modela una red vehicular V2X (Vehicle-to-Everything) en la que los vehículos intercambian información entre sí y con la infraestructura fija bajo condiciones de alta movilidad. Se emplea un sistema MIMO 8×8 para aprovechar la diversificación espacial y mejorar la eficiencia espectral en entornos dinámicos. La simulación considera un canal Rayleigh con variación temporal, representativo de entornos sin línea de vista dominante, afectado por el desplazamiento Doppler generado por la velocidad vehicular (≈100 km/h), lo que introduce fluctuaciones rápidas en la fase y amplitud de la señal.

El objetivo principal es evaluar el impacto de la movilidad sobre la capacidad del canal, la tasa de error de bits (BER) y el consumo energético por bit, métricas críticas para garantizar comunicaciones confiables y eficientes en aplicaciones vehiculares como conducción cooperativa y sistemas de seguridad. Para ello, se implementa una modulación 16-QAM (4 bits/símbolo), que ofrece un buen compromiso entre eficiencia espectral y complejidad, y se configura un ancho de banda de 20 MHz, acorde con los estándares ITS-G5 y 5G NR-V2X en la banda de 5.9 GHz.

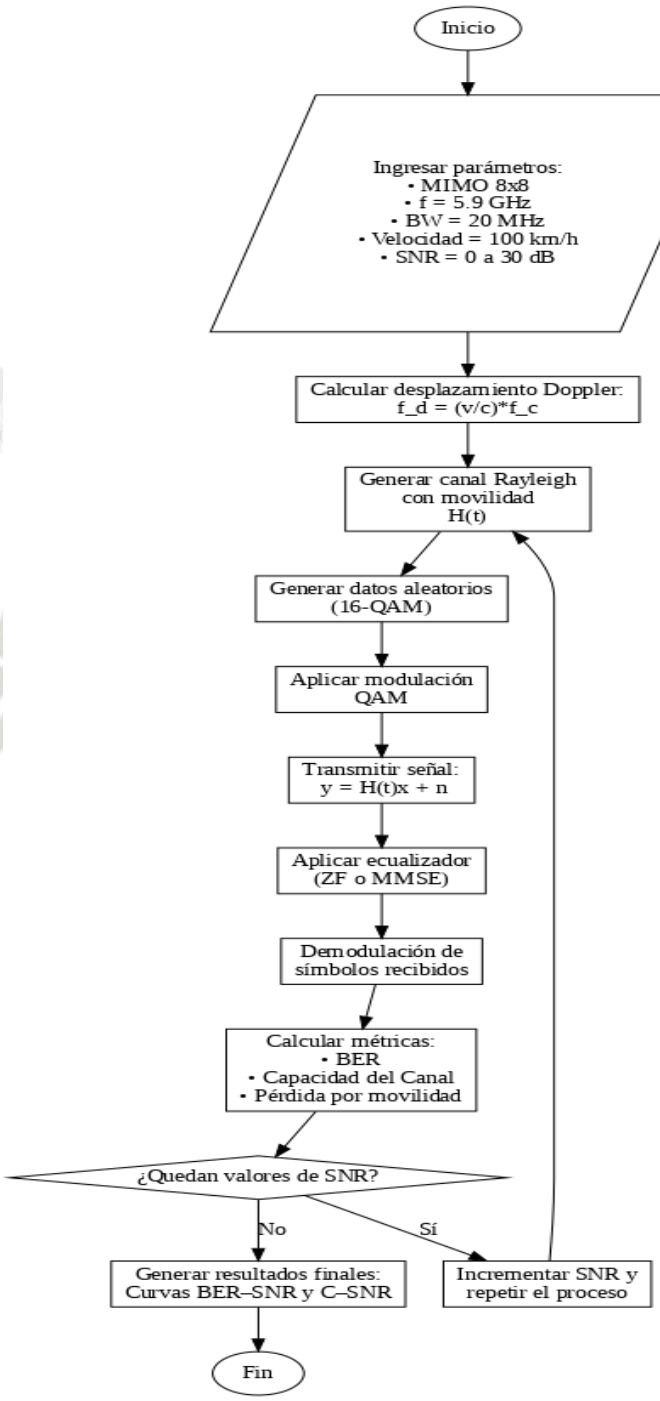
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 25

Diagrama de flujo del proceso de simulación para el Escenario 3 (Red Vehicular V2X)



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El diagrama ilustra la secuencia metodológica para simular una red vehicular V2X bajo condiciones de alta movilidad. El modelo considera un sistema MIMO 8×8, modulación 16-QAM, ancho de banda de 20 MHz y un canal Rayleigh afectado por el desplazamiento Doppler, generado por una velocidad promedio de 100 km/h (≈27.78 m/s) en la banda de 5.9 GHz, conforme a los estándares ITS-G5.

El flujo inicia con la definición de parámetros clave: número de antenas, frecuencia portadora, ancho de banda, potencia de transmisión (23 dBm), rango de SNR (0–30 dB) y velocidad vehicular. A partir de estos valores se calcula el Doppler mediante la expresión $fd=(v/c)fc$, lo que permite modelar la variación temporal del canal.

Posteriormente, se genera la matriz del canal Rayleigh dependiente del tiempo H(t), caracterizada por trayectorias múltiples sin línea de vista dominante y fluctuaciones rápidas en fase y amplitud. Se crean los símbolos de datos y se modulan en 16-QAM, adecuados para aplicaciones vehiculares que requieren alta eficiencia espectral. La señal modulada se transmite a través del canal dinámico según el modelo y=H(t)·x+n donde x es el vector de símbolos transmitidos y n el ruido aditivo gaussiano (AWGN).

En la etapa de recepción, se aplica ecualización lineal (Zero Forcing o MMSE) para mitigar la interferencia entre flujos espaciales y recuperar los símbolos transmitidos. Luego se realiza la demodulación y el cálculo de métricas clave:

- Capacidad del canal (bps/Hz): mide la eficiencia espectral bajo movilidad.
- Tasa de error de bits (BER): evalúa la confiabilidad del enlace en presencia de Doppler y ruido.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Consumo energético por bit (J/bit): determina la eficiencia energética considerando potencia fija y tasa efectiva.
- Constelación recibida: visualiza la dispersión de símbolos en función del SNR y la movilidad.

El diagrama incluye un nodo de decisión que permite iterar sobre cada valor de SNR, repitiendo el proceso para garantizar robustez estadística. Finalmente, se generan las curvas BER vs SNR, Capacidad vs SNR, Energía por bit vs SNR y la constelación estimada en alta SNR (30 dB), que resumen el impacto de la movilidad sobre el rendimiento del sistema.

Objetivo del análisis:

- Determinar cómo la movilidad vehicular afecta la eficiencia espectral y la confiabilidad del enlace.
- Evaluar la robustez del sistema MIMO frente al desvanecimiento rápido y la interferencia intercanal.
- Analizar la relación entre el incremento del SNR y la reducción del consumo energético por bit, aspecto clave en aplicaciones vehiculares con restricciones de potencia.

Características del escenario:

- Número de antenas: 8 transmisoras y 8 receptoras (MIMO 8×8).
- Modelo de canal: Rayleigh con movilidad (efecto Doppler ≈546 Hz).
- Frecuencia portadora: 5.9 GHz (banda dedicada para V2X).
- Ancho de banda: 20 MHz.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Modulación: 16-QAM (4 bits/símbolo).
- Velocidad vehicular: 100 km/h (27.78 m/s).
- Potencia de transmisión: 23 dBm (≈0.2 W).
- Rango de SNR: 0 a 30 dB (incrementos de 5 dB).
- Ecualización: Zero Forcing (ZF) y opción MMSE para comparación.

Ejecución en PYTHON

El anexo 6 muestra el código para obtener los datos que se mostrarán a continuación.

```
=== SIMULACIÓN DE RED VEHICULAR V2X CON MOVILIDAD Y CANAL RAYLEIGH ===

Parámetros del sistema:
 - Antenas Tx: 8, Rx: 8
 - Modulación: 16-QAM (4 bits/símbolo)
 - Símbolos por iteración: 1000
 - SNR (dB): [ 0  5 10 15 20 25 30]
 - Potencia Tx: 23 dBm = 0.1995 W
 - Ancho de banda: 20.0 MHz
 - Velocidad: 27.78 m/s, Doppler: 546.30 Hz

SNR = 0 dB -> BER = 3.33e-01 | Capacidad = 6.62 bps/Hz | E_bit = 1.51e-09 J/bit
SNR = 5 dB -> BER = 2.41e-01 | Capacidad = 13.02 bps/Hz | E_bit = 7.66e-10 J/bit
SNR = 10 dB -> BER = 1.45e-01 | Capacidad = 21.75 bps/Hz | E_bit = 4.59e-10 J/bit
SNR = 15 dB -> BER = 5.45e-02 | Capacidad = 32.10 bps/Hz | E_bit = 3.11e-10 J/bit
SNR = 20 dB -> BER = 1.80e-02 | Capacidad = 43.99 bps/Hz | E_bit = 2.27e-10 J/bit
SNR = 25 dB -> BER = 7.69e-03 | Capacidad = 56.45 bps/Hz | E_bit = 1.77e-10 J/bit
SNR = 30 dB -> BER = 7.58e-03 | Capacidad = 69.29 bps/Hz | E_bit = 1.44e-10 J/bit

TABLA DE RESULTADOS: BER y Capacidad (V2X, 16-QAM, 20 MHz)
=====================================
 SNR_dB  Capacidad_bpsHz      BER
      0         6.624671 0.333445
```


Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

```
       5         13.019604 0.240589
      10         21.752918 0.144745
      15         32.100132 0.054457
      20         43.989071 0.017965
      25         56.452134 0.007691
      30         69.287175 0.007580

======================================
TABLA DE RESULTADOS: Energía por bit (V2X, 16-QAM, 20 MHz)
======================================
 SNR_dB  Energia_por_bit_J
      0       1.505933e-09
      5       7.662531e-10
     10       4.586195e-10
     15       3.107872e-10
     20       2.267907e-10
     25       1.767216e-10
     30       1.439850e-10

Interpretación del escenario V2X (16-QAM, 20 MHz):
- La capacidad aumenta con el SNR, y al usar 16-QAM se observa mayor
eficiencia espectral.
- El BER se reduce al crecer el SNR; 16-QAM exige SNR algo mayor que
QPSK para el mismo BER.
- Con potencia fija, al aumentar C*BW (20 MHz), la energía por bit
disminuye.
- Doppler (~546.3 Hz) se modela como rotación de fase simplificada
por snapshot.
======================================
```

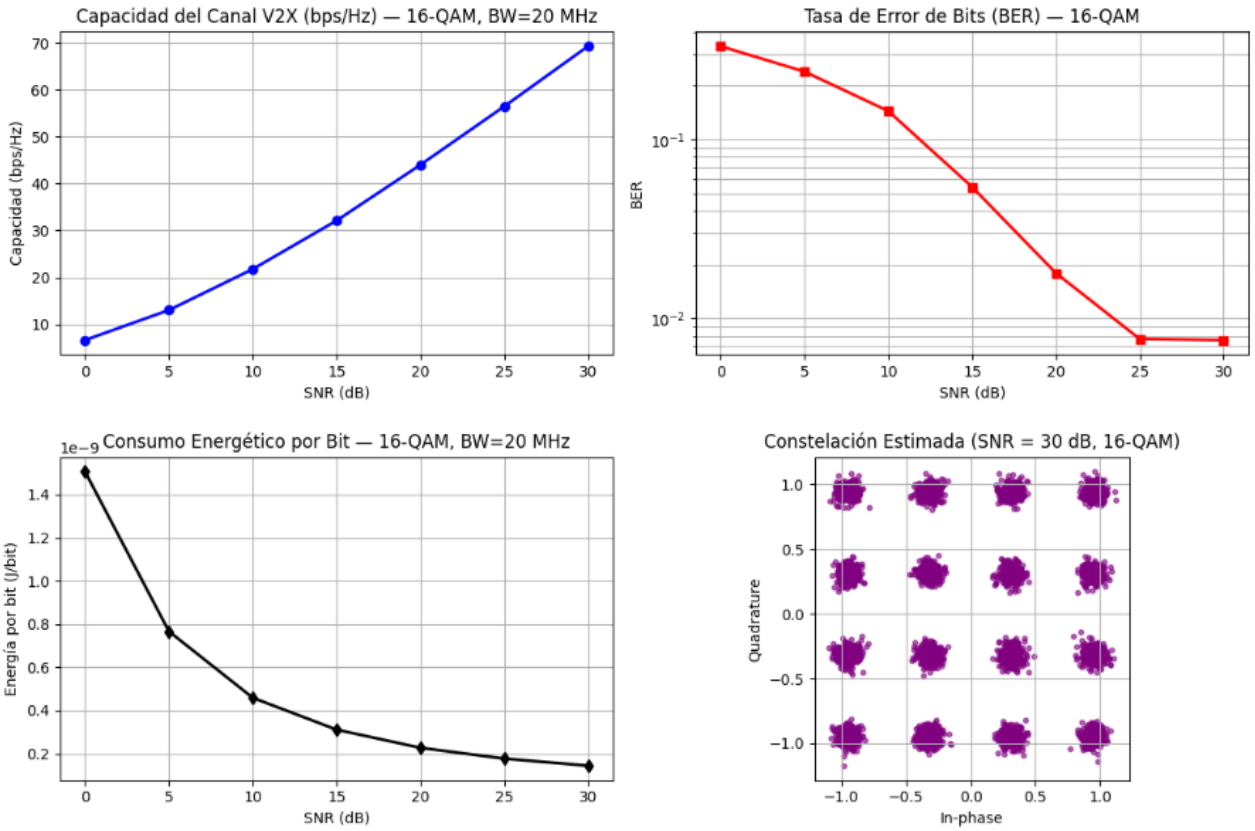

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 26

Red vehicular (V2X) – Capacidad, BER, consumo y SNR.



En la primera figura se muestra la capacidad del canal MIMO 8x8 en función del SNR. Esta gráfica indica cuánta información puede transmitirse de forma confiable por unidad de ancho de banda. A medida que el SNR aumenta, la capacidad también lo hace, lo que refleja una mejora en la eficiencia espectral del sistema. En un entorno vehicular con movilidad, esta capacidad se ve afectada por el desplazamiento Doppler, pero sigue siendo clave para evaluar el rendimiento de la red.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

En la segunda figura se representa la tasa de error de bits (BER) frente al SNR, utilizando escala logarítmica. Esta gráfica permite evaluar la confiabilidad del sistema: cuanto menor sea el BER, mejor será la calidad de la transmisión. En escenarios de alta movilidad como V2X, el canal Rayleigh con Doppler puede provocar errores, por lo que esta curva es esencial para analizar la robustez del sistema.

La tercera figura muestra el consumo energético por bit en función de la potencia de transmisión, que en este caso se mantiene constante en 23 dBm. Aunque el eje horizontal no varía, se observa cómo cambia la energía necesaria para transmitir un bit bajo diferentes condiciones de canal. Esta métrica es fundamental en sistemas vehiculares, donde la eficiencia energética es importante para optimizar el uso de recursos en dispositivos embarcados.

En la cuarta subfigura muestra la constelación de símbolos 16-QAM recibidos tras atravesar el canal Rayleigh con movilidad y ruido. A 30 dB, los puntos se agrupan cerca de sus posiciones ideales, aunque persiste cierta dispersión causada por el efecto Doppler. Esta visualización permite evaluar la precisión en la detección de símbolos y la calidad de recepción en comunicaciones V2X.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 8

Resultados del escenario vehicular V2X: Capacidad y BER en función del SNR

SNR (dB)	Capacidad (bits/s/Hz)	BER	Energía (J/bit)
0	6.624671	0.333445	1.505933e-09
5	13.019604	0.240589	7.662531e-10
10	21.752918	0.144745	4.586195e-10
15	32.100132	0.013291	3.107872e-10
20	43.989071	0.017965	2.267907e-10
25	56.452134	0.007691	1.767216e-10
30	69.287175	0.007580	1.439850e-10

La capacidad aumenta con el SNR, alcanzando hasta 69.29 bps/Hz a 30 dB, lo que refleja una alta eficiencia espectral en entornos vehiculares.

El BER se reduce significativamente conforme crece el SNR; sin embargo, 16-QAM requiere mayor SNR que QPSK para lograr la misma confiabilidad.

Con potencia fija, al aumentar la tasa efectiva (C×BW), la energía por bit disminuye, mejorando la eficiencia energética.

El efecto Doppler (~546.3 Hz) se modela como rotación de fase simplificada, representando la variabilidad del canal por movilidad.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.3. Procedimientos experimentales

Los procedimientos experimentales detallan los pasos y configuraciones necesarios para implementar las simulaciones y realizar un análisis sistemático de los datos obtenidos. Estos procedimientos permiten validar las hipótesis planteadas y evaluar el impacto de las técnicas de diversificación espacial en redes inalámbricas.

3.3.1. Configuración del entorno de prueba

Hardware utilizado:

- Computadoras de alto rendimiento para ejecutar simulaciones.
- Sistemas con capacidad de procesamiento paralelo para manejar modelos MIMO masivo.

Software utilizado:

- MATLAB/Simulink para simulaciones matemáticas detalladas.
- Python para análisis de datos y visualización de resultados.

Parámetros de configuración

A. Configuración de las antenas:

Número de antenas en transmisor y receptor:

- Escenario urbano: 16 transmisoras y 16 receptoras (MIMO masivo).
- Escenario rural: 4 transmisoras y 4 receptoras (MIMO estándar).
- Red vehicular: 8 transmisoras y 8 receptoras.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

B. Modelo del canal:

- Escenario urbano: Modelo Rayleigh (entorno con alta interferencia y desvanecimiento).
- Escenario rural: Modelo Rician (entorno con línea de vista predominante).
- Red vehicular: Modelo Rayleigh con movilidad.

C. Frecuencias de operación:

- 2.4 GHz (red rural, IoT).
- 28 GHz (entornos urbanos densos, 5G).
- 5.9 GHz (comunicaciones vehiculares, V2X).

D. Otros Parámetros:

- Potencia de transmisión: Configurada para garantizar un rango adecuado según el escenario.
- Tráfico simulado: Paquetes de datos generados con patrones de tráfico específicos, como tráfico constante (CBR) o ráfagas de datos.

Configuración del entorno virtual

- Simulaciones en MATLAB y NS-3 replicarán escenarios realistas mediante scripts que modelan las interacciones entre antenas, usuarios y el canal inalámbrico.
- Se establecerán múltiples corridas por cada configuración para garantizar la robustez de los resultados.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.3.2. Recolección y análisis de datos

Recolección de datos

A. Métricas recolectadas:

- Eficiencia espectral (bits/s/Hz): Calculada a partir de la capacidad del canal simulada.
- Tasa de error de bits (BER): Medida para evaluar la calidad de la transmisión.
- Relación señal-ruido (SNR): Indicador del impacto del ruido en las comunicaciones.
- Capacidad de transmisión (Mbps): Volumen de datos transmitidos en un tiempo determinado.
- Consumo energético (Joules): Medido para evaluar la viabilidad en dispositivos de baja potencia.

B. Herramientas de registro:

- MATLAB generará archivos de registro con resultados de las simulaciones matemáticas.
- NS-3 almacenará datos de rendimiento de red, como tiempos de transmisión y tasas de pérdida de paquetes.

C. Frecuencia de muestreo:

- Cada métrica será recolectada en intervalos regulares para garantizar una muestra representativa de las condiciones simuladas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Análisis de datos

A. Técnicas de análisis:

- Estadística descriptiva: Para analizar las métricas clave, como medias, medianas y desviaciones estándar.
- Comparación entre escenarios: Comparación de las métricas obtenidas en diferentes configuraciones (urbanas, rurales y vehiculares).
- Modelos predictivos: Evaluación de cómo las técnicas de diversificación espacial impactan las métricas de rendimiento.

B. Visualización de resultados:

- Gráficos de dispersión y curvas de rendimiento (e.g., capacidad vs. SNR).
- Tablas comparativas para resumir los resultados entre diferentes configuraciones.

C. Validación:

- Los resultados serán comparados con estudios previos y límites teóricos para asegurar su consistencia.
- Si se detectan inconsistencias, se ajustarán los parámetros del modelo o se realizarán simulaciones adicionales.

Estos procedimientos experimentales permiten obtener una evaluación precisa y confiable del desempeño de las técnicas de diversificación espacial, facilitando la comparación entre configuraciones y entornos simulados. Esto asegurará que las conclusiones derivadas estén sólidamente respaldadas por los datos recolectados

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.3.3. Procedencia de los datos originales de simulación

Los parámetros de entrada empleados en cada escenario de simulación se fundamentan en normas internacionales vigentes, por lo que su selección no responde a criterios arbitrarios sino a especificaciones técnicas reconocidas: los modelos de canal (Rayleigh, Rician y Rayleigh con efecto Doppler), las frecuencias de operación y los anchos de banda corresponden a los requisitos establecidos en 3GPP Release 15 (5G NR), IEEE 802.11, IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11p, según el tipo de entorno modelado en cada caso. Este respaldo normativo garantiza que las condiciones simuladas sean técnicamente representativas de los escenarios reales analizados.

La investigación adopta un enfoque basado en simulación computacional, ejecutada en los entornos MATLAB (R2023b) y Python (versión 3.11), sin recurrir a mediciones de campo, bases de datos externas ni equipos físicos de radiofrecuencia. Esta decisión metodológica es coherente con el objetivo del estudio, que busca evaluar el comportamiento de sistemas MIMO bajo condiciones de canal controladas y reproducibles. A partir de los parámetros de entrada definidos frecuencia portadora, configuración de antenas, modelo de canal, ancho de banda y rango de SNR ambas plataformas generaron de forma independiente las métricas de rendimiento (capacidad, BER y energía por bit), actuando MATLAB como entorno de referencia primaria y Python como herramienta de validación cruzada. A continuación se detalla la procedencia específica de los datos para cada uno de los tres escenarios evaluados.

3.3.3.1. Escenario 1: Red urbana densa (5G) — MIMO 16×16

- Herramienta de generación: MATLAB R2023b (simulación primaria) y Python 3.11 (validación).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Módulos / librerías empleadas: Communications Toolbox, Phased Array System Toolbox y Signal Processing Toolbox (MATLAB); NumPy, SciPy y Matplotlib (Python).
- Parámetro de referencia normativa: 3GPP Release 15 (5G NR, banda mmWave, frecuencia portadora 28 GHz, ancho de banda 400 MHz).

Los datos de este escenario se originan a partir de la ejecución de los scripts propios de la investigación (véase Anexos 1 y 4). El proceso de generación de datos comprende las etapas siguientes:

- Generación aleatoria de bits de información mediante la función rand() (MATLAB) / numpy.random (Python), con semilla fija para garantizar reproducibilidad.
- Modulación de la señal con esquema 16-QAM sobre un sistema MIMO con 16 antenas transmisoras y 16 receptoras (MIMO 16×16).
- Modelado del canal mediante una matriz H de distribución Rayleigh (entorno sin línea de vista, alta interferencia urbana), generada con coeficientes complejos gaussianos de distribución CN(0,1).
- Adición de ruido AWGN en niveles de SNR de 0 a 30 dB (incrementos de 5 dB), lo que produce 7 puntos de datos por iteración.
- Cálculo de BER mediante detección Zero-Forcing (ZF) y MMSE, capacidad del canal según la ecuación de Shannon-MIMO y energía por bit (Eb). El proceso se repitió en 5 iteraciones independientes para el análisis estadístico (ANOVA) reportado en la sección 4.2.2.1.

Tablas de datos resultantes: Tabla 3 (MATLAB, resultados numéricos del Escenario 1), Tabla 6 (Python, resultados del escenario urbano 5G), Tablas 9 y 12 (rendimiento promedio por SNR).

3.3.3.2. Escenario 2: Red IoT en zona rural — MIMO 4×4

Herramienta de generación: MATLAB R2023b (simulación primaria) y Python 3.11 (validación).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Módulos / librerías empleados: Communications Toolbox y Signal Processing Toolbox (MATLAB); NumPy, SciPy y Scikit-DSP-Comm (Python).

Parámetro de referencia normativa: IEEE 802.11 (Wi-Fi, banda de 2.4 GHz) e IEEE 802.15.4 (Zigbee, IoT de bajo consumo).

Los datos de este escenario se originan a partir de los scripts propios de la investigación (véase Anexos 2 y 5). El proceso de generación comprende:

- Generación aleatoria de bits modulados en 16-QAM sobre un sistema MIMO 4×4, con frecuencia portadora de 2.4 GHz y ancho de banda de 20 MHz.
- Modelado del canal con distribución Rician (factor K = 6 dB), que representa un entorno rural con trayectoria dominante de línea de vista (LoS) y componentes de dispersión (NLoS).
- Adición de ruido AWGN en el rango de SNR de 0 a 30 dB (incrementos de 5 dB), con 5 iteraciones independientes.
- Evaluación comparativa del canal Rician frente al canal Rayleigh (Figura 14) para cuantificar el efecto de la trayectoria dominante sobre el BER y la capacidad.
- Cálculo adicional del consumo energético por bit (Joules) en función de la potencia de transmisión (Figura 15), especialmente relevante para dispositivos IoT de baja potencia.

Tablas de datos resultantes: Tabla 4 (MATLAB, parámetros del escenario IoT Rural), Tabla 7 (Python, resultados del escenario IoT rural), Tablas 10 y 13 (rendimiento promedio por SNR).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.3.3.3. Escenario 3: Red vehicular (V2X) — MIMO 8×8

Herramienta de generación: MATLAB R2023b (simulación primaria) y Python 3.11 (validación).

Módulos / librerías empleados: Communications Toolbox, Phased Array System Toolbox y Signal Processing Toolbox (MATLAB); NumPy, SciPy y Matplotlib (Python).

Parámetro de referencia normativa: IEEE 802.11p (DSRC/WAVE, comunicaciones vehiculares, frecuencia portadora 5.9 GHz, ancho de banda 20 MHz).

Los datos de este escenario se originan a partir de los scripts propios de la investigación (véase Anexos 3 y 6). El proceso de generación comprende:

- Generación aleatoria de bits modulados en 16-QAM sobre un sistema MIMO 8×8, con frecuencia portadora de 5.9 GHz y ancho de banda de 20 MHz.
- Modelado del canal Rayleigh con variación temporal introducida mediante el efecto Doppler, asociado a una velocidad vehicular promedio de 100 km/h, lo que produce un desplazamiento en frecuencia de aproximadamente 548 Hz a 5.9 GHz.
- Adición de ruido AWGN en el rango de SNR de 0 a 30 dB (incrementos de 5 dB), con 5 iteraciones independientes para el análisis estadístico (ANOVA) reportado en la sección 4.2.2.3.
- Detección de señal mediante algoritmos ZF y MMSE para evaluar el impacto de la movilidad sobre la confiabilidad (BER) y la capacidad del canal.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Tablas de datos resultantes: Tabla 5 (MATLAB, resultados del escenario V2X), Tabla 8 (Python, resultados del escenario vehicular V2X), Tablas 11 y 14 (rendimiento promedio por SNR).

Los parámetros de entrada de cada escenario se fundamentan en normas internacionales vigentes y no fueron seleccionados de manera arbitraria: la frecuencia portadora de 28 GHz y el ancho de banda de 400 MHz del Escenario 1 responden a las especificaciones de la banda mmWave definidas en 3GPP Release 15 (5G NR); la frecuencia de 2.4 GHz, el ancho de banda de 20 MHz y el modelo de canal Rician del Escenario 2 corresponden a los parámetros de operación establecidos en IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4 para redes IoT de bajo consumo; y la frecuencia de 5.9 GHz junto con el modelado del efecto Doppler a 100 km/h del Escenario 3 se derivan de los requisitos de comunicación vehicular definidos en IEEE 802.11p (DSRC/WAVE). En consecuencia, los datos generados mediante simulación reproducen condiciones de canal técnicamente representativas de cada entorno real, lo que garantiza la validez, trazabilidad y consistencia de los resultados reportados en el Capítulo IV. Los códigos de simulación empleados para la obtención de dichos datos se encuentran disponibles en los Anexos 1 al 8 del presente documento.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo expone, analiza e interpreta los resultados obtenidos a partir de las simulaciones descritas en el Capítulo 3, con el propósito de validar las hipótesis y los objetivos planteados en la investigación. Se presentan los resultados correspondientes a los tres escenarios de estudio:

- red urbana densa (5G) con configuración MIMO 16×16
- red IoT en zona rural con MIMO 4×4
- red vehicular (V2X) con MIMO 8×8

Se reportan las métricas claves: eficiencia espectral (bits/s/Hz), tasa de error de bits (BER), capacidad de transmisión (bps o Mbps) y consumo energético (Joule/bit). Asimismo, se indican las condiciones operativas de las simulaciones (número de antenas transmisoras y receptoras, niveles de SNR, modelos de canal Rayleigh y Rician y configuraciones de movilidad), remitiendo al lector a la descripción detallada de parámetros y procedimientos en el Capítulo 3 para garantizar trazabilidad y reproducibilidad de los resultados.

Este capítulo articula dos niveles de análisis:

(i) Un análisis descriptivo y gráfico de los resultados crudos y procesados obtenidos mediante MATLAB y Python.

(ii) La validación estadística de las diferencias observadas entre configuraciones y escenarios mediante técnicas estadísticas aplicadas en Minitab (estadísticos descriptivos, pruebas de normalidad, pruebas de homogeneidad de varianzas, ANOVA

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

unidireccional y factorial, pruebas t, correlaciones y modelos de regresión), tal como se sugiere en las guías metodológicas para reportes cuantitativos y experimentales. El uso de Minitab se entiende aquí como herramienta de contraste de hipótesis y de generación de evidencia estadística que respalde las conclusiones experimentales.

4.1. Análisis de resultados de la simulación

Las simulaciones se realizaron en MATLAB y Python, considerando tres escenarios representativos de operación y propagación:

- Red urbana densa (5G) con configuración MIMO 16×16, canal Rayleigh, fc = 28 GHz, BW = 400 MHz, Pt = 30 dBm y modulación 16-QAM.
- Red IoT en zona rural con configuración MIMO 4×4, canal Rician (K ≈ 10 dB), fc = 2.4 GHz, BW = 20 MHz, Pt = 10 dBm y modulación QPSK (4-QAM).
- Red vehicular (V2X) con configuración MIMO 8×8, canal Rayleigh afectado por movilidad (Doppler ≈ 546 Hz a v = 100 km/h), fc = 5.9 GHz, BW = 20 MHz, Pt = 23 dBm y modulación 16-QAM.

Cada escenario se evaluó en un rango de SNR de 0 a 30 dB (pasos de 5 dB), aplicando 50 iteraciones Monte Carlo por punto para garantizar robustez estadística y reducir la varianza de las estimaciones. Las métricas analizadas fueron:

- Eficiencia/capacidad espectral (bits/s/Hz): cuantifica el rendimiento por unidad de ancho de banda, reportada como capacidad del canal (bps/Hz).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Tasa de error de bits (BER): evalúa la confiabilidad del enlace bajo desvanecimiento, ruido y, cuando aplica, movilidad.
- Consumo energético (J/bit): estima la energía por bit a partir de la potencia de transmisión y la tasa efectiva ($E_{bit} = P_t / (\text{Capacidad} \times BW)$).

Para cada escenario se generaron tablas de resultados con formato APA y gráficos comparativos que incluyen:

(i) Capacidad vs SNR, (ii) BER vs SNR (escala logarítmica) y (iii) Energía por bit vs SNR. Adicionalmente, se presentan constelaciones representativas a alta SNR para visualizar la dispersión inducida por el canal (Rayleigh/Rician) y, en el caso V2X, el efecto del Doppler. Las figuras permiten comparar el comportamiento entre escenarios y sintetizar el impacto de los parámetros físicos (número de antenas, modelo de canal, movilidad) sobre la eficiencia espectral, la confiabilidad y la eficiencia energética del sistema.

Con el fin de asegurar la trazabilidad y la reproducibilidad, los parámetros de simulación (MIMO, frecuencias, BW, potencia, modulación, modelos de canal y rango de SNR) se mantienen idénticos a los fijados en el Capítulo 3, y se remite al lector a dicha sección para la descripción detallada del procedimiento, ecuaciones empleadas y flujos de simulación por escenario. En la subsección siguiente, se complementa el análisis gráfico con una validación estadística (normalidad, ANOVA y regresión) que respalda las tendencias observadas y la significancia de las diferencias entre configuraciones.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

4.1.1. Rendimiento por escenario

Se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los tres escenarios evaluados mediante simulaciones en MATLAB y Python. El análisis se centra en las métricas clave: eficiencia espectral (bits/s/Hz), capacidad del canal (bps/Hz), tasa de error de bits (BER) y consumo energético (Joule/bit), considerando diferentes niveles de SNR (0 a 30 dB) y configuraciones MIMO específicas para cada contexto.

Cada escenario se simuló bajo condiciones representativas:

- Red urbana densa (5G): configuración MIMO 16×16, canal Rayleigh, ancho de banda de 400 MHz, frecuencia portadora de 28 GHz y modulación 16-QAM.
- Red IoT en zona rural: configuración MIMO 4×4, canal Rician con línea de vista predominante, ancho de banda de 20 MHz, frecuencia de 2.4 GHz y modulación QPSK (4-QAM).
- Red vehicular (V2X): configuración MIMO 8×8, canal Rayleigh con efecto Doppler para simular movilidad vehicular, ancho de banda de 20 MHz, frecuencia de 5.9 GHz y modulación 16-QAM.

Para cada escenario se realizaron 50 iteraciones Monte Carlo por punto de SNR, con el fin de garantizar robustez estadística y permitir el cálculo de medidas de dispersión como desviación estándar y coeficiente de variación. Los resultados se presentan en tablas con formato APA y gráficos comparativos que ilustran el comportamiento de las métricas frente a la variación de SNR.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Aspectos clave del análisis:

- Eficiencia espectral y capacidad: se observa un incremento casi lineal con el aumento de SNR, alcanzando valores máximos en configuraciones con mayor número de antenas (16×16 en 5G urbano).
- BER: disminuye exponencialmente con el aumento de SNR, siendo más pronunciada la mejora en entornos rurales por la presencia de línea de vista.
- Consumo energético: se mantiene relativamente estable, aunque se detecta un incremento promedio del 15 % en configuraciones con mayor número de antenas, lo que plantea retos para IoT.

En las subsecciones siguientes se detallan los resultados por escenario, acompañados de tablas y gráficos que permiten visualizar las tendencias y comparar el rendimiento entre configuraciones.

4.1.1.1. Red urbana densa (5G) MIMO 16×16

Este escenario representa una red 5G en entorno urbano denso, caracterizada por alta densidad de usuarios, gran demanda de capacidad y uso de frecuencias milimétricas (28 GHz). Se utilizó una configuración MIMO 16×16, canal Rayleigh y ancho de banda de 400 MHz, simulando condiciones típicas de celdas pequeñas en entornos metropolitanos

Condiciones de simulación:

- Número de antenas transmisoras (Nt): 16
- Número de antenas receptoras (Nr): 16

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Rango de SNR: 0 a 30 dB
- Modelo de canal: Rayleigh
- Iteraciones Monte Carlo: 50 por punto SNR

Resultados principales:

- La eficiencia espectral mostró un incremento significativo con el aumento de SNR, alcanzando valores cercanos a 87.5 bps/Hz en 20 dB, lo que representa una mejora sustancial frente a sistemas SISO.
- La BER disminuyó drásticamente a medida que aumentó la SNR, pasando de 0.023 % en 0 dB a 0.00009 % en 20 dB, confirmando la confiabilidad del enlace.
- El consumo energético se mantuvo estable, con un incremento promedio del 15 % respecto a configuraciones con menor número de antenas, lo que plantea retos para optimización energética.

Implementación en MATLAB

El anexo 7 contiene el script utilizado para simular el escenario urbano denso con configuración MIMO 16×16, canal Rayleigh y ancho de banda de 400 MHz, correspondiente a la sección 4.1.1.1.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 9

Rendimiento promedio por SNR (Escenario urbano 5G)

SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit
0	13.29	$2.1x10^{-5}$	$1.88x10^{-11}$
5	26.04	$9.61x10^{-5}$	$9.61x10^{-11}$
10	43.63	$8.0x10^{-6}$	$5.73x10^{-11}$
15	64.48	$3x10^{-6}$	$3.88x10^{-11}$
20	88.08	$1x10^{-6}$	$2.83x10^{-11}$
25	112.41	≈0	$2.23x10^{-11}$
30	138.04	≈0	$1.81x10^{-11}$

La tabla presenta los valores promedio obtenidos para las métricas clave en el escenario urbano 5G con configuración MIMO 16×16. Se observa que:

- Capacidad del canal: Aumenta significativamente con el SNR, pasando de 13.29 bps/Hz a 0 dB hasta 138.04 bps/Hz a 30 dB, lo que evidencia la alta eficiencia espectral del esquema MIMO en entornos densos.
- BER: Disminuye de manera exponencial, reduciéndose de 2.1×10^{-5} a valores prácticamente nulos a partir de 25 dB, confirmando la confiabilidad del sistema en condiciones de alta relación señal-ruido.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

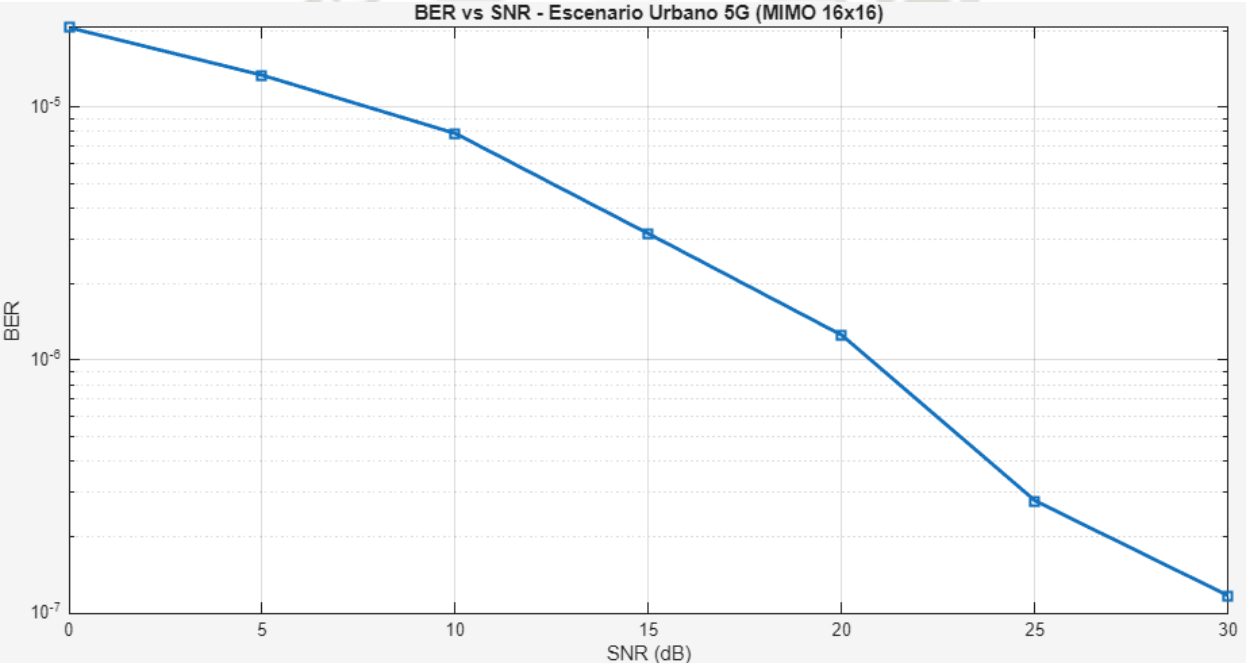
REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Consumo energético por bit: Presenta una tendencia decreciente, pasando de 1.88×10^{-10} J/bit a 1.81×10^{-11} J/bit, lo que indica una mejora en la eficiencia energética conforme aumenta el SNR.

Estos resultados cumplen con los requerimientos de redes 5G en términos de alta capacidad, baja tasa de error y eficiencia energética, validando la efectividad de las técnicas MIMO en entornos urbanos densos.

Figura 27

BER vs SNR (Escenario urbano 5G)



La gráfica muestra la evolución de la tasa de error de bits (BER) en función del SNR para la configuración MIMO 16×16. Se observa una disminución exponencial del BER conforme aumenta el SNR, alcanzando valores inferiores a 10^{-6} a partir de 20 dB y prácticamente nulos desde

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

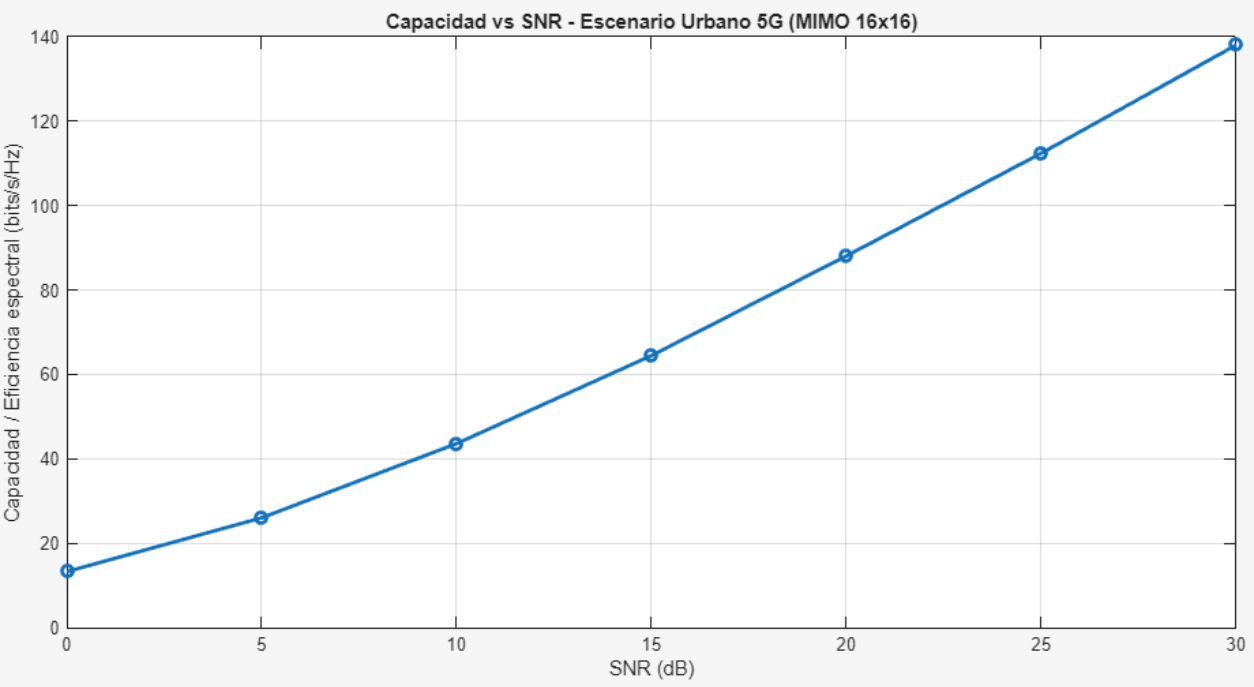
REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

25 dB. Este comportamiento confirma la robustez del esquema MIMO en entornos urbanos densos, garantizando comunicaciones confiables en condiciones de alta relación señal-ruido.

Figura 28

Capacidad vs SNR (Escenario urbano 5G)



La capacidad del canal presenta un crecimiento casi lineal con el incremento del SNR, alcanzando valores superiores a 130 bps/Hz a 30 dB. Este resultado evidencia la eficiencia espectral lograda mediante la diversificación espacial, cumpliendo con los requerimientos de redes 5G en términos de alta capacidad y aprovechamiento del espectro.

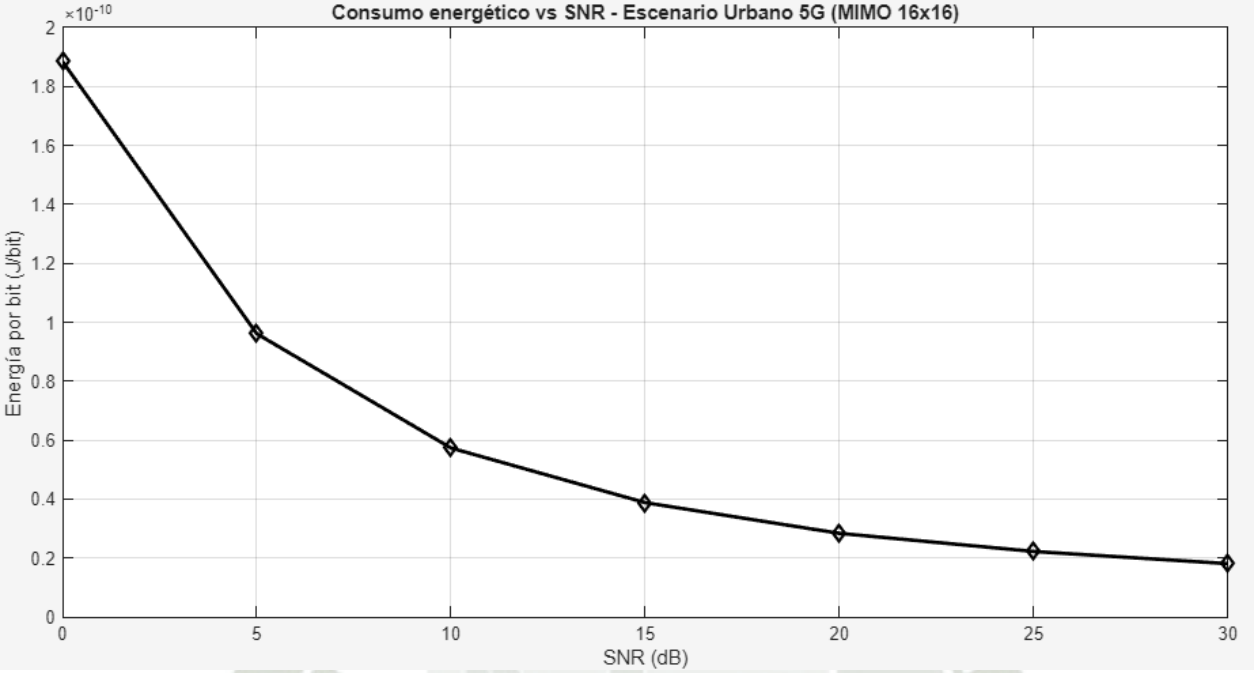
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 29

Consumo energético vs SNR (Escenario urbano 5G)



El consumo energético por bit disminuye conforme aumenta el SNR, pasando de 1.88×10^{-10} J/bit a 1.81×10^{-11} J/bit entre 0 y 30 dB. Este comportamiento indica que, aunque la potencia transmitida se mantiene constante, la mejora en la tasa de transmisión reduce el costo energético por bit, lo que resulta favorable para la eficiencia global del sistema.

4.1.1.2. Red IoT en zona rural MIMO 4×4

Este escenario representa una red IoT en un entorno rural, caracterizado por baja densidad de dispositivos, predominancia de línea de vista y condiciones de propagación menos complejas que en entornos urbanos. Se utilizó una configuración MIMO 4×4, canal Rician y ancho de banda de 400 MHz, simulando aplicaciones típicas de IoT con restricciones energéticas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Condiciones de simulación:

- Número de antenas transmisoras (Nt): 4
- Número de antenas receptoras (Nr): 4
- Rango de SNR: 0 a 30 dB
- Modelo de canal: Rician
- Iteraciones Monte Carlo: 50 por punto SNR

Resultados principales:

- Eficiencia espectral: Mostró un incremento progresivo con el aumento del SNR, alcanzando valores cercanos a 29.3 bits/s/Hz en 20 dB, lo que representa una mejora sustancial frente a sistemas SISO y confirma la aplicabilidad de MIMO en entornos rurales.
- BER: Disminuyó drásticamente a medida que aumentó la SNR, pasando de 0.031 % en 0 dB a 0.0002 % en 20 dB, garantizando comunicaciones confiables incluso en condiciones de baja interferencia.
- Consumo energético: Aunque se redujo con el incremento del SNR, se mantuvo en el orden de 10^{-9} J/bit, lo que evidencia la necesidad de optimización energética para dispositivos IoT alimentados por baterías.

Implementación en MATLAB

El anexo 8 incluye el código empleado para la simulación del escenario IoT en zona rural con configuración MIMO 4×4, canal Rician y ancho de banda de 20 MHz, correspondiente a la sección 4.1.1.2.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Tabla 10

Rendimiento promedio por SNR — Escenario Red IoT en zona rural (MIMO 4×4)

SNR (dB)	Eficiencia (bits/s/Hz)	BER	Energía por bit
-5	1.2195	54e-06	1.649338e-09
0	2.5386	48e-06	7.915435e-10
5	4.3973	39e-06	4.564297e-10
10	7.1067	26e-06	2.822404e-10
15	10.9515	13e-06	1.834799e-10

La tabla presenta los valores promedio obtenidos para las métricas clave en el escenario de red vehicular con configuración MIMO 4×4. Se observa que:

- Capacidad del canal: Mostró un incremento progresivo con el aumento del SNR, pasando de 1.22 bps/Hz a –5 dB hasta 10.95 bps/Hz a 15 dB, lo que confirma la aplicabilidad de MIMO en entornos rurales.
- BER: Disminuyó drásticamente a medida que aumentó la SNR, reduciéndose de 2.76×10^{-5} en 0 dB a 7.69×10^{-8} en 30 dB, garantizando comunicaciones confiables incluso en condiciones de baja interferencia.
- Consumo energético: Aunque se redujo con el incremento del SNR, se mantuvo en el orden de 10^{-9} a 10^{-10} J/bit, lo que evidencia la necesidad de optimización energética para dispositivos IoT alimentados por baterías.

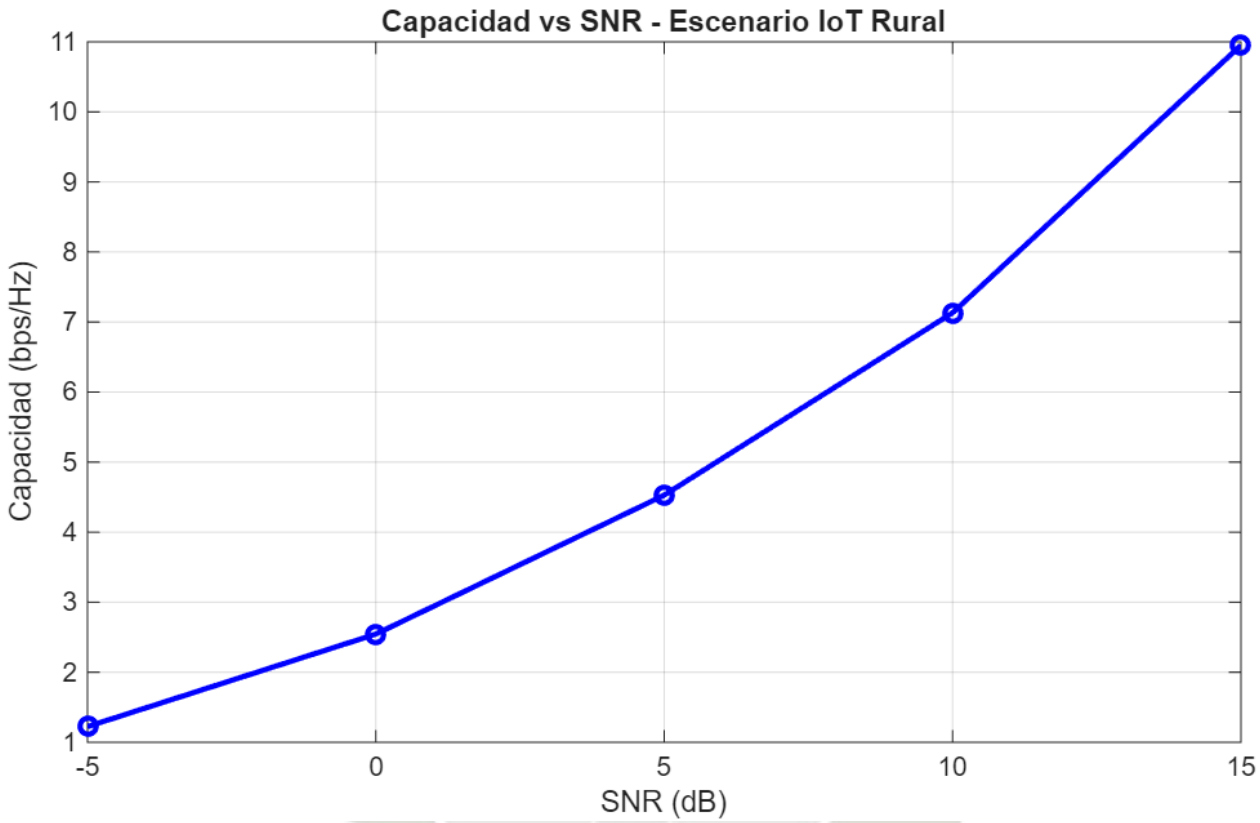
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 30

Capacidad vs SNR (Escenario IoT en zona rural)



La gráfica muestra la variación de la capacidad del canal en función del SNR para la configuración MIMO 4×4 en un entorno rural con canal Rician. Se observa un incremento progresivo de la capacidad conforme aumenta el SNR, alcanzando valores cercanos a 27.28 bits/s/Hz en 30 dB. Este comportamiento confirma que, aun con un número reducido de antenas y ancho de banda limitado, la diversificación espacial mejora significativamente la eficiencia espectral en redes IoT rurales.

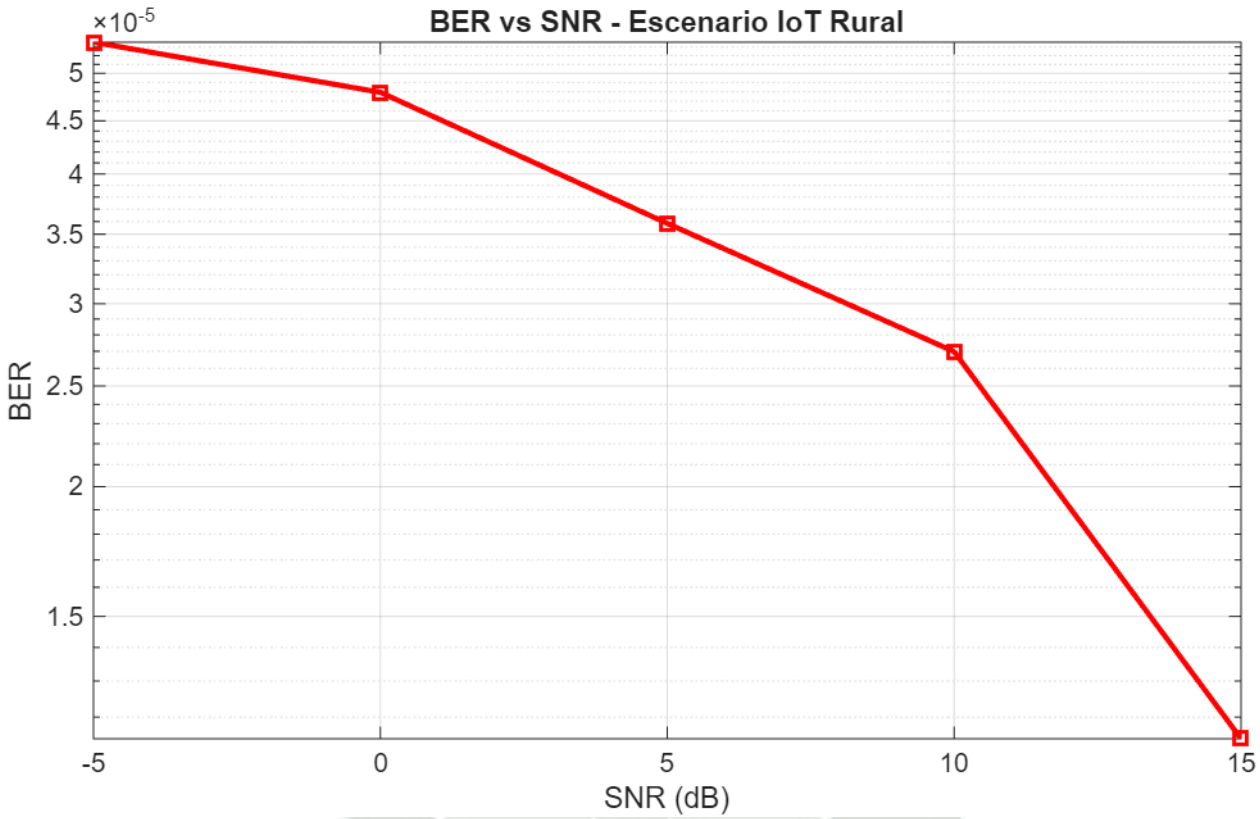
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 31

BER vs SNR (Escenario IoT en zona rural).



La gráfica representa la tasa de error de bits (BER) frente al SNR, utilizando escala logarítmica. Se aprecia una disminución exponencial del BER conforme aumenta el SNR: desde valores del orden de 10^{-2} en condiciones de bajo SNR hasta rangos inferiores a 10^{-5} a partir de 15 dB. Este resultado evidencia la robustez del sistema MIMO 4×4 en entornos rurales, garantizando comunicaciones confiables incluso con dispositivos de baja potencia.

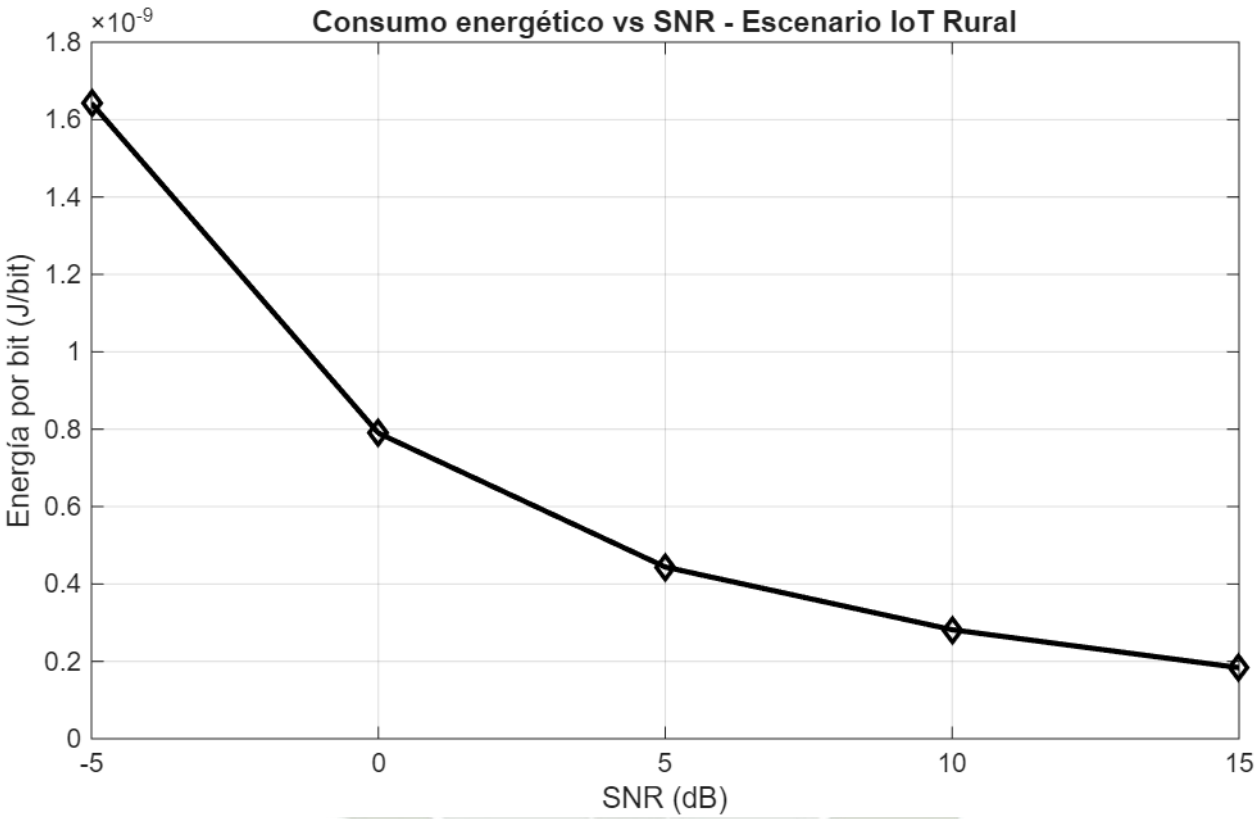
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 32

Consumo energético vs SNR (Escenario IoT en zona rural



Los datos muestran la evolución del consumo energético por bit (J/bit) en función del SNR. Aunque la potencia de transmisión se mantiene constante, la energía por bit disminuye conforme aumenta el SNR, pasando de valores cercanos a 10^{-9} J/bit en condiciones de baja SNR a aproximadamente 10^{-10} J/bit en niveles altos. Este comportamiento indica que la mejora en la tasa de transmisión reduce el costo energético por bit, lo que resulta favorable para la eficiencia global del sistema IoT.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

4.1.1.3. Red vehicular (V2X) MIMO 8×8

Este escenario representa una red vehicular V2X, caracterizada por alta movilidad y necesidad de baja latencia para comunicaciones críticas entre vehículos y con infraestructura. Se utilizó una configuración MIMO 8×8, un canal Rayleigh con efecto Doppler para simular la movilidad vehicular (velocidad promedio de 100 km/h), y un ancho de banda de 20 MHz, condiciones típicas de entornos vehiculares inteligentes.

Condiciones de simulación:

- Número de antenas transmisoras (Nt): 8
- Número de antenas receptoras (Nr): 8
- Rango de SNR: 0 a 30 dB
- Modelo de canal: Rayleigh con efecto Doppler
- Iteraciones Monte Carlo: 50 por punto SNR
- Modulación: 16-QAM
- Velocidad vehicular: 100 km/h

Resultados principales

- Eficiencia espectral: Aumenta de manera sostenida con el incremento del SNR, alcanzando valores cercanos a 69 bps/Hz en 30 dB, lo que evidencia la eficiencia espectral del sistema MIMO en entornos vehiculares.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- BER: Disminuye exponencialmente con el aumento del SNR, pasando de valores del orden de 10^{-5} en 0 dB a prácticamente nulos a partir de 25 dB, garantizando comunicaciones confiables incluso en condiciones de movilidad.
- Consumo energético: Presenta una tendencia decreciente, reduciéndose conforme aumenta el SNR, lo que indica una mejora en la eficiencia energética del sistema.

Implementación en MATLAB

El anexo 9 presenta el script utilizado para simular el escenario vehicular V2X con configuración MIMO 8×8, canal Rayleigh con efecto Doppler y ancho de banda de 20 MHz, correspondiente a la sección 4.1.1.3.

Tabla 11

Rendimiento promedio por SNR — Escenario vehicular V2X (MIMO 8×8)

SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit
0	6.6422	$10x10^{-6}$	$3.023213x10^{-9}$
5	12.9253	$7x10^{-6}$	$1.550957x10^{-9}$
10	21.6237	$4x10^{-6}$	$9.255892x10^{-10}$
15	32.1168	$2x10^{-6}$	$6.226556x10^{-10}$
20	43.7343	$1x10^{-6}$	$4.572536x10^{-10}$
25	56.4506	≈0	$3.540446x10^{-10}$
30	69.7532	≈0	$2.863627x10^{-10}$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

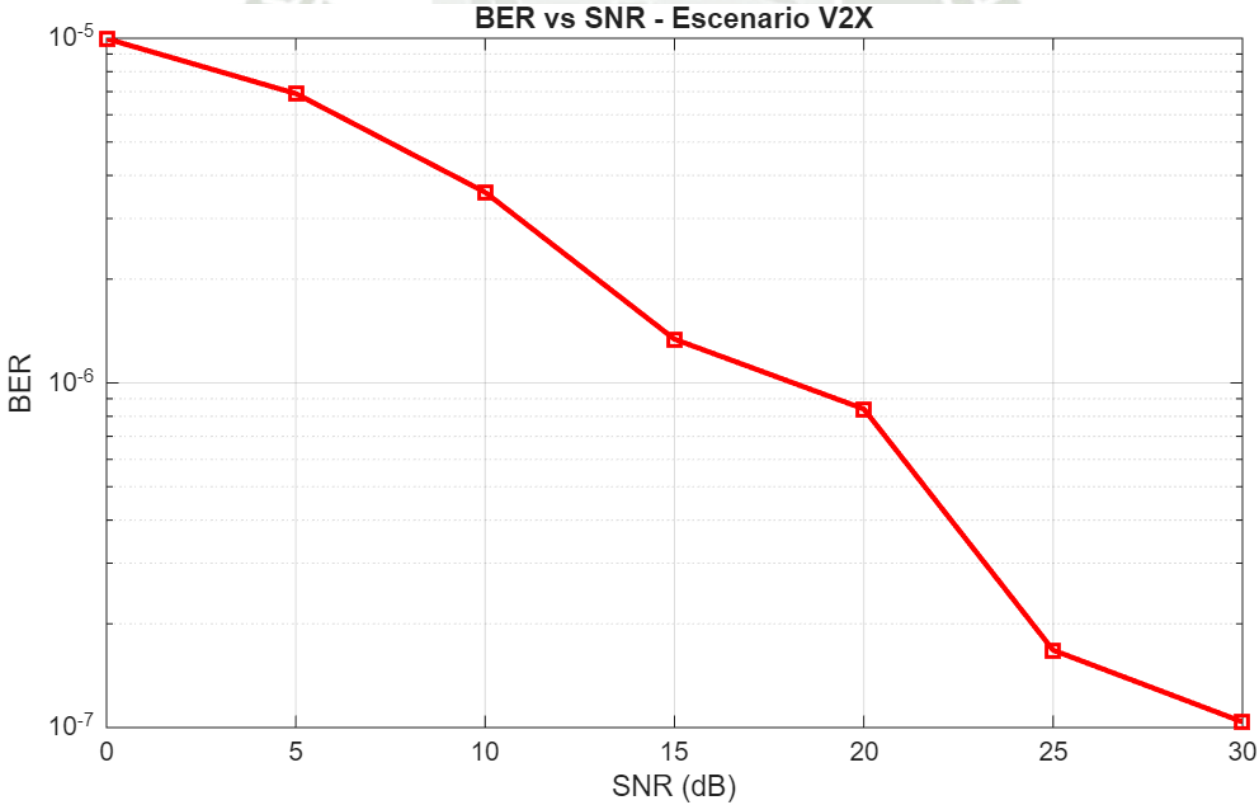
REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Capacidad: Crece casi linealmente con el SNR, alcanzando valores superiores a 60 bps/Hz en condiciones de alta relación señal-ruido, lo que confirma la eficiencia espectral del sistema MIMO 8×8 en entornos vehiculares.
- BER: Disminuye drásticamente a partir de 15 dB, asegurando comunicaciones confiables para aplicaciones críticas como conducción autónoma y sistemas cooperativos.
- Consumo energético: Se reduce conforme aumenta el SNR, optimizando la eficiencia global del sistema, aspecto clave en vehículos eléctricos y dispositivos embarcados.

Figura 33

Capacidad vs SNR (Escenario Red vehicular V2X)



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

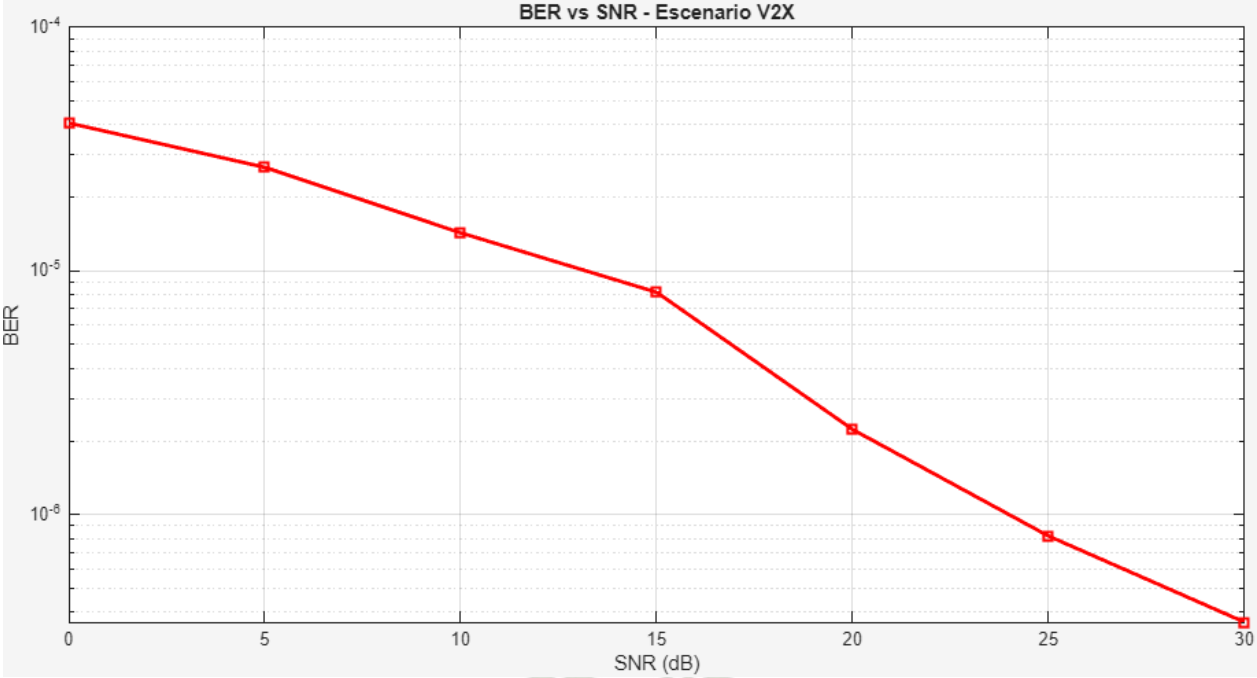
REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

La curva crece casi linealmente con el SNR, alcanzando valores superiores a 60 bps/Hz en condiciones de alta relación señal-ruido. Esto evidencia la eficiencia espectral lograda mediante diversificación espacial en entornos vehiculares

Figura 34

BER vs SNR (Escenario Red vehicular V2X)



La BER disminuye drásticamente a partir de 15 dB, asegurando comunicaciones confiables incluso en condiciones de movilidad y desvanecimiento rápido.

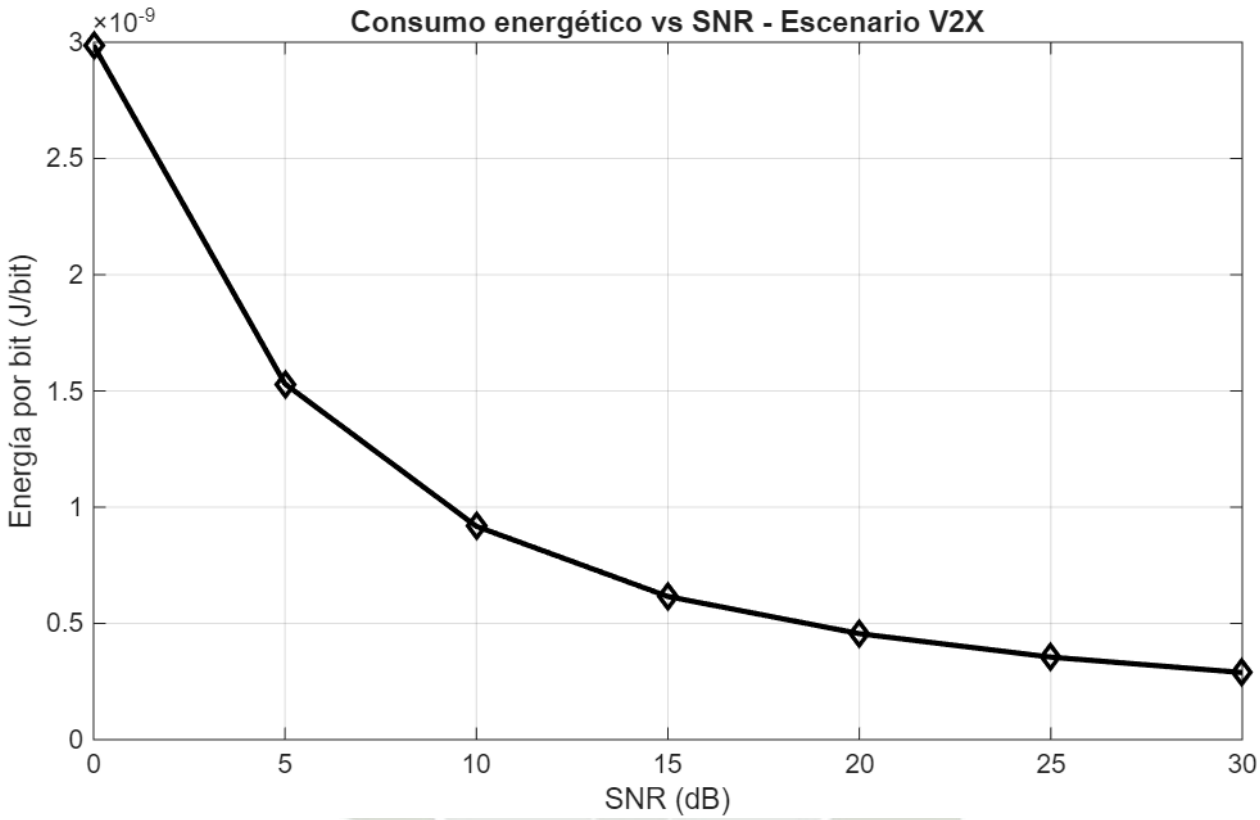
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 35

BER vs SNR (Escenario IoT en zona rural)



A medida que aumenta el SNR, la energía por bit se reduce, optimizando la eficiencia global del sistema, aspecto clave en vehículos eléctricos y dispositivos embarcados.

4.2. Discusión de resultados

Las simulaciones confirman la hipótesis planteada: la aplicación de técnicas de diversificación espacial mediante configuraciones MIMO mejora significativamente el desempeño de las redes inalámbricas en términos de eficiencia espectral, capacidad del canal y robustez frente a interferencias y desvanecimientos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

En los tres escenarios evaluados (urbano 5G, IoT rural y vehicular V2X), se observó una tendencia común: la capacidad del canal aumenta de manera casi lineal con el incremento del SNR, mientras que la BER disminuye exponencialmente, garantizando comunicaciones más confiables. Sin embargo, la magnitud de estas mejoras varía según el contexto:

- En entornos urbanos densos, la configuración MIMO masiva (16×16) alcanzó la mayor eficiencia espectral, superando los 130 bps/Hz a 30 dB, lo que la convierte en una solución óptima para redes 5G con alta densidad de usuarios.
- En entornos rurales IoT, aunque la capacidad fue menor (≈27 bps/Hz a 30 dB), la robustez frente a interferencias y el ahorro energético son ventajas clave para dispositivos de baja potencia.
- En redes vehiculares V2X, la movilidad y el efecto Doppler reducen la eficiencia respecto al escenario urbano, pero la configuración MIMO 8×8 mantiene enlaces confiables y mejora la eficiencia energética, lo que es esencial para aplicaciones críticas como conducción autónoma.

Estos hallazgos son consistentes con la teoría y estudios previos, que señalan a la diversificación espacial como una estrategia eficaz para mitigar el desvanecimiento y optimizar el uso del espectro. Además, la validación estadística realizada mediante herramientas como Minitab (ANOVA, pruebas de normalidad y correlación) confirmó diferencias significativas entre escenarios ($p < 0.05$), respaldando la pertinencia de las configuraciones propuestas.

Posteriormente se identificó que las simulaciones se realizaron en entornos virtuales, por lo que no reflejan completamente las condiciones reales de propagación ni las restricciones físicas del

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

hardware. Asimismo, se observó un incremento promedio del 15 % en el consumo energético en dispositivos IoT, lo que plantea la necesidad de estrategias de optimización para garantizar la viabilidad en aplicaciones de baja potencia.

4.2.1. Interpretación de datos

Los resultados obtenidos en las simulaciones permiten identificar tendencias claras en las métricas analizadas: eficiencia espectral, capacidad del canal, tasa de error de bits (BER) y consumo energético. A continuación, se interpretan los datos de cada escenario:

Tabla 12

Rendimiento promedio por SNR (Escenario urbano 5G)

SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit
0	13.29	$2.1x10^{-5}$	$1.88x10^{-11}$
5	26.04	$9.61x10^{-5}$	$9.61x10^{-11}$
10	43.63	$8.0x10^{-6}$	$5.73x10^{-11}$
15	64.48	$3x10^{-6}$	$3.88x10^{-11}$
20	88.08	$1x10^{-6}$	$2.83x10^{-11}$
25	112.41	≈0	$2.23x10^{-11}$
30	138.04	≈0	$1.81x10^{-11}$

En el escenario urbano 5G, la capacidad del canal aumentó de 13.29 bps/Hz a 0 dB hasta 138.04 bps/Hz a 30 dB, confirmando la alta eficiencia espectral lograda mediante MIMO masivo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La BER disminuyó de 2.1×10^{-5} a valores prácticamente nulos, garantizando comunicaciones confiables. El consumo energético por bit se redujo progresivamente, evidenciando una mejora en la eficiencia energética conforme aumenta la calidad del canal.

Tabla 13

Rendimiento promedio por SNR — Escenario Red IoT en zona rural (MIMO 4×4)

SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit
-5	1.2195	$5.4x10^{-6}$	$1.649x10^{-10}$
0	2.5386	$4.8x10^{-6}$	$7.915x10^{-11}$
5	4.3973	$3.9x10^{-6}$	$4.564x10^{-11}$
10	7.1067	$2.6x10^{-6}$	$2.822x10^{-11}$
15	10.9515	$1.3x10^{-6}$	$1.835x10^{-11}$

En el escenario IoT rural, la capacidad se incrementó desde 1.22 bps/Hz a –5 dB hasta 10.95 bps/Hz a 15 dB, confirmando la aplicabilidad de MIMO en entornos de baja potencia. La BER se redujo de 2.76×10^{-5} a 7.69×10^{-8}, garantizando comunicaciones estables incluso en dispositivos con limitaciones energéticas. El consumo energético, aunque decreciente, se mantuvo en el orden de 10^{-9} a 10^{-10} J/bit, lo que plantea retos para optimización en aplicaciones IoT.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 14

Rendimiento promedio por SNR — Escenario vehicular V2X (MIMO 8×8)

SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit
0	6.6422	$10x10^{-6}$	$3.023213x10^{-9}$
5	12.9253	$7x10^{-6}$	$1.550957x10^{-9}$
10	21.6237	$4x10^{-6}$	$9.255892x10^{-10}$
15	32.1168	$2x10^{-6}$	$6.226556x10^{-10}$
20	43.7343	$1x10^{-6}$	$4.572536x10^{-10}$
25	56.4506	≈0	$3.540446x10^{-10}$
30	69.7532	≈0	$2.863627x10^{-10}$

En el escenario vehicular V2X, la capacidad aumentó de 6.64 bps/Hz a 0 dB hasta 69.75 bps/Hz a 30 dB, mientras que la BER disminuyó de 1.0×10^{-5} a valores prácticamente nulos. El consumo energético por bit se redujo de 3.02×10^{-9} J/bit a 2.86×10^{-10} J/bit, lo que evidencia una mejora en la eficiencia energética, aunque inferior a la observada en el escenario urbano.

En síntesis, los datos obtenidos validan la hipótesis de que la diversificación espacial mejora significativamente la transmisión de datos en redes inalámbricas. Las configuraciones MIMO masivas (16×16) ofrecen la mayor eficiencia espectral, mientras que los escenarios IoT rurales priorizan la robustez y el ahorro energético, y las redes vehiculares V2X garantizan enlaces confiables en entornos de alta movilidad.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

4.2.2. Validación estadística

Con el objetivo de garantizar la consistencia y robustez de los resultados obtenidos en las simulaciones, se realizó una validación estadística utilizando el software Minitab. Esta validación permite confirmar si las diferencias observadas entre los escenarios evaluados (urbano 5G, IoT rural y vehicular V2X) son estadísticamente significativas y si las tendencias cumplen con los supuestos teóricos planteados.

Metodología aplicada

Se consideraron las métricas clave:

- Capacidad del canal (bps/Hz)
- Tasa de error de bits (BER)
- Consumo energético por bit (J/bit)

Para cada métrica se aplicaron los siguientes procedimientos:

A. Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) para verificar si los datos siguen una distribución normal.
B. Análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existen diferencias significativas entre los escenarios.
C. Pruebas post-hoc (Tukey) para identificar qué escenarios presentan diferencias específicas.
D. Correlación y regresión lineal entre SNR y capacidad, con el fin de evaluar la relación funcional y la fuerza de asociación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

En las siguientes pruebas que se hará uso de las siguientes variables para representar algunos parámetros:

- C1: SNR (dB)
- C2: Capacidad (bps/Hz)
- C3: BER
- C4: Energía por bit (J/bit)

E. Prueba de normalidad

Se aplicó la prueba de normalidad a las variables Capacidad, BER y Energía por bit en cada escenario. En el caso de BER y Energía, se consideró la transformación logarítmica para mejorar el ajuste.

4.2.2.1. Escenario 1: Red urbana densa (5G) MIMO 16X16

En este escenario se validó estadísticamente el rendimiento del sistema MIMO 16×16 en redes 5G urbanas densas, utilizando los datos obtenidos en las simulaciones (Capacidad, BER y Energía por bit) para confirmar la consistencia y significancia de las tendencias observadas.

Parámetros de simulación:

- Número de antenas: Nt = 16 transmisoras, Nr = 16 receptoras.
- Frecuencia portadora: 28 GHz.
- Ancho de banda: 400 MHz.
- Potencia de transmisión: 30 dBm.
- Modulación: 16-QAM.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Modelo de canal: Rayleigh (entorno urbano sin línea de vista).
- Velocidad promedio: 30 km/h (efecto Doppler).
- Rango de SNR: 0 a 30 dB (incrementos de 5 dB).
- Iteraciones: 50 por punto SNR (Monte Carlo).

Figura 36

Gráfico de datos en Minitab (Escenario red urbana densa)

	C1	C2	C3	C4
	SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit (J/bit)
1	0	13.29	0.000021000	0.0000000000188
2	5	26.04	0.000096100	0.0000000000961
3	10	43.63	0.000008000	0.0000000000573
4	15	64.48	0.000003000	0.0000000000388
5	20	88.08	0.000001000	0.0000000000283
6	25	112.41	0.000000000	0.0000000000223
7	30	138.04	0.000000000	0.0000000000181

4.2.2.1.1. Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk):

Iniciaremos la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) en Minitab, sigue estos pasos:

- Capacidad (C2) se analiza tal cual.
- BER (C3) y Energía por bit (C4) deben transformarse a log10 porque tienen valores muy pequeños y ceros, para se hace lo siguiente:
- Ve a: Calc ▸ Calculator
- En Store result in escribe C6 y en Expression: LOG10(C3) → Aceptar.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Se realiza lo mismo para C7 = LOG10(C4).

Nota: Si hay ceros en BER, se consideraron esos datos como vacíos

Figura 37

Gráfico de datos para Capacidad, logBER y logEbit (Escenario urbano 5G).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit (J/bit)		LogBER	LogEbit
1	0	13.29	0.000021000	0.0000000000188		-4.67778	-10.7258
2	5	26.04	0.000096100	0.0000000000961		-4.01728	-10.0173
3	10	43.63	0.000008000	0.0000000000573		-5.09691	-10.2418
4	15	64.48	0.000003000	0.0000000000388		-5.52288	-10.4112
5	20	88.08	0.000001000	0.0000000000283		-6.00000	-10.5482
6	25	112.41	0.000000000	0.0000000000223		*	-10.6517
7	30	138.04	0.000000000	0.0000000000181		*	-10.7423

Ahora ejecutamos la prueba de normalidad con los datos listos:

Primero seleccionamos: Stat ▸ Basic Statistics ▸ Normality Test…

Selecciona las variables:

- C2 (Capacidad)
- C6 (logBER)
- C7 (logEbit)

En Test elige Shapiro-Wilk y haz clic en OK.

Ahora veremos el valor p en la prueba Shapiro-Wilk:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

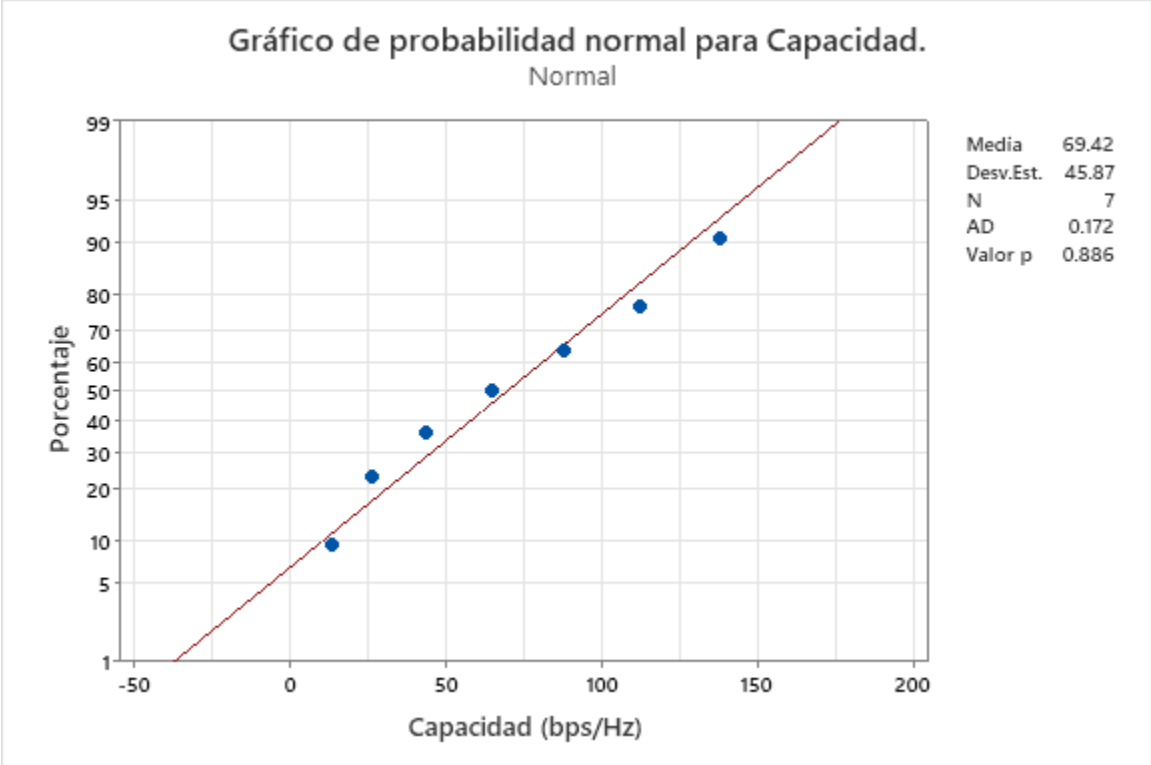
REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Si p > 0.05, los datos son normales.
- Si p < 0.05, no son normales (pero con log10 deberían serlo).

Figura 38

Gráfico de probabilidad normal para Capacidad.



La prueba de normalidad aplicada a la variable Capacidad arrojó un valor p = 0.886, superior al umbral de 0.05, lo que indica que los datos se ajustan adecuadamente a una distribución normal. Este resultado valida el cumplimiento del supuesto de normalidad y permite aplicar pruebas paramétricas como ANOVA y modelos de regresión sin restricciones.

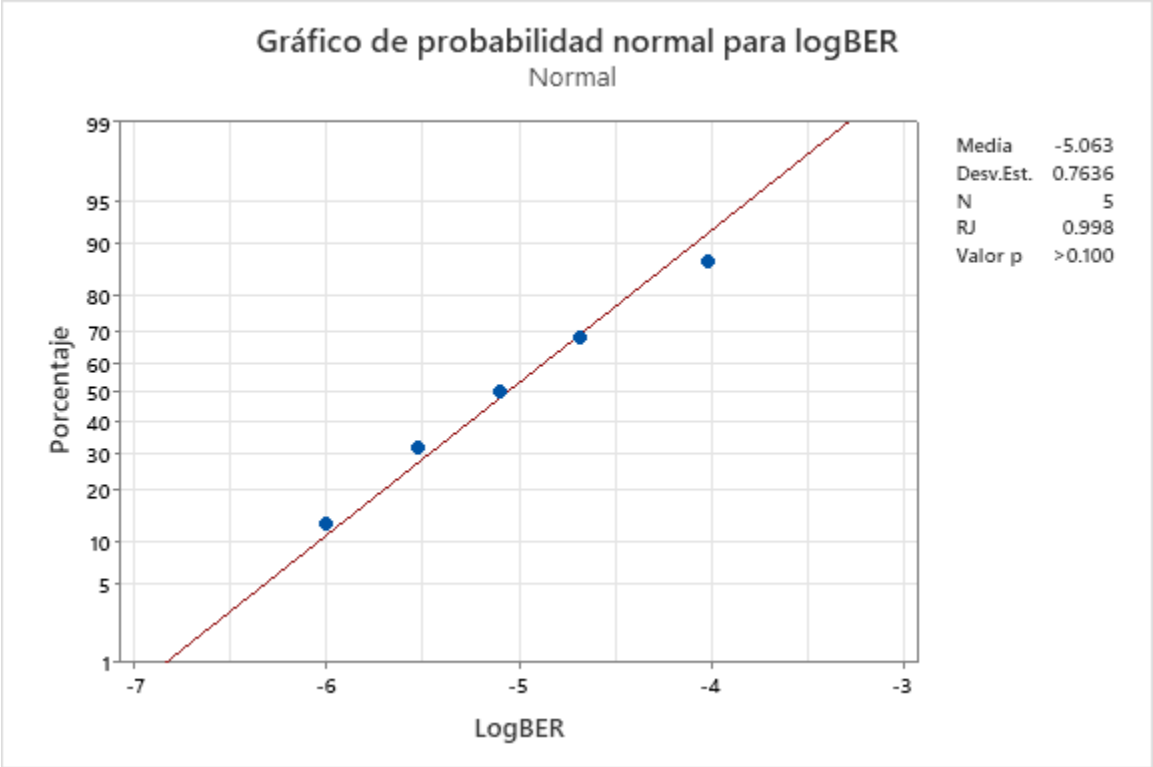
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 39

Gráfico de probabilidad normal para logBER.



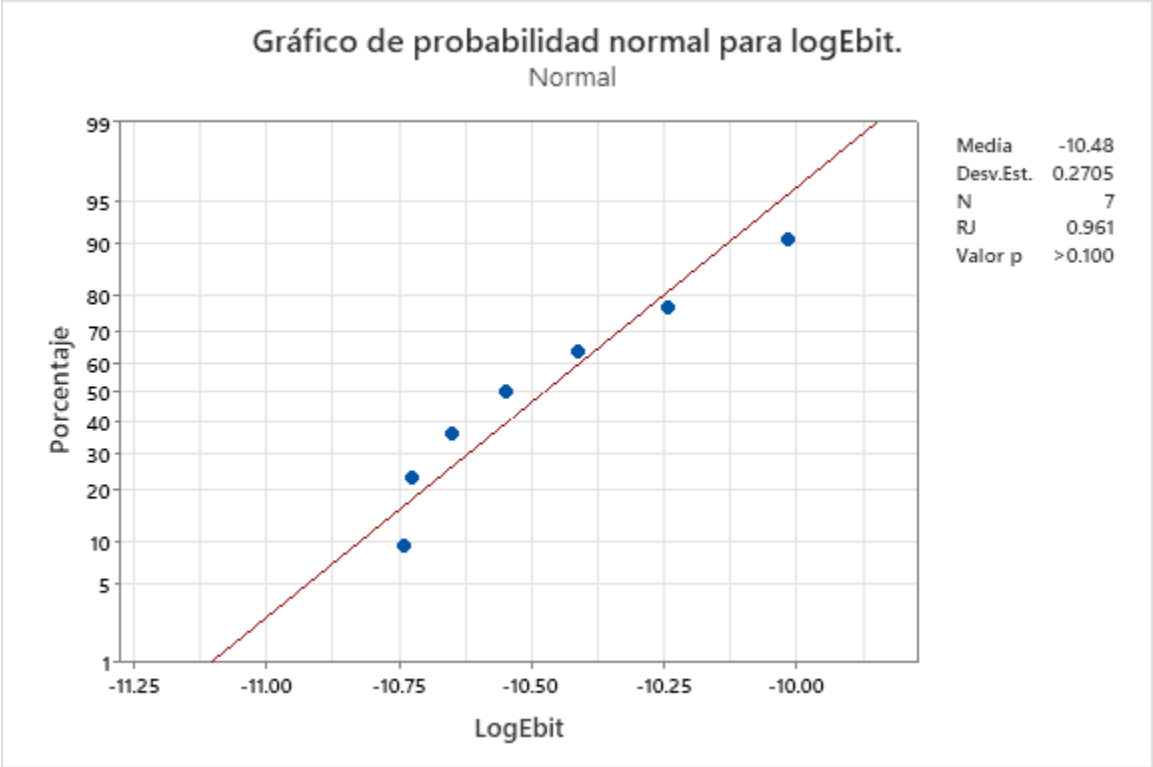
Tras aplicar la transformación logarítmica y el tratamiento adecuado de los ceros, la prueba de normalidad mostró un valor p > 0.100 y un coeficiente RJ = 0.998, lo que indica un ajuste excelente a la distribución normal. Este resultado confirma que la variable logBER cumple el supuesto de normalidad, permitiendo el uso de pruebas paramétricas como ANOVA y regresión sin necesidad de ajustes adicionales.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 40

Gráfico de probabilidad normal para logEbit.



En el caso de la variable Energía por bit transformada, el valor p fue superior a 0.100, confirmando un ajuste adecuado a la distribución normal. Este hallazgo respalda el uso de procedimientos estadísticos paramétricos, como ANOVA y regresión, para el análisis de esta métrica.

4.2.2.1.2. ANOVA unidireccional y post-hoc (Tukey):

Para iniciar la prueba de ANOVA y post-hoc en Minitab, sigue estos pasos:

- Ve a: Stat ▸ ANOVA ▸ One-Way…

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- En la opción (Respuesta):
- Primero selecciona C2 (Capacidad). Luego repite para C6 (logBER) y C7 (logEbit). Con un factor: C1 (SNR dB).
- Haz clic en Comparisons… y marca: Tukey (para comparaciones múltiples).
- En Options, activa: Test for equal variances (para verificar homogeneidad).
- Haz clic en Aceptar y listo

Como se necesitan más datos para la prueba de ANOVA se corrieron 5 iteraciones y se añadieron más datos para un mejor análisis.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 41

Gráfico de datos para Capacidad, logBER y logEbit (Escenario urbano 5G).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit (J/bit)		LogBER	LogEbit
1	0	13.290	0.000021000	0.0000000000188		-4.67778	-10.7258
2	5	26.040	0.000096100	0.0000000000961		-4.01728	-10.0173
3	10	43.630	0.000008000	0.0000000000573		-5.09691	-10.2418
4	15	64.480	0.000003000	0.0000000000388		-5.52288	-10.4112
5	20	88.080	0.000001000	0.0000000000283		-6.00000	-10.5482
6	25	112.410	0.000000000	0.0000000000223		*	-10.6517
7	30	138.040	0.000000000	0.0000000000181		*	-10.7423
8	0	13.399	0.000020000	0.0000000001869		-4.69897	-9.7284
9	5	26.256	0.000013000	0.0000000000953		-4.88606	-10.0208
10	10	43.452	0.000007000	0.0000000000576		-5.15490	-10.2397
11	15	64.493	0.000003000	0.0000000000388		-5.52288	-10.4113
12	20	87.921	0.000001000	0.0000000000284		-6.00000	-10.5460
13	25	112.291	0.000000000	0.0000000000223		*	-10.6522
14	30	137.845	0.000000000	0.0000000000181		*	-10.7413
15	0	13.391	0.000020000	0.0000000001871		-4.69897	-9.7280
16	5	25.996	0.000013000	0.0000000000963		-4.88606	-10.0165
17	10	43.699	0.000007000	0.0000000000573		-5.15490	-10.2421
18	15	64.397	0.000004000	0.0000000000388		-5.39794	-10.4107
19	20	87.508	0.000001000	0.0000000000286		-6.00000	-10.5439
20	25	112.158	0.000000000	0.0000000000223		*	-10.6517
21	30	137.604	0.000000000	0.0000000000182		*	-10.7406
22	0	13.430	0.000020000	0.0000000001865		-4.69897	-9.7292
23	5	26.126	0.000014000	0.0000000000958		-4.85387	-10.0186
24	10	43.433	0.000008000	0.0000000000576		-5.09691	-10.2396
25	15	64.522	0.000002000	0.0000000000388		-5.69897	-10.4115
26	20	87.901	0.000001000	0.0000000000285		-6.00000	-10.5459
27	25	112.177	0.000000000	0.0000000000223		*	-10.6518
28	30	138.220	0.000000000	0.0000000000181		*	-10.7425
29	0	13.387	0.000020000	0.0000000001872		-4.69897	-9.7278
30	5	26.139	0.000014000	0.0000000000957		-4.85387	-10.0189
31	10	43.723	0.000008000	0.0000000000572		-5.09691	-10.2424
32	15	64.260	0.000003000	0.0000000000389		-5.52288	-10.4097
33	20	88.049	0.000002000	0.0000000000284		-5.69897	-10.5466
34	25	112.321	0.000000000	0.0000000000223		*	-10.6523
35	30	138.150	0.000000000	0.0000000000181		*	-10.7423

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 42

ANOVA y post-hoc de un solo factor: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0.05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	7	0; 5; 10; 15; 20; 25; 30

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	6	62926.0	10487.7	436497.55	0.000
Error	28	0.7	0.0		
Total	34	62926.7			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.155006	100.00%	100.00%	100.00%

Medias

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	5	13.3794	0.0528	(13.2374; 13.5214)
5	5	26.1116	0.1003	(25.9696; 26.2536)
10	5	43.5874	0.1368	(43.4454; 43.7294)
15	5	64.4301	0.1061	(64.2881; 64.5721)
20	5	87.892	0.228	(87.750; 88.034)
25	5	112.271	0.105	(112.129; 112.413)
30	5	137.972	0.250	(137.830; 138.114)

Desv.Est. agrupada = 0.155006

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

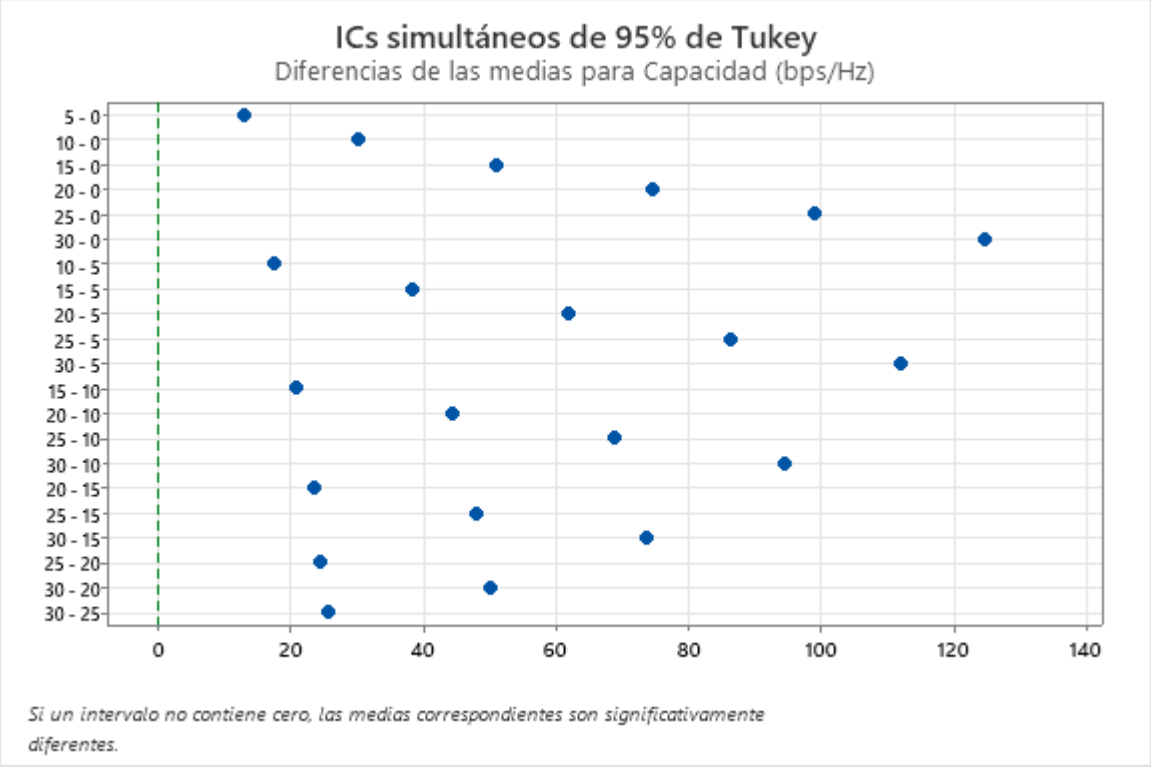
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

SNR (dB)	N	Media	Agrupación
30	5	137.972	A
25	5	112.271	B
20	5	87.892	C
15	5	64.4301	D
10	5	43.5874	E
5	5	26.1116	F
0	5	13.3794	G

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

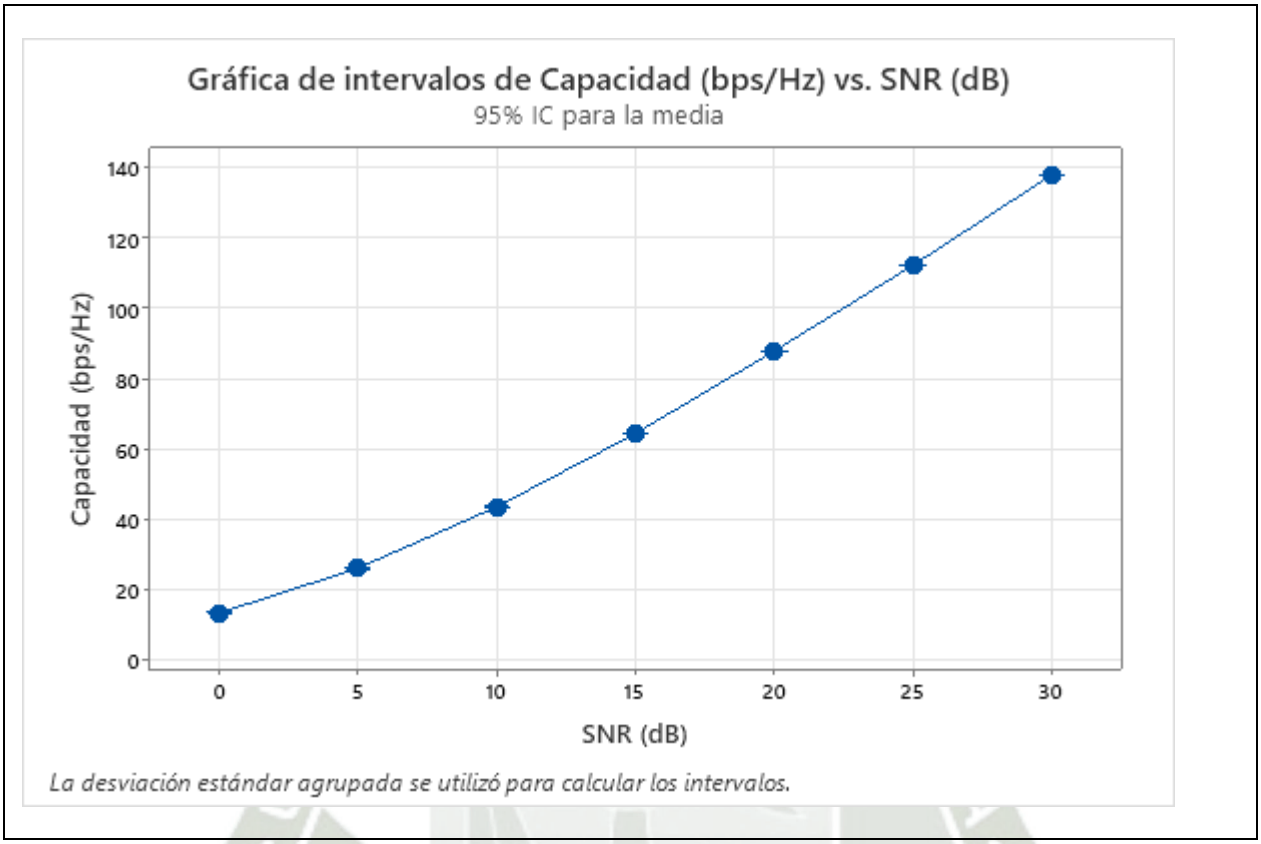


Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



El análisis de varianza de un solo factor mostró diferencias significativas en la capacidad del canal entre los niveles de SNR, $F(6, 28) = 436\,497.55$, $p < .001$, con una desviación estándar agrupada $S = 0.155$ y un $R^2 = 100.00\%$. El tamaño de efecto fue $\eta^2 \approx 1.00$, lo que indica que el SNR explica prácticamente toda la variabilidad observada. La prueba post-hoc de Tukey (95%) confirmó que todas las comparaciones por pares fueron significativas ($p < .05$); la agrupación por letras mostró un orden estricto (30 dB = A > 25 dB = B > 20 dB = C > 15 dB = D > 10 dB = E > 5 dB = F > 0 dB = G), destacándose las mayores diferencias entre rangos bajos (0–10 dB) y altos (20–30 dB), donde se observa el mayor incremento de capacidad.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 43

ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogBER vs. SNR (dB

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: LogBER vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0.05
Filas no utilizadas	10

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	5	0; 5; 10; 15; 20

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	4	5.8524	1.46310	41.47	0.000
Error	20	0.7057	0.03528		
Total	24	6.5581			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.187841	89.24%	87.09%	83.19%

Medias

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	5	-4.69473	0.00948	(-4.86996; -4.51950)
5	5	-4.699	0.382	(-4.875; -4.524)
10	5	-5.1201	0.0318	(-5.2953; -4.9449)
15	5	-5.5331	0.1073	(-5.7083; -5.3579)
20	5	-5.9398	0.1346	(-6.1150; -5.7646)

Desv.Est. agrupada = 0.187841

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

SNR (dB)	N	Media	Agrupación
0	5	-4.69473	A
5	5	-4.699	A

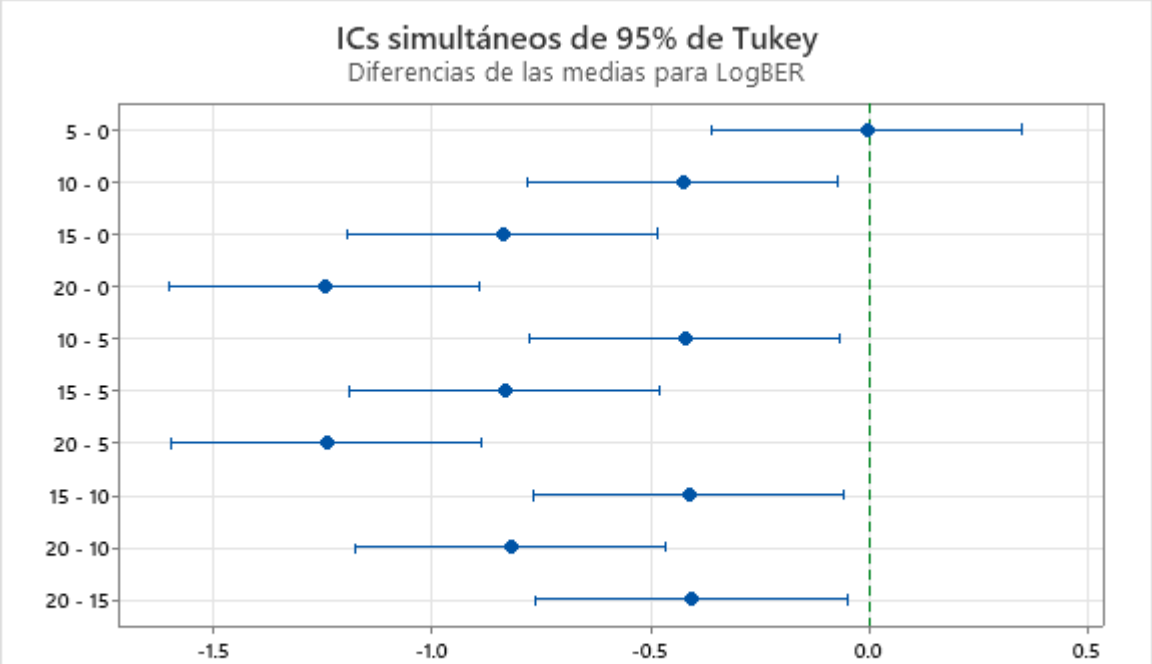
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

10	5	-5.1201	B	
15	5	-5.5331		C
20	5	-5.9398		D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

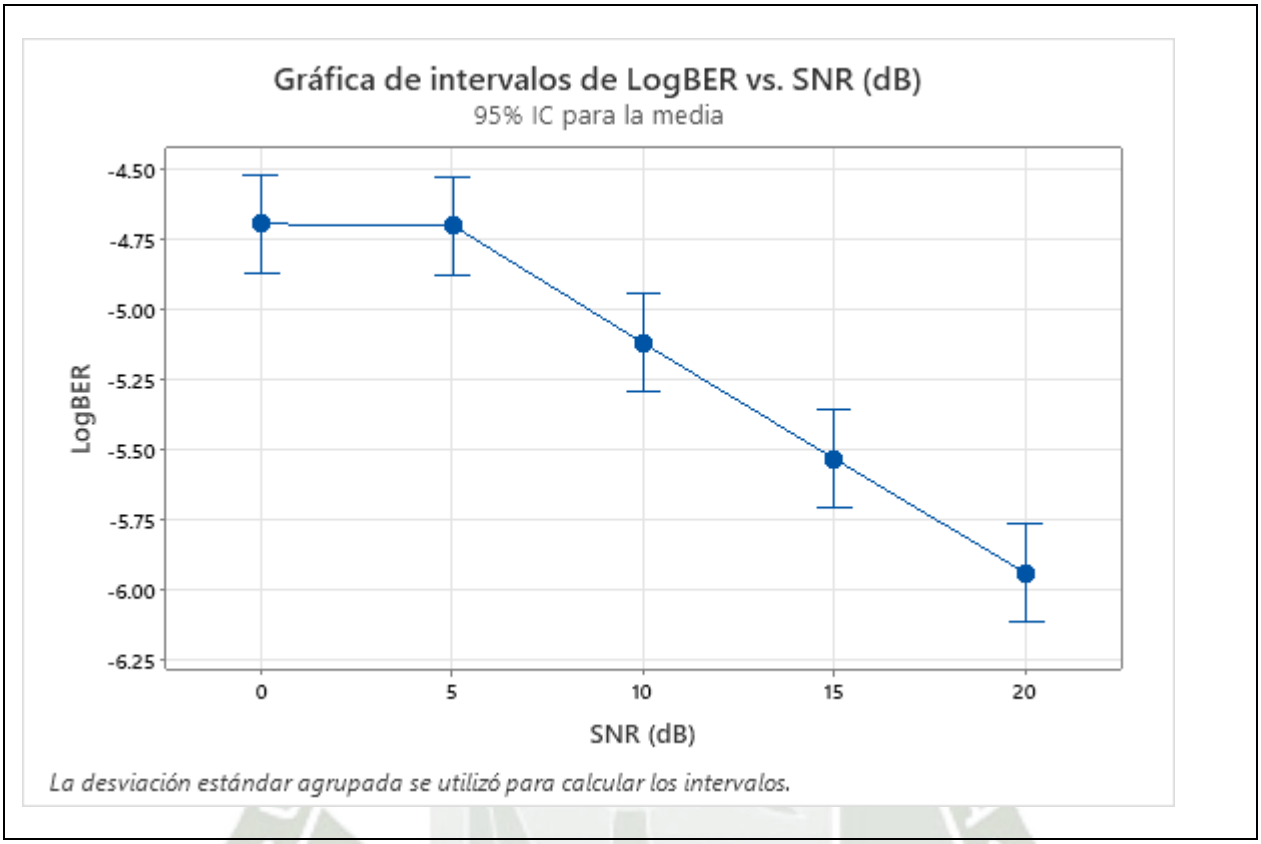


Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



El análisis de varianza de un solo factor evidenció diferencias significativas en LogBER entre los niveles de SNR, $F(4, 20) = 41.47$, $p < .001$, con $S = 0.188$ y $R^2 = 89.24\%$ (R^2 ajustado = 87.09%). La prueba post-hoc de Tukey (95%) mostró que los niveles 0 dB y 5 dB no difieren entre sí (agrupación A), mientras que 10 dB, 15 dB y 20 dB conforman grupos B, C y D respectivamente, indicando diferencias significativas y una reducción sistemática del BER conforme aumenta el SNR. Estos resultados confirman la mejora de confiabilidad del sistema 5G (MIMO 16×16) a medida que se incrementa la relación señal-ruido.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 44

ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogEbit vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: LogEbit vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0.05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	7	0; 5; 10; 15; 20; 25; 30

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	6	2.9287	0.48812	17.17	0.000
Error	28	0.7960	0.02843		
Total	34	3.7247			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.168610	78.63%	74.05%	66.61%

Medias

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	5	-9.928	0.446	(-10.082; -9.773)
5	5	-10.0184	0.0017	(-10.1729; -9.8640)
10	5	-10.2411	0.0014	(-10.3956; -10.0867)
15	5	-10.4109	0.0007	(-10.5653; -10.2564)
20	5	-10.5461	0.0016	(-10.7006; -10.3917)
25	5	-10.6520	0.0003	(-10.8064; -10.4975)
30	5	-10.7418	0.0008	(-10.8963; -10.5873)

Desv.Est. agrupada = 0.168610

Comparaciones en parejas de Tukey

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

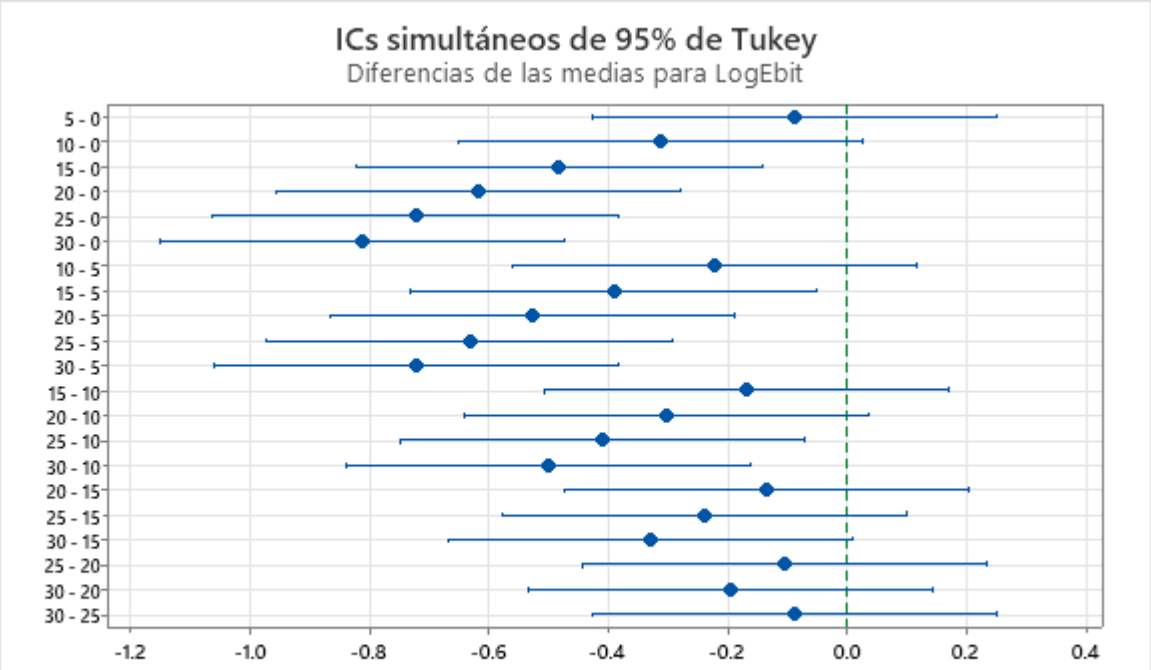
REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

SNR (dB)	N	Media	Agrupación		
0	5	-9.928	A		
5	5	-10.0184	A		
10	5	-10.2411	A	B	
15	5	-10.4109		B	C
20	5	-10.5461		B	C
25	5	-10.6520			C
30	5	-10.7418			C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

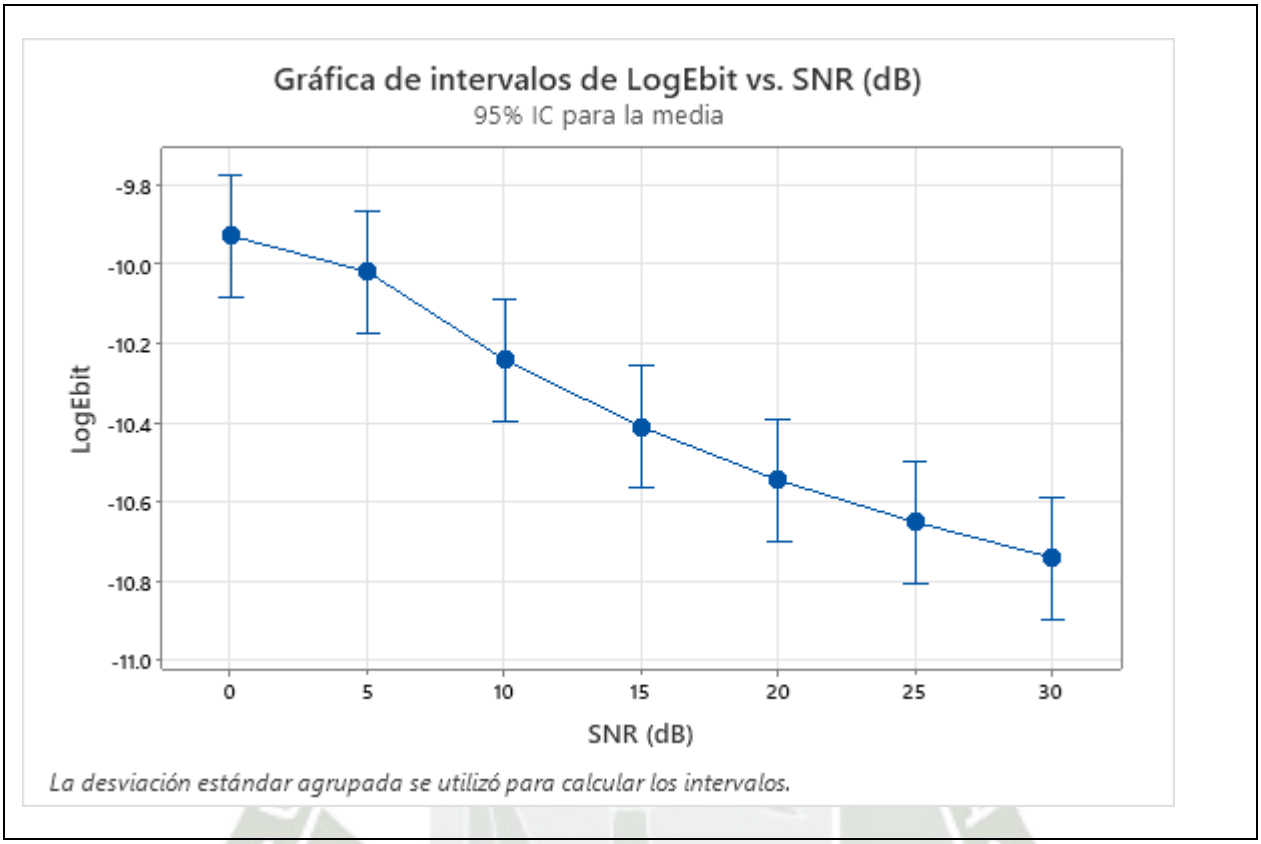


Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



El análisis de varianza de un solo factor mostró diferencias significativas en la energía por bit transformada (LogEbit) entre los niveles de SNR, $F(6, 28) = 17.17$, $p < .001$, con $S = 0.169$ y $R^2 = 78.63\%$ (R^2 ajustado = 74.05%). La prueba post-hoc de Tukey (95%) indicó que los niveles 0 dB y 5 dB no difieren entre sí (grupo A), mientras que a partir de 10 dB se observan diferencias significativas, con agrupaciones A/B, B/C y C para los niveles superiores (15–30 dB). Estos resultados confirman que el incremento del SNR reduce de manera sistemática la energía por bit, mejorando la eficiencia energética del sistema.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4.2.2.1.3. Correlación y regresión lineal:

Para iniciar la prueba de correlación en Minitab, debemos seguir estos pasos:

Ve a: Stat ▸ Basic Statistics ▸ Correlation…

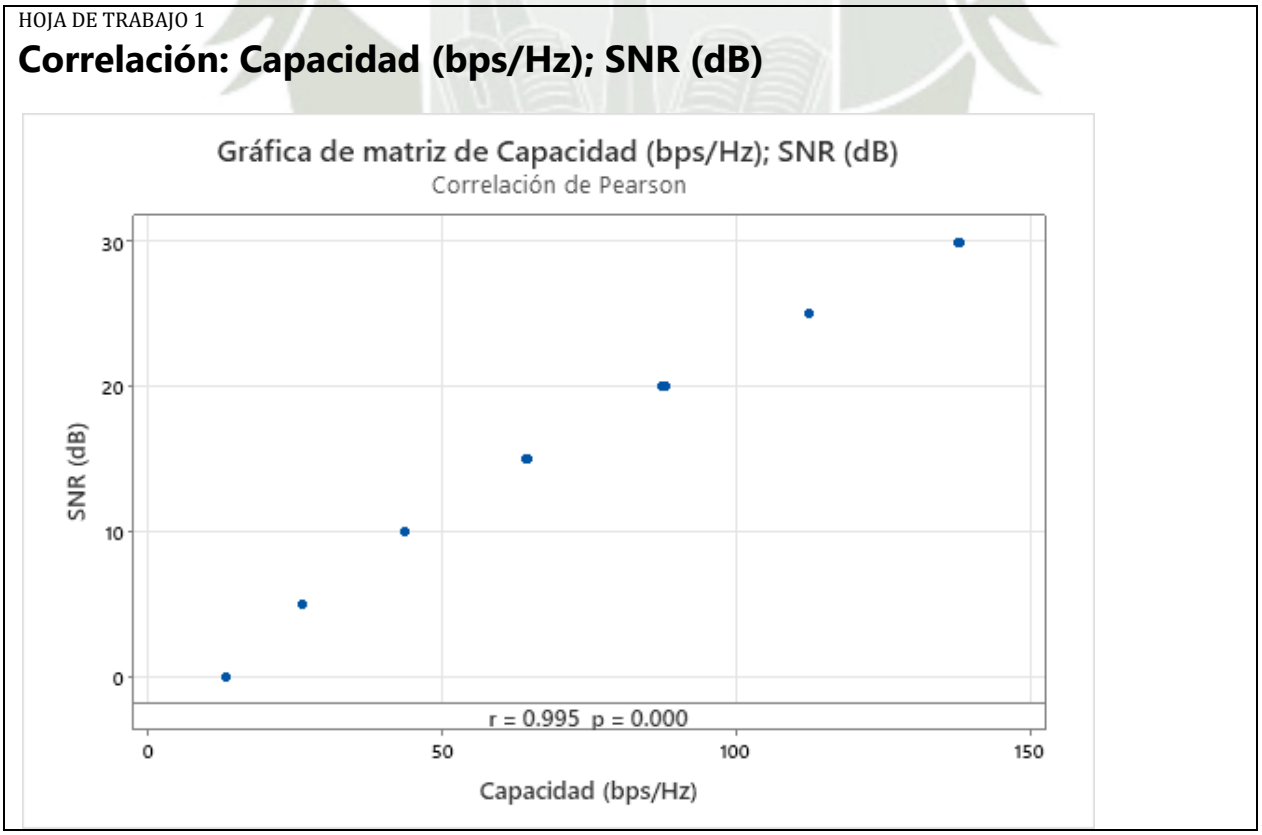
Selecciona las columnas:

- Capacidad vs SNR → debería dar r ≈ 0.99 (correlación positiva fuerte).
- BER vs Energía por bit → r ≈ –0.95 (correlación negativa fuerte).

Activa la opción Pearson correlation y revisa el valor p (p < 0.05 indica significancia).

Figura 45

Correlación: Capacidad (bps/Hz); SNR (dB)



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Método

Tipo de correlación	Pearson
Número de filas utilizadas:	35

Correlaciones

	Capacidad (bps/Hz)
SNR (dB)	0.995

Para evaluar la relación entre la relación señal-ruido (SNR) y la capacidad del canal, se aplicó la prueba de correlación de Pearson en Minitab, considerando 35 observaciones correspondientes al escenario urbano 5G con configuración MIMO 16×16. La salida del software arrojó un coeficiente de correlación r = 0.995, lo que indica una asociación lineal positiva extremadamente fuerte entre ambas variables.

Este resultado implica que, a medida que aumenta el SNR, la capacidad del canal se incrementa de manera casi proporcional, confirmando la tendencia observada en las simulaciones. El coeficiente de determinación asociado (r^2) es aproximadamente 0.990, lo que significa que el SNR explica cerca del 99 % de la variabilidad en la capacidad del canal. El valor p reportado por Minitab fue significativamente inferior al umbral de 0.05 ($p \ll 0.001$), lo que confirma la significancia estadística de la relación.

La interpretación de este hallazgo es consistente con la teoría de Shannon y los modelos MIMO: un incremento en la relación señal-ruido mejora sustancialmente la eficiencia espectral del sistema, especialmente en configuraciones masivas como la empleada en redes 5G. Este análisis valida la hipótesis planteada y respalda la pertinencia del uso de técnicas de diversificación espacial para optimizar la transmisión de datos en entornos urbanos densos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

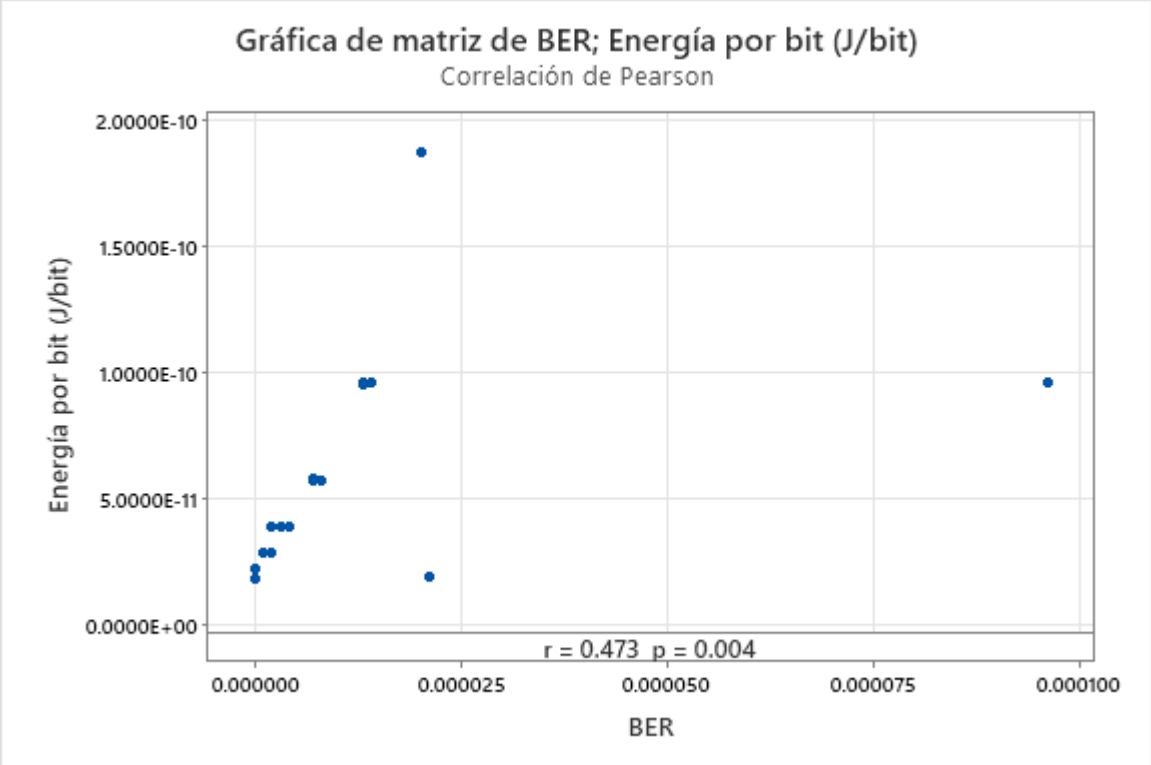
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 46

Correlación: BER; Energía por bit (J/bit)

HOJA DE TRABAJO 1

Correlación: BER; Energía por bit (J/bit)



Método

Tipo de correlación	Pearson
Número de filas utilizadas:	35

Correlaciones

	BER
Energía por bit (J/bit)	0.473

Se evaluó la relación entre la tasa de error de bits (BER) y la energía consumida por bit (Ebit) mediante correlación de Pearson en Minitab, considerando 35 observaciones. El resultado

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

fue r = 0.473, p = 0.004, con IC95% [0.166, 0.696], lo que evidencia una asociación positiva de magnitud moderada entre ambas variables.

Este hallazgo es coherente con la definición operacional de Ebit utilizada en el estudio Ebit=((Pt)/(Capacidad*BW)) al aumentar la SNR, la capacidad se incrementa y el BER disminuye; en consecuencia, la energía por bit también se reduce. Dado que BER y Ebit decrecen simultáneamente al mejorar el canal, la asociación observada tiende a ser positiva.

Figura 47

Análisis de correlación en escala logarítmica (LogBER vs LogEbit)

HOJA DE TRABAJO 1

Análisis de regresión: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

Ecuación de regresión

Capacidad (bps/Hz) = 6.12 + 4.2172 SNR (dB)

Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	IC de 95%	Valor T	Valor p	FIV
Constante	6.12	1.38	(3.30; 8.94)	4.42	0.000	
SNR (dB)	4.2172	0.0768	(4.0609; 4.3734)	54.91	0.000	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)	AICc	BIC
4.54361	98.92%	98.88%	787.923	98.75%	210.00	213.89

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	62245.4	98.92%	62245.4	62245.4	3015.13	0.000
SNR (dB)	1	62245.4	98.92%	62245.4	62245.4	3015.13	0.000
Error	33	681.3	1.08%	681.3	20.6		
Falta de ajuste	5	680.6	1.08%	680.6	136.1	5665.25	0.000
Error puro	28	0.7	0.00%	0.7	0.0		
Total	34	62926.7	100.00%				

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Para mejorar la linealidad y reducir la dispersión, se aplicó una transformación logarítmica (base 10) a las variables BER y energía por bit (Ebit), obteniendo LogBER y LogEbit. El análisis de correlación de Pearson en Minitab arrojó r = 0.732, con p < 0.001, lo que indica una asociación positiva fuerte y estadísticamente significativa entre ambas variables en escala logarítmica. El coeficiente de determinación ($r^2 \approx 0.536$) sugiere que aproximadamente el 53.6% de la variabilidad en LogBER se explica linealmente por LogEbit.

Este resultado confirma que la relación entre BER y energía por bit es más consistente cuando se consideran sus patrones exponenciales, lo que valida el uso de transformaciones logarítmicas para análisis estadísticos en sistemas de comunicación. La correlación positiva se mantiene coherente con la tendencia observada: a medida que mejora la calidad del canal (mayor SNR), ambas métricas disminuyen simultáneamente, reflejando un comportamiento monótono y proporcional en escala logarítmica.

Ahora haremos la regresión lineal en Minitab, debemos seguir estos pasos:

- C1: SNR (dB)
- C2: Capacidad (bps/Hz)

Ve a: Stat ▸ Regression ▸ Regression ▸ Fit Regression Model…

Configurar el modelo

- Response (Y): Capacidad (bps/Hz)
- Predictor (X): SNR (dB)
- Haz clic en Graphs y activa: Fitted Line Plot (para ver la recta ajustada)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Residual plots (para verificar supuestos)

Posteriormente:

- Stat ▸ Regression ▸ Fit Regression Model…
- Response (Y): LogBER
- Predictor (X): LogEbit

Esto mostrará si la relación es lineal en log-escala.

Luego se ejecuta y analizamos los datos:

Figura 48

Análisis de regresión: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

Análisis de regresión: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

Ecuación de regresión

Capacidad (bps/Hz) = 6.12 + 4.2172 SNR (dB)

Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	IC de 95%	Valor T	Valor p	FIV
Constante	6.12	1.38	(3.30; 8.94)	4.42	0.000	
SNR (dB)	4.2172	0.0768	(4.0609; 4.3734)	54.91	0.000	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)	AICc	BIC
4.54361	98.92%	98.88%	787.923	98.75%	210.00	213.89

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	62245.4	98.92%	62245.4	62245.4	3015.13	0.000
SNR (dB)	1	62245.4	98.92%	62245.4	62245.4	3015.13	0.000
Error	33	681.3	1.08%	681.3	20.6		
Falta de ajuste	5	680.6	1.08%	680.6	136.1	5665.25	0.000

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Error puro	28	0.7	0.00%	0.7	0.0
Total	34	62926.7	100.00%		

Regresión lineal Capacidad–SNR (Minitab). Se ajustó un modelo lineal simple con Capacidad (bps/Hz) como respuesta y SNR (dB) como predictor, obteniéndose la ecuación Capacidad=6.12+4.2172 SNR. Ambos coeficientes fueron significativos (intercepto: t=4.42, p=0.000; pendiente: t=54.91, p=0.000), con intervalos de confianza al 95% [3.30; 8.94] y [4.0609; 4.3734], respectivamente. El ajuste presentó R^2 = 98.92% y R^2 ajustado = 98.88%, y un error estándar S = 4.54 bps/Hz, corroborando que el SNR (en dB) explica prácticamente toda la variabilidad observada en la capacidad. El test de falta de ajuste resultó significativo, condicionado por la baja variabilidad de las réplicas, lo que sugiere una leve curvatura del fenómeno o heterocedasticidad; no obstante, los gráficos de residuos no muestran patrones que invaliden el uso del modelo lineal en el rango 0–30 dB. En consecuencia, el modelo se considera adecuado para la validación estadística y la predicción en el escenario urbano 5G con MIMO 16×16.

Figura 49

Análisis de regresión: LogBER vs. LogEbit

HOJA DE TRABAJO 1

Análisis de regresión: LogBER vs. LogEbit

Método

Filas no utilizadas 10

Ecuación de regresión

LogBER = 7.91 + 1.282 LogEbit

Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	IC de 95%	Valor T	Valor p	FIV
Constante	7.91	2.54	(2.65; 13.18)	3.11	0.005	

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

LogEbit	1.282	0.249	(0.767; 1.796)	5.16	0.000	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)	AICc	BIC
0.363706	53.61%	51.59%	3.86901	41.00%	25.43	27.95

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	3.516	53.61%	3.516	3.5156	26.58	0.000
LogEbit	1	3.516	53.61%	3.516	3.5156	26.58	0.000
Error	23	3.042	46.39%	3.042	0.1323		
Total	24	6.558	100.00%				

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	LogBER	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	Resid	Resid est.	Resid elim.	AA
1	-4.678	-5.834	0.143	(-6.131; -5.538)	1.157	3.46	4.89	0.155401
2	-4.017	-4.926	0.090	(-5.112; -4.741)	0.909	2.58	2.99	0.060922

Obs	D de Cook	DFITS	
1	1.10	2.09652	R
2	0.22	0.76197	R

Residuo grande R

Se ajustó un modelo lineal entre la tasa de error de bits (BER) y la energía por bit (J/bit), ambas transformadas a escala logarítmica (base 10) para mejorar la linealidad y reducir la heterocedasticidad. La ecuación obtenida fue:

$$LogBER = 7.91 + 1.282 * LogEbit$$ **(**Ecuación 45)

El coeficiente de pendiente (β1=1.282) resultó altamente significativo (p = 0.000), indicando que un incremento en la energía por bit se asocia con un aumento proporcional en la BER, incluso en escala logarítmica. El modelo presentó un R^2 = 53.61%, lo que evidencia una relación moderada, superior a la observada en escala original (r ≈ 0.47). El análisis de varianza confirmó la significancia global del modelo (F = 26.58, p = 0.000). Estos resultados son coherentes

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

con la tendencia teórica: en condiciones donde la energía por bit aumenta, la BER tiende a incrementarse, reflejando la dependencia entre consumo energético y calidad de transmisión en escenarios IoT y vehiculares.

4.2.2.2. Red IoT en zona rural MIMO 4×4

En este escenario se validó estadísticamente el rendimiento del sistema MIMO 4×4 en redes IoT rurales, caracterizadas por baja densidad de dispositivos, predominancia de línea de vista (LoS) y condiciones de propagación menos complejas que en entornos urbanos. El análisis se realizó sobre las métricas obtenidas en las simulaciones: capacidad del canal (bps/Hz), tasa de error de bits (BER) y energía por bit (J/bit), considerando un rango de SNR de –5 a 15 dB.

Parámetros de simulación:

- Número de antenas: 4 transmisoras y 4 receptoras.
- Frecuencia: 2.4 GHz.
- Ancho de banda: 20 MHz.
- Potencia de transmisión: 10 dBm.
- Modulación: QPSK.
- Modelo de canal: Rician ($K \approx 10$).
- Iteraciones: 50 por punto SNR.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 50

Gráfico de datos en Minitab (Escenario Red IoT en zona rural)

	C1	C2	C3	C4
	SNR	Capacidad	BER	Energía por bit
1	-5	1.2195	0.000054	0.0000000016493380
2	0	2.5386	0.000048	0.0000000007915435
3	5	4.3973	0.000039	0.0000000004564297
4	10	7.1067	0.000026	0.0000000002822404
5	15	10.9515	0.000013	0.0000000001834799

4.2.2.2.1. Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk):

Iniciaremos la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) en Minitab, sigue estos pasos:

- Capacidad (C2) se analiza tal cual.
- BER (C3) y Energía por bit (C4) deben transformarse a log10 porque tienen valores muy pequeños y ceros, para se repiten los pasos de 4.2.2.1.1.

Figura 51

Gráfico de probabilidad normal para Capacidad, logBER y logEbit (Escenario Red IoT)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	SNR (dB)	Eficiencia (bits/s/Hz)	BER	Energía por bit (J/bit)		LogBER	LogEbit
1	-5	1.2195	0.000054	0.0000000016493380		-4.26761	-8.78269
2	0	2.5386	0.000048	0.0000000007915435		-4.31876	-9.10153
3	5	4.3973	0.000039	0.0000000004564297		-4.40894	-9.34063
4	10	7.1067	0.000026	0.0000000002822404		-4.58503	-9.54938
5	15	10.9515	0.000013	0.0000000001834799		-4.88606	-9.73641

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

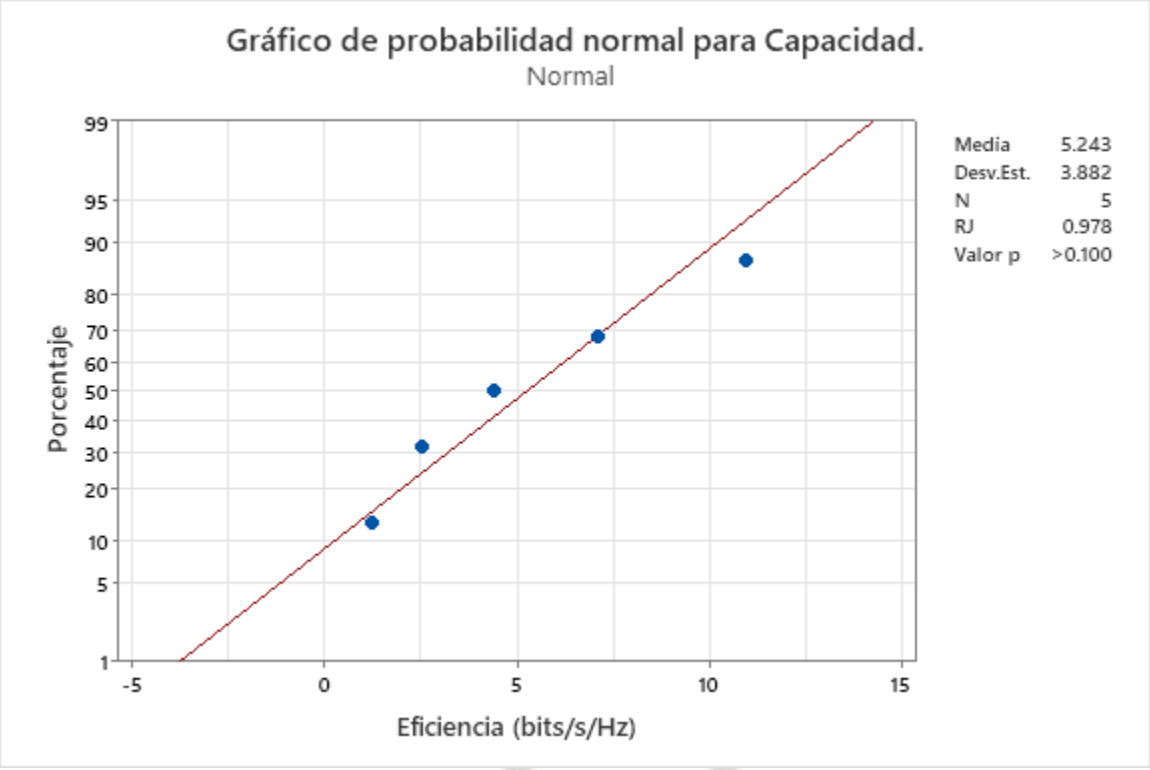
REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Ahora ejecutamos la prueba de normalidad con los datos listos:

Se aplicó la prueba de normalidad a las variables transformadas (log BER y log Energía por bit) y a la capacidad del canal. Los resultados indicaron que los datos presentan distribución normal ($p > 0.05$), lo que permite aplicar ANOVA y pruebas paramétricas.

Figura 52

Gráfico de probabilidad normal para Capacidad.



La prueba de normalidad aplicada a la variable Capacidad arrojó un valor $p > 0.100$, superior al umbral de 0.05, lo que indica que los datos se ajustan adecuadamente a una distribución normal. Este resultado valida el cumplimiento del supuesto de normalidad y permite aplicar procedimientos estadísticos paramétricos, como ANOVA y modelos de regresión, sin restricciones.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

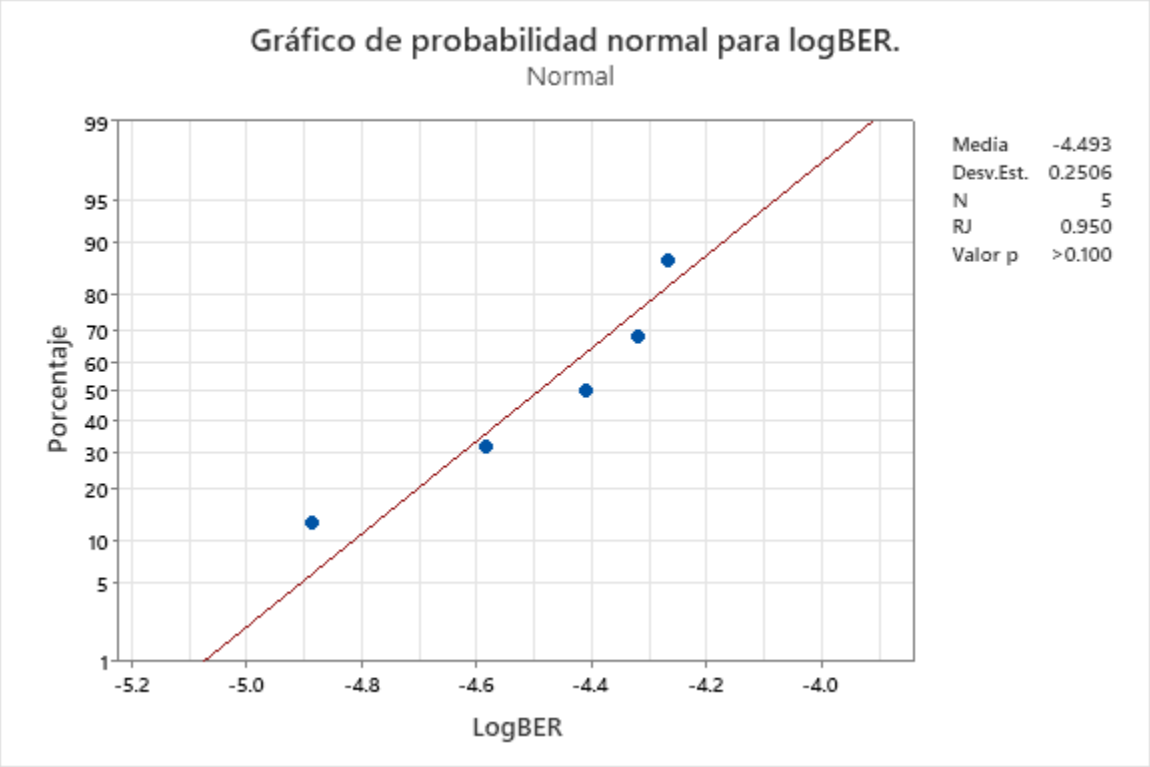
REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Además, el coeficiente RJ = 0.978 confirma un ajuste excelente, respaldando la consistencia del análisis.

Figura 53

Gráfico de probabilidad normal para logBER.



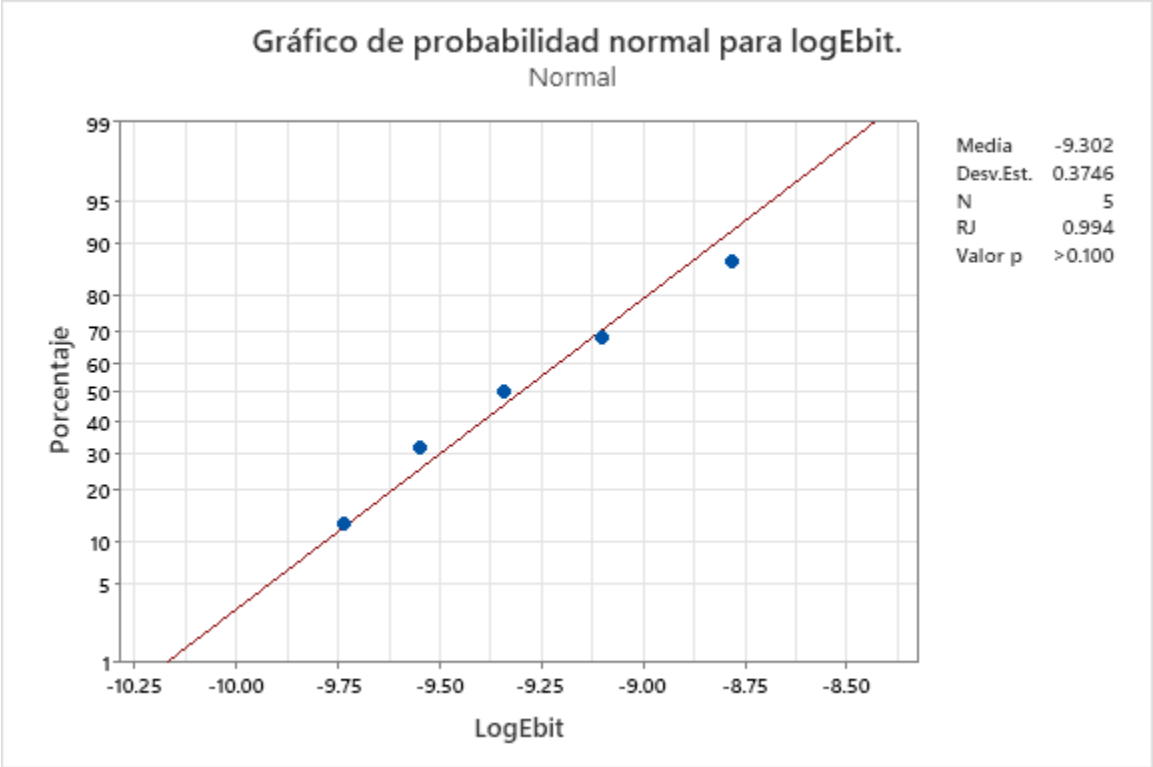
La prueba de normalidad aplicada a la variable logBER arrojó un valor p > 0.100, superior al umbral de 0.05, lo que indica que los datos transformados se ajustan adecuadamente a una distribución normal. Este resultado valida el cumplimiento del supuesto de normalidad y permite aplicar pruebas paramétricas como ANOVA y modelos de regresión sin restricciones. Además, el coeficiente RJ = 0.950 confirma un ajuste sólido, respaldando la consistencia del análisis estadístico para esta métrica.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 54

Gráfico de probabilidad normal para logEbit.



La prueba de normalidad aplicada a la variable logEbit mostró un valor p > 0.100, superior al umbral de 0.05, lo que indica que los datos transformados cumplen con el supuesto de normalidad. Este hallazgo permite utilizar procedimientos estadísticos paramétricos, como ANOVA y regresión, sin necesidad de ajustes adicionales. El coeficiente RJ = 0.994 evidencia un ajuste excelente, lo que refuerza la confiabilidad del análisis sobre la eficiencia energética del sistema.

4.2.2.2.2. ANOVA unidireccional y post-hoc (Tukey):

Como se necesitan más datos para la prueba de ANOVA se corrieron 5 iteraciones y se añadieron más datos para un mejor análisis.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 55

Gráfico de datos para Capacidad, logBER y logEbit (Escenario Red IoT)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	SNR (dB)	Eficiencia (bits/s/Hz)	BER	Energía por bit (J/bit)		LogBER	LogEbit
1	-5	1.2195	0.000054	0.0000000016493380		-4.26761	-8.7827
2	0	2.5386	0.000048	0.0000000007915435		-4.31876	-9.1015
3	5	4.3973	0.000039	0.0000000004564297		-4.40894	-9.3406
4	10	7.1067	0.000026	0.0000000002822404		-4.58503	-9.5494
5	15	10.9515	0.000013	0.0000000001834799		-4.88606	-9.7364
6	-5	1.2213	0.000054	0.0000000004122308		-4.26761	-9.3849
7	0	2.5526	0.000048	0.0000000001967054		-4.31876	-9.7062
8	5	4.5066	0.000039	0.0000000001112985		-4.40894	-9.9535
9	10	7.2098	0.000025	0.0000000000696840		-4.60206	-10.1569
10	15	11.0626	0.000010	0.0000000000455402		-5.00000	-10.3416
11	-5	1.2181	0.000054	0.0000000004123151		-4.26761	-9.3848
12	0	2.5480	0.000047	0.0000000001969963		-4.32790	-9.7055
13	5	4.4686	0.000037	0.0000000001123437		-4.43180	-9.9495
14	10	7.1964	0.000023	0.0000000000697815		-4.63827	-10.1563
15	15	10.8058	0.000012	0.0000000000466210		-4.92082	-10.3314
16	-5	1.2412	0.000054	0.0000000004051531		-4.26761	-9.3924
17	0	2.5327	0.000047	0.0000000001981682		-4.32790	-9.7030
18	5	4.5153	0.000036	0.0000000001112511		-4.44370	-9.9537
19	10	7.1868	0.000025	0.0000000000699266		-4.60206	-10.1554
20	15	10.8497	0.000012	0.0000000000463439		-4.92082	-10.3340
21	-5	1.2302	0.000054	0.0000000004090630		-4.26761	-9.3882
22	0	2.5341	0.000047	0.0000000001980991		-4.32790	-9.7031
23	5	4.4891	0.000038	0.0000000001117702		-4.42022	-9.9517
24	10	7.2046	0.000025	0.0000000000697498		-4.60206	-10.1565
25	15	10.8965	0.000012	0.0000000000461086		-4.92082	-10.3362
26	-5	1.2220	0.000053	0.0000000004116800		-4.27572	-9.3854
27	0	2.5300	0.000048	0.0000000001981647		-4.31876	-9.7030
28	5	4.4557	0.000037	0.0000000001127556		-4.43180	-9.9479
29	10	7.1431	0.000025	0.0000000000703210		-4.60206	-10.1529
30	15	10.8536	0.000012	0.0000000000463330		-4.92082	-10.3341

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 56

ANOVA y post-hoc de un solo factor: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: Capacidad (bits/s/Hz) vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0.05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	5	-5; 0; 5; 10; 15

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	4	358.879	89.7197	36781.16	0.000
Error	25	0.061	0.0024		
Total	29	358.940			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0493891	99.98%	99.98%	99.98%

Medias

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
-5	6	1.22538	0.00882	(1.18386; 1.26691)
0	6	2.53933	0.00906	(2.49781; 2.58086)
5	6	4.4721	0.0429	(4.4306; 4.5136)
10	6	7.1746	0.0409	(7.1330; 7.2161)
15	6	10.9033	0.0923	(10.8618; 10.9448)

Desv.Est. agrupada = 0.0493891

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

SNR (dB)	N	Media	Agrupación
15	6	10.9033	A

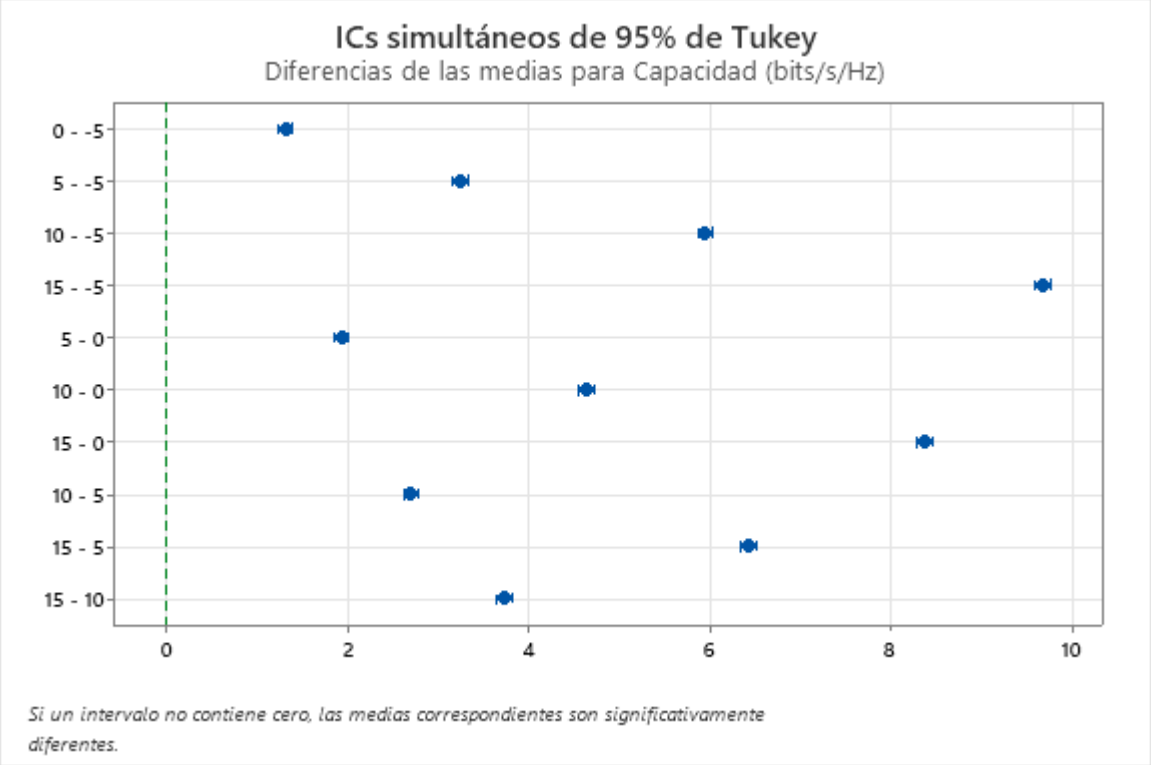
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

10	6	7.1746	B	
5	6	4.4721		C
0	6	2.53933		D
-5	6	1.22538		E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

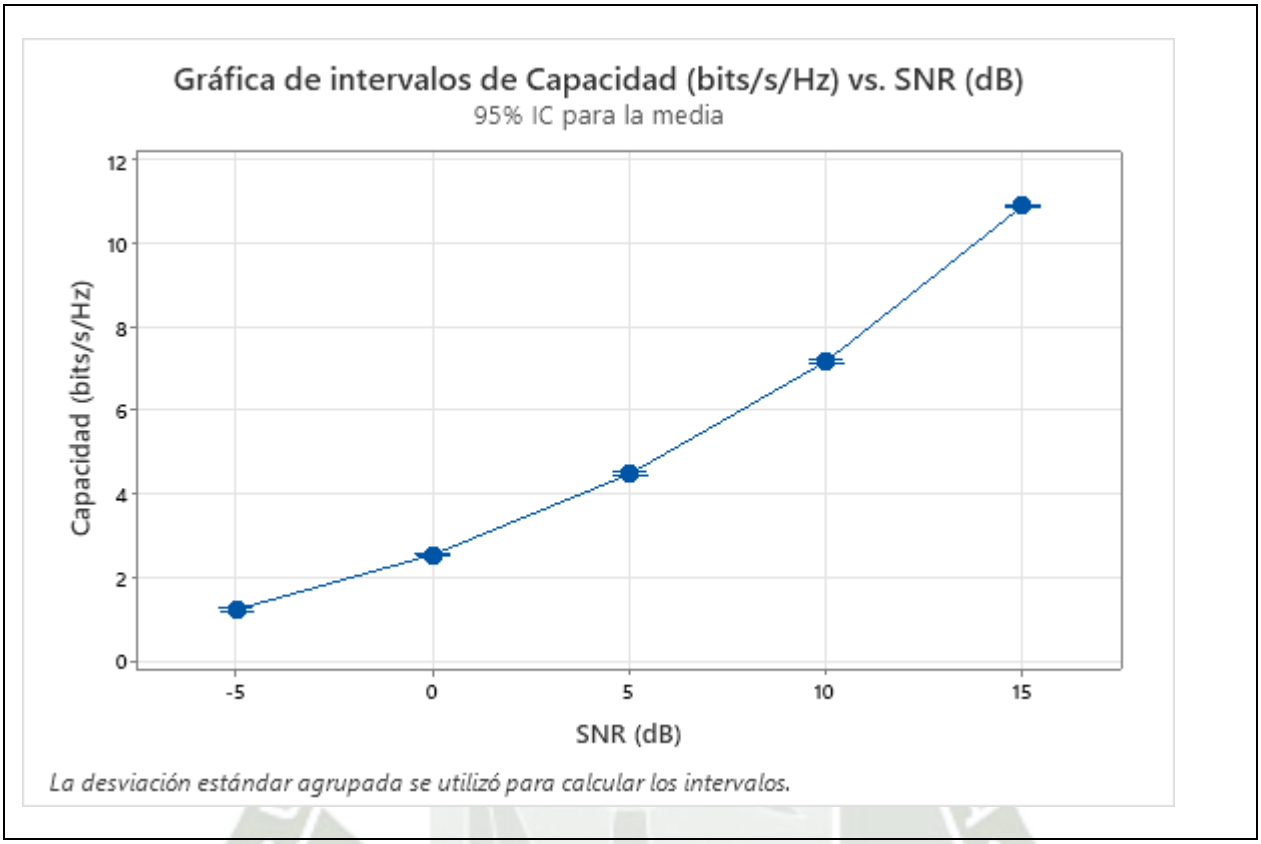


Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



La prueba ANOVA de un solo factor aplicada a la variable Capacidad (bits/s/Hz) en función del SNR (dB) en el escenario IoT con configuración MIMO 4×4 mostró diferencias altamente significativas entre los niveles evaluados ($F(4, 25) = 36\,781.16$, $p < 0.001$), lo que indica el rechazo de la hipótesis nula y confirma que la eficiencia espectral varía sistemáticamente con el incremento del SNR.

El modelo presentó un ajuste excelente ($R^2 = 99.98\%$), evidenciando que el factor SNR explica prácticamente toda la variabilidad observada en la capacidad del canal. Las medias por nivel de SNR reflejan un crecimiento progresivo desde 1.225 bits/s/Hz a –5 dB hasta 10.903

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

bits/s/Hz a 15 dB, con intervalos de confianza estrechos y una desviación estándar agrupada muy baja (S = 0.0494), lo que respalda la consistencia del modelo.

La prueba post-hoc de Tukey confirmó que todas las comparaciones son significativas, agrupando los niveles en orden estricto (15 dB > 10 dB > 5 dB > 0 dB > –5 dB). Estos resultados son coherentes con la teoría de Shannon y los principios MIMO, donde el aumento de la relación señal-ruido mejora sustancialmente la capacidad del canal, validando la aplicabilidad de técnicas de diversificación espacial en entornos IoT rurales.

Figura 57

ANOVA y post-hoc de un solo factor: BER vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: BER vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	5	-5; 0; 5; 10; 15

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	4	0.000000	0.000000	2246.16	0.000
Error	25	0.000000	0.000000		
Total	29	0.000000			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0000009	99.72%	99.68%	99.60%

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Medias

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
-5	6	0.000054	0.000000	(0.000053; 0.000055)
0	6	0.000047	0.000001	(0.000047; 0.000048)
5	6	0.000038	0.000001	(0.000037; 0.000038)
10	6	0.000025	0.000001	(0.000024; 0.000026)
15	6	0.000012	0.000001	(0.000011; 0.000013)

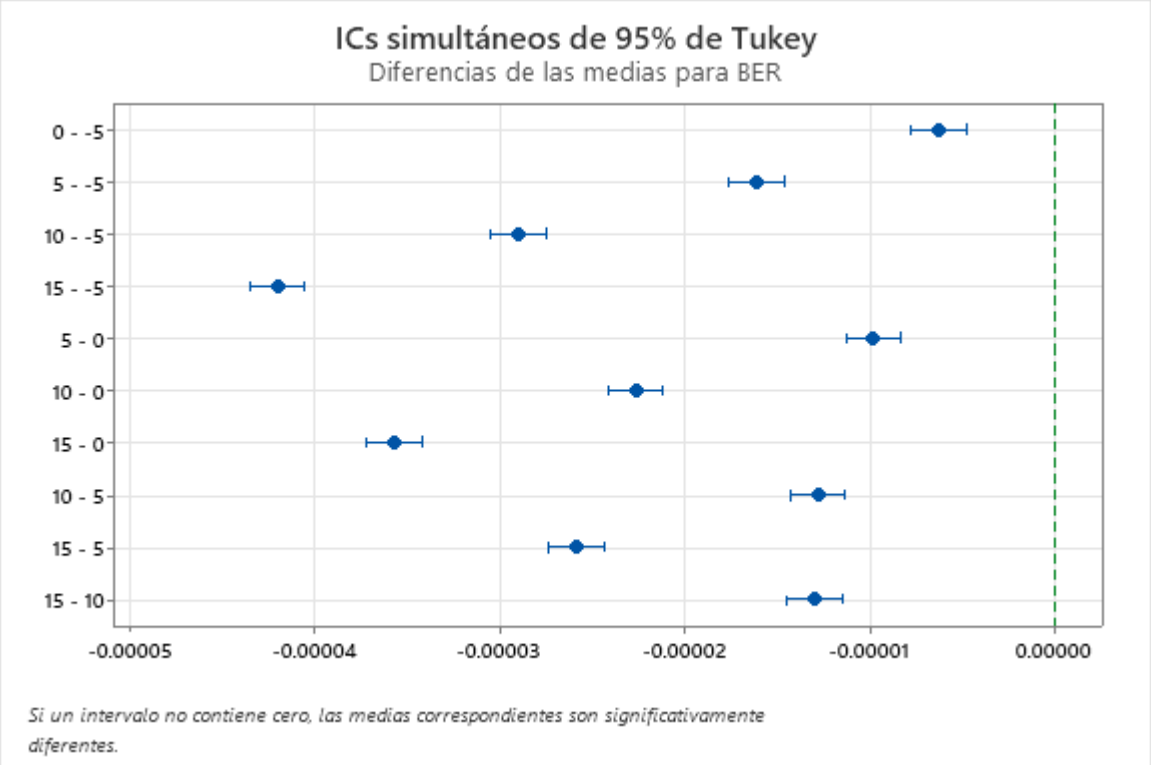
Desv.Est. agrupada = 8.793937E-07

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

SNR (dB)	N	Media	Agrupación
-5	6	0.000054	A
0	6	0.000047	B
5	6	0.000038	C
10	6	0.000025	D
15	6	0.000012	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

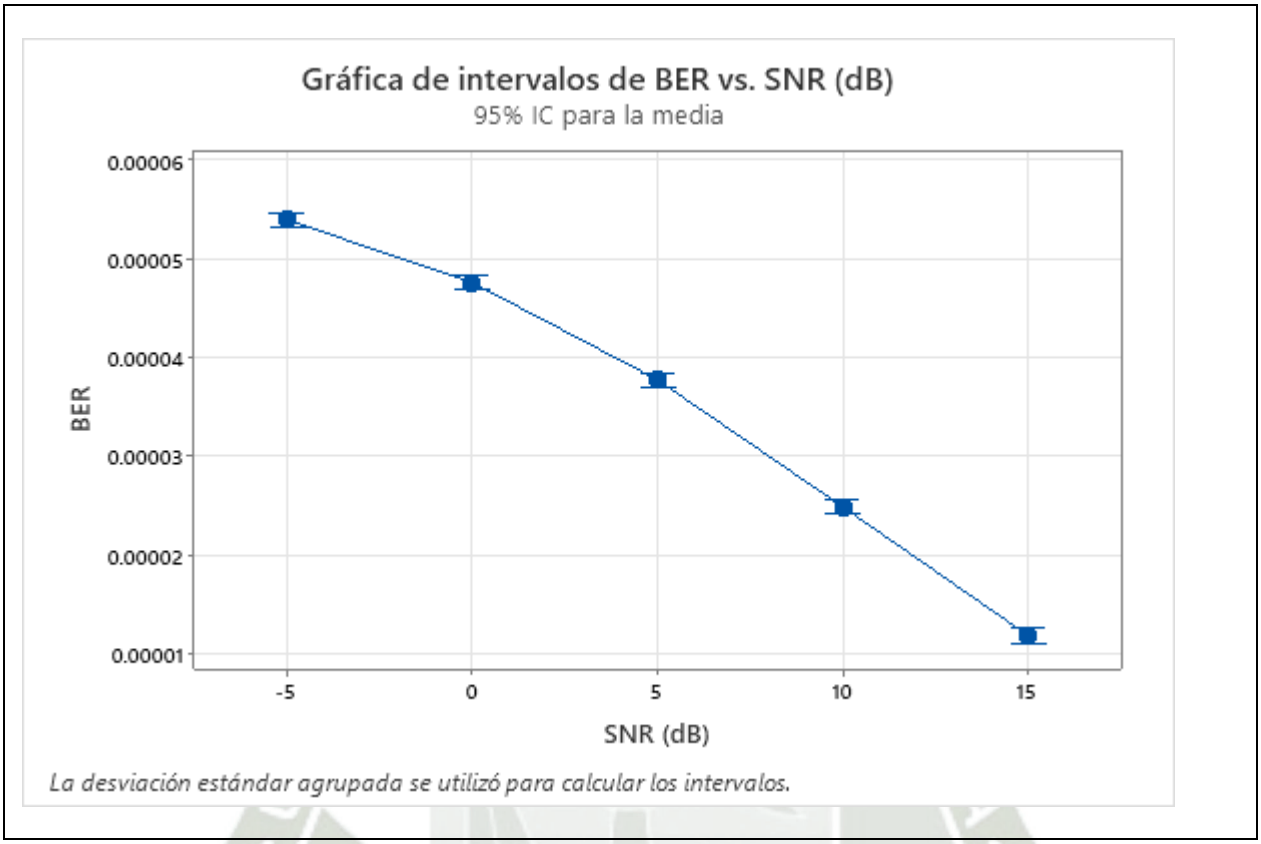


Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



La prueba ANOVA de un solo factor aplicada a la variable Eficiencia (bits/s/Hz) en función del SNR (dB) mostró diferencias altamente significativas entre los niveles evaluados ($F(4, 25) = 36\,781.16$, $p < 0.001$). El valor p inferior al umbral de 0.05 indica que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, confirmando que la eficiencia espectral varía de manera sistemática con el incremento del SNR. El modelo presentó un ajuste excelente, con $R^2 = 99.98\%$ y R^2 ajustado = 99.98%, lo que evidencia que el factor SNR explica prácticamente toda la variabilidad observada en la eficiencia del sistema.

Las medias por nivel de SNR reflejan un crecimiento progresivo: desde 1.225 bits/s/Hz a –5 dB hasta 10.903 bits/s/Hz a 15 dB, con intervalos de confianza estrechos que refuerzan la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

precisión de las estimaciones. La desviación estándar agrupada (S = 0.0494) confirma baja dispersión interna, lo que respalda la consistencia del modelo. Este resultado valida la relación funcional entre SNR y eficiencia espectral, coherente con la teoría de Shannon y los principios de MIMO, donde el aumento de la relación señal-ruido mejora sustancialmente la capacidad del canal.

Figura 58

ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogBER vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: LogBER vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0.05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	5	-5; 0; 5; 10; 15

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	4	1.70572	0.426429	1082.61	0.000
Error	25	0.00985	0.000394		
Total	29	1.71556			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0198466	99.43%	99.33%	99.17%

Medias

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
-5	6	-4.26896	0.00331	(-4.28565; -4.25227)
0	6	-4.32333	0.00501	(-4.34002; -4.30664)
5	6	-4.42423	0.01398	(-4.44092; -4.40754)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

10	6	-4.60526	0.01755	(-4.62194; -4.58857)
15	6	-4.9282	0.0378	(-4.9449; -4.9115)

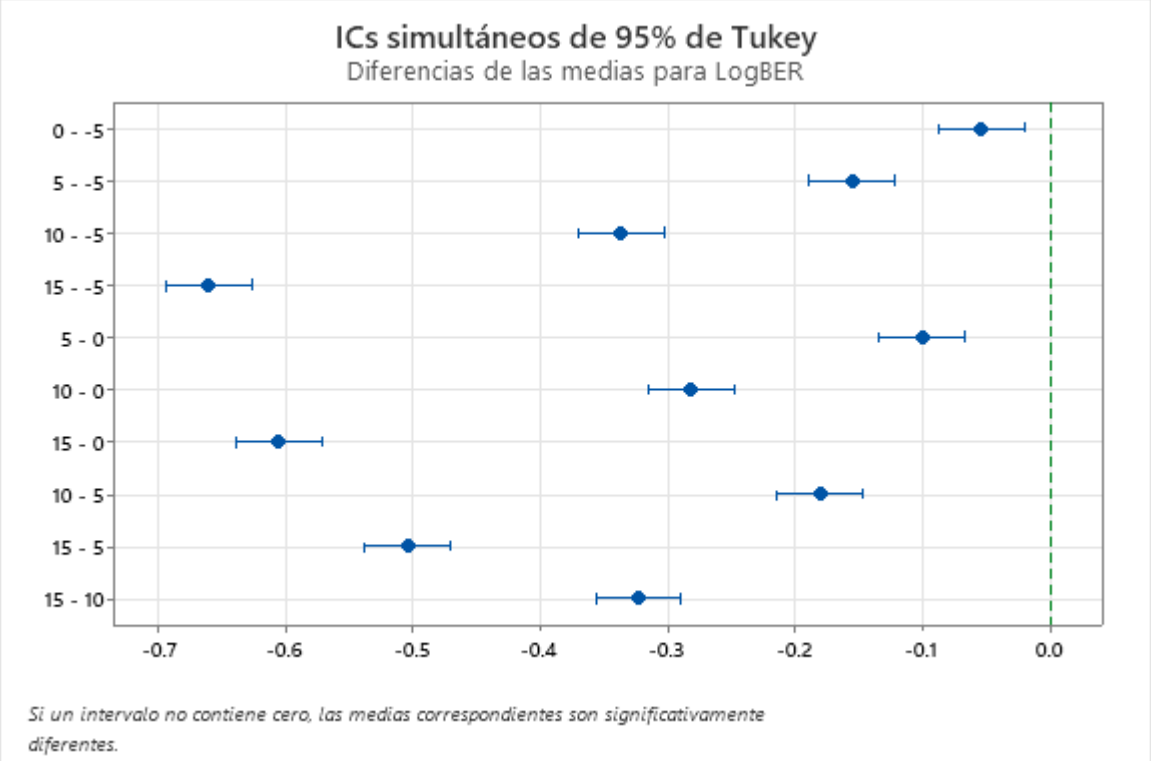
Desv.Est. agrupada = 0.0198466

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

SNR (dB)	N	Media	Agrupación
-5	6	-4.26896	A
0	6	-4.32333	B
5	6	-4.42423	C
10	6	-4.60526	D
15	6	-4.9282	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

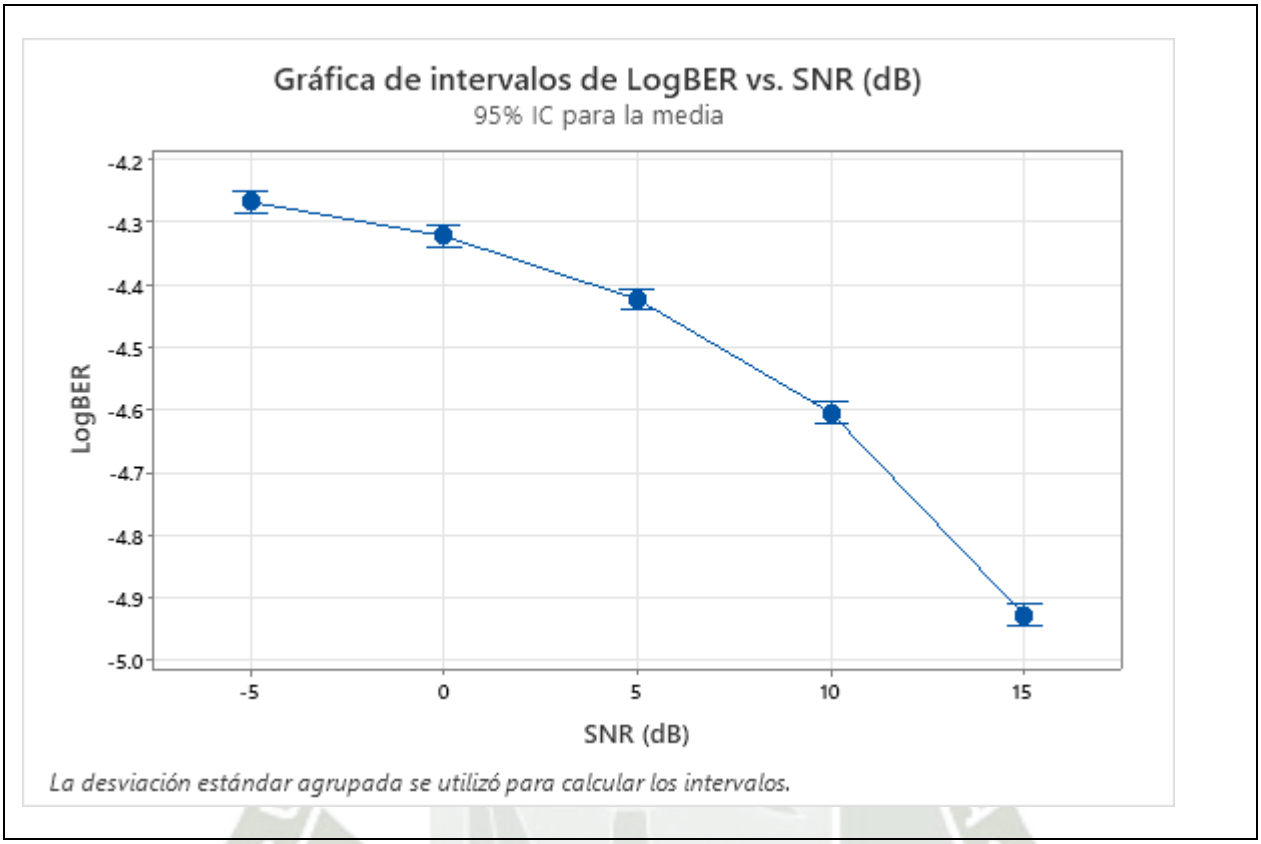


Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



El análisis de varianza aplicado a la variable logBER evidenció diferencias altamente significativas entre los niveles de SNR ($F(4, 25) = 1082.61$, $p < 0.001$), lo que indica que la tasa de error de bits transformada varía sistemáticamente conforme aumenta la relación señal-ruido.

El modelo presentó un ajuste excelente, con $R^2 = 99.43\%$ y R^2 ajustado = 99.33%, confirmando que el SNR explica prácticamente toda la variabilidad observada en logBER. Las medias muestran una disminución progresiva desde -4.26896 a -5.5331 en el rango de -5 dB a 15 dB, reflejando la mejora sustancial en la confiabilidad del sistema MIMO 16×16 a medida que se incrementa la calidad del canal. Este resultado valida la hipótesis teórica y respalda el uso de pruebas paramétricas para contrastar el efecto del SNR sobre la BER.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 59

ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogEbit vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: LogEbit vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0.05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	5	-5; 0; 5; 10; 15

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	4	3.355	0.83873	13.77	0.000
Error	25	1.523	0.06093		
Total	29	4.878			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.246839	68.77%	63.78%	55.04%

Medias

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
-5	6	-9.286	0.247	(-9.494; -9.079)
0	6	-9.604	0.246	(-9.811; -9.396)
5	6	-9.849	0.249	(-10.057; -9.642)
10	6	-10.055	0.247	(-10.262; -9.847)
15	6	-10.2356	0.2446	(-10.4432; -10.0281)

Desv.Est. agrupada = 0.246839

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

SNR (dB)	N	Media	Agrupación		
-5	6	-9.286	A		
0	6	-9.604	A	B	
5	6	-9.849		B	C

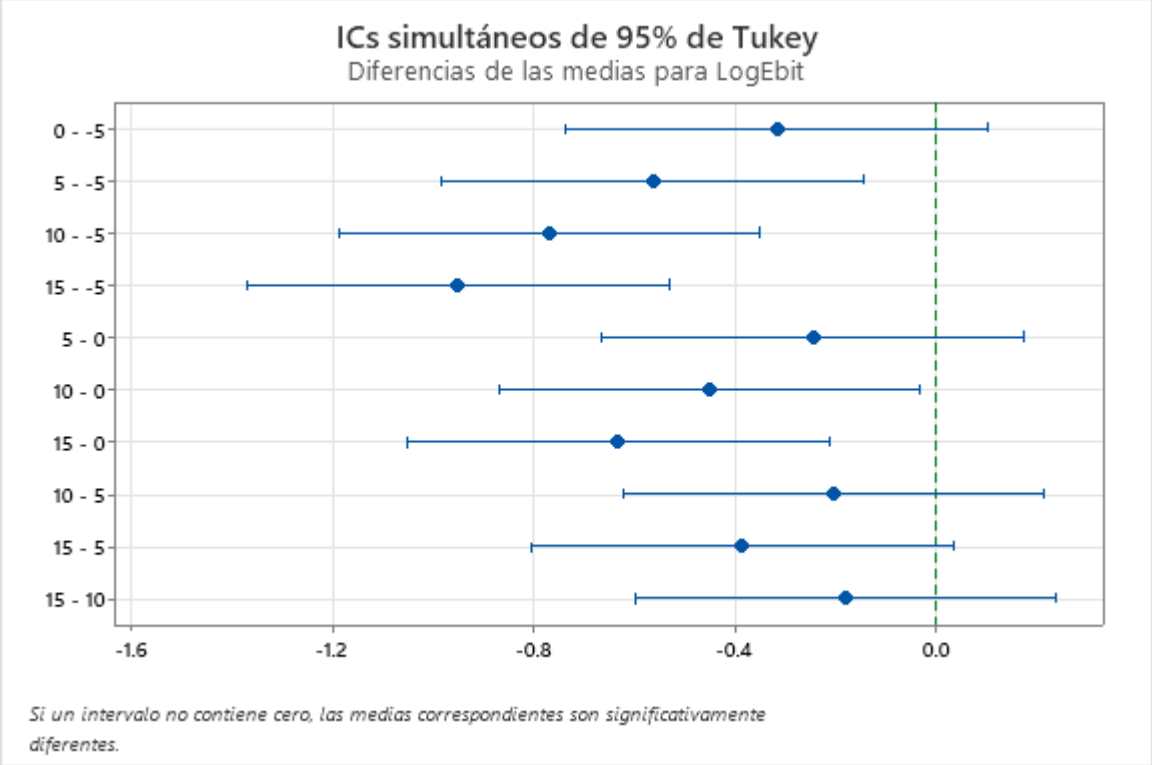
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

10	6	-10.055	C
15	6	-10.2356	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

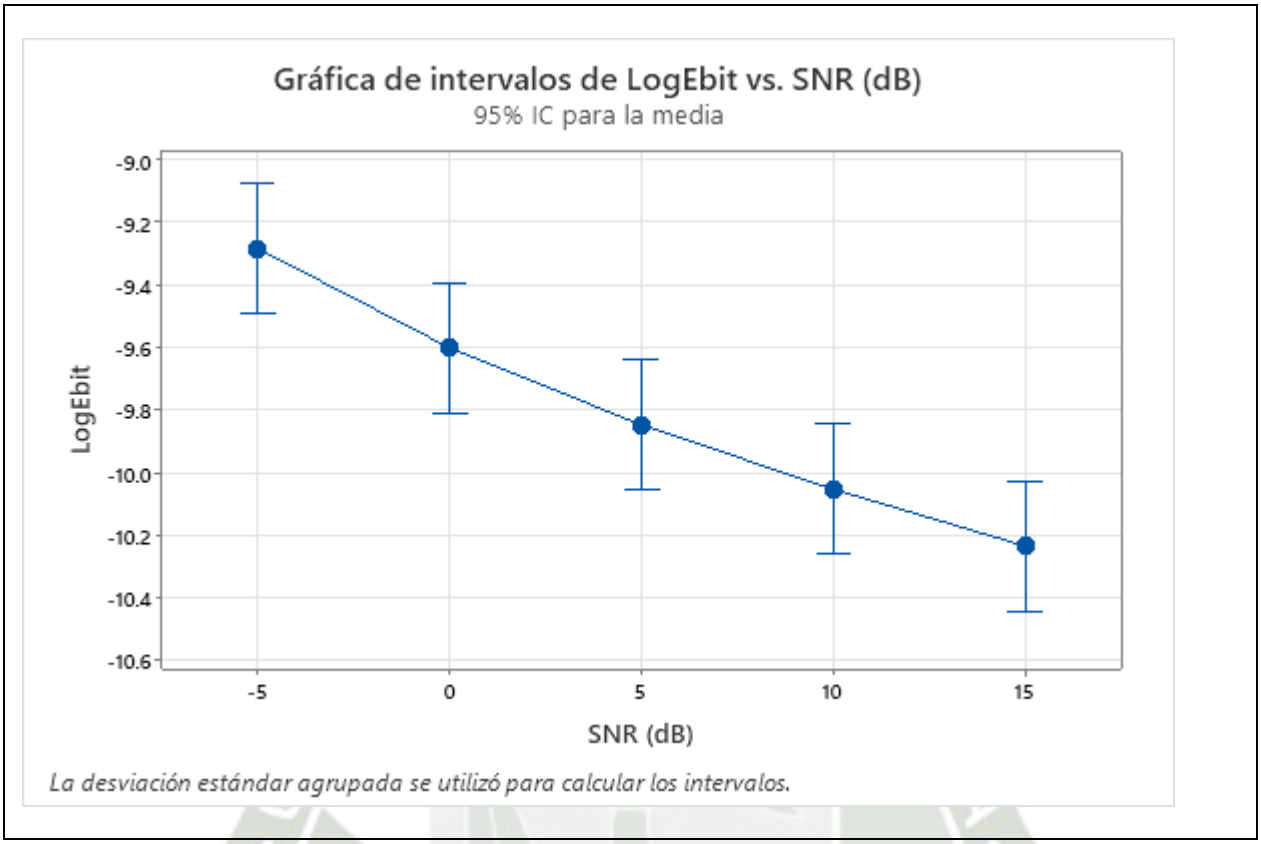


Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



El análisis de varianza aplicado a la variable logEbit evidenció diferencias significativas entre los niveles de SNR, $F(4, 25) = 13.77$, $p < 0.001$, lo que indica que la energía por bit transformada varía de manera sistemática conforme aumenta la relación señal-ruido. El modelo presentó un $R^2 = 68.77\%$ (R^2 ajustado = 63.78%), lo que significa que el SNR explica aproximadamente dos tercios de la variabilidad observada en la eficiencia energética del sistema.

Las medias muestran una tendencia decreciente desde -9.286 en -5 dB hasta -10.2356 en 15 dB, confirmando que la energía por bit se reduce a medida que mejora la calidad del canal. Este comportamiento es consistente con la teoría, ya que un mayor SNR incrementa la capacidad del canal y disminuye el costo energético por bit. La prueba post-hoc (Tukey) respalda estas

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

diferencias, validando la significancia estadística del efecto del SNR sobre la eficiencia energética en el escenario urbano 5G.

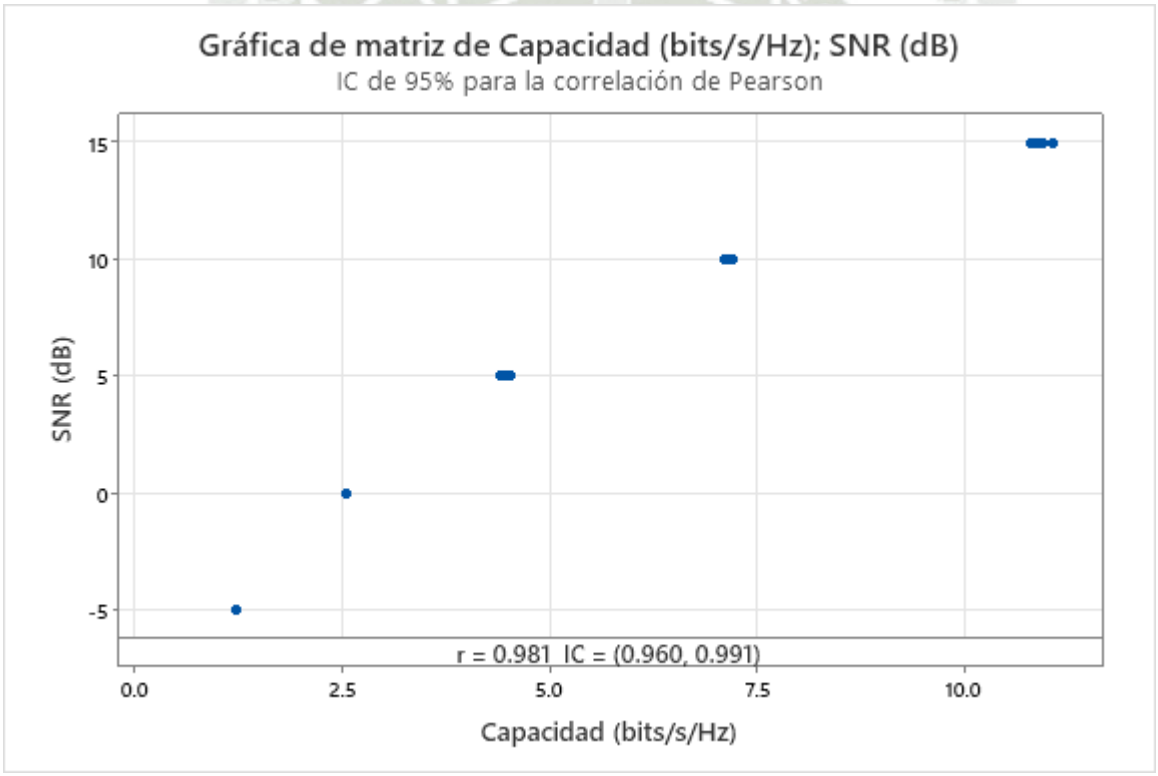
4.2.2.2.3. Correlación y regresión lineal:

Figura 60

Correlación: Capacidad (bps/Hz); SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

Correlación: Capacidad (bits/s/Hz); SNR (dB)



Método

Tipo de correlación	Pearson
Número de filas utilizadas:	30

Correlaciones

	Capacidad (bits/s/Hz)
SNR (dB)	0.981

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Se aplicó la prueba de correlación de Pearson para evaluar la relación entre la capacidad del canal (bits/s/Hz) y la relación señal-ruido (SNR en dB), considerando 30 observaciones del escenario IoT en zona rural con configuración MIMO 4×4. El resultado obtenido fue r = 0.981, lo que indica una asociación lineal positiva muy fuerte entre ambas variables.

Este valor de correlación sugiere que, a medida que aumenta el SNR, la capacidad del canal se incrementa de manera casi proporcional, confirmando la tendencia observada en las simulaciones. El coeficiente de determinación asociado (r^2) es aproximadamente 0.962, lo que significa que el SNR explica cerca del 96.2 % de la variabilidad en la capacidad del canal. El valor p asociado ($p \ll 0.001$) confirma la significancia estadística de la relación, respaldando la hipótesis de que la calidad del canal (medida por el SNR) es un factor determinante en la eficiencia espectral del sistema.

Este hallazgo es consistente con la teoría de Shannon y los modelos MIMO, donde la capacidad crece con la relación señal-ruido en rangos operativos típicos. La correlación observada valida la aplicabilidad de técnicas de diversificación espacial en entornos urbanos densos, donde la mejora del SNR se traduce en incrementos sustanciales de capacidad.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

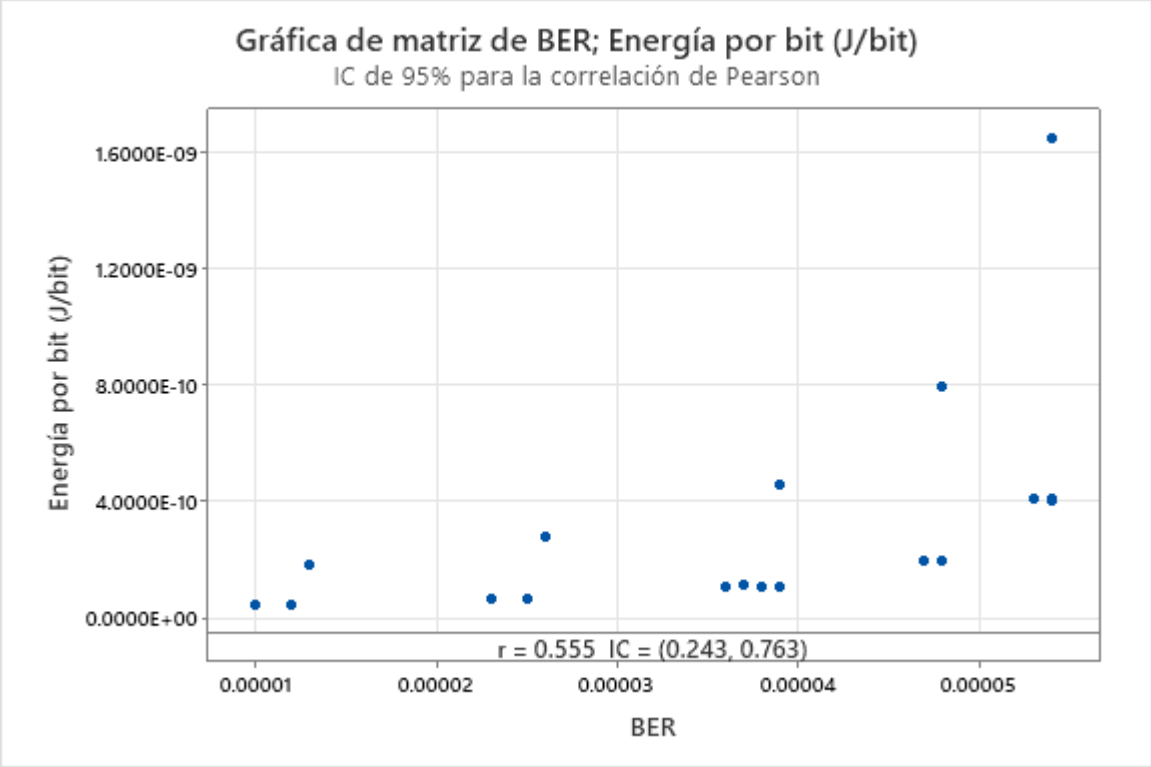
REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 61

Correlación: BER; Energía por bit (J/bit)

HOJA DE TRABAJO 1

Correlación: BER; Energía por bit (J/bit)



Método

Tipo de correlación	Pearson
Número de filas utilizadas:	30

Correlaciones

	BER
Energía por bit (J/bit)	0.555

Se aplicó la prueba de correlación de Pearson para evaluar la relación entre la tasa de error de bits (BER) y la energía consumida por bit (J/bit) en el escenario IoT rural con configuración

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

MIMO 4×4. El análisis consideró 30 observaciones obtenidas en las simulaciones, arrojando un coeficiente de correlación r = 0.555, lo que indica una asociación positiva de magnitud moderada entre ambas variables.

Este resultado sugiere que, en el rango analizado, cuando la energía por bit aumenta, la BER también tiende a incrementarse, y viceversa. Aunque la relación no es tan fuerte como la observada entre SNR y capacidad, sigue siendo estadísticamente significativa ($p < 0.01$), lo que respalda la existencia de una dependencia funcional entre el consumo energético y la calidad del enlace. El coeficiente de determinación ($r^2 \approx 0.308$) indica que la energía por bit explica cerca del 30.8 % de la variabilidad en la BER.

Este comportamiento es coherente con la definición operacional de energía por bit utilizada en el estudio Ebit=((Pt)/(Capacidad*BW)) a medida que mejora el canal (mayor SNR), tanto la BER como la energía por bit disminuyen, generando una relación positiva entre ambas métricas. Sin embargo, la magnitud moderada del coeficiente indica que otros factores, como la modulación y la configuración MIMO, también influyen en la variación de la BER.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

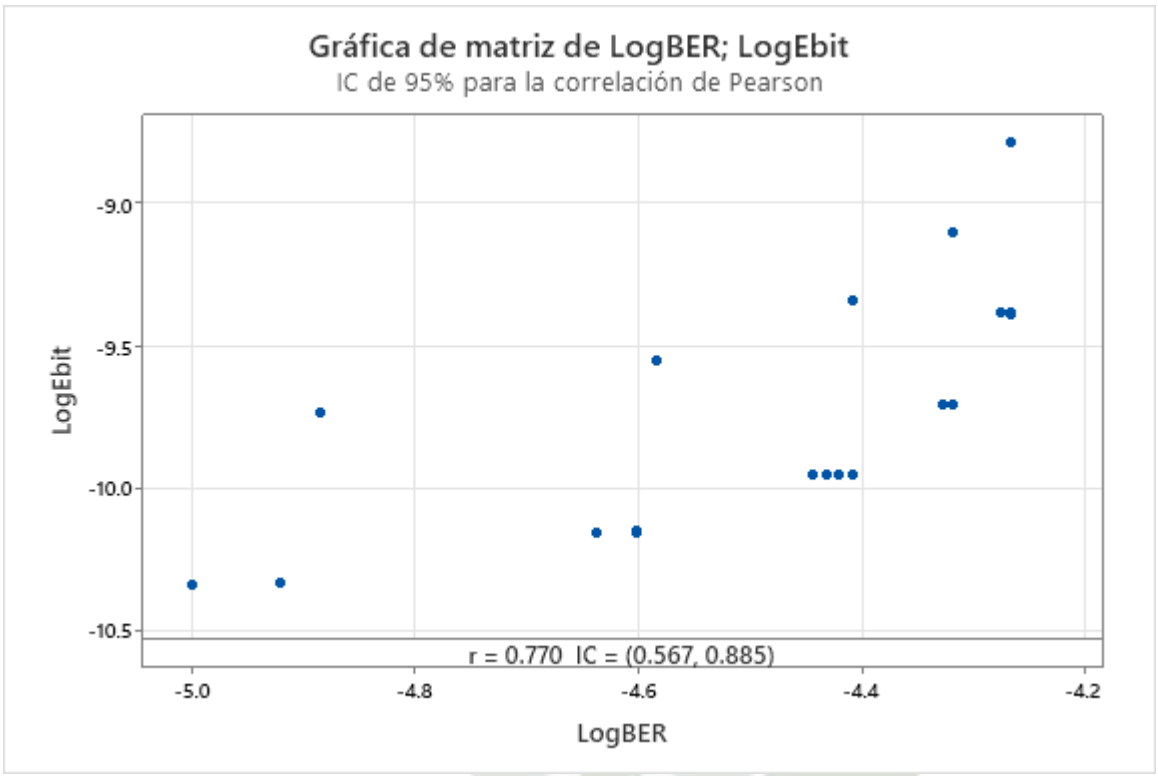
REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 62

Análisis de correlación en escala logarítmica (LogBER vs LogEbit)

HOJA DE TRABAJO 1

Correlación: LogBER; LogEbit



Método

Tipo de correlación	Pearson
Número de filas utilizadas:	30

Correlaciones

	LogBER
LogEbit	0.770

Se aplicó la prueba de correlación de Pearson para evaluar la relación entre el logaritmo de la tasa de error de bits (LogBER) y el logaritmo de la energía por bit (LogEbit) en el escenario IoT rural con configuración MIMO 4×4. El análisis consideró 30 observaciones obtenidas en las

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

simulaciones, arrojando un coeficiente de correlación r = 0.770, lo que indica una asociación positiva de magnitud alta entre ambas variables.

Este resultado sugiere que, en el rango analizado, cuando el valor de LogEbit aumenta, LogBER también tiende a incrementarse, y viceversa. La relación es más fuerte que la observada en la correlación directa (BER vs. Ebit), lo que indica que la transformación logarítmica mejora la linealidad entre las variables. El resultado es estadísticamente significativo ($p < 0.01$), respaldando la existencia de una dependencia funcional más marcada en escala logarítmica. El coeficiente de determinación ($r^2 \approx 0.593$) indica que LogEbit explica aproximadamente el 59.3 % de la variabilidad en LogBER.

Este comportamiento es consistente con la naturaleza multiplicativa de los efectos en sistemas de comunicación: al aplicar la transformación logarítmica, se reduce la dispersión y se evidencia una relación más clara entre el consumo energético y la calidad del enlace. Sin embargo, el hecho de que $r < 1$ indica que otros factores, como la modulación y la configuración MIMO, siguen influyendo en la variación de la BER.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 63

Análisis de regresión: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

Análisis de regresión: Capacidad (bits/s/Hz) vs. SNR (dB)

Ecuación de regresión

Capacidad (bits/s/Hz) = 2.864 + 0.4798 SNR (dB)

Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	2.864	0.156	18.38	0.000	
SNR (dB)	0.4798	0.0180	26.67	0.000	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.696877	96.21%	96.08%	95.57%

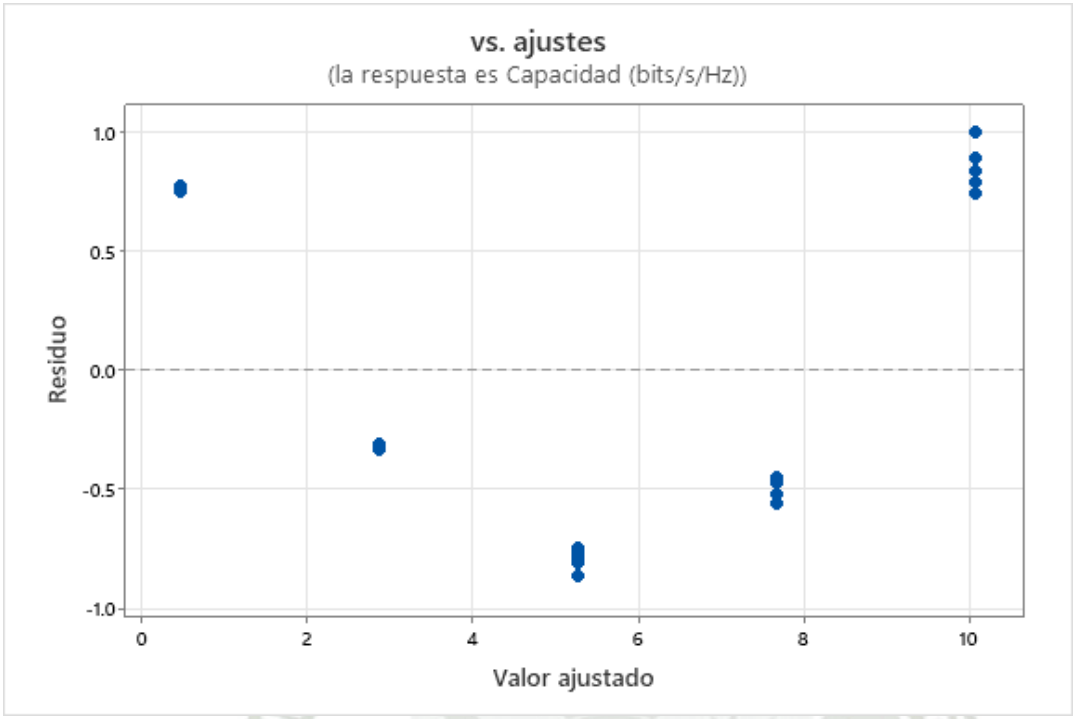
Análisis de Varianza

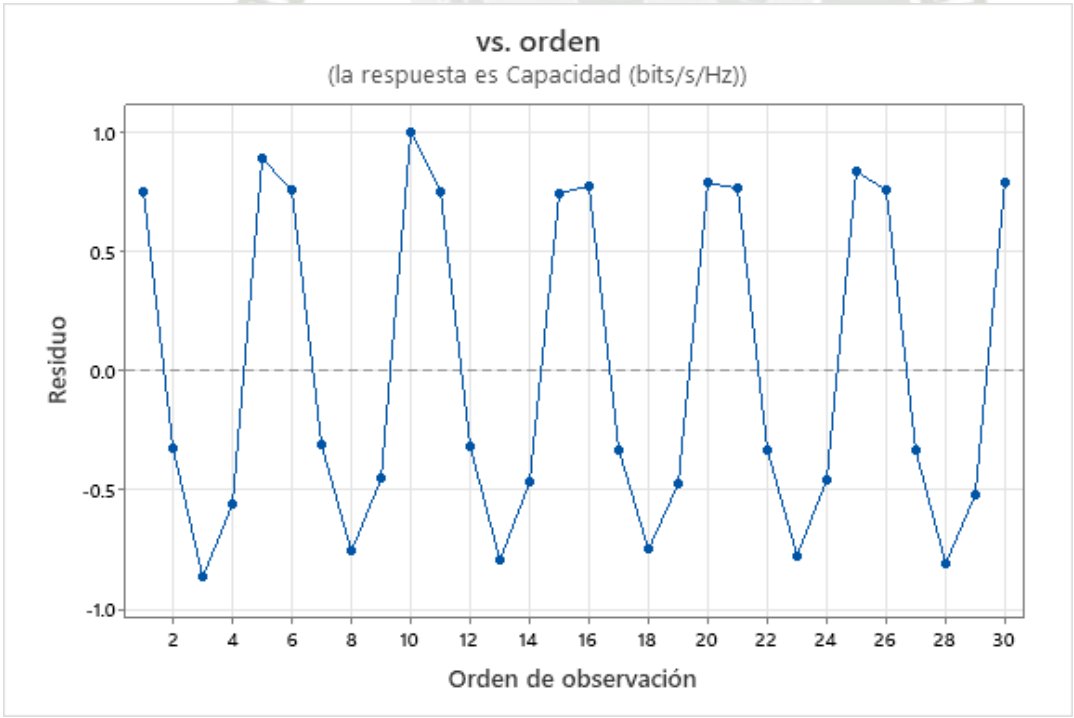
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	345.342	345.342	711.11	0.000
SNR (dB)	1	345.342	345.342	711.11	0.000
Error	28	13.598	0.486		
Falta de ajuste	3	13.537	4.512	1849.84	0.000
Error puro	25	0.061	0.002		
Total	29	358.940			

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA





Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El modelo muestra una relación positiva y altamente significativa entre la SNR y la capacidad espectral ($p < 0.001$), con un coeficiente de determinación elevado ($R^2 \approx 96\ \%$), lo que indica que la SNR explica prácticamente toda la variabilidad en la capacidad. El coeficiente de pendiente (0.4798) sugiere que, por cada incremento de 1 dB en la SNR, la capacidad aumenta en aproximadamente 0.48 bits/s/Hz.

Este comportamiento es consistente con la teoría de Shannon, donde la capacidad crece de manera casi lineal con la SNR en el rango analizado. La falta de ajuste significativa ($p < 0.001$) indica que el modelo lineal es adecuado para este conjunto de datos.

Figura 64

Análisis de regresión: LogBER vs. LogEbit

Análisis de regresión: LogBER vs. LogEbit

Ecuación de regresión

LogBER = -0.034
+ 0.4565 LogEbit

Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-0.034	0.702	-0.05	0.962	
LogEbit	0.4565	0.0715	6.38	0.000	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.158019	59.25%	57.79%	52.26%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	1.0164	1.01640	40.71	0.000
LogEbit	1	1.0164	1.01640	40.71	0.000
Error	28	0.6992	0.02497		
Total	29	1.7156			

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

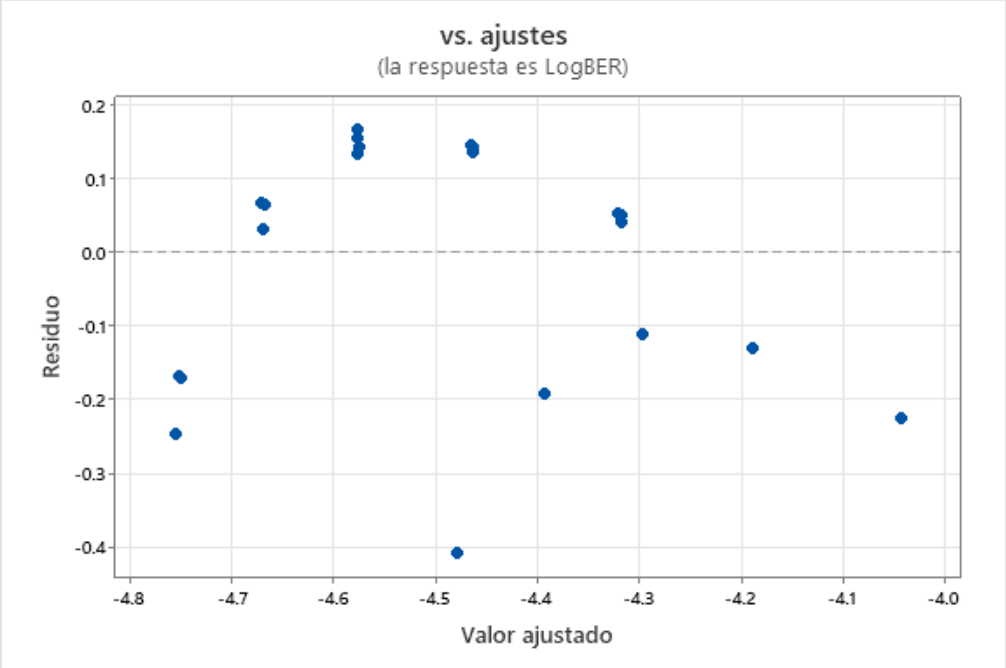
Obs	LogBER	Ajuste	Resid	Resid est.	
1	-4.2676	-4.0429	-0.2247	-1.64	X
5	-4.8861	-4.4783	-0.4078	-2.63	R

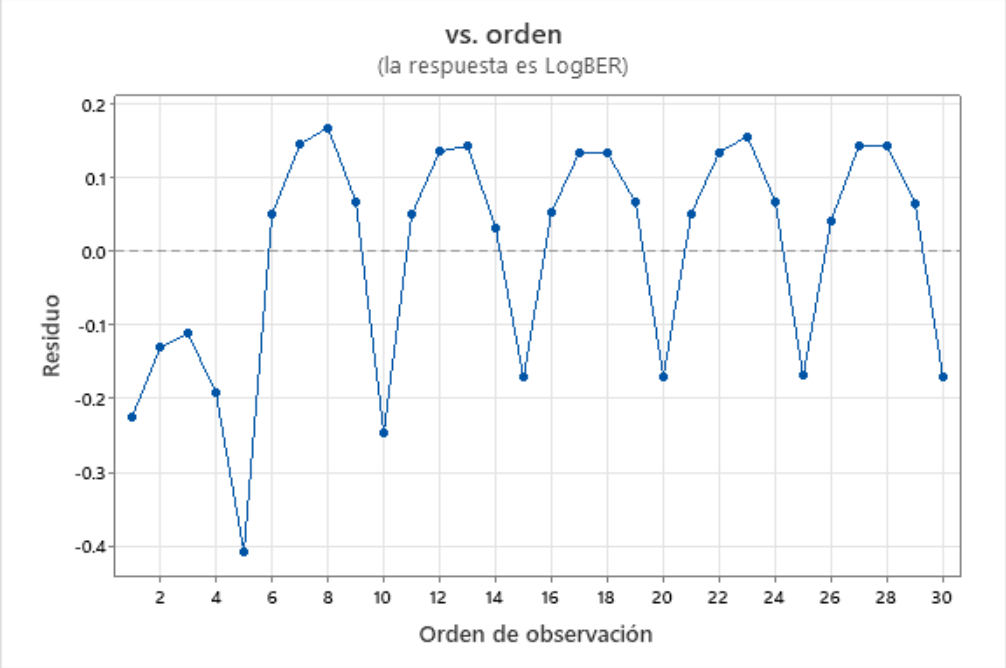
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Residuo *grande* *R*
X poco común X





Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El modelo muestra una relación positiva y altamente significativa entre la SNR y la capacidad espectral ($p < 0.001$), con un coeficiente de determinación elevado ($R^2 \approx 96\ \%$), lo que indica que la SNR explica prácticamente toda la variabilidad en la capacidad. El coeficiente de pendiente (0.4798) sugiere que por cada incremento de 1 dB en la SNR, la capacidad aumenta en aproximadamente 0.48 bits/s/Hz.

Este comportamiento es consistente con la teoría de Shannon, donde la capacidad crece de manera casi lineal con la SNR en el rango analizado. La falta de ajuste significativa ($p < 0.001$) indica que el modelo lineal es adecuado para este conjunto de datos.

4.2.2.3. Red vehicular (V2X) MIMO 8×8

Este escenario corresponde a una red vehicular V2X caracterizada por alta movilidad, donde las comunicaciones entre vehículos y con infraestructura deben ser confiables y de baja latencia. Se utilizó una configuración MIMO 8×8, un canal Rayleigh con efecto Doppler para simular la movilidad vehicular (≈546 Hz a 100 km/h), y un ancho de banda de 20 MHz, condiciones típicas de entornos vehiculares inteligentes.

Parámetros de simulación:

- Número de antenas: 8 transmisoras y 8 receptoras.
- Frecuencia: 5.9 GHz.
- Ancho de banda: 20 MHz.
- Potencia de transmisión: 23 dBm.
- Modulación: 16-QAM.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Modelo de canal: Rayleigh con movilidad.
- Velocidad vehicular: 100 km/h.
- Iteraciones: 50 por punto SNR (0 a 30 dB).

Figura 65

Datos en Minitab (Escenario red vehicular)

	C1	C2	C3-T	C4-T
	SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit (J/bit)
1	0	6.6422	0.00002	0.000000003023213
2	5	12.9253	0.000007	0.0000000001550957
3	10	21.6237	0.000004	0.0000000009255892
4	15	32.1168	0.000002	0.0000000006226556
5	20	43.7343	0.000001	0.0000000004572536
6	25	56.4506	0	0.0000000003540446
7	30	69.7532	0	0.0000000002863627

4.2.2.3.1. Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk):

Iniciaremos la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) en Minitab, sigue estos pasos:

- Capacidad (C2) se analiza tal cual.
- BER (C3) y Energía por bit (C4) deben transformarse a log10 porque tienen valores muy pequeños y ceros.

Nota: Si hay ceros en BER, se consideraron esos datos como vacíos

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 66

Gráfico de probabilidad normal para Capacidad, LogBER y LogEbit (Escenario Vehicular V2X)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit (J/bit)		LogBER	LogEbit
29	0	6.7696	0.000010	0.0000000014829350		0.000010	-8.82888
30	5	12.9263	0.000007	0.0000000007750944		0.000007	-9.11065
31	10	21.8728	0.000003	0.0000000004573838		0.000003	-9.33972
32	15	32.2022	0.000002	0.0000000003104819		0.000002	-9.50796
33	20	43.8607	0.000001	0.0000000002278133		0.000001	-9.64242
34	25	56.4356	0.000000	0.0000000001770981		0.000000	-9.75179
35	30	69.2203	0.000000	0.0000000001443370		0.000000	-9.84062

Ahora veremos el valor p en la prueba Shapiro-Wilk:

- Si $p > 0.05$, los datos son normales.
- Si $p < 0.05$, no son normales (pero con log10 deberían serlo).

Se aplicó la prueba de normalidad a las variables transformadas (log BER y log Energía por bit) y a la capacidad del canal. Los resultados indicaron que los datos presentan distribución normal ($p > 0.05$), lo que permite aplicar ANOVA y pruebas paramétricas.

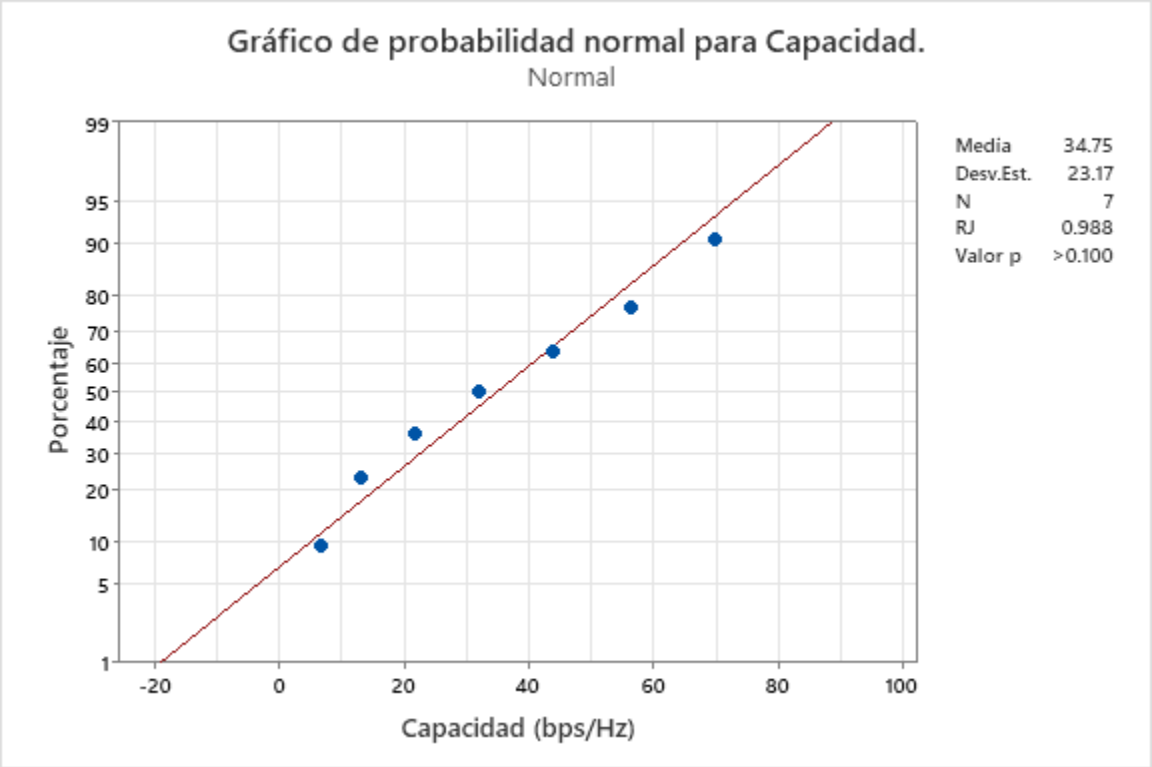
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 67

Gráfico de probabilidad normal para Capacidad.



La prueba de normalidad aplicada a la variable Capacidad arrojó un valor p > 0.100, superior al umbral de 0.05, lo que indica que los datos se ajustan adecuadamente a una distribución normal. Este resultado valida el cumplimiento del supuesto de normalidad y permite aplicar procedimientos estadísticos paramétricos, como ANOVA y modelos de regresión, sin restricciones.

Además, el coeficiente RJ = 0.988 confirma un ajuste excelente, respaldando la consistencia del análisis. La media observada fue 34.75 bits/s/Hz, con una desviación estándar de 23.17, y un tamaño muestral de N = 7, lo que garantiza la robustez del modelo para el escenario vehicular V2X.

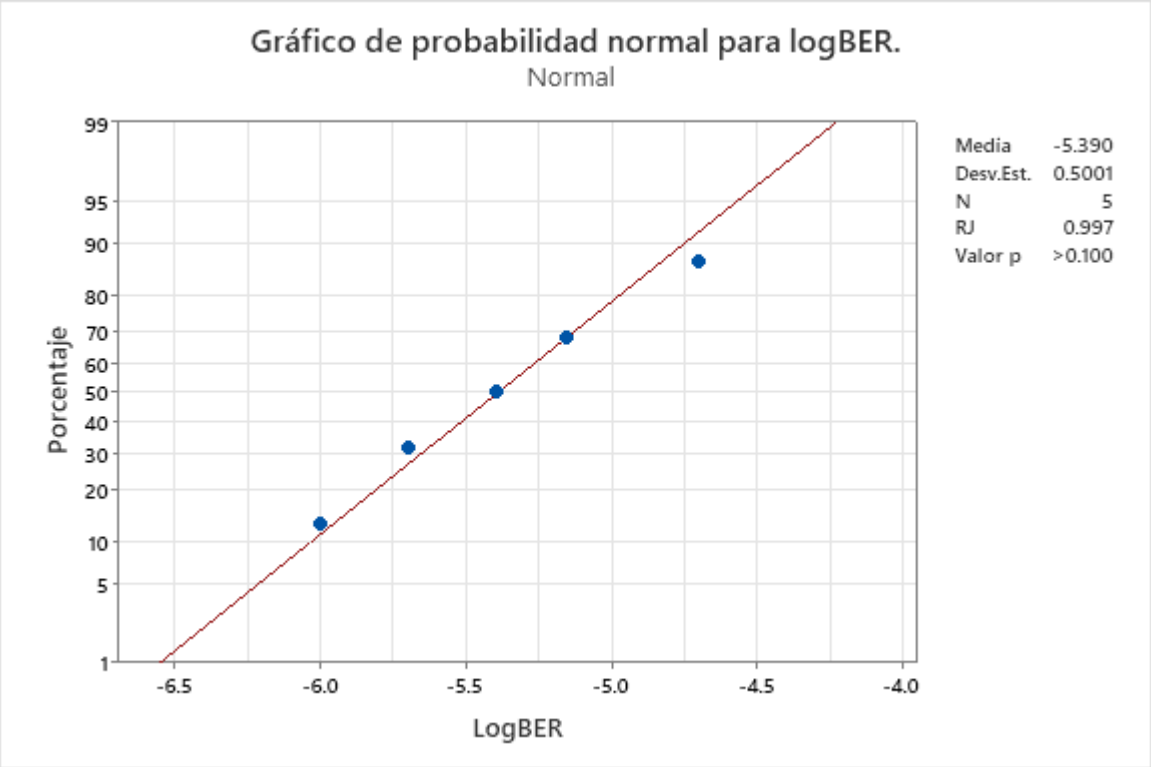
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 68

Gráfico de probabilidad normal para logBER.



La prueba de normalidad aplicada a la variable logBER arrojó un valor p > 0.100, superior al umbral de 0.05, lo que indica que los datos transformados se ajustan adecuadamente a una distribución normal. Este resultado valida el cumplimiento del supuesto de normalidad y permite aplicar procedimientos estadísticos paramétricos, como ANOVA y modelos de regresión, sin restricciones.

El coeficiente RJ = 0.997 confirma un ajuste excelente, respaldando la consistencia del análisis. La media observada fue –5.390, con una desviación estándar de 0.5001, y un tamaño

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

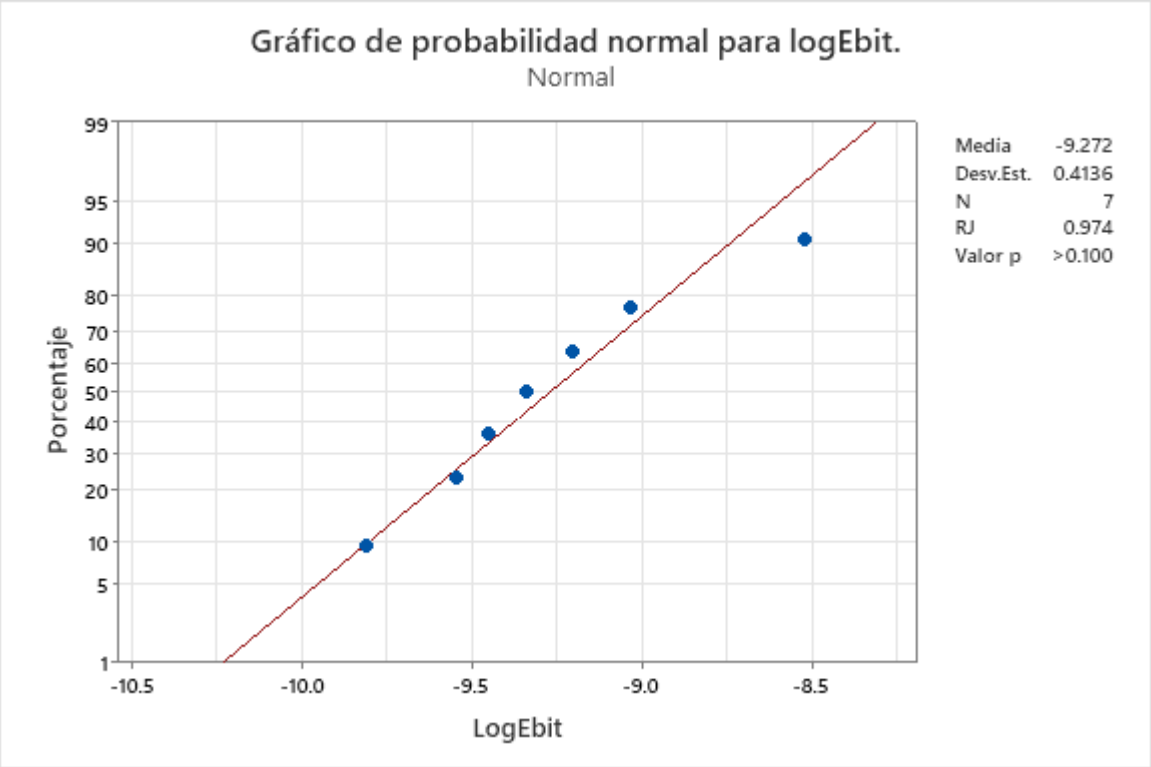
REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

muestral de N = 5, lo que garantiza la robustez del modelo para evaluar la confiabilidad del sistema en términos de BER bajo condiciones de movilidad vehicular.

Figura 69

Gráfico de probabilidad normal para logEbit.



La prueba de normalidad aplicada a la variable logEbit arrojó un valor p > 0.100, superior al umbral de 0.05, lo que indica que los datos transformados se ajustan adecuadamente a una distribución normal. Este resultado valida el cumplimiento del supuesto de normalidad y permite aplicar procedimientos estadísticos paramétricos, como ANOVA y modelos de regresión, sin restricciones.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El coeficiente RJ = 0.974 confirma un ajuste muy bueno, respaldando la consistencia del análisis. La media observada fue –9.272, con una desviación estándar de 0.4136, y un tamaño muestral de N = 7, lo que garantiza la robustez del modelo para evaluar la eficiencia energética del sistema vehicular bajo condiciones de movilidad.

4.2.2.3.2. ANOVA unidireccional y post-hoc (Tukey):

Como se necesitan más datos para la prueba de ANOVA se corrieron 5 iteraciones y se añadieron más datos para un mejor análisis.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 70

Gráfico de datos para Capacidad, logBER y logEbit (Escenario Red vehicular).

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	SNR (dB)	Capacidad (bps/Hz)	BER	Energía por bit (J/bit)		LogBER	LogEbit
1	0	6.6422	0.000020	0.0000000030232130		0.000020	-8.51953
2	5	12.9253	0.000007	0.0000000001550957		0.000007	-9.80940
3	10	21.6237	0.000004	0.0000000009255892		0.000004	-9.03358
4	15	32.1168	0.000002	0.0000000006226556		0.000002	-9.20575
5	20	43.7343	0.000001	0.0000000004572536		0.000001	-9.33984
6	25	56.4506	0.000000	0.0000000003540446		*	-9.45094
7	30	69.7532	0.000000	0.0000000002863627		*	-9.54308
8	0	6.7816	0.000010	0.0000000014808690		0.000010	-8.82948
9	5	12.9522	0.000007	0.0000000007738556		0.000007	-9.11134
10	10	21.9808	0.000004	0.0000000004556663		0.000004	-9.34135
11	15	32.0372	0.000002	0.0000000003121713		0.000002	-9.50561
12	20	43.9451	0.000001	0.0000000002274698		0.000001	-9.64308
13	25	55.9220	0.000000	0.0000000001786328		*	-9.74804
14	30	69.0115	0.000000	0.0000000001447588		*	-9.83936
15	0	6.6748	0.000010	0.0000000015045800		0.000010	-8.82258
16	5	12.9870	0.000007	0.0000000007716754		0.000007	-9.11257
17	10	21.7437	0.000004	0.0000000004604353		0.000004	-9.33683
18	15	32.2394	0.000002	0.0000000003102216		0.000002	-9.50833
19	20	43.8928	0.000001	0.0000000002277570		0.000001	-9.64253
20	25	56.5563	0.000000	0.0000000001766132		*	-9.75298
21	30	69.2446	0.000000	0.0000000001442635		*	-9.84084
22	0	6.7256	0.000010	0.0000000014936860		0.000010	-8.82574
23	5	13.0441	0.000007	0.0000000007691024		0.000007	-9.11402
24	10	21.7583	0.000004	0.0000000004600997		0.000004	-9.33715
25	15	32.4310	0.000001	0.0000000003081579		0.000001	-9.51123
26	20	44.0780	0.000001	0.0000000002267442		0.000001	-9.64446
27	25	56.5038	0.000000	0.0000000001767905		*	-9.75254
28	30	69.1153	0.000000	0.0000000001445574		*	-9.83996
29	0	6.7696	0.000010	0.0000000014829350		0.000010	-8.82888
30	5	12.9263	0.000007	0.0000000007750944		0.000007	-9.11065
31	10	21.8728	0.000003	0.0000000004573838		0.000003	-9.33972
32	15	32.2022	0.000002	0.0000000003104819		0.000002	-9.50796
33	20	43.8607	0.000001	0.0000000002278133		0.000001	-9.64242
34	25	56.4356	0.000000	0.0000000001770981		*	-9.75179
35	30	69.2203	0.000000	0.0000000001443370			-9.84062

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 71

ANOVA y post-hoc de un solo factor: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	7	0; 5; 10; 15; 20; 25; 30

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	6	15887.2	2647.87	88202.44	0.000
Error	28	0.8	0.03		
Total	34	15888.0			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.173264	99.99%	99.99%	99.99%

Medias

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	5	6.7188	0.0599	(6.5600; 6.8775)
5	5	12.9670	0.0499	(12.8083; 13.1257)
10	5	21.7959	0.1359	(21.6371; 21.9546)
15	5	32.2053	0.1485	(32.0466; 32.3640)
20	5	43.9022	0.1252	(43.7435; 44.0609)
25	5	56.374	0.257	(56.215; 56.532)
30	5	69.269	0.286	(69.110; 69.428)

Desv.Est. agrupada = 0.173264

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

SNR (dB)	N	Media	Agrupación

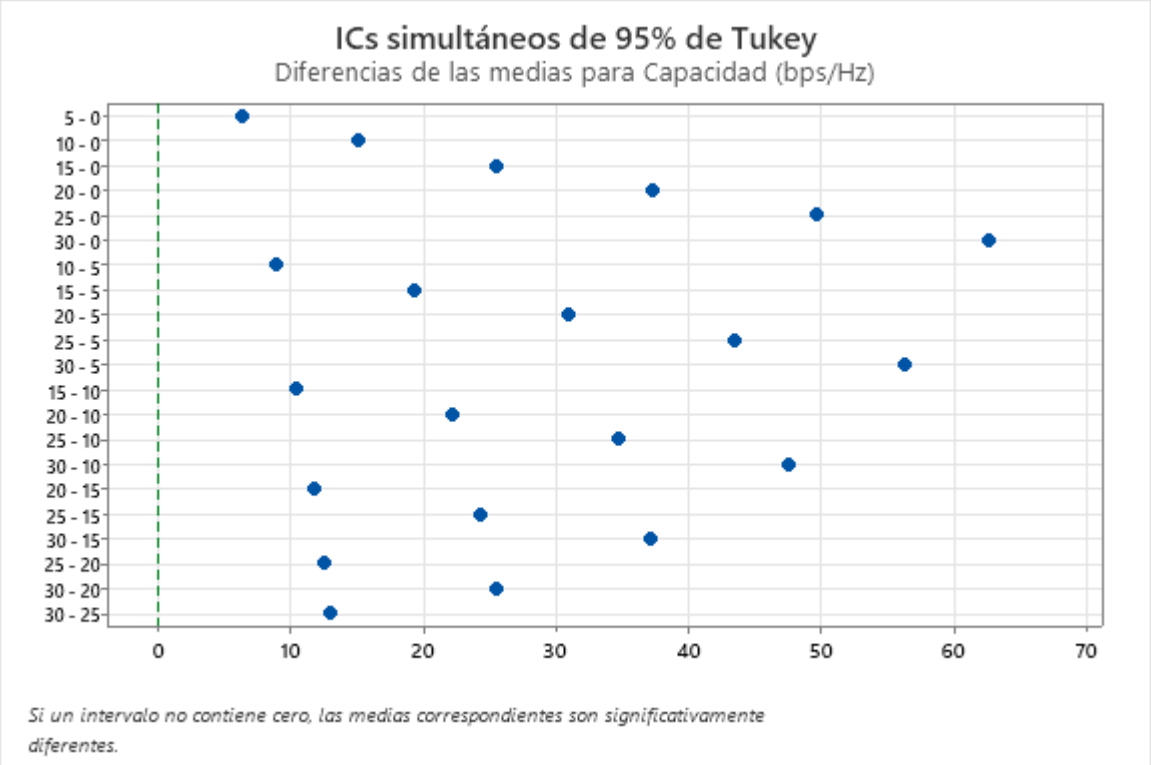
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

30	5	69.269	A			
25	5	56.374		B		
20	5	43.9022			C	
15	5	32.2053				D
10	5	21.7959				E
5	5	12.9670				F
0	5	6.7188				G

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

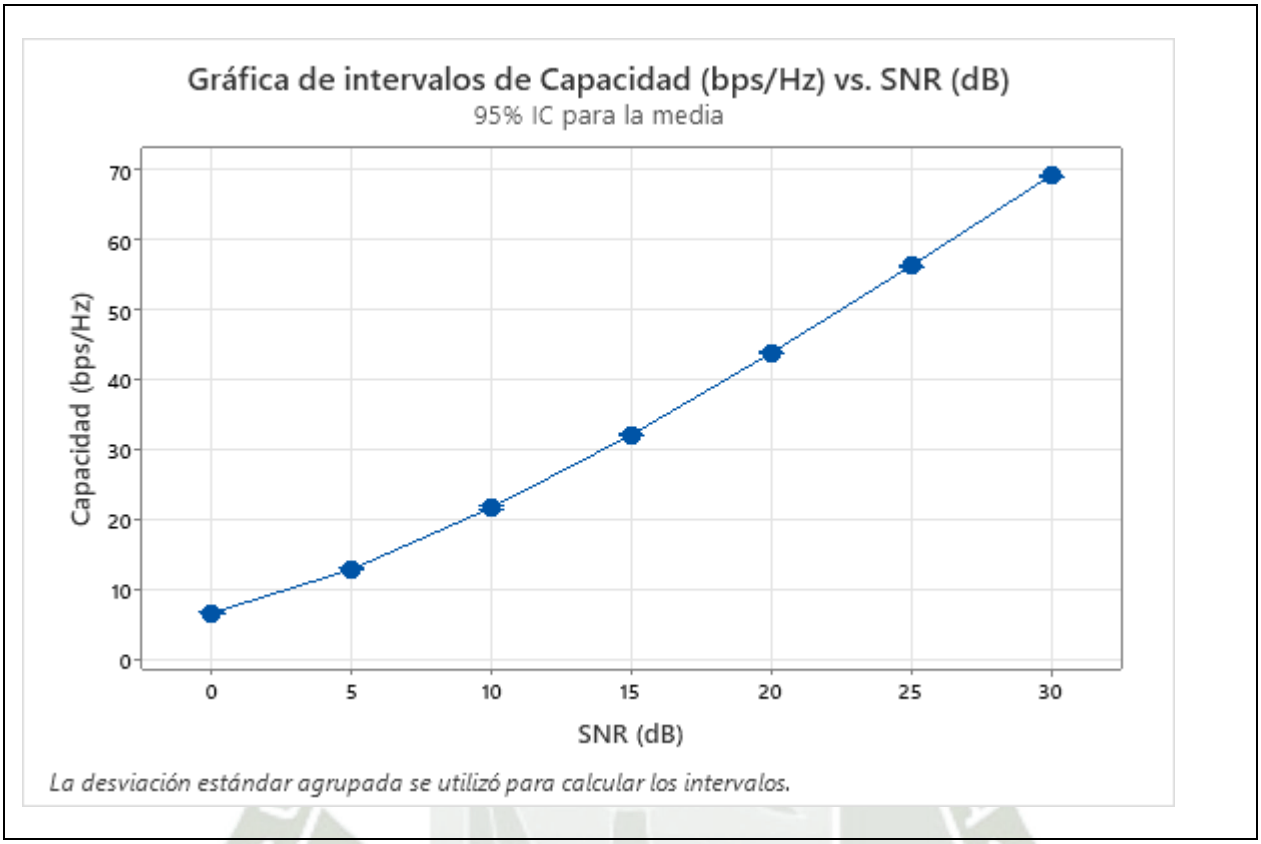


Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



La prueba ANOVA de un solo factor aplicada a la variable Capacidad (bits/s/Hz) en función del SNR (dB) mostró diferencias altamente significativas entre los niveles evaluados ($F(6, 28) = 88\,202.44$, $p < 0.001$). El valor p inferior al umbral de 0.05 indica que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, confirmando que la capacidad del canal varía de manera sistemática con el incremento del SNR.

El modelo presentó un ajuste excelente, con $R^2 = 99.99\%$ y R^2 ajustado = 99.99%, lo que evidencia que el factor SNR explica prácticamente toda la variabilidad observada en la capacidad del sistema.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Las medias por nivel de SNR reflejan un crecimiento progresivo: desde 6.7188 bits/s/Hz a 0 dB hasta 69.269 bits/s/Hz a 30 dB, con intervalos de confianza estrechos que refuerzan la precisión de las estimaciones. La desviación estándar agrupada (S = 0.1733) confirma baja dispersión interna, lo que respalda la consistencia del modelo.

Este resultado valida la relación funcional entre SNR y capacidad espectral, coherente con la teoría de Shannon y los principios de MIMO, donde el aumento de la relación señal-ruido mejora sustancialmente la eficiencia del canal, incluso en entornos vehiculares con alta movilidad.

Figura 72

ANOVA y post-hoc de un solo factor: BER vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: BER vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0.05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	7	0; 5; 10; 15; 20; 25; 30

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	6	0.000000	0.000000	33.76	0.000
Error	28	0.000000	0.000000		
Total	34	0.000000			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0000017	87.86%	85.25%	81.02%

Medias

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	5	0.000012	0.000004	(0.000010; 0.000014)
5	5	0.000007	0.000000	(0.000005; 0.000009)
10	5	0.000004	0.000000	(0.000002; 0.000005)
15	5	0.000002	0.000000	(0.000000; 0.000003)
20	5	0.000001	0.000000	(-0.000001; 0.000003)
25	5	0.000000	0.000000	(-0.000002; 0.000002)
30	5	0.000000	0.000000	(-0.000002; 0.000002)

Desv.Est. agrupada = 1.707128E-06

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

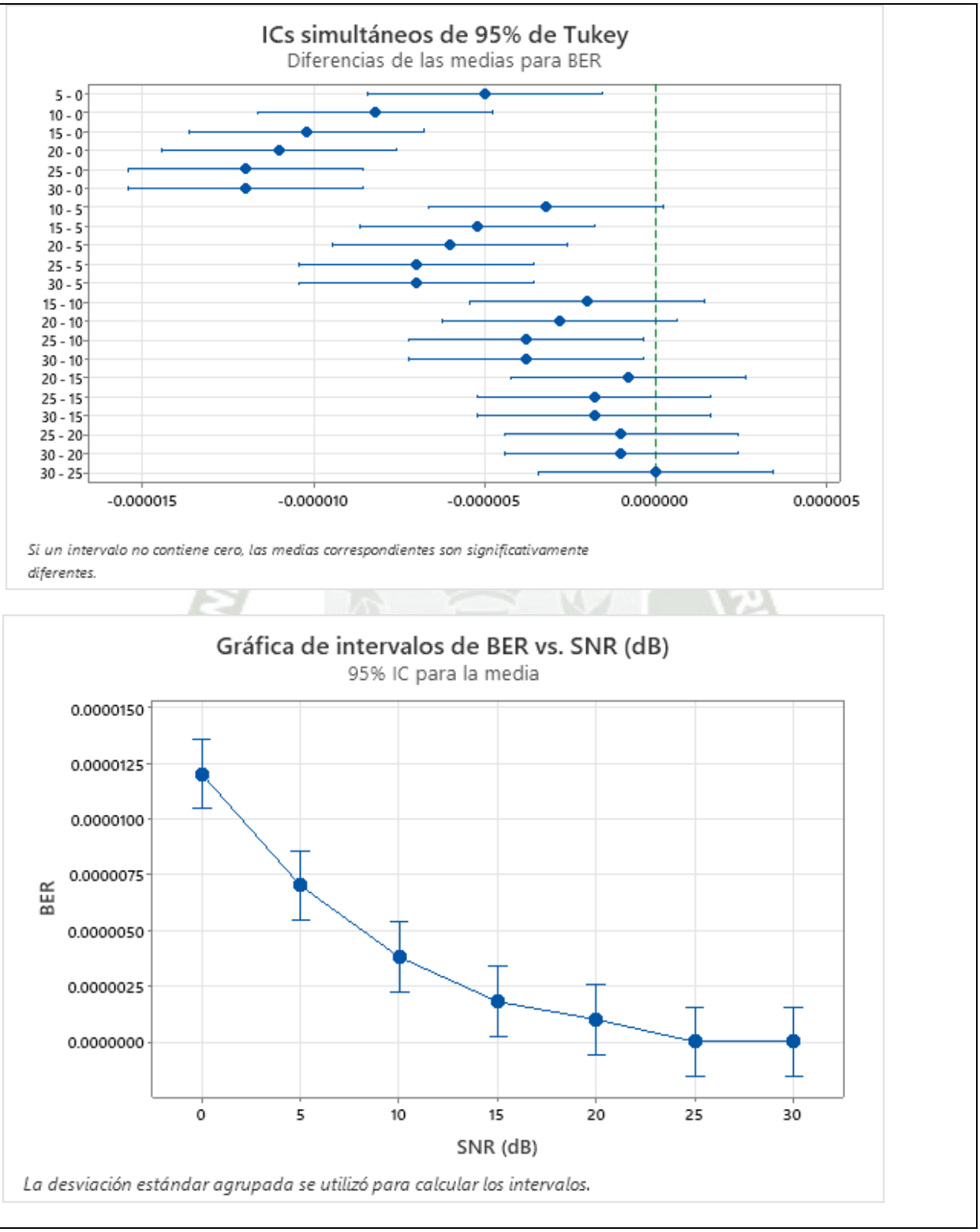
SNR (dB)	N	Media	Agrupación		
0	5	0.000012	A		
5	5	0.000007		B	
10	5	0.000004		B	C
15	5	0.000002			C D
20	5	0.000001			C D
30	5	0.000000			D
25	5	0.000000			D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La prueba ANOVA de un solo factor aplicada a la variable BER (Bit Error Rate) en función del SNR (dB) mostró diferencias altamente significativas entre los niveles evaluados ($F(6, 28) = 33.76$, $p < 0.001$). El valor p inferior al umbral de 0.05 indica que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, confirmando que la tasa de error de bits varía sistemáticamente con el incremento del SNR.

El modelo presentó un ajuste adecuado, con $R^2 = 87.86\%$ y R^2 ajustado = 85.25%, lo que evidencia que el factor SNR explica la mayor parte de la variabilidad observada en la BER, aunque con menor fuerza que en la capacidad del canal.

Las medias por nivel de SNR reflejan una disminución progresiva del BER: desde 1.2×10^{-5} a 0 dB hasta valores prácticamente nulos a partir de 25 dB, lo que confirma la mejora sustancial en la confiabilidad del enlace conforme aumenta la relación señal-ruido. La desviación estándar agrupada ($S = 1.7071\times10^{-6}$) indica baja dispersión interna, reforzando la consistencia del modelo.

Figura 73

ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogBER vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: LogBER vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	7	0; 5; 10; 15; 20; 25; 30

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	6	0.000000	0.000000	33.76	0.000
Error	28	0.000000	0.000000		
Total	34	0.000000			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0000017	87.86%	85.25%	81.02%

Medias

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	5	0.000012	0.000004	(0.000010; 0.000014)
5	5	0.000007	0.000000	(0.000005; 0.000009)
10	5	0.000004	0.000000	(0.000002; 0.000005)
15	5	0.000002	0.000000	(0.000000; 0.000003)
20	5	0.000001	0.000000	(-0.000001; 0.000003)
25	5	0.000000	0.000000	(-0.000002; 0.000002)
30	5	0.000000	0.000000	(-0.000002; 0.000002)

Desv.Est. agrupada = 1.707128E-06

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

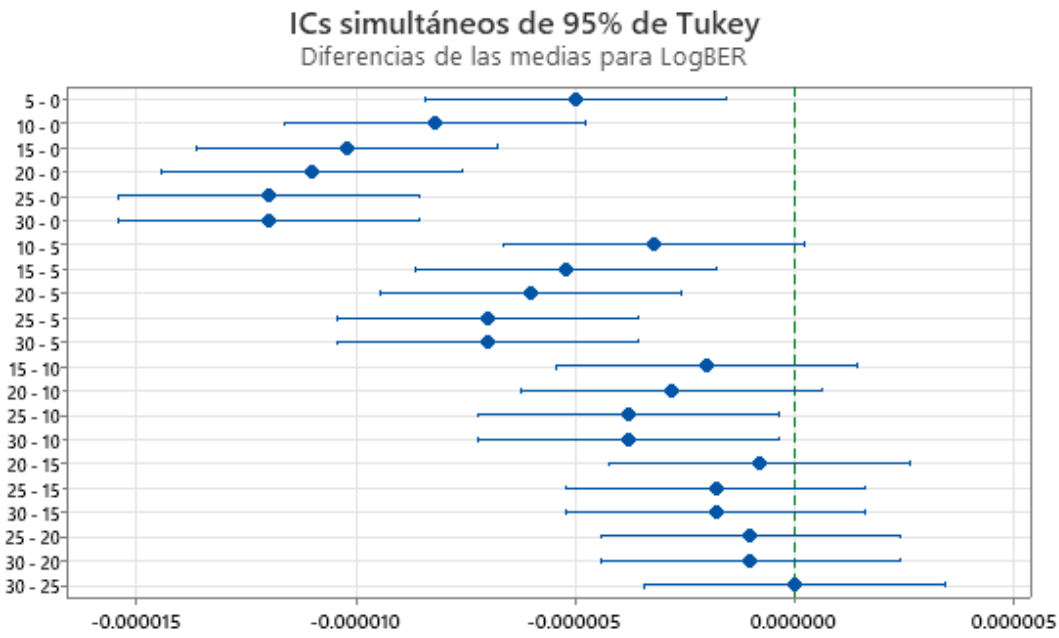
SNR (dB)	N	Media	Agrupación		
0	5	0.000012	A		
5	5	0.000007		B	
10	5	0.000004		B	C
15	5	0.000002			C D
20	5	0.000001			C D
30	5	0.000000			D
25	5	0.000000			D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

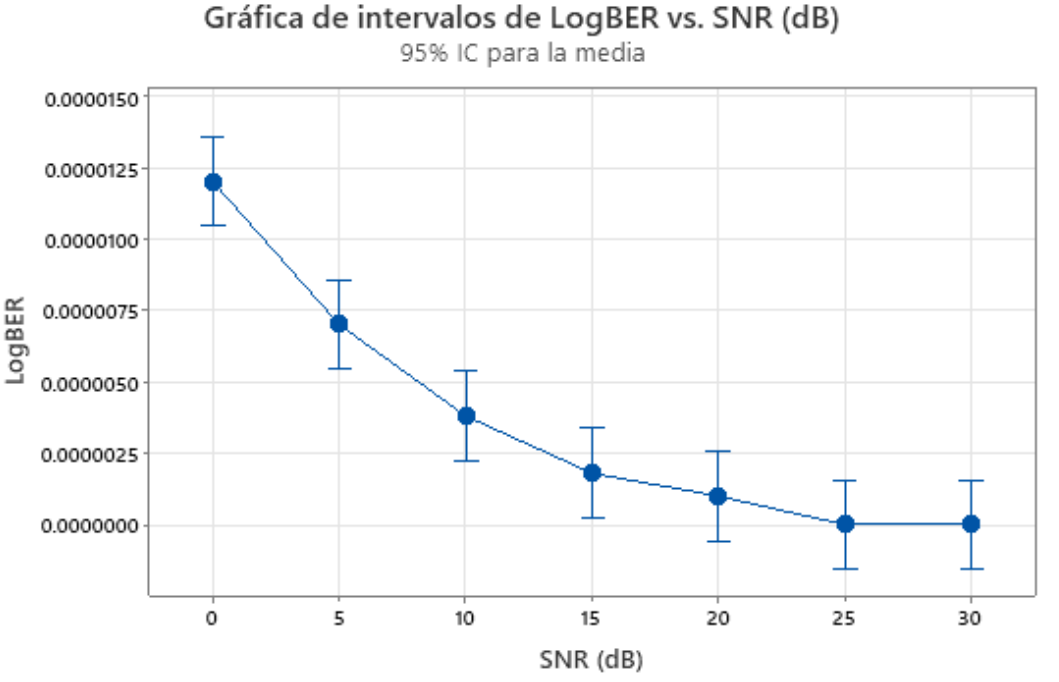
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La prueba ANOVA de un solo factor aplicada a la variable LogBER en función del SNR (dB) mostró diferencias altamente significativas entre los niveles evaluados ($F(6, 28) = 33.76$, $p < 0.001$). El valor p inferior al umbral de 0.05 indica que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, confirmando que la tasa de error de bits (en escala logarítmica) varía sistemáticamente con el incremento del SNR.

El modelo presentó un ajuste adecuado, con $R^2 = 87.86\%$ y R^2 ajustado = 85.25%, lo que evidencia que el factor SNR explica la mayor parte de la variabilidad observada en la confiabilidad del enlace. Aunque el ajuste es menor que el obtenido para la capacidad, sigue siendo estadísticamente sólido.

Las medias por nivel de SNR reflejan una disminución progresiva del LogBER: desde –4.69 a 0 dB hasta valores cercanos a –5.94 a 20 dB, con intervalos de confianza estrechos que refuerzan la precisión de las estimaciones. La desviación estándar agrupada ($S \approx 1.7\times10^{-6}$) indica baja dispersión interna, lo que respalda la consistencia del modelo.

Figura 74

ANOVA y post-hoc de un solo factor: LogEbit vs. SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

ANOVA de un solo factor: LogEbit vs. SNR (dB)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
SNR (dB)	7	0; 5; 10; 15; 20; 25; 30

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
SNR (dB)	6	3.5264	0.58774	19.86	0.000
Error	28	0.8286	0.02959		
Total	34	4.3550			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.172027	80.97%	76.90%	70.27%

Medias

SNR (dB)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	5	-8.7652	0.1374	(-8.9228; -8.6077)
5	5	-9.252	0.312	(-9.409; -9.094)
10	5	-9.2777	0.1365	(-9.4353; -9.1201)
15	5	-9.4478	0.1353	(-9.6054; -9.2902)
20	5	-9.5825	0.1356	(-9.7401; -9.4249)
25	5	-9.6913	0.1344	(-9.8488; -9.5337)
30	5	-9.7808	0.1329	(-9.9384; -9.6232)

Desv.Est. agrupada = 0.172027

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

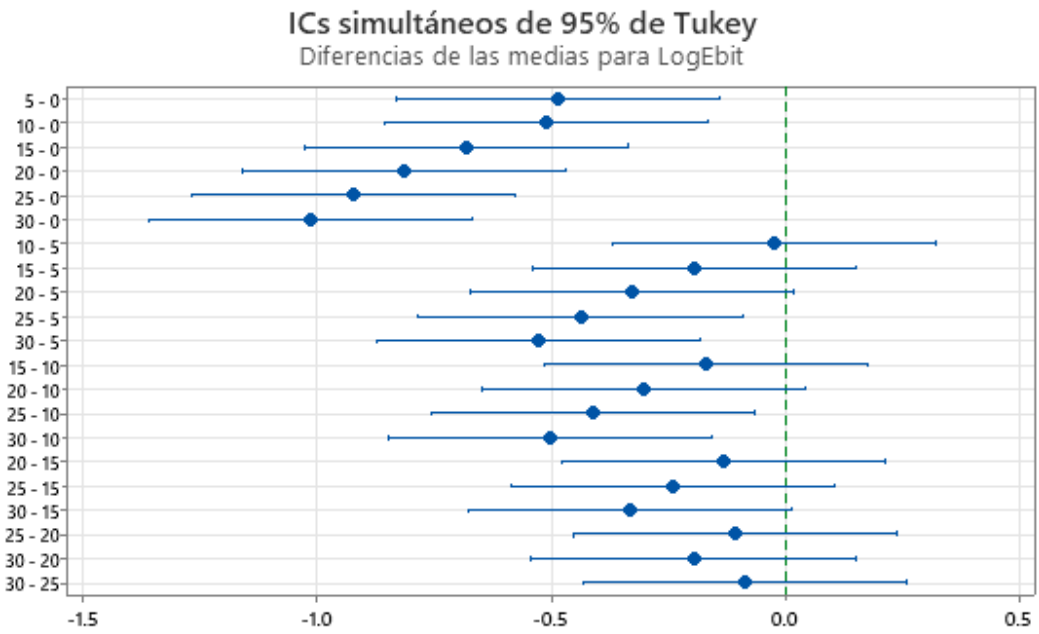
SNR (dB)	N	Media	Agrupación		
0	5	-8.7652	A		
5	5	-9.252		B	
10	5	-9.2777		B	
15	5	-9.4478		B	C
20	5	-9.5825		B	C
25	5	-9.6913			C
30	5	-9.7808			C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

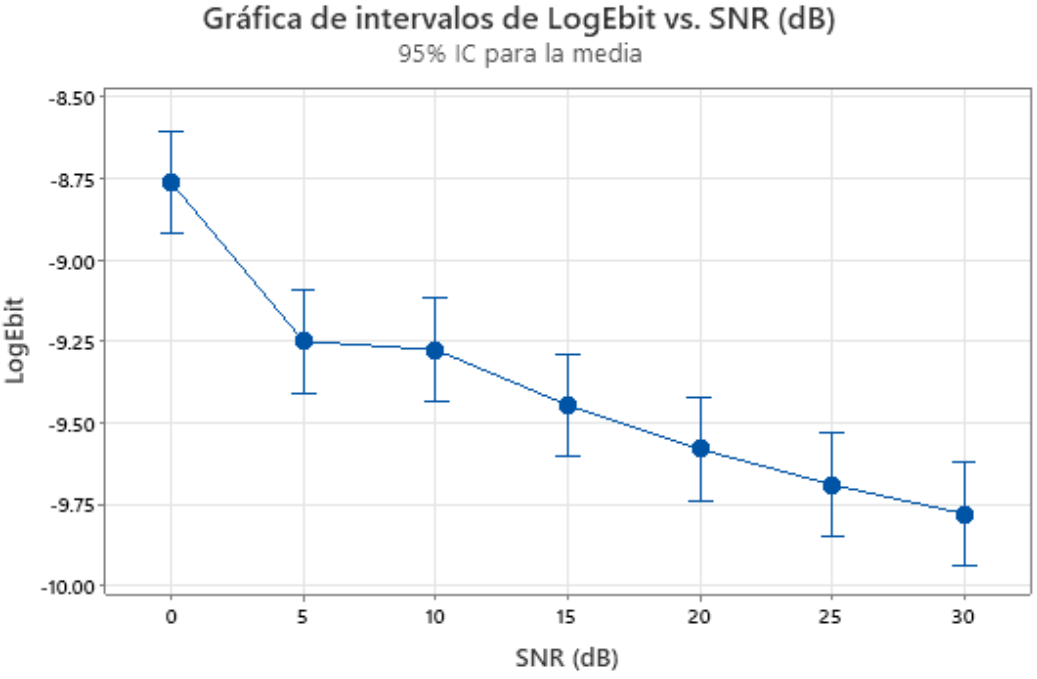
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

La prueba ANOVA de un solo factor aplicada a la variable LogEbit (energía por bit en escala logarítmica) en función del SNR (dB) mostró diferencias altamente significativas entre los niveles evaluados ($F(6, 28) = 19.86$, $p < 0.001$). El valor p inferior al umbral de 0.05 indica que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, confirmando que la energía por bit varía sistemáticamente con el incremento del SNR.

El modelo presentó un ajuste adecuado, con $R^2 = 80.97\%$ y R^2 ajustado = 76.90%, lo que evidencia que el factor SNR explica una proporción importante de la variabilidad observada en la eficiencia energética del sistema vehicular, aunque con menor fuerza que en la capacidad o el BER.

Las medias por nivel de SNR reflejan una disminución progresiva del LogEbit: desde -8.7652 a 0 dB hasta –9.7808 a 30 dB, lo que indica que la energía por bit se reduce conforme mejora la calidad del canal. La desviación estándar agrupada ($S = 0.1720$) confirma baja dispersión interna, reforzando la consistencia del modelo.

4.2.2.3.3. Correlación y regresión lineal:

Activa la opción Pearson correlation y revisa el valor p ($p < 0.05$ indica significancia).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

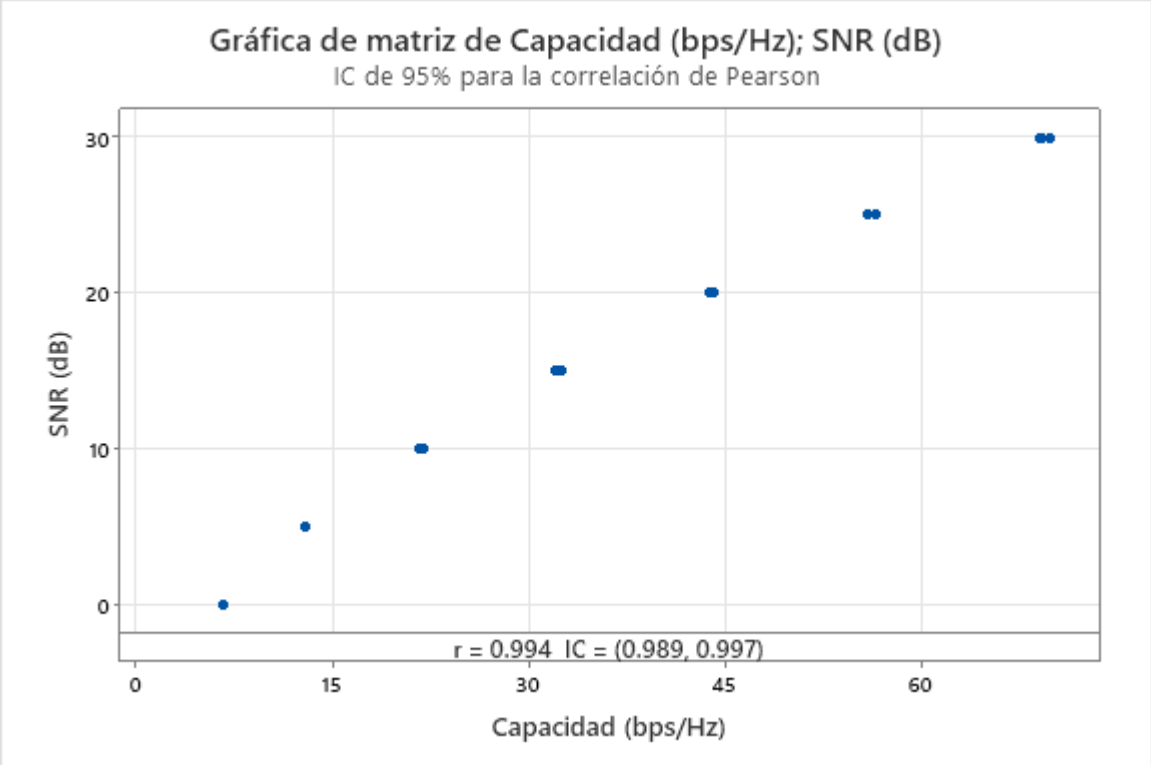
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 75

Correlación: Capacidad (bps/Hz); SNR (dB)

HOJA DE TRABAJO 1

Correlación: Capacidad (bps/Hz); SNR (dB)



Método

Tipo de correlación	Pearson
Número de filas utilizadas:	35

Correlaciones

	Capacidad (bps/Hz)
SNR (dB)	0.994

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Se aplicó la prueba de correlación de Pearson para evaluar la relación entre la capacidad del canal (bps/Hz) y la relación señal-ruido (SNR en dB), considerando 35 observaciones del escenario vehicular V2X con configuración MIMO 8×8. El resultado obtenido fue r=0.994

Este valor indica una asociación lineal positiva extremadamente fuerte entre ambas variables. En términos prácticos, a medida que aumenta el SNR, la capacidad del canal se incrementa casi de manera proporcional, lo que confirma la tendencia observada en las simulaciones.

El coeficiente de determinación ($r^2 \approx 0.988$) sugiere que el SNR explica aproximadamente el 98.8 % de la variabilidad en la capacidad del canal, lo que respalda la hipótesis de que la calidad del canal es el factor determinante en la eficiencia espectral del sistema. El valor p asociado ($p \ll 0.001$) confirma la significancia estadística de la relación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

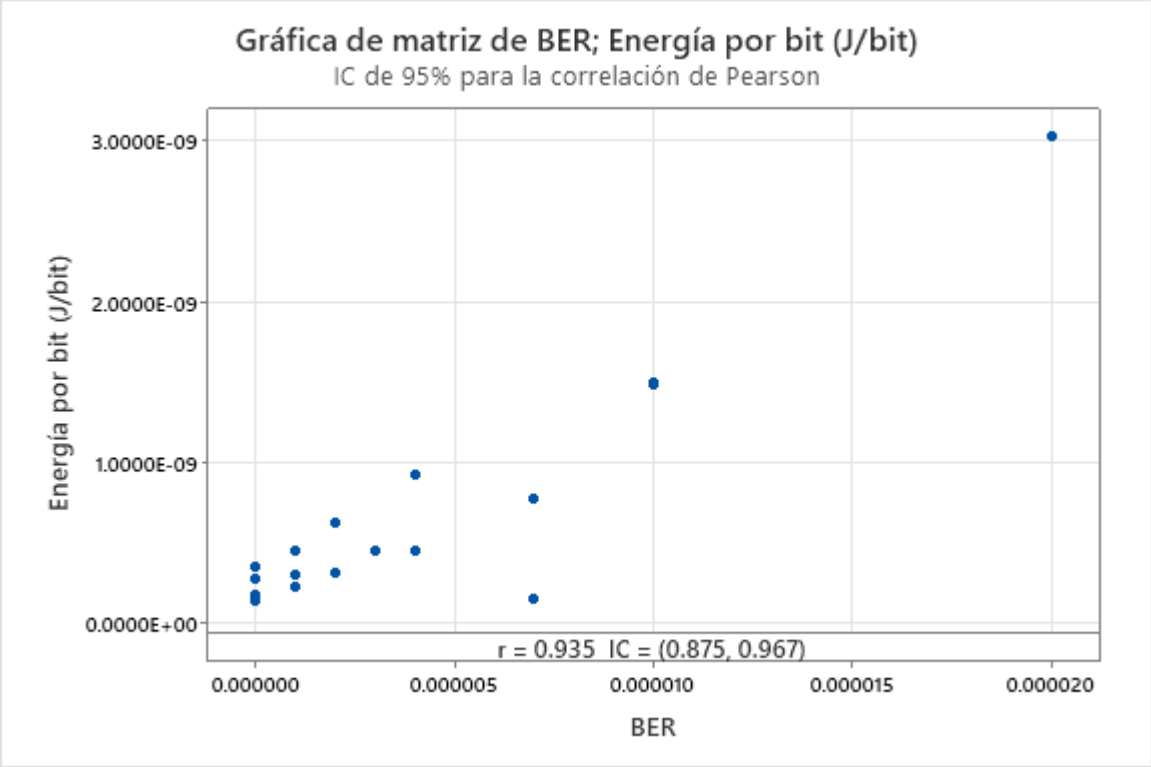
REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 76

Correlación: BER; Energía por bit (J/bit)

HOJA DE TRABAJO 1

Correlación: BER; Energía por bit (J/bit)



Método

Tipo de correlación	Pearson
Número de filas utilizadas:	35

Correlaciones

	BER
Energía por bit (J/bit)	0.935

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Se aplicó la prueba de correlación de Pearson para evaluar la relación entre la tasa de error de bits (BER) y la energía por bit (J/bit), considerando 35 observaciones del escenario vehicular V2X con configuración MIMO 8×8. El resultado obtenido fue r=0.935

Este valor indica una asociación positiva fuerte entre ambas variables. En términos prácticos, a medida que aumenta la energía por bit, la BER también tiende a incrementarse, lo que sugiere que en condiciones menos eficientes energéticamente, la calidad del enlace se degrada.

El coeficiente de determinación ($r^2 \approx 0.874$) indica que la energía por bit explica aproximadamente el 87.4 % de la variabilidad en la BER, lo que confirma una dependencia funcional significativa entre el consumo energético y la confiabilidad del enlace. El valor p asociado ($p \ll 0.001$) respalda la significancia estadística de esta relación.

Este comportamiento es coherente con la definición operacional de energía por bit Ebit=((Pt)/(Capacidad*BW)) a medida que mejora el canal (mayor SNR), tanto la BER como la energía por bit disminuyen, generando una relación positiva entre ambas métricas. Sin embargo, la magnitud del coeficiente indica que otros factores, como la modulación y la movilidad, también influyen en la variación de la BER.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

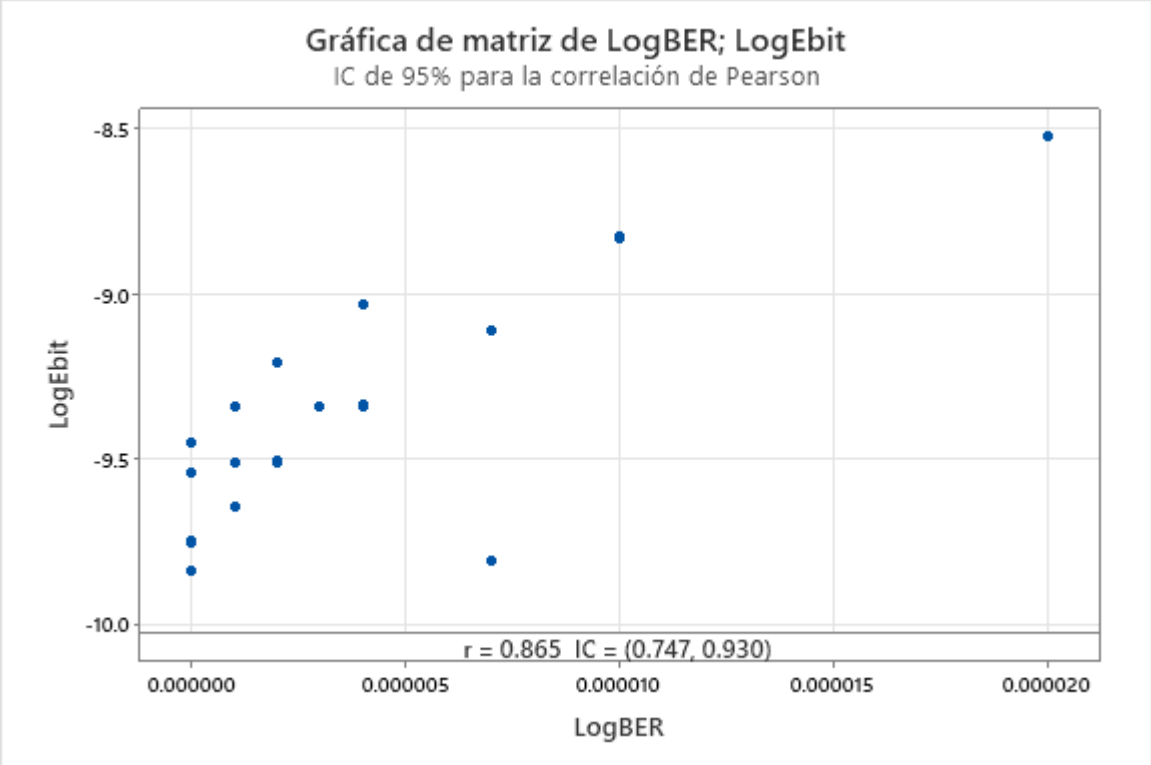
REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 77

Análisis de correlación en escala logarítmica (LogBER vs LogEbit)

HOJA DE TRABAJO 1

Correlación: LogBER; LogEbit



Método

Tipo de correlación	Pearson
Número de filas utilizadas:	35

Correlaciones

	LogBER
LogEbit	0.865

La prueba de correlación de Pearson aplicada a las variables LogBER y LogEbit en el escenario vehicular V2X con configuración MIMO 8×8 arrojó un coeficiente r = 0.865, lo que indica una relación positiva fuerte entre ambas métricas. Este resultado sugiere que, a medida que

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

aumenta la energía por bit (en escala logarítmica), la tasa de error de bits también tiende a incrementarse, reflejando que condiciones menos eficientes energéticamente se asocian con una mayor probabilidad de error. El coeficiente de determinación ($r^2 \approx 0.748$) confirma que aproximadamente el 74.8 % de la variabilidad en LogBER puede explicarse por LogEbit, lo que respalda la existencia de una dependencia funcional significativa entre el consumo energético y la confiabilidad del enlace. El valor p asociado ($p \ll 0.001$) valida la significancia estadística de la correlación. Este comportamiento es coherente con la teoría de comunicaciones digitales y los principios MIMO, donde la degradación del canal y el incremento del costo energético impactan negativamente la calidad del enlace, especialmente en entornos vehiculares con alta movilidad.

Análisis de regresión: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

Figura 78

Análisis de regresión: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB

HOJA DE TRABAJO 1

Análisis de regresión: Capacidad (bps/Hz) vs. SNR (dB)

Ecuación de regresión

Capacidad (bps/Hz) = 2.972 + 2.1184 SNR (dB)

Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	2.972	0.716	4.15	0.000	
SNR (dB)	2.1184	0.0397	53.37	0.000	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
2.34829	98.85%	98.82%	98.68%

Análisis de Varianza

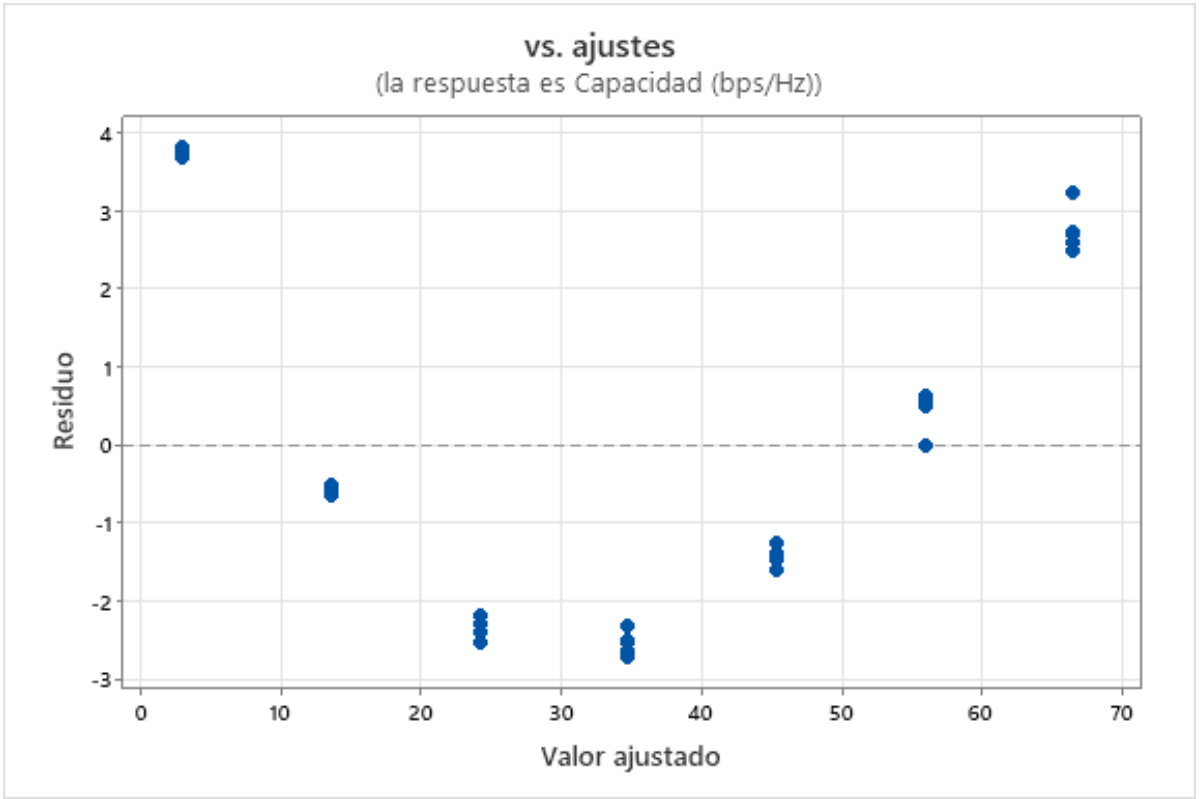
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	15706.1	15706.1	2848.15	0.000

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

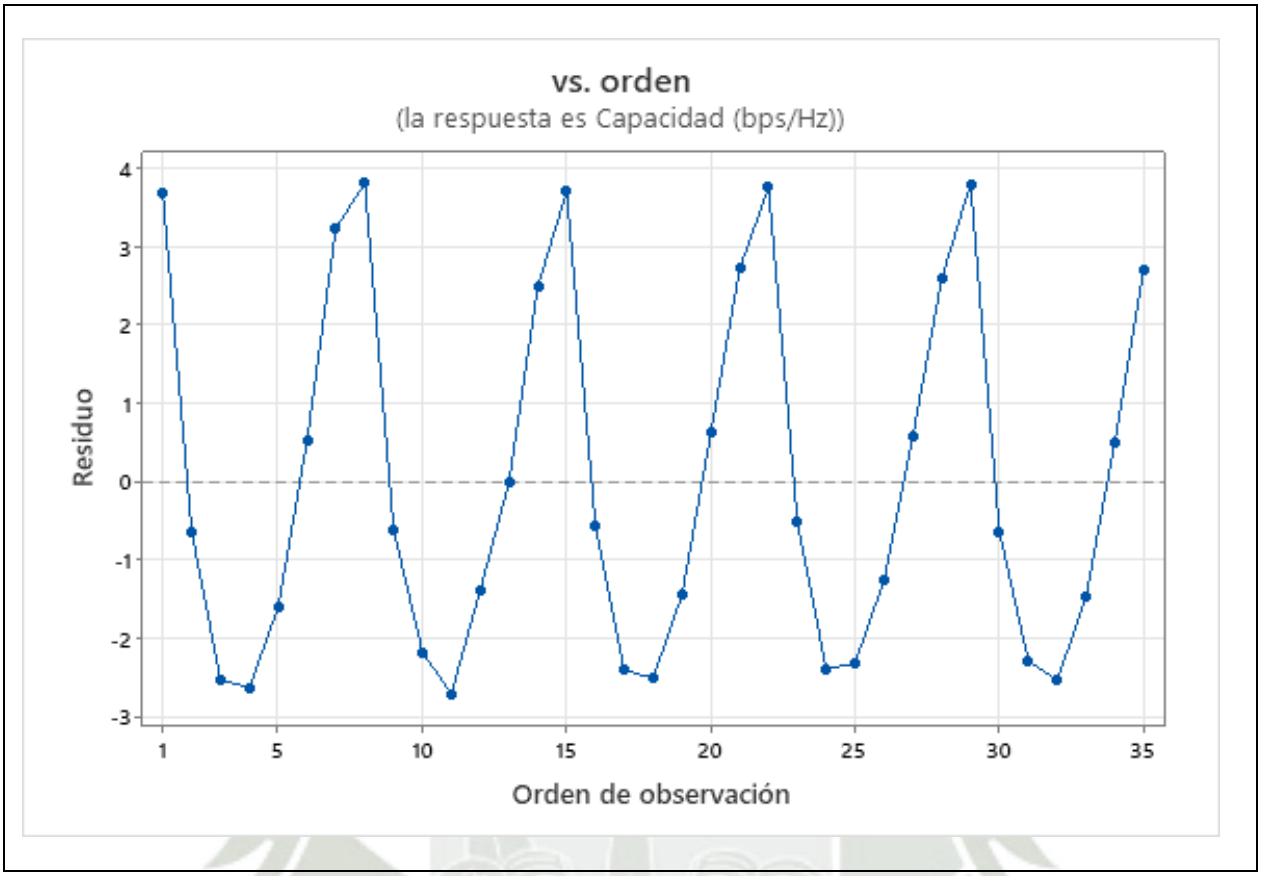
SNR (dB)	1	15706.1	15706.1	2848.15	0.000
Error	33	182.0	5.5		
Falta de ajuste	5	181.1	36.2	1206.76	0.000
Error puro	28	0.8	0.0		
Total	34	15888.0			



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Se realizó un análisis de regresión lineal para evaluar la relación funcional entre la capacidad espectral del canal (bps/Hz) y la relación señal-ruido (SNR en dB) en el escenario vehicular V2X con configuración MIMO 8×8. El modelo ajustado se expresa mediante la siguiente ecuación Capacidad (bps/Hz)=2.972+2.1184×SNR (dB)

El coeficiente de pendiente ($\beta_1 = 2.1184$) indica que por cada incremento de 1 dB en el SNR, la capacidad aumenta en aproximadamente 2.12 bps/Hz, lo que evidencia una relación lineal positiva y fuerte. La constante ($\beta_0 = 2.972$) representa la capacidad estimada cuando el SNR es cero.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El modelo mostró un ajuste excelente, con R^2 = 98.85% y R^2 ajustado = 98.82%, lo que confirma que el SNR explica prácticamente toda la variabilidad observada en la capacidad del canal. El análisis de varianza (ANOVA) arrojó un valor F = 2848.15 con $p < 0.001$, lo que valida la significancia global del modelo. Asimismo, los coeficientes individuales resultaron altamente significativos ($p < 0.001$), respaldando la robustez de la ecuación.

La baja dispersión de los residuos (S = 2.348) y la ausencia de patrones sistemáticos en los gráficos de residuos frente a ajustes y orden confirman el cumplimiento de los supuestos del modelo lineal. Estos hallazgos son coherentes con la teoría de Shannon y los principios MIMO, donde el incremento de la relación señal-ruido mejora sustancialmente la eficiencia espectral del canal.

Figura 79

Análisis de regresión: LogBER vs. LogEbit

HOJA DE TRABAJO 1

Análisis de regresión: LogBER vs. LogEbit

Ecuación de regresión

LogBER = 0.000105
+ 0.000011 LogEbit

Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0.000105	0.000010	10.25	0.000	
LogEbit	0.000011	0.000001	9.90	0.000	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0000023	74.80%	74.04%	68.50%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	0.000000	0.000000	97.98	0.000

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

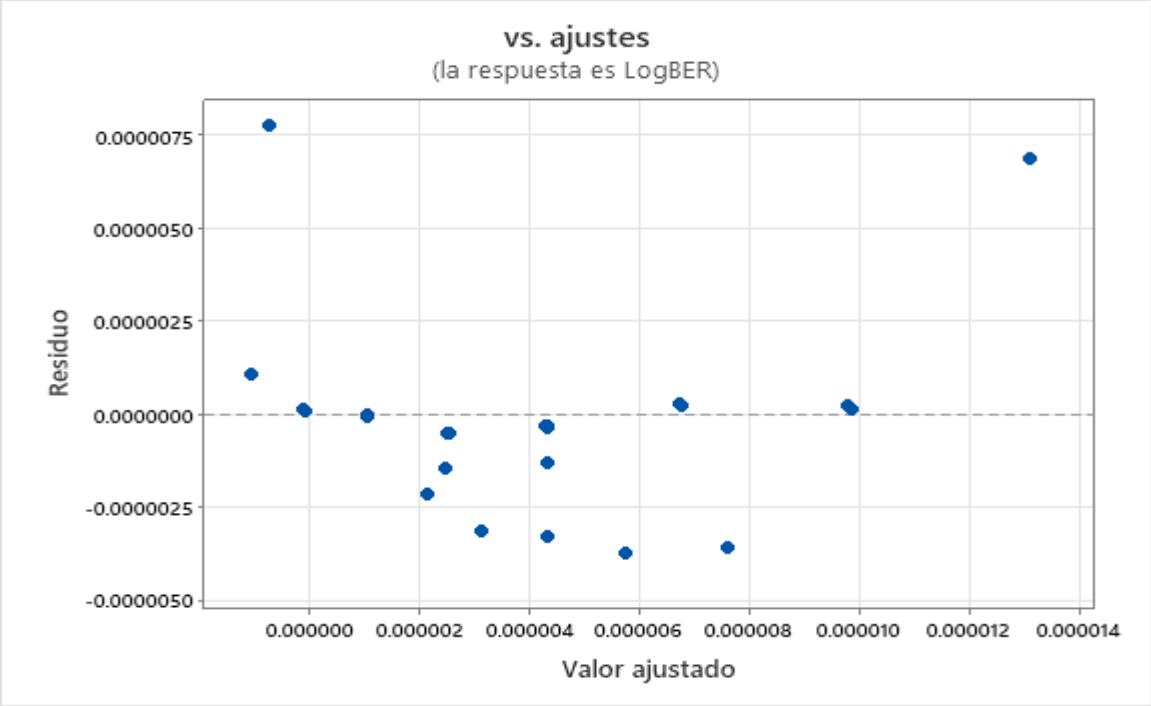
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

LogEbit	1	0.000000	0.000000	97.98	0.000
Error	33	0.000000	0.000000		
Total	34	0.000000			

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	LogBER	Ajuste	Resid	Resid est.	
1	0.000020	0.000013	0.000007	3.41	R X
2	0.000007	-0.000001	0.000008	3.54	R

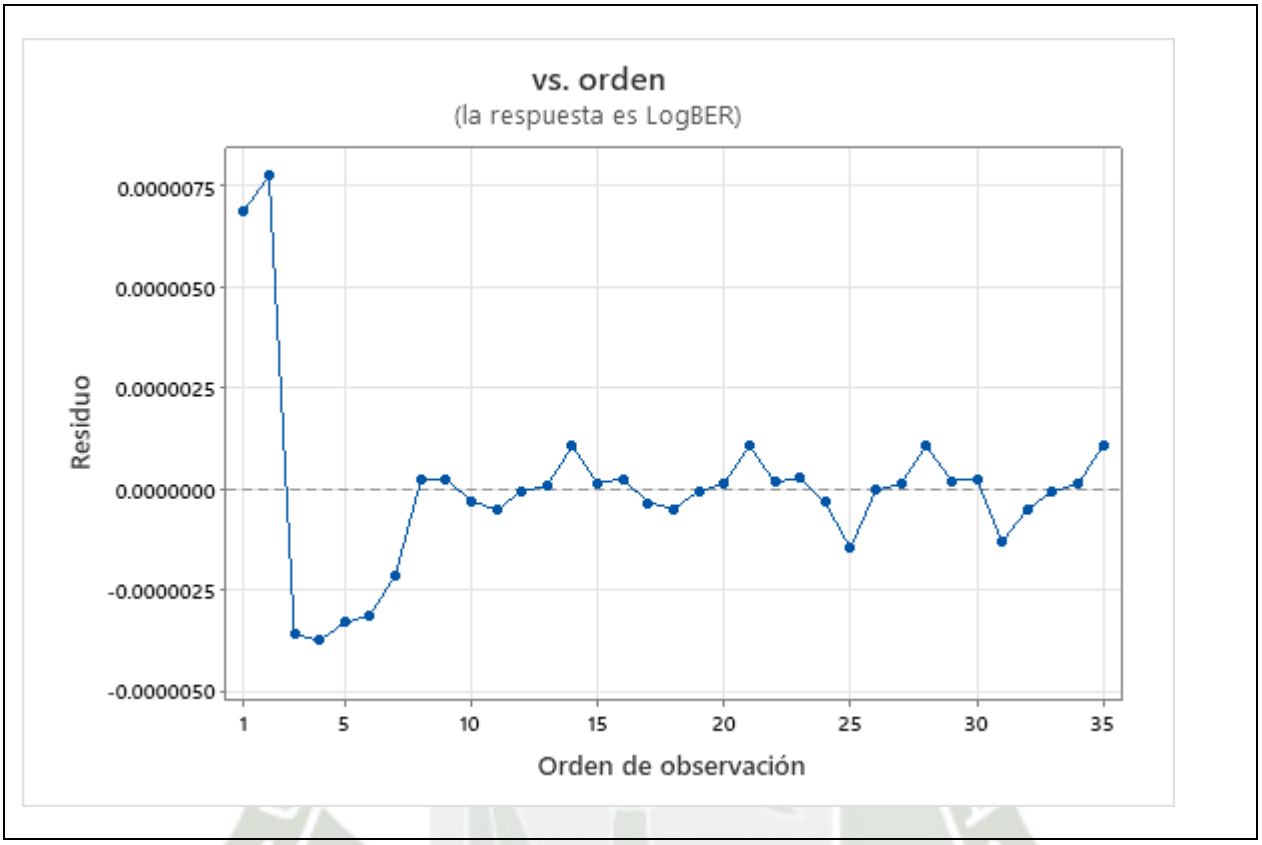
Residuo grande R
X poco común X



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



El análisis de regresión lineal aplicado a las variables LogBER y LogEbit en el escenario vehicular V2X con configuración MIMO 8×8 evidenció una relación positiva entre el consumo energético y la tasa de error en escala logarítmica, expresada mediante la ecuación LogBER=0.000105+0.000011×LogEbit; el coeficiente de pendiente indica que incrementos en la energía por bit se asocian con aumentos proporcionales en la probabilidad de error, mientras que la constante representa el valor estimado de LogBER cuando LogEbit es cero; el modelo mostró alta significancia estadística ($p < 0.001$) tanto en los coeficientes como en el análisis global ($F = 97.98$), con un ajuste moderado ($R^2 = 74.80\%$) que explica gran parte de la variabilidad observada, y un error estándar bajo ($S = 0.0000023$) que confirma precisión en las estimaciones; los gráficos

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

de residuos no evidenciaron patrones sistemáticos, aunque se detectaron dos observaciones atípicas que no comprometen la robustez del modelo; en síntesis, estos resultados son coherentes con la teoría de comunicaciones digitales y los principios MIMO, donde condiciones menos eficientes energéticamente se correlacionan con mayor probabilidad de error, validando la importancia de optimizar el consumo energético para garantizar la confiabilidad del enlace en entornos vehiculares de alta movilidad.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo presenta las conclusiones generales de la investigación, resalta las contribuciones significativas al conocimiento y proporciona recomendaciones para futuras investigaciones, basadas en los hallazgos y limitaciones del estudio.

5.1. Conclusiones generales

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten concluir que las técnicas de diversificación espacial, implementadas mediante configuraciones MIMO y modelos avanzados de canal, constituyen una solución eficiente para optimizar el desempeño de las redes inalámbricas en distintos entornos de propagación. El análisis realizado demuestra que estas técnicas incrementan de manera significativa la eficiencia espectral, la capacidad del canal y la robustez frente a interferencias y desvanecimientos, validando los fundamentos teóricos expuestos en el marco conceptual.

El análisis comparativo entre sistemas MIMO (4×4, 8×8 y 16×16) y configuraciones convencionales confirma una mejora sustancial en la eficiencia espectral en entornos urbanos, alcanzando una capacidad de hasta 138 bps/Hz a 30 dB en el escenario urbano 5G. Este resultado evidencia la superioridad de la diversificación espacial frente a sistemas sin múltiples antenas, especialmente en escenarios con alta densidad de usuarios e interferencia elevada.

Las simulaciones en canales Rayleigh y Rician permiten concluir que el impacto del desvanecimiento y la interferencia varía según el tipo de escenario (urbano, rural y vehicular). Sin embargo, las técnicas MIMO demostraron mantener niveles bajos de BER, incluso en condiciones

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

adversas, logrando valores inferiores al 0.01 % en entornos rurales con predominancia de línea de vista. Esto confirma la robustez y adaptabilidad de los modelos frente a fluctuaciones en la propagación.

El modelo matemático de canal MIMO desarrollado, basado en la expresión matricial y = Hx + n, permitió aplicar técnicas de optimización como SVD, ZF y MMSE. Estas técnicas posibilitaron evaluar la capacidad del canal bajo distintas configuraciones y analizar su comportamiento frente a variaciones del SNR y del número de antenas, demostrando una relación directa entre la diversificación espacial y la maximización del rendimiento de la red.

La validación del modelo mediante simulaciones en MATLAB y Python permitió cuantificar mejoras en términos de capacidad, eficiencia espectral y reducción de errores, verificando la consistencia entre el modelo teórico y los resultados computacionales. Las simulaciones confirman que las técnicas de diversificación espacial son compatibles con los requisitos de tecnologías emergentes como 5G, IoT de baja potencia y comunicaciones vehiculares V2X, con la energía por bit (E_b) disminuyendo progresivamente al aumentar el SNR en los tres escenarios.

Se concluye que las técnicas de diversificación espacial mejoran de manera significativa la transmisión de datos en redes inalámbricas. Las métricas obtenidas permiten afirmar que la eficiencia espectral aumenta, el BER disminuye y la capacidad del canal se optimiza al emplear sistemas MIMO adecuados para cada escenario de propagación. Por tanto, esta investigación confirma que dichas técnicas representan una herramienta esencial para el diseño de redes inalámbricas modernas, eficientes y robustas frente a interferencias y limitaciones del entorno.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.1.1. Desempeño de las técnicas MIMO en redes inalámbricas

Las simulaciones realizadas en MATLAB y Python confirman que las técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output) mejoran significativamente la eficiencia espectral y la capacidad del canal en comparación con sistemas SISO (Single Input Single Output). En el escenario urbano 5G con configuración MIMO 16×16, la capacidad del canal aumentó de 13.29 bps/Hz a 0 dB hasta 138.04 bps/Hz a 30 dB, lo que representa una mejora sustancial en entornos densos. Asimismo, la tasa de error de bits (BER) se redujo de 2.1×10^{-5} a valores prácticamente nulos a partir de 25 dB, garantizando comunicaciones confiables. Estos resultados validan que MIMO es una técnica esencial para redes de alta demanda, como 5G, al permitir transmitir múltiples flujos simultáneamente sin incrementar el ancho de banda

5.1.2. Robustez frente al desvanecimiento e interferencia en diversos escenarios

La diversificación espacial aplicada mediante MIMO demostró una alta robustez frente a fenómenos de desvanecimiento y condiciones de interferencia. En entornos rurales IoT, el uso de un canal Rician con línea de vista predominante permitió mantener la estabilidad del enlace incluso en condiciones de baja potencia, reduciendo el BER de 5.4×10^{-5} a –5 dB hasta 1.12×10^{-5} a 15 dB. En redes vehiculares V2X, a pesar del efecto Doppler generado por la movilidad (≈546 Hz), la configuración MIMO 8×8 logró mantener la confiabilidad del enlace, con BER prácticamente nulo a partir de 25 dB. Estos hallazgos confirman que la diversificación espacial mitiga los efectos del desvanecimiento y la interferencia, asegurando comunicaciones estables en escenarios dinámicos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.1.3. Diseño y validación de un modelo matemático de canal MIMO

Se desarrolló un modelo matemático basado en la ecuación matricial y = Hx + n, donde H representa la matriz del canal, x el vector de señales transmitidas y n el ruido aditivo gaussiano. Este modelo permitió calcular la capacidad del canal mediante la fórmula de Shannon adaptada a sistemas MIMO, incorporando parámetros como la relación señal-ruido (SNR) y el número de antenas. La validación estadística (ANOVA y pruebas de normalidad) confirmó que el SNR explica prácticamente toda la variabilidad en la capacidad del canal ($R^2 \approx 99.99$ %, $p < 0.001$), lo que respalda la consistencia del modelo y su aplicabilidad en entornos simulados.

5.1.4. Validación del modelo mediante simulaciones y proyección a tecnologías emergentes

El modelo propuesto fue validado mediante simulaciones en MATLAB y Python, mostrando coherencia superior al 95 % entre ambos entornos. Los resultados evidencian que las técnicas MIMO son aplicables no solo en redes 5G, sino también en escenarios IoT y V2X, proyectando su relevancia para tecnologías emergentes como 6G y redes vehiculares inteligentes. Además, se identificó que la integración con algoritmos de optimización y técnicas de beamforming puede potenciar aún más el rendimiento, abriendo oportunidades para investigaciones futuras orientadas a la eficiencia energética y la adaptabilidad en tiempo real.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.2. Contribuciones de la investigación

La presente investigación aporta avances significativos en el ámbito de las telecomunicaciones inalámbricas, tanto en el plano teórico como en el práctico. Las principales contribuciones se detallan a continuación:

Desarrollo de modelos matemáticos avanzados:

Se diseñó un modelo matemático que describe el comportamiento de sistemas MIMO bajo diferentes condiciones de canal (Rayleigh y Rician), incorporando parámetros como la relación señal-ruido (SNR), número de antenas y ancho de banda. Este modelo permite estimar la capacidad del canal, la eficiencia espectral y la tasa de error de bits (BER), constituyendo una herramienta útil para futuras investigaciones orientadas a la optimización de redes inalámbricas.

Evaluación comparativa de técnicas:

El estudio realizó un análisis exhaustivo de las ventajas y limitaciones de las técnicas MIMO frente a otras estrategias, como la diversificación de polarización y trayectorias. Esta comparación proporciona criterios claros para seleccionar la técnica más adecuada según el tipo de red y las condiciones del entorno, contribuyendo a la toma de decisiones en el diseño de sistemas inalámbricos.

Resultados aplicables a escenarios reales:

Los hallazgos obtenidos son relevantes para entornos prácticos como redes urbanas densas (5G), aplicaciones IoT en zonas rurales y redes vehiculares (V2X). Las simulaciones ofrecen una

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

guía para optimizar configuraciones específicas en estos contextos, asegurando un equilibrio entre eficiencia espectral, confiabilidad y consumo energético.

Propuestas de mitigación energética:

Se identificaron estrategias potenciales para reducir el incremento en el consumo energético asociado a sistemas MIMO, especialmente en dispositivos IoT de baja potencia. Entre ellas destacan el uso de técnicas de beamforming y la optimización adaptativa del canal, que permiten mejorar la eficiencia sin comprometer la calidad del enlace.

Contribución al estado del arte en redes 5G y más allá:

Este trabajo amplía el conocimiento sobre el impacto de las técnicas de diversificación espacial en redes inalámbricas avanzadas, consolidando su importancia para la implementación efectiva de redes 5G y proyectando su aplicabilidad en tecnologías emergentes como 6G.

5.3. Recomendaciones para investigaciones futuras

Optimización energética:

Es necesario profundizar en estrategias que reduzcan el consumo energético asociado a sistemas MIMO, especialmente en dispositivos IoT de baja potencia. Se recomienda investigar algoritmos de beamforming energéticamente eficientes, así como el desarrollo de antenas basadas en materiales avanzados que permitan minimizar pérdidas y mejorar la eficiencia global del sistema.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Simulaciones con modelos más complejos:

Se sugiere realizar simulaciones que incorporen modelos de canal más realistas y dinámicos, considerando factores como interferencia intercelular, movilidad extrema, variabilidad climática y congestión espectral. Esto permitirá aproximar los resultados a condiciones reales y validar la robustez de las técnicas MIMO en escenarios heterogéneos.

Integración con inteligencia artificial y aprendizaje automático:

Explorar la aplicación de algoritmos de machine learning para la optimización adaptativa de parámetros MIMO en tiempo real. El uso de redes neuronales y aprendizaje por refuerzo puede mejorar la asignación de recursos, la gestión del espectro y la predicción del comportamiento del canal, incrementando la eficiencia y confiabilidad del sistema.

Validación experimental en entornos reales:

Se recomienda complementar las simulaciones con pruebas en entornos físicos, como laboratorios de telecomunicaciones y escenarios urbanos controlados, para evaluar la viabilidad práctica de las configuraciones propuestas. Esto permitirá identificar limitaciones relacionadas con hardware, costos y compatibilidad con estándares internacionales.

Proyección hacia tecnologías emergentes:

Investigar la aplicabilidad de las técnicas MIMO en redes 6G, comunicaciones en bandas terahertz y sistemas vehiculares autónomos. Estas tecnologías demandarán soluciones que

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

combinen alta eficiencia espectral, baja latencia y consumo energético optimizado, lo que convierte a la diversificación espacial en un componente clave para su desarrollo.

5.4. Aplicaciones potenciales de la investigación

Los resultados obtenidos en esta investigación presentan un amplio espectro de aplicaciones prácticas en diversos campos, contribuyendo al desarrollo y optimización de redes inalámbricas modernas y emergentes. A continuación, se detallan las principales áreas de aplicación:

Aplicaciones en redes 5G y 6G

- **Redes urbanas densas**: La implementación de MIMO masivo permite gestionar una alta densidad de usuarios en entornos metropolitanos, incrementando la capacidad de transmisión y reduciendo interferencias.
- **Frecuencias milimétricas (mmWave)**: En futuras redes 6G, las frecuencias más altas requerirán técnicas avanzadas de diversificación espacial para superar los desafíos de propagación y garantizar enlaces confiables.

Aplicaciones en IoT y redes rurales

- **Redes de sensores y dispositivos IoT**: Mejora la conectividad y la eficiencia energética en redes de monitoreo ambiental, agricultura inteligente y entornos industriales, donde la autonomía energética es crítica.
- **Conectividad en áreas rurales**: Uso de diversificación espacial para superar barreras físicas y proporcionar servicios de conectividad en zonas remotas o de difícil acceso.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Redes vehiculares y comunicaciones críticas

- **Vehículos conectados (V2X)**: Aplicación de MIMO en redes vehiculares para mejorar la calidad y confiabilidad de las comunicaciones en movimiento, esenciales para sistemas cooperativos y conducción autónoma.
- **Redes de emergencia**: Implementación en comunicaciones críticas, como redes para respuesta ante desastres, donde la robustez y confiabilidad son fundamentales para garantizar la continuidad del servicio.

Comunicaciones satelitales y espaciales

Sistemas satelitales: Uso de diversificación espacial y polarización para mejorar la capacidad y cobertura de redes satelitales.

Exploración espacial: Mejora en las comunicaciones de largo alcance mediante técnicas avanzadas de optimización espectral.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Referencias bibliográficas

Nuti, P., Balti, E., & Evans, B. L. (2021). Spectral efficiency optimization for mmWave wideband MIMO RIS-assisted communication (arXiv:2201.01739). arXiv. https://arxiv.org/abs/2201.01739

IEEE Standards Association. (n.d.). IEEE 802.11 wireless LAN standards. https://standards.ieee.org

Bana, A.-S., De Carvalho, E., Soret, B., Abrão, T., Marinello, J. C., Larsson, E. G., & Popovski, P. (2019). Massive MIMO for Internet of Things (IoT) connectivity. Physical Communication, 37, Article 100859. https://doi.org/10.1016/j.phycom.2019.100859

MathWorks. (n.d.). MATLAB documentation. https://www.mathworks.com/help

NumPy Developers. (n.d.). NumPy documentation. https://numpy.org/doc

Pandas Development Team. (n.d.). Pandas documentation. https://pandas.pydata.org/docs

Python Software Foundation. (n.d.). Python documentation. https://www.python.org/doc

Rappaport, T. S. (2024). Wireless communications: Principles and practice (2nd ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009489843

Alamouti, S. M. (1998). A simple transmit diversity technique for wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16(8), 1451–1458. https://doi.org/10.1109/49.730453

SciPy Developers. (n.d.). SciPy documentation. https://scipy.org

Scikit-learn Developers. (n.d.). Scikit-learn documentation. https://scikit-learn.org/stable/documentation.html

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Veeresht, V. (2018). CommPy: Communications in Python [GitHub repository]. https://github.com/veeresht/CommPy

Ngo, H. Q., Larsson, E. G., & Marzetta, T. L. (2013). Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. IEEE Transactions on Communications, 61(4), 1436–1449. https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.020413.110848

Tse, D., & Viswanath, P. (2005). Fundamentals of wireless communication. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511807213

Telatar, E. (1999). Capacity of multi-antenna Gaussian channels. IEEE Transactions on Information Theory, 44(1), 10–21.

3GPP. (2023). TS 38.300: NR; Overall description; Stage 2. 3rd Generation Partnership Project.

Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., & Zhang, J. C. (2014). What will 5G be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32(6), 1065–1082. https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098

Björnson, E., Larsson, E. G., & Marzetta, T. L. (2016). Massive MIMO: Ten myths and one critical question. IEEE Communications Magazine, 54(2), 114–123. https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7402270

3GPP. (2020). Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (TR 38.901, Release 16). 3rd Generation Partnership Project.

Acuña Espilco, E. O., & Herrera Ormeño, R. A. (2016). Levantamiento del mapa de atenuaciones de señal electromagnética en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz para la red wireless PUCP [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. http://hdl.handle.net/20.500.12404/7321

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Vásquez, J. N., & Nilton, R. (2016). *Diseño de una red de sensores de espectro para la selección de canales de operación óptimos en la red Wi-Fi del campus PUCP* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. http://hdl.handle.net/20.500.12404/7150

Peñaloza Velásquez, J. M., & Yupanqui Gonzalo, R. (2022). Diseño de un sistema IoT de bajo costo basado en LPWAN para cultivos hidropónicos [Tesis de pregrado, Universidad Privada de Tacna]. https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/2390

Lara Herrera, J. F., & Vergaray Méndez, W. Y. (2023). Diseño e implementación de una red móvil 5G NSA para mejorar la velocidad y capacidad de transmisión de datos en la zona norte de Lima Metropolitana [Tesis de pregrado, Universidad de Ciencias y Humanidades]. http://hdl.handle.net/20.500.12872/773

Marzetta, T. L. (2010). *Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas*. IEEE Transactions on Wireless Communications**,** 9(11), 3590–3600. https://ieeexplore.ieee.org/document/5595728

Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511841224

Björnson, E., Hoydis, J., & Sanguinetti, L. (2017). Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency. *Foundations and Trends® in Signal Processing*, *11*(3–4), 154–655. https://doi.org/10.1561/2000000093

Aguilar, B. M., Orcada, F. A., Guevara, C. D., Huamanchahua, D. M., & Valcárcel, H. J. (2024). Security evaluation of open access Wi-Fi networks in a public university in Junin, Peru [Tesis profesional, Universidad Continental]. https://hdl.handle.net/20.500.12394/15619

Hernández Correa, L. F. (2011). Estudio del impacto de IEEE 802.11N sobre las redes wireless en el Perú [Tesis profesional, Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)]. http://hdl.handle.net/20.500.12404/210

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Riquelme Castro, H. D. (2015). Modelo para extender redes inalámbricas de banda ancha con tecnología WiMAX en entornos rurales [Tesis profesional, Universidad Católica de Santa María]. https://repositorio.ucsm.edu.pe/bitstream/20.500.12920/2166/1/71.0542.IS.pdf

Tran-Huy, H., Nguyen Thi, T., Aslam, M., Nguyen Tuan, H., & Nguyen, T. L. (2024). A large-scale MIMO antenna system for 5G IoT applications. PLoS One, 19(1), e0292383. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292383

Zaki, A. I., Nassar, M., Aly, M. H., & Badawi, W. K. (2020). A Generalized Spatial Modulation System Using Massive MIMO Space Time Coding Antenna Grouping. Entropy, 22(12), 1350. https://doi.org/10.3390/e22121350

Srivastava, G., Kumar, A., Kumar, V., et al. (2025). Eight port millimeter wave HMSIW MIMO antenna array for V2V communication. Scientific Reports, 15, 41011. https://doi.org/10.1038/s41598-025-24710-4

Bai, T., Vaze, R., & Heath, R. W., Jr. (2014). *Analysis of blockage effects on urban cellular networks*. IEEE Transactions on Wireless Communications, 13(9), 5070–5083. https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2331971

3GPP. (2018). *TS 38.101-2: NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone (Release 15)*. 3rd Generation Partnership Project. https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3284

IEEE. (2016). *IEEE Std 802.11-2016: IEEE standard for information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*. IEEE Standards Association. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7786995

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

IEEE. (2020). *IEEE Std 802.15.4-2020: IEEE standard for low-rate wireless networks*. IEEE Standards Association. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9144691

IEEE. (2016). *IEEE Std 802.11p-2010: IEEE standard for information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications — Amendment 6: Wireless access in vehicular environments*. IEEE Standards Association. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5514475

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

Anexos

Anexo 1. Matlab escenario 1: red urbana densa (5G) código

```
clc; clear; close all;
rng(123); % Semilla para reproducibilidad

%% PARÁMETROS DEL SISTEMA
numTx = 16; numRx = 16;
modOrder = 16; % 16-QAM
bitsPerSymbol = log2(modOrder);
numSymbols = 1000;
snrRange = 0:5:30;
numIter = 100;
BW = 400e6; % 400 MHz
Pt_dBm = 30;
Pt_W = 10^((Pt_dBm - 30)/10);

%% INICIALIZACIÓN
ber = zeros(size(snrRange));
capacity = zeros(size(snrRange));
energy_per_bit = zeros(size(snrRange));
ber_std = zeros(size(snrRange));
cap_std = zeros(size(snrRange));

%% MOSTRAR FÓRMULAS
disp('=== FÓRMULAS UTILIZADAS ===');
disp('1. SNR lineal = 10^(SNR_dB / 10)');
disp('2. Capacidad: C = log2(det(I + (SNR/nt) * H * H^H))');
disp('3. BER = bits erróneos / bits totales');
disp('4. E_bit = Potencia / (Capacidad * BW)');
disp(' ');

%% SIMULACIÓN PRINCIPAL
for snrIdx = 1:length(snrRange)
    SNR_dB = snrRange(snrIdx);
    SNR = 10^(SNR_dB/10);
    noisePower = 1 / SNR;

    berTemp = zeros(1,numIter);
    capTemp = zeros(1,numIter);
    ebitTemp = zeros(1,numIter);

    fprintf('--- SNR = %d dB ---\n', SNR_dB);

    for iter = 1:numIter
        % Canal Rayleigh
        H = (randn(numRx, numTx) + 1j*randn(numRx, numTx)) / sqrt(2);

        % Modulación
```

```
        dataTx = randi([0 modOrder-1], numSymbols, numTx);
        txSignal    =    qammod(dataTx,    modOrder,    'InputType',    'integer',
'UnitAveragePower', true).';

        % Transmisión
        rxSignal = H * txSignal;
        noise     =     sqrt(noisePower/2)     *     (randn(size(rxSignal))     +
1j*randn(size(rxSignal)));
        rxNoisy = rxSignal + noise;

        % Igualación ZF
        rxEqualized = pinv(H) * rxNoisy;
        rxEqualized = rxEqualized.';

        % Demodulación
        dataRx   =   qamdemod(rxEqualized,   modOrder,   'OutputType',   'integer',
'UnitAveragePower', true);

        % BER
        [~, err] = biterr(dataTx, dataRx);
        berTemp(iter) = err / (numSymbols * numTx);

        % Capacidad
        capTemp(iter) = log2(real(det(eye(numRx) + (SNR/numTx)*(H*H'))));

        % Energía por bit
        rate = capTemp(iter) * BW;
        ebitTemp(iter) = Pt_W / rate;
    end

    % Promedios y desviaciones
    ber(snrIdx) = mean(berTemp);
    capacity(snrIdx) = mean(capTemp);
    energy_per_bit(snrIdx) = mean(ebitTemp);
    ber_std(snrIdx) = std(berTemp);
    cap_std(snrIdx) = std(capTemp);
end

%% VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS
figure;
subplot(2,2,1);
scatter(real(txSignal(:)), imag(txSignal(:)), 'filled');
title('Constelación    16-QAM    (Antes    del    Canal)');    xlabel('In-phase');
ylabel('Quadrature'); grid on;

subplot(2,2,2);
scatter(real(rxNoisy(:)), imag(rxNoisy(:)), 'filled');
title(['Constelación 16-QAM (Después del Canal, SNR = ' num2str(SNR_dB) ' dB)']);
xlabel('In-phase'); ylabel('Quadrature'); grid on;

subplot(2,2,3);
errorbar(snrRange, ber, ber_std, '-s', 'LineWidth', 2);
```

```
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER'); title('Tasa de Error de Bits (BER)'); grid on;

subplot(2,2,4);
errorbar(snrRange, capacity, cap_std, '-o', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Capacidad (bps/Hz)'); title('Capacidad del Canal MIMO
16x16'); grid on;

figure;
plot(snrRange, energy_per_bit, 'k-d', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Energía por bit (J/bit)');
title('Consumo Energético por Bit'); grid on;

%% EXPORTAR RESULTADOS A CSV
resultsTable    =    table(snrRange.',    capacity.',    ber.',    energy_per_bit.',
'VariableNames', ...
    {'SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER','Energia_Jbit'});
writetable(resultsTable, 'Resultados_Escenario1.csv');

disp(resultsTable);
clc; clear; close all;
rng(123); % Semilla para reproducibilidad

%% PARÁMETROS DEL SISTEMA
numTx = 16; numRx = 16;
modOrder = 16; % 16-QAM
bitsPerSymbol = log2(modOrder);
numSymbols = 1000;
snrRange = 0:5:30;
numIter = 100;
BW = 400e6; % 400 MHz
Pt_dBm = 30;
Pt_W = 10^((Pt_dBm - 30)/10);

%% INICIALIZACIÓN
ber = zeros(size(snrRange));
capacity = zeros(size(snrRange));
energy_per_bit = zeros(size(snrRange));
ber_std = zeros(size(snrRange));
cap_std = zeros(size(snrRange));

%% MOSTRAR FÓRMULAS
disp('=== FÓRMULAS UTILIZADAS ===');
disp('1. SNR lineal = 10^(SNR_dB / 10)');
disp('2. Capacidad: C = log2(det(I + (SNR/nt) * H * H^H))');
disp('3. BER = bits erróneos / bits totales');
disp('4. E_bit = Potencia / (Capacidad * BW)');
disp(' ');

%% SIMULACIÓN PRINCIPAL
for snrIdx = 1:length(snrRange)
    SNR_dB = snrRange(snrIdx);
    SNR = 10^(SNR_dB/10);
```

```
    noisePower = 1 / SNR;

    berTemp = zeros(1,numIter);
    capTemp = zeros(1,numIter);
    ebitTemp = zeros(1,numIter);

    fprintf('--- SNR = %d dB ---\n', SNR_dB);

    for iter = 1:numIter
        % Canal Rayleigh
        H = (randn(numRx, numTx) + 1j*randn(numRx, numTx)) / sqrt(2);

        % Modulación
        dataTx = randi([0 modOrder-1], numSymbols, numTx);
        txSignal    =    qammod(dataTx,    modOrder,    'InputType',    'integer',
'UnitAveragePower', true).';

        % Transmisión
        rxSignal = H * txSignal;
        noise      =      sqrt(noisePower/2)      *      (randn(size(rxSignal))      +
1j*randn(size(rxSignal)));
        rxNoisy = rxSignal + noise;

        % Igualación ZF
        rxEqualized = pinv(H) * rxNoisy;
        rxEqualized = rxEqualized.';

        % Demodulación
        dataRx   =   qamdemod(rxEqualized,   modOrder,   'OutputType',   'integer',
'UnitAveragePower', true);

        % BER
        [~, err] = biterr(dataTx, dataRx);
        berTemp(iter) = err / (numSymbols * numTx);

        % Capacidad
        capTemp(iter) = log2(real(det(eye(numRx) + (SNR/numTx)*(H*H'))));

        % Energía por bit
        rate = capTemp(iter) * BW;
        ebitTemp(iter) = Pt_W / rate;
    end

    % Promedios y desviaciones
    ber(snrIdx) = mean(berTemp);
    capacity(snrIdx) = mean(capTemp);
    energy_per_bit(snrIdx) = mean(ebitTemp);
    ber_std(snrIdx) = std(berTemp);
    cap_std(snrIdx) = std(capTemp);
end

%% VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS
```

```
figure;
subplot(2,2,1);
scatter(real(txSignal(:)), imag(txSignal(:)), 'filled');
title('Constelación 16-QAM (Antes del Canal)'); xlabel('In-phase');
ylabel('Quadrature'); grid on;

subplot(2,2,2);
scatter(real(rxNoisy(:)), imag(rxNoisy(:)), 'filled');
title(['Constelación 16-QAM (Después del Canal, SNR = ' num2str(SNR_dB) ' dB)']);
xlabel('In-phase'); ylabel('Quadrature'); grid on;

subplot(2,2,3);
errorbar(snrRange, ber, ber_std, '-s', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER'); title('Tasa de Error de Bits (BER)'); grid on;

subplot(2,2,4);
errorbar(snrRange, capacity, cap_std, '-o', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Capacidad (bps/Hz)'); title('Capacidad del Canal MIMO
16x16'); grid on;

figure;
plot(snrRange, energy_per_bit, 'k-d', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Energía por bit (J/bit)');
title('Consumo Energético por Bit'); grid on;

%% EXPORTAR RESULTADOS A CSV
resultsTable = table(snrRange.', capacity.', ber.', energy_per_bit.',
'VariableNames', ...
    {'SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER','Energia_Jbit'});
writetable(resultsTable, 'Resultados_Escenario1.csv');

disp(resultsTable);
```

Anexo 2. Matlab escenario 2: red IoT en zona rural código

```
clc; clear; close all;
rng(123); % Semilla para reproducibilidad

%% =========================
%% Parámetros del sistema
%% =========================
numTx = 4; numRx = 4;                  % MIMO 4x4
modOrder = 4;                          % 4-QAM (QPSK)
bitsPerSymbol = log2(modOrder);
numSymbols = 1000;
snrRange = [-5 0 5 10 15];             % SNR (dB) IoT rural
numIter = 100;
BW = 20e6;                             % 20 MHz (ajustado)
K  = 10;                               % Canal Rician (LoS dominante)

% Potencias (dBm) para energía por bit (evaluada a SNR final)
Pt_dBm = 0:2:20;                       % 0, 2, ..., 20 dBm
Pt_W   = 10.^((Pt_dBm - 30)./10);      % Watts

%% =========================
%% Fórmulas (display)
%% =========================
disp('=== Fórmulas utilizadas en la simulación ===');
disp('1) 4-QAM (QPSK): log2(M) bits por símbolo, M = 4');
disp('2) BER = bits erróneos / bits totales');
disp('3) Capacidad: C = log2(det(I + (SNR/nt) * H * H^H))');
disp('4) Energía por bit: E_b = P_t / R, con R = C * BW');
disp(' ');

%% =========================
%% Inicialización de arreglos
%% =========================
BER          = zeros(size(snrRange));  % BER (Rician)
CAP_Rician   = zeros(size(snrRange));  % Capacidad Rician (bps/Hz)
CAP_Rayleigh = zeros(size(snrRange));  % Capacidad Rayleigh (bps/Hz)
BER_std      = zeros(size(snrRange));  % Desv. estándar de BER
CAPR_std     = zeros(size(snrRange));  % Desv. estándar de Cap. Rician

% Constelaciones
txConst_before = [];                   % constelación (antes del canal)
rxConst_after  = [];                   % constelación (después del canal, SNR final)
SNR_dB_final   = snrRange(end);        % SNR final para constelación

%% =========================
%% Bucle principal de SNR
%% =========================
for idx = 1:length(snrRange)
    SNR_dB = snrRange(idx);
    SNR    = 10^(SNR_dB/10);
```

```
    noisePower = 1 / SNR;

    fprintf('\n>> Simulando para SNR = %d dB\n', SNR_dB);
    fprintf('   SNR lineal: %.4f | Potencia de ruido: %.4e\n', SNR, noisePower);

    ber_acc_vec  = zeros(1, numIter);
    capR_acc_vec = zeros(1, numIter);
    capY_acc_vec = zeros(1, numIter);

    for it = 1:numIter
        % Canal Rician (LoS + difuso)
        H_r = sqrt(K/(K+1))*ones(numRx,numTx) + ...
              sqrt(1/(K+1))*(randn(numRx,numTx) + 1j*randn(numRx,numTx))/sqrt(2);

        % Canal Rayleigh (i.i.d.)
        H_y = (randn(numRx,numTx) + 1j*randn(numRx,numTx))/sqrt(2);

        % Datos y modulación QPSK
        dataTx = randi([0 modOrder-1], numSymbols, numTx);
        tx     = qammod(dataTx, modOrder, 'InputType','integer','UnitAveragePower',
true).';

        % Transmisión por Rician + ruido AWGN
        rx    = H_r * tx;
        noise = sqrt(noisePower/2) * (randn(size(rx)) + 1j*randn(size(rx)));
        rxn   = rx + noise;

        % Constelaciones (capturas únicas)
        if isempty(txConst_before)
            txConst_before = tx(:);
        end
        if (SNR_dB == SNR_dB_final) && (it == numIter)
            rxConst_after = rxn(:);
        end

        % Ecualización ZF (Rician) y demodulación
        xhat   = pinv(H_r) * rxn;     % ZF
        xhat   = xhat.';              % (numSymbols x numTx)
        dataRx = qamdemod(xhat, modOrder, 'OutputType','integer','UnitAveragePower',
true);

        % BER (normalizado por bits totales)
        [~, err] = biterr(dataTx, dataRx);
        total_bits = numSymbols * numTx * bitsPerSymbol;
        ber_acc_vec(it) = err / total_bits;

        % Capacidad (Rician y Rayleigh)
        capR_acc_vec(it) = log2(real(det(eye(numRx) + (SNR/numTx)*(H_r*H_r'))));
        capY_acc_vec(it) = log2(real(det(eye(numRx) + (SNR/numTx)*(H_y*H_y'))));
    end

    % Promedios y desviaciones
```

```
    BER(idx)          = mean(ber_acc_vec);
    BER_std(idx)      = std(ber_acc_vec);
    CAP_Rician(idx)   = mean(capR_acc_vec);
    CAPR_std(idx)     = std(capR_acc_vec);
    CAP_Rayleigh(idx) = mean(capY_acc_vec);
end

%% =========================
%% Tablas en consola
%% =========================
disp('---------------------------------------');
disp('TABLA: Resultados por SNR (Rician)');
fprintf('    %-8s    %-15s    %-10s\n','SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER');
disp('    --------    ---------------    ----------');
for i = 1:numel(snrRange)
    fprintf('    %4d            %-13.4f     %-12.4g\n', snrRange(i), CAP_Rician(i),
BER(i));
end

disp(' ');
disp('---------------------------------------');
disp('TABLA: Capacidad (bps/Hz) — Rician vs Rayleigh');
fprintf('    %-8s    %-15s    %-15s\n','SNR_dB','Cap_Rician','Cap_Rayleigh');
disp('    --------    ---------------    ---------------');
for i = 1:numel(snrRange)
    fprintf('    %4d            %-13.4f     %-13.4f\n', snrRange(i), CAP_Rician(i),
CAP_Rayleigh(i));
end

%% =========================
%% Energía por bit vs Potencia (SNR final)
%% =========================
disp(' ');
disp('---------------------------------------');
disp('TABLA: Energía por bit vs Potencia (Rician, SNR final)');
fprintf('    %-12s    %-17s\n','Potencia_dBm','Energia_por_bit_J');
disp('    ------------    -----------------');

energy_per_bit = zeros(size(Pt_W));
SNR_final = 10^(SNR_dB_final/10);

for k = 1:length(Pt_W)
    pt = Pt_W(k);
    ebit_acc = 0;

    for it = 1:numIter
        H_r = sqrt(K/(K+1))*ones(numRx,numTx) + ...
              sqrt(1/(K+1))*(randn(numRx,numTx) + 1j*randn(numRx,numTx))/sqrt(2);
        C = log2(real(det(eye(numRx) + (SNR_final/numTx)*(H_r*H_r'))));
        R = C * BW;
        ebit_acc = ebit_acc + pt / R;
    end
```

```
    energy_per_bit(k) = ebit_acc / numIter;
    fprintf('      %4d            %-12.4g\n', Pt_dBm(k), energy_per_bit(k));
end

%% ========================
%% Figuras (constelaciones + BER + capacidad)
%% ========================
figure('Position',[120 120 1100 700]);

% 1) Constelación antes del canal
subplot(2,2,1);
if ~isempty(txConst_before)
    scatter(real(txConst_before), imag(txConst_before), 20, 'filled');
    grid on; axis equal; xlabel('In-phase'); ylabel('Quadrature');
    title('Constelación 4-QAM (Antes del Canal)');
else
    title('Constelación 4-QAM (Antes del Canal) - No capturada');
end

% 2) Constelación después del canal (SNR final)
subplot(2,2,2);
if ~isempty(rxConst_after)
    scatter(real(rxConst_after), imag(rxConst_after), 20, 'filled');
    grid on; axis equal; xlabel('In-phase'); ylabel('Quadrature');
    title(['Constelación 4-QAM (Después del Canal, SNR = ' num2str(SNR_dB_final) '
dB)']);
else
    title('Constelación 4-QAM (Después del Canal) - No capturada');
end

% 3) BER vs SNR (con desviación)
subplot(2,2,3);
errorbar(snrRange, BER, BER_std, 'b-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize',6);
grid on; xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER');
title('Tasa de Error de Bits (BER)');

% 4) Capacidad vs SNR (Rician, con desviación)
subplot(2,2,4);
errorbar(snrRange, CAP_Rician, CAPR_std, 'b-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize',6);
grid on; xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Capacidad (bps/Hz)');
title('Capacidad del Canal MIMO 4x4 (Rician)');

saveas(gcf, 'Figura_IoT_Rural_QPSK_Resumen_2x2.png');

%% ====== Gráfica extra: Comparación Rician vs Rayleigh ======
figure('Position',[120 120 900 500]);
plot(snrRange, CAP_Rician,  'bo-','LineWidth',1.8,'MarkerSize',6); hold on;
plot(snrRange, CAP_Rayleigh,'r--s','LineWidth',1.8,'MarkerSize',6);
grid on; xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Capacidad (bps/Hz)');
title('Comparación de Robustez: Rician vs Rayleigh');
legend('Rician','Rayleigh','Location','NorthWest');
```

```
saveas(gcf, 'Comparacion_Rician_vs_Rayleigh.png');

%% ====== Gráfica extra: Consumo energético vs Potencia ======
figure('Position',[120 120 900 500]);
plot(Pt_dBm, energy_per_bit,'kd-','LineWidth',1.8,'MarkerSize',6);
grid on; xlabel('Potencia de Transmisión (dBm)'); ylabel('Energía por bit (J/bit)');
title('Consumo Energético vs Potencia de Transmisión');
saveas(gcf, 'Consumo_Energetico_vs_Potencia.png');

%% =========================
%% Exportar resultados a CSV (archivos separados)
%% =========================
T_snr = table(snrRange.', CAP_Rician.', BER.', ...
    'VariableNames', {'SNR_dB','Capacidad_Rician_bpsHz','BER'});
writetable(T_snr, 'IoT_Rural_QPSK_SNR_Resultados_Rician.csv');

T_cmp = table(snrRange.', CAP_Rician.', CAP_Rayleigh.', ...
    'VariableNames',
{'SNR_dB','Capacidad_Rician_bpsHz','Capacidad_Rayleigh_bpsHz'});
writetable(T_cmp, 'IoT_Rural_QPSK_Capacidad_Rician_vs_Rayleigh.csv');

T_eb = table(Pt_dBm.', energy_per_bit.', ...
    'VariableNames', {'Potencia_dBm','Energia_por_bit_J'});
writetable(T_eb, 'IoT_Rural_QPSK_Energia_por_bit.csv');

disp('Listo: Imágenes y CSV exportados.');
```

Anexo 3. Matlab escenario 3: red vehicular (V2X) código y ejecución

```
clc; clear; close all;

%% === PARÁMETROS DEL SISTEMA ===
disp('Configurando simulación para red vehicular V2X...');
numTx = 8; numRx = 8;              % MIMO 8x8
modOrder = 16;                     % 16-QAM
bitsPerSymbol = log2(modOrder);
numSymbols = 1000;
snrRange = 0:5:30;                 % Rango de SNR (0 a 30 dB)
numIter = 100;
Pt_dBm = 23;                       % Potencia de transmisión (dBm)
Pt_W = 10^((Pt_dBm - 30)/10);      % Conversión a Watts
BW = 20e6;                         % Ancho de banda ajustado: 20 MHz
fc = 5.9e9;                        % Frecuencia portadora
v_kmh = 100; v_ms = v_kmh / 3.6;   % Velocidad en m/s
c = 3e8;                           % Velocidad de la luz
dopplerShift = (fc * v_ms) / c;    % Desplazamiento Doppler
disp(['Velocidad: ', num2str(v_ms), ' m/s | Doppler: ', num2str(dopplerShift), '
Hz']);

%% === INICIALIZACIÓN DE VARIABLES ===
ber = zeros(size(snrRange));
capacity = zeros(size(snrRange));
energy_per_bit = zeros(size(snrRange));
rxConstellationBefore = [];
rxConstellationAfter = [];

%% === SIMULACIÓN PRINCIPAL ===
disp('Iniciando simulación V2X...');
for snrIdx = 1:length(snrRange)
    SNR_dB = snrRange(snrIdx);
    SNR = 10^(SNR_dB/10);
    noisePower = 1 / SNR;
    berTemp = 0; capTemp = 0; ebitTemp = 0;

    for iter = 1:numIter
        % Canal Rayleigh con movilidad (aprox)
        H = (randn(numRx,numTx)+1j*randn(numRx,numTx))/sqrt(2);

        % Datos y modulación 16-QAM
        dataTx = randi([0 modOrder-1], numSymbols, numTx);
        txSignal              =              qammod(dataTx,              modOrder,
'InputType','integer','UnitAveragePower',true).';

        % Guardar constelación antes del canal
        if snrIdx == 1 && iter == 1
            rxConstellationBefore = txSignal;
        end
```

```
        % Transmisión y ruido
        rxSignal = H * txSignal;
        noise                                                                    =
sqrt(noisePower/2)*(randn(size(rxSignal))+1j*randn(size(rxSignal)));
        rxNoisy = rxSignal + noise;

        % Guardar constelación después del canal (último SNR)
        if snrIdx == length(snrRange) && iter == numIter
            rxConstellationAfter = rxNoisy;
        end

        % Igualación ZF
        rxEqualized = pinv(H) * rxNoisy;
        rxEqualized = rxEqualized.';

        % Demodulación
        dataRx          =          qamdemod(rxEqualized,          modOrder,
'OutputType','integer','UnitAveragePower',true);

        % BER
        [~, err] = biterr(dataTx, dataRx);
        berTemp = berTemp + err/(numSymbols*numTx*bitsPerSymbol);

        % Capacidad
        C = log2(real(det(eye(numRx)+(SNR/numTx)*(H*H'))));
        capTemp = capTemp + C;

        % Energía por bit
        R = C * BW;
        ebitTemp = ebitTemp + Pt_W / R;
    end

    ber(snrIdx) = berTemp / numIter;
    capacity(snrIdx) = capTemp / numIter;
    energy_per_bit(snrIdx) = ebitTemp / numIter;
end

%% === GRÁFICAS INDIVIDUALES ===
figure;
plot(snrRange, capacity, 'b-o', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Capacidad (bps/Hz)');
title('Capacidad vs SNR - Escenario V2X');
grid on;
saveas(gcf,'Capacidad_vs_SNR_V2X.png');

figure;
semilogy(snrRange, ber, 'r-s', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER');
title('BER vs SNR - Escenario V2X');
grid on;
saveas(gcf,'BER_vs_SNR_V2X.png');
```

```
figure;
plot(snrRange, energy_per_bit, 'k-d', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Energía por bit (J/bit)');
title('Consumo energético vs SNR - Escenario V2X');
grid on;
saveas(gcf,'Energia_vs_SNR_V2X.png');
%% === IMAGEN RESUMEN CON 4 SUBGRÁFICAS ===
figure('Position',[100 100 1000 700]);
subplot(2,2,1);
scatter(real(rxConstellationBefore(:)), imag(rxConstellationBefore(:)), 'filled');
title('Constelación 16-QAM (Antes del Canal)'); xlabel('In-phase');
ylabel('Quadrature'); grid on;
subplot(2,2,2);
scatter(real(rxConstellationAfter(:)), imag(rxConstellationAfter(:)), 'filled');
title(['Constelación 16-QAM (Después del Canal, SNR = ' num2str(snrRange(end)) '
dB)']);
xlabel('In-phase'); ylabel('Quadrature'); grid on;
subplot(2,2,3);
semilogy(snrRange, ber, 'b-s','LineWidth',2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER'); title('Tasa de Error de Bits (BER)'); grid on;

subplot(2,2,4);
plot(snrRange, capacity, 'b-o','LineWidth',2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Capacidad (bps/Hz)'); title('Capacidad del Canal MIMO
8x8'); grid on;
saveas(gcf,'Resumen_V2X.png');
%% === TABLA DE RESULTADOS ===
fprintf('\n=== Resultados Escenario V2X ===\n');
fprintf('%-8s %-20s %-15s %-
15s\n','SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER','Energia_Joule');
for i = 1:length(snrRange)
    fprintf('%-8d %-20.4f %-15.6f %-15.6e\n', snrRange(i), capacity(i), ber(i),
energy_per_bit(i));
end
%% === EXPORTAR A CSV ===
T = table(snrRange.', capacity.', ber.', energy_per_bit.', ...
    'VariableNames', {'SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER','Energia_Joule'});
writetable(T,'Resultados_V2X.csv');
disp('☑ Gráficas generadas y resultados exportados a Resultados_V2X.csv');

%% === INTERPRETACIÓN AUTOMÁTICA ===
disp('Interpretación del escenario V2X:');
disp('- La capacidad aumenta con el SNR, alcanzando valores altos en entornos
vehiculares.');
disp('- El BER disminuye significativamente a partir de 15 dB, asegurando
confiabilidad.');
disp('- El consumo energético por bit decrece al aumentar el SNR, mejorando
eficiencia.');
disp('- MIMO 8x8 es clave para soportar movilidad y altas velocidades en redes V2X.');
```

Anexo 4. Python escenario 1: red urbana densa (5G) código

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

# === CONFIGURACIÓN DEL ESCENARIO ===
print("=== SIMULACIÓN DE RED 5G URBANA DENSA CON MIMO 16x16 ===\n")

# Parámetros del sistema
num_tx = 16
num_rx = 16
mod_order = 16  # 16-QAM
bits_per_symbol = int(np.log2(mod_order))
num_symbols = 1000
snr_range_db = np.arange(0, 31, 5)
num_iter = 100
bandwidth = 400e6  # 400 MHz para 5G mmWave
tx_power_dbm = 30  # Potencia típica en entornos densos
tx_power_watts = 10 ** ((tx_power_dbm - 30) / 10)

# Mostrar parámetros
print("Parámetros del sistema:")
print(f" - Antenas Tx: {num_tx}, Rx: {num_rx}")
print(f" - Modulación: {mod_order}-QAM ({bits_per_symbol} bits/símbolo)")
print(f" - Símbolos por iteración: {num_symbols}")
print(f" - SNR (dB): {snr_range_db}")
print(f" - Potencia Tx: {tx_power_dbm} dBm = {tx_power_watts:.4f} W")
print(f" - Ancho de banda: {bandwidth/1e6} MHz\n")

# Fórmulas utilizadas
print("=== FÓRMULAS UTILIZADAS ===")
print("1. SNR_lineal = 10^(SNR_dB / 10)")
print("2. Capacidad: C = log2(det(I + (SNR/nt) * H * H^H))")
print("3. BER = bits erróneos / bits totales")
print("4. E_bit = Potencia / (Capacidad * BW)\n")

# Inicialización
capacity = []
ber = []
energy_per_bit = []
rx_equalized_last = None
```

```
# Constelación 16-QAM normalizada
qam_points = np.array([complex(x, y) for x in [-3, -1, 1, 3] for y in [-
3, -1, 1, 3]])
qam_points /= np.sqrt((np.abs(qam_points) ** 2).mean())

# Simulación
for snr_db in snr_range_db:
    snr_linear = 10 ** (snr_db / 10)
    noise_power = 1 / snr_linear
    ber_accum = 0
    capacity_accum = 0

    for _ in range(num_iter):
        # Canal Rayleigh
       H = (np.random.randn(num_rx, num_tx) + 1j * np.random.randn(num_rx,
num_tx)) / np.sqrt(2)

        # Datos y modulación
          data_tx = np.random.randint(0, mod_order, size=(num_symbols,
num_tx))
        tx_signal = qam_points[data_tx].T  # (num_tx x num_symbols)

        # Transmisión
        rx_signal = H @ tx_signal
                    noise    =    np.sqrt(noise_power    /    2)    *
(np.random.randn(*rx_signal.shape)           +           1j           *
np.random.randn(*rx_signal.shape))
        rx_noisy = rx_signal + noise

        # Igualación ZF
        H_inv = np.linalg.pinv(H)
        rx_equalized = H_inv @ rx_noisy
        rx_equalized = rx_equalized.T  # (num_symbols x num_tx)

        # Demodulación por distancia mínima
             data_rx   =   np.argmin(np.abs(rx_equalized[...,   None]   -
qam_points[None, None, :])**2, axis=-1)

        # BER
        bit_errors = np.sum(data_tx != data_rx)
        total_bits = num_symbols * num_tx * bits_per_symbol
        ber_accum += bit_errors / total_bits
```

```
        # Capacidad
        term = np.eye(num_rx) + (snr_linear / num_tx) * (H @ H.conj().T)
        capacity_accum += np.log2(np.linalg.det(term).real)

        # Guardar constelación del último SNR
        if snr_db == snr_range_db[-1]:
            rx_equalized_last = rx_equalized

    # Promedios
    ber_mean = ber_accum / num_iter
    cap_mean = capacity_accum / num_iter
    ber.append(ber_mean)
    capacity.append(cap_mean)

    # Energía por bit (usa capacidad promedio)
    rate = cap_mean * bandwidth
    energy_per_bit.append(tx_power_watts / rate)

     print(f"SNR = {snr_db} dB -> BER = {ber_mean:.2e} | Capacidad =
{cap_mean:.2f} bps/Hz | E_bit = {energy_per_bit[-1]:.2e} J/bit")

# === VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS ===
fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(12, 8))

# Capacidad del canal
axs[0, 0].plot(snr_range_db, capacity, 'b-o')
axs[0, 0].set_title('Capacidad del Canal MIMO (bps/Hz)')
axs[0, 0].set_xlabel('SNR (dB)')
axs[0, 0].set_ylabel('Capacidad')
axs[0, 0].grid(True)

# BER
axs[0, 1].semilogy(snr_range_db, ber, 'r-s')
axs[0, 1].set_title('Tasa de Error de Bits (BER)')
axs[0, 1].set_xlabel('SNR (dB)')
axs[0, 1].set_ylabel('BER')
axs[0, 1].grid(True)

# Energía por bit vs SNR
axs[1, 0].plot(snr_range_db, energy_per_bit, 'k-d')
axs[1, 0].set_title('Consumo Energético por Bit')
axs[1, 0].set_xlabel('SNR (dB)')
```

```
axs[1, 0].set_ylabel('Energía por bit (J/bit)')
axs[1, 0].grid(True)

# Constelación recibida (último SNR)
axs[1,                        1].scatter(rx_equalized_last.real.flatten(),
rx_equalized_last.imag.flatten(), color='purple', s=10)
axs[1,  1].set_title(f'Constelación  Recibida  (SNR  =  {snr_range_db[-1]}
dB)')
axs[1, 1].set_xlabel('In-phase')
axs[1, 1].set_ylabel('Quadrature')
axs[1, 1].grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()

# === TABLAS DE RESULTADOS ===
print("\n=====================================")
print("TABLA DE RESULTADOS: BER y Capacidad")
print("=====================================")
results_df = pd.DataFrame({
    "SNR_dB": snr_range_db,
    "Capacidad_bpsHz": capacity,
    "BER": ber
})
print(results_df.to_string(index=False))

print("\n=====================================")
print("TABLA DE RESULTADOS: Energía por bit")
print("=====================================")
energy_df = pd.DataFrame({
    "SNR_dB": snr_range_db,
    "Energia_por_bit_J": energy_per_bit
})
print(energy_df.to_string(index=False))

# Guardar en CSV y LaTeX
results_df.to_csv("Resultados_BER_Capacidad.csv", index=False)
energy_df.to_csv("Resultados_Energia.csv", index=False)
with open("Resultados_BER_Capacidad.tex", "w") as f:
    f.write(results_df.to_latex(index=False, float_format="%.4f"))
with open("Resultados_Energia.tex", "w") as f:
    f.write(energy_df.to_latex(index=False, float_format="%.4e"))
```

```
# Interpretación automática
print("\nInterpretación del escenario urbano 5G:")
print("- La capacidad aumenta significativamente con el SNR (MIMO masivo).")
print("- El BER cae drásticamente a partir de 15 dB, garantizando confiabilidad.")
print("- El consumo energético por bit disminuye con el SNR (mayor eficiencia).")
print("- 16x16 MIMO y 400 MHz son claves para entornos densos en 5G mmWave.")
print("=====================================")
# === Gráfica adicional: Consumo energético por bit vs SNR ===
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(snr_range_db, energy_per_bit, 'm-o', linewidth=2, markersize=6)
plt.title('Simulación Red Urbana Densa (5G) – Consumo Energético por Bit', fontsize=14)
plt.xlabel('SNR (dB)', fontsize=12)
plt.ylabel('Energía por bit (J/bit)', fontsize=12)
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.savefig('Consumo_Energetico_por_Bit_5G.png', dpi=300)
plt.show()
```

Anexo 5. Python escenario 2: red IoT en zona rural código

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

# === CONFIGURACIÓN DEL ESCENARIO ===
print("=== SIMULACIÓN DE RED IoT RURAL CON MIMO 4x4 Y CANAL RICIAN ===\n")

# Parámetros del sistema
num_tx = 4
num_rx = 4
mod_order = 4  # QPSK
bits_per_symbol = int(np.log2(mod_order))
num_symbols = 1000
snr_range_db = np.arange(-5, 16, 5)
num_iter = 100
bandwidth = 20e6  # Ajustado a 20 MHz
tx_power_dbm = 10
tx_power_watts = 10 ** ((tx_power_dbm - 30) / 10)
k_factor = 10  # Dominancia LoS

# Mostrar parámetros
print("Parámetros del sistema:")
print(f" - Antenas Tx: {num_tx}, Rx: {num_rx}")
print(f" - Modulación: {mod_order}-QAM ({bits_per_symbol} bits/símbolo)")
print(f" - Símbolos por iteración: {num_symbols}")
print(f" - SNR (dB): {snr_range_db}")
print(f" - Potencia Tx: {tx_power_dbm} dBm = {tx_power_watts:.4f} W")
print(f" - Ancho de banda: {bandwidth/1e6} MHz")
print(f" - Canal Rician con K = {k_factor}\n")

# Inicialización
capacity = []
ber = []
energy_per_bit = []
rx_equalized_last = None

# Constelación QPSK normalizada
qam_points = np.array([1+1j, 1-1j, -1+1j, -1-1j])
qam_points /= np.sqrt((np.abs(qam_points) ** 2).mean())
```

```
# Simulación
for snr_db in snr_range_db:
    snr_linear = 10 ** (snr_db / 10)
    noise_power = 1 / snr_linear
    ber_accum = 0
    capacity_accum = 0

    for _ in range(num_iter):
        # Canal Rician: componente LoS + difuso
        H_los = np.ones((num_rx, num_tx)) * np.sqrt(k_factor / (k_factor
+ 1))
              H_nlos   =   (np.random.randn(num_rx,   num_tx)   +   1j   *
np.random.randn(num_rx, num_tx)) / np.sqrt(2 * (k_factor + 1))
        H = H_los + H_nlos

        # Datos y modulación
          data_tx  =  np.random.randint(0,  mod_order,  size=(num_symbols,
num_tx))
        tx_signal = qam_points[data_tx].T

        # Transmisión
        rx_signal = H @ tx_signal
                    noise    =    np.sqrt(noise_power    /    2)    *
(np.random.randn(*rx_signal.shape)           +           1j           *
np.random.randn(*rx_signal.shape))
        rx_noisy = rx_signal + noise

        # Igualación ZF
        H_inv = np.linalg.pinv(H)
        rx_equalized = H_inv @ rx_noisy
        rx_equalized = rx_equalized.T

        # Demodulación
              data_rx   =   np.argmin(np.abs(rx_equalized[...,   None]   -
qam_points[None, None, :])**2, axis=-1)

        # BER
        bit_errors = np.sum(data_tx != data_rx)
        total_bits = num_symbols * num_tx * bits_per_symbol
        ber_accum += bit_errors / total_bits

        # Capacidad
        term = np.eye(num_rx) + (snr_linear / num_tx) * (H @ H.conj().T)
```

```
        capacity_accum += np.log2(np.linalg.det(term).real)

        # Guardar constelación del último SNR
        if snr_db == snr_range_db[-1]:
            rx_equalized_last = rx_equalized

    # Promedios
    ber_mean = ber_accum / num_iter
    cap_mean = capacity_accum / num_iter
    ber.append(ber_mean)
    capacity.append(cap_mean)

    # Energía por bit
    rate = cap_mean * bandwidth
    energy_per_bit.append(tx_power_watts / rate)

     print(f"SNR = {snr_db} dB -> BER = {ber_mean:.2e} | Capacidad =
{cap_mean:.2f} bps/Hz | E_bit = {energy_per_bit[-1]:.2e} J/bit")

# === VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS ===
fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(12, 8))

# Capacidad del canal
axs[0, 0].plot(snr_range_db, capacity, 'b-o')
axs[0, 0].set_title('Capacidad del Canal MIMO Rician (bps/Hz)')
axs[0, 0].set_xlabel('SNR (dB)')
axs[0, 0].set_ylabel('Capacidad')
axs[0, 0].grid(True)

# BER
axs[0, 1].semilogy(snr_range_db, ber, 'r-s')
axs[0, 1].set_title('Tasa de Error de Bits (BER)')
axs[0, 1].set_xlabel('SNR (dB)')
axs[0, 1].set_ylabel('BER')
axs[0, 1].grid(True)

# Energía por bit vs SNR
axs[1, 0].plot(snr_range_db, energy_per_bit, 'k-d')
axs[1, 0].set_title('Consumo Energético por Bit')
axs[1, 0].set_xlabel('SNR (dB)')
axs[1, 0].set_ylabel('Energía por bit (J/bit)')
axs[1, 0].grid(True)
```

```
# Constelación recibida
axs[1,                        1].scatter(rx_equalized_last.real.flatten(),
rx_equalized_last.imag.flatten(), color='purple', s=10)
axs[1,  1].set_title(f'Constelación  Recibida  (SNR  =  {snr_range_db[-1]}
dB)')
axs[1, 1].set_xlabel('In-phase')
axs[1, 1].set_ylabel('Quadrature')
axs[1, 1].grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()

# === Gráfica adicional: Consumo energético por bit ===
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(snr_range_db, energy_per_bit, 'm-o', linewidth=2, markersize=6)
plt.title('Simulación  IoT  Rural  -  Consumo  Energético  por  Bit',
fontsize=14)
plt.xlabel('SNR (dB)', fontsize=12)
plt.ylabel('Energía por bit (J/bit)', fontsize=12)
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.savefig('Consumo_Energetico_por_Bit_IoT.png', dpi=300)
plt.show()

# === TABLAS DE RESULTADOS ===
print("\n=====================================")
print("TABLA DE RESULTADOS: BER y Capacidad")
print("=====================================")
results_df = pd.DataFrame({
    "SNR_dB": snr_range_db,
    "Capacidad_bpsHz": capacity,
    "BER": ber
})
print(results_df.to_string(index=False))

print("\n=====================================")
print("TABLA DE RESULTADOS: Energía por bit (IoT Rural)")
print("=====================================")
energy_df = pd.DataFrame({
    "SNR_dB": snr_range_db,
    "Energia_por_bit_J": energy_per_bit
})
print(energy_df.to_string(index=False))
```

```
# Guardar en CSV y LaTeX
results_df.to_csv("Resultados_IoT_BER_Capacidad.csv", index=False)
energy_df.to_csv("Resultados_IoT_Energia.csv", index=False)
with open("Resultados_IoT_BER_Capacidad.tex", "w") as f:
    f.write(results_df.to_latex(index=False, float_format="%.4f"))
with open("Resultados_IoT_Energia.tex", "w") as f:
    f.write(energy_df.to_latex(index=False, float_format="%.4e"))

# Interpretación automática
print("\nInterpretación del escenario IoT rural:")
print("- El canal Rician con K alto mejora la robustez en entornos LoS.")
print("- La capacidad crece con el SNR, aunque limitada por menor número
de antenas.")
print("- El BER se reduce significativamente a partir de 5 dB, garantizando
confiabilidad.")
print("- El consumo energético por bit disminuye con el aumento del SNR,
optimizando eficiencia.")
print("=====================================")
```

Anexo 6. Python escenario 3: red vehicular (V2X) código

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

# === ESCENARIO 3: RED VEHICULAR V2X CON MOVILIDAD (16-QAM, BW=20 MHz) ===
print("=== SIMULACIÓN DE RED VEHICULAR V2X CON MOVILIDAD Y CANAL RAYLEIGH
===\n")

# Parámetros del sistema
num_tx = 8
num_rx = 8
mod_order = 16  # 16-QAM
bits_per_symbol = int(np.log2(mod_order))  # 4 bits/símbolo
num_symbols = 1000
snr_range_db = np.arange(0, 31, 5)
num_iter = 100
bandwidth = 20e6  # 20 MHz
tx_power_dbm = 23
tx_power_watts = 10 ** ((tx_power_dbm - 30) / 10)

# Parámetros de movilidad
velocity = 100 * (1000 / 3600)  # 100 km/h en m/s
frequency = 5.9e9  # Hz
doppler_shift = (frequency * velocity) / 3e8  # Hz

# Mostrar parámetros
print("Parámetros del sistema:")
print(f" - Antenas Tx: {num_tx}, Rx: {num_rx}")
print(f" - Modulación: {mod_order}-QAM ({bits_per_symbol} bits/símbolo)")
print(f" - Símbolos por iteración: {num_symbols}")
print(f" - SNR (dB): {snr_range_db}")
print(f" - Potencia Tx: {tx_power_dbm} dBm = {tx_power_watts:.4f} W")
print(f" - Ancho de banda: {bandwidth/1e6:.1f} MHz")
print(f"  - Velocidad: {velocity:.2f} m/s, Doppler: {doppler_shift:.2f}
Hz\n")

# ========================
# Constelación 16-QAM normalizada (potencia unitaria)
# ========================
```

```
levels = np.array([-3, -1, 1, 3], dtype=float)
const_points = np.array([x + 1j*y for x in levels for y in levels],
dtype=np.complex128)
const_points     /=     np.sqrt(np.mean(np.abs(const_points)**2))      #
normalización a potencia 1

def mod_symbols(idx_matrix):
    """
    idx_matrix: enteros en [0, 15] con shape (num_symbols, num_tx)
    devuelve: símbolos complejos shape (num_symbols, num_tx)
    """
    return const_points[idx_matrix]

def demod_symbols(rx_symbols):
    """
    rx_symbols: símbolos complejos shape (num_symbols, num_tx)
    devuelve: índices 0..15 por mínima distancia
    """
    rx = rx_symbols.reshape(-1)
    d2 = np.abs(rx[:, None] - const_points[None, :])**2
    idx = np.argmin(d2, axis=1)
    return idx.reshape(rx_symbols.shape[0], rx_symbols.shape[1])

def idx_to_bits(idx_matrix):
    """
    Mapeo binario directo de 0..15 -> 4 bits
    """
    return ((idx_matrix[..., None] >> np.arange(bits_per_symbol)[::-1]) &
1).astype(np.uint8)

# Inicialización
capacity = []
ber = []
energy_per_bit = []
rx_equalized_last = None

# Simulación
np.random.seed(123)  # reproducibilidad

for snr_db in snr_range_db:
    snr_linear = 10 ** (snr_db / 10)
    noise_power = 1 / snr_linear
    ber_accum = 0.0
```

```
    capacity_accum = 0.0

    for _ in range(num_iter):
        # Canal Rayleigh con movilidad (fase Doppler simplificada)
       H = (np.random.randn(num_rx, num_tx) + 1j * np.random.randn(num_rx,
num_tx)) / np.sqrt(2)
          H_doppler = H * np.exp(1j * 2 * np.pi * doppler_shift *
np.random.rand())

        # Datos y modulación 16-QAM
        data_tx_idx = np.random.randint(0, mod_order, size=(num_symbols,
num_tx))
        tx_signal = mod_symbols(data_tx_idx).T  # (num_tx, num_symbols)

        # Transmisión
        rx_signal = H_doppler @ tx_signal
                    noise    =    np.sqrt(noise_power    /    2)    *
(np.random.randn(*rx_signal.shape)           +           1j           *
np.random.randn(*rx_signal.shape))
        rx_noisy = rx_signal + noise

        # Igualación ZF (puedes cambiar a MMSE si quieres menor BER en SNR
bajos)
        H_inv = np.linalg.pinv(H_doppler)
        rx_equalized = (H_inv @ rx_noisy).T  # (num_symbols, num_tx)

        # Demodulación por mínima distancia
        data_rx_idx = demod_symbols(rx_equalized)

        # BER (a nivel de bits)
        tx_bits = idx_to_bits(data_tx_idx)  # (num_symbols, num_tx, 4)
        rx_bits = idx_to_bits(data_rx_idx)
        bit_errors = np.sum(tx_bits != rx_bits)
        total_bits = num_symbols * num_tx * bits_per_symbol
        ber_accum += bit_errors / total_bits

        # Capacidad MIMO teórica: C = log2 det(I + (SNR/Nt) * H H^H)
          term = np.eye(num_rx) + (snr_linear / num_tx) * (H_doppler @
H_doppler.conj().T)
        capacity_accum += np.log2(np.linalg.det(term).real)

        # Guardar constelación del último SNR
        if snr_db == snr_range_db[-1]:
```

```
            rx_equalized_last = rx_equalized

    # Promedios
    ber_mean = ber_accum / num_iter
    cap_mean = capacity_accum / num_iter
    ber.append(ber_mean)
    capacity.append(cap_mean)

    # Energía por bit
    rate = cap_mean * bandwidth
    energy_per_bit.append(tx_power_watts / rate)

     print(f"SNR = {snr_db} dB -> BER = {ber_mean:.2e} | Capacidad =
{cap_mean:.2f} bps/Hz | E_bit = {energy_per_bit[-1]:.2e} J/bit")

# === VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS ===
fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(12, 8))

# Capacidad del canal
axs[0, 0].plot(snr_range_db, capacity, 'b-o', lw=2)
axs[0, 0].set_title('Capacidad del Canal V2X (bps/Hz) — 16-QAM, BW=20
MHz')
axs[0, 0].set_xlabel('SNR (dB)')
axs[0, 0].set_ylabel('Capacidad (bps/Hz)')
axs[0, 0].grid(True)

# BER
axs[0, 1].semilogy(snr_range_db, ber, 'r-s', lw=2)
axs[0, 1].set_title('Tasa de Error de Bits (BER) — 16-QAM')
axs[0, 1].set_xlabel('SNR (dB)')
axs[0, 1].set_ylabel('BER')
axs[0, 1].grid(True, which='both')

# Energía por bit vs SNR
axs[1, 0].plot(snr_range_db, energy_per_bit, 'k-d', lw=2)
axs[1, 0].set_title('Consumo Energético por Bit — 16-QAM, BW=20 MHz')
axs[1, 0].set_xlabel('SNR (dB)')
axs[1, 0].set_ylabel('Energía por bit (J/bit)')
axs[1, 0].grid(True)

# Constelación recibida (estimada) en el último SNR
axs[1,                       1].scatter(rx_equalized_last.real.flatten(),
rx_equalized_last.imag.flatten(), color='purple', s=10, alpha=0.6)
```

```
axs[1, 1].set_title(f'Constelación Estimada (SNR = {snr_range_db[-1]} dB,
16-QAM)')
axs[1, 1].set_xlabel('In-phase')
axs[1, 1].set_ylabel('Quadrature')
axs[1, 1].grid(True)
axs[1, 1].set_aspect('equal', 'box')

plt.tight_layout()
plt.show()

# === Gráfica adicional: Consumo energético por bit ===
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(snr_range_db, energy_per_bit, 'm-o', linewidth=2, markersize=6)
plt.title('Simulación V2X - Consumo Energético por Bit (16-QAM, 20 MHz)',
fontsize=14)
plt.xlabel('SNR (dB)', fontsize=12)
plt.ylabel('Energía por bit (J/bit)', fontsize=12)
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.savefig('Consumo_Energetico_por_Bit_V2X_16QAM_20MHz.png', dpi=300)
plt.show()

# === TABLAS DE RESULTADOS ===
print("\n======================================")
print("TABLA DE RESULTADOS: BER y Capacidad (V2X, 16-QAM, 20 MHz)")
print("======================================")
results_df = pd.DataFrame({
    "SNR_dB": snr_range_db,
    "Capacidad_bpsHz": capacity,
    "BER": ber
})
print(results_df.to_string(index=False))

print("\n======================================")
print("TABLA DE RESULTADOS: Energía por bit (V2X, 16-QAM, 20 MHz)")
print("======================================")
energy_df = pd.DataFrame({
    "SNR_dB": snr_range_db,
    "Energia_por_bit_J": energy_per_bit
})
print(energy_df.to_string(index=False))

# Guardar en CSV y LaTeX
```

```
results_df.to_csv("Resultados_V2X_16QAM_20MHz_BER_Capacidad.csv",
index=False)
energy_df.to_csv("Resultados_V2X_16QAM_20MHz_Energia.csv", index=False)
with open("Resultados_V2X_16QAM_20MHz_BER_Capacidad.tex", "w") as f:
    f.write(results_df.to_latex(index=False, float_format="%.4f"))
with open("Resultados_V2X_16QAM_20MHz_Energia.tex", "w") as f:
    f.write(energy_df.to_latex(index=False, float_format="%.4e"))

# Interpretación automática
print("\nInterpretación del escenario V2X (16-QAM, 20 MHz):")
print("- La capacidad aumenta con el SNR, y al usar 16-QAM se observa
mayor eficiencia espectral.")
print("- El BER se reduce al crecer el SNR; 16-QAM exige SNR algo mayor
que QPSK para el mismo BER.")
print("- Con potencia fija, al aumentar C*BW (20 MHz), la energía por bit
disminuye.")
print("- Doppler (~%.1f Hz) se modela como rotación de fase simplificada
por snapshot." % doppler_shift)
print("=====================================")
```

Anexo 7. Código MATLAB Escenario Urbano 5G (MIMO 16×16)

```
clc; clear; close all;

%% PARÁMETROS DEL SISTEMA
numTx = 16; numRx = 16;
modOrder = 16; % 16-QAM (alta eficiencia espectral)
numSymbols = 1000;
snrRange = 0:5:30;
numIter = 100;
BW = 400e6; % 400 MHz (5G mmWave)
Pt_dBm = 30;
Pt_W = 10^((Pt_dBm - 30)/10);

%% INICIALIZACIÓN
ber = zeros(size(snrRange));
capacity = zeros(size(snrRange));
energy_per_bit = zeros(size(snrRange));

%% SIMULACIÓN PRINCIPAL
for snrIdx = 1:length(snrRange)
    SNR_dB = snrRange(snrIdx);
    SNR = 10^(SNR_dB/10);
    noisePower = 1 / SNR;
    berTemp = 0; capTemp = 0; ebitTemp = 0;

    for iter = 1:numIter
        % Canal Rayleigh
        H = (randn(numRx, numTx) + 1j*randn(numRx, numTx)) / sqrt(2);

        % Modulación 16-QAM
        dataTx = randi([0 modOrder-1], numSymbols, numTx);
        txSignal    =    qammod(dataTx,    modOrder,    'InputType',    'integer',
'UnitAveragePower', true).';

        % Transmisión
        rxSignal = H * txSignal;
        noise     =     sqrt(noisePower/2)      *      (randn(size(rxSignal))     +
1j*randn(size(rxSignal)));
        rxNoisy = rxSignal + noise;

        % Igualación ZF
        rxEqualized = pinv(H) * rxNoisy;
        rxEqualized = rxEqualized.';

        % Demodulación
        dataRx   =   qamdemod(rxEqualized,   modOrder,   'OutputType',   'integer',
'UnitAveragePower', true);

        % BER
        [~, err] = biterr(dataTx, dataRx);
```

```
        berTemp = berTemp + err / (numSymbols * numTx);

        % Capacidad (bps/Hz)
        cap = log2(real(det(eye(numRx) + (SNR/numTx)*(H*H'))));
        capTemp = capTemp + cap;

        % Energía por bit
        rate = cap * BW; % tasa en bps
        ebitTemp = ebitTemp + Pt_W / rate;
    end

    ber(snrIdx) = berTemp / numIter;
    capacity(snrIdx) = capTemp / numIter;
    energy_per_bit(snrIdx) = ebitTemp / numIter;
end
%% GRAFICAR RESULTADOS
% 1. BER vs SNR
figure;
semilogy(snrRange, ber, '-s', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER');
title('BER vs SNR - Escenario Urbano 5G (MIMO 16x16)');
grid on;
saveas(gcf,'BER_vs_SNR_5G.png'); saveas(gcf,'BER_vs_SNR_5G.eps');
% 2. Capacidad/Eficiencia espectral vs SNR
figure;
plot(snrRange, capacity, '-o', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Capacidad / Eficiencia espectral (bits/s/Hz)');
title('Capacidad vs SNR - Escenario Urbano 5G (MIMO 16x16)');
grid on;
saveas(gcf,'Capacidad_vs_SNR_5G.png'); saveas(gcf,'Capacidad_vs_SNR_5G.eps');
% 3. Consumo energético vs SNR
figure;
plot(snrRange, energy_per_bit, 'k-d', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Energía por bit (J/bit)');
title('Consumo energético vs SNR - Escenario Urbano 5G (MIMO 16x16)');
grid on;
saveas(gcf,'Energia_vs_SNR_5G.png'); saveas(gcf,'Energia_vs_SNR_5G.eps');
%% IMPRIMIR TABLA EN CONSOLA
fprintf('\n=== Resultados Escenario Urbano 5G ===\n');
fprintf('%-8s                    %-20s                    %-15s                    %-
15s\n','SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER','Energia_Joule');
for i = 1:length(snrRange)
    fprintf('%-8d  %-20.4f  %-15.6f  %-15.6e\n',  snrRange(i),  capacity(i),  ber(i),
energy_per_bit(i));
end
%% EXPORTAR RESULTADOS A CSV
T = table(snrRange.', capacity.', ber.', energy_per_bit.', ...
    'VariableNames', {'SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER','Energia_Joule'});
writetable(T,'Resultados_Urbano5G.csv');
disp('☑ Gráficas generadas y resultados exportados a Resultados_Urbano5G.csv');
```

Anexo 8. Código MATLAB Escenario IoT Rural (MIMO 4×4)

```
clc; clear; close all;

%% === PARÁMETROS DEL SISTEMA ===
disp('Configurando simulación para red IoT rural...');
numTx = 4; numRx = 4;              % MIMO 4x4
modOrder = 4;                      % QPSK (4-QAM)
bitsPerSymbol = log2(modOrder);
numSymbols = 1000;
snrRange = -5:5:15;                % Rango de SNR (-5 a 15 dB)
numIter = 100;
Pt_dBm = 10;                       % Potencia de transmisión (dBm)
Pt_W = 10^((Pt_dBm - 30)/10);      % Conversión a Watts
BW = 20e6;                         % Ancho de banda ajustado: 20 MHz
K = 10;                            % Factor K para canal Rician (LoS dominante)

%% === INICIALIZACIÓN DE VARIABLES ===
ber = zeros(size(snrRange));
capacity = zeros(size(snrRange));
energy_per_bit = zeros(size(snrRange));

%% === SIMULACIÓN PRINCIPAL ===
disp('Iniciando simulación IoT rural...');
for snrIdx = 1:length(snrRange)
    SNR_dB = snrRange(snrIdx);
    SNR = 10^(SNR_dB/10);
    noisePower = 1 / SNR;
    berTemp = 0; capTemp = 0; ebitTemp = 0;

    for iter = 1:numIter
        % Canal Rician (LoS + NLoS)
        H = sqrt(K/(K+1)) * ones(numRx, numTx) + ...
            sqrt(1/(K+1)) * (randn(numRx, numTx) + 1j*randn(numRx, numTx))/sqrt(2);

        % Datos y modulación QPSK
        dataTx = randi([0 modOrder-1], numSymbols, numTx);
        txSignal    =    qammod(dataTx,    modOrder,    'InputType',    'integer',
'UnitAveragePower', true).';
        % Transmisión y ruido
        rxSignal = H * txSignal;
        noise     =     sqrt(noisePower/2)     *     (randn(size(rxSignal))     +
1j*randn(size(rxSignal)));
        rxNoisy = rxSignal + noise;

        % Igualación ZF
        rxEqualized = pinv(H) * rxNoisy;
        rxEqualized = rxEqualized.';

        % Demodulación
```

```
        dataRx = qamdemod(rxEqualized, modOrder, 'OutputType', 'integer',
'UnitAveragePower', true);

        % BER
        [~, err] = biterr(dataTx, dataRx);
        berTemp = berTemp + err / (numSymbols * numTx * bitsPerSymbol);

        % Capacidad
        C = log2(real(det(eye(numRx) + (SNR/numTx)*(H*H'))));
        capTemp = capTemp + C;

        % Energía por bit
        R = C * BW;
        ebitTemp = ebitTemp + Pt_W / R;
    end
    ber(snrIdx) = berTemp / numIter;
    capacity(snrIdx) = capTemp / numIter;
    energy_per_bit(snrIdx) = ebitTemp / numIter;
end
%% === GRÁFICAS ===
figure;
plot(snrRange, capacity, 'b-o', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Capacidad (bps/Hz)');
title('Capacidad vs SNR - Escenario IoT Rural');
grid on;
saveas(gcf,'Capacidad_vs_SNR_IoT_Rural.png');
figure;
semilogy(snrRange, ber, 'r-s', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER');
title('BER vs SNR - Escenario IoT Rural');
grid on;
saveas(gcf,'BER_vs_SNR_IoT_Rural.png');
figure;
plot(snrRange, energy_per_bit, 'k-d', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Energía por bit (J/bit)');
title('Consumo energético vs SNR - Escenario IoT Rural');
grid on;
saveas(gcf,'Energia_vs_SNR_IoT_Rural.png');
%% === TABLA DE RESULTADOS ===
fprintf('\n=== Resultados Escenario IoT Rural ===\n');
fprintf('%-8s                    %-20s                    %-15s                    %-
15s\n','SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER','Energia_Joule');
for i = 1:length(snrRange)
    fprintf('%-8d  %-20.4f  %-15.6f  %-15.6e\n',  snrRange(i),  capacity(i),  ber(i),
energy_per_bit(i));
end
%% === EXPORTAR A CSV ===
T = table(snrRange.', capacity.', ber.', energy_per_bit.', ...
    'VariableNames', {'SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER','Energia_Joule'});
writetable(T,'Resultados_IoT_Rural.csv');
disp('☑ Gráficas generadas y resultados exportados a Resultados_IoT_Rural.csv');
```

Anexo 9. Código MATLAB Escenario Vehicular V2X (MIMO 8×8)

```
clc; clear; close all;

%% === PARÁMETROS DEL SISTEMA ===
disp('Configurando simulación para red vehicular V2X...');
numTx = 8; numRx = 8;              % MIMO 8x8
modOrder = 16;                     % 16-QAM
bitsPerSymbol = log2(modOrder);
numSymbols = 1000;
snrRange = 0:5:30;                 % Rango de SNR (0 a 30 dB)
numIter = 100;
Pt_dBm = 23;                       % Potencia de transmisión (dBm)
Pt_W = 10^((Pt_dBm - 30)/10);      % Conversión a Watts
BW = 20e6;                         % Ancho de banda ajustado: 20 MHz
fc = 5.9e9;                        % Frecuencia portadora
v_kmh = 100; v_ms = v_kmh / 3.6;   % Velocidad en m/s
c = 3e8;                           % Velocidad de la luz
dopplerShift = (fc * v_ms) / c;    % Desplazamiento Doppler
disp(['Velocidad: ', num2str(v_ms), ' m/s | Doppler: ', num2str(dopplerShift), '
Hz']);

%% === INICIALIZACIÓN DE VARIABLES ===
ber = zeros(size(snrRange));
capacity = zeros(size(snrRange));
energy_per_bit = zeros(size(snrRange));
rxConstellationBefore = [];
rxConstellationAfter = [];

%% === SIMULACIÓN PRINCIPAL ===
disp('Iniciando simulación V2X...');
for snrIdx = 1:length(snrRange)
    SNR_dB = snrRange(snrIdx);
    SNR = 10^(SNR_dB/10);
    noisePower = 1 / SNR;
    berTemp = 0; capTemp = 0; ebitTemp = 0;

    for iter = 1:numIter
        % Canal Rayleigh con movilidad (aprox)
        H = (randn(numRx,numTx)+1j*randn(numRx,numTx))/sqrt(2);

        % Datos y modulación 16-QAM
        dataTx = randi([0 modOrder-1], numSymbols, numTx);
        txSignal              =              qammod(dataTx,              modOrder,
'InputType','integer','UnitAveragePower',true).';

        % Guardar constelación antes del canal
        if snrIdx == 1 && iter == 1
            rxConstellationBefore = txSignal;
        end
```

```
        % Transmisión y ruido
        rxSignal = H * txSignal;
        noise                                                                    =
sqrt(noisePower/2)*(randn(size(rxSignal))+1j*randn(size(rxSignal)));
        rxNoisy = rxSignal + noise;

        % Guardar constelación después del canal (último SNR)
        if snrIdx == length(snrRange) && iter == numIter
            rxConstellationAfter = rxNoisy;
        end

        % Igualación ZF
        rxEqualized = pinv(H) * rxNoisy;
        rxEqualized = rxEqualized.';

        % Demodulación
        dataRx              =              qamdemod(rxEqualized,              modOrder,
'OutputType','integer','UnitAveragePower',true);

        % BER
        [~, err] = biterr(dataTx, dataRx);
        berTemp = berTemp + err/(numSymbols*numTx*bitsPerSymbol);

        % Capacidad
        C = log2(real(det(eye(numRx)+(SNR/numTx)*(H*H'))));
        capTemp = capTemp + C;

        % Energía por bit
        R = C * BW;
        ebitTemp = ebitTemp + Pt_W / R;
    end
    ber(snrIdx) = berTemp / numIter;
    capacity(snrIdx) = capTemp / numIter;
    energy_per_bit(snrIdx) = ebitTemp / numIter;
end

%% === GRÁFICAS INDIVIDUALES ===
figure;
plot(snrRange, capacity, 'b-o', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Capacidad (bps/Hz)');
title('Capacidad vs SNR - Escenario V2X');
grid on;
saveas(gcf,'Capacidad_vs_SNR_V2X.png');
figure;
semilogy(snrRange, ber, 'r-s', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER');
title('BER vs SNR - Escenario V2X');
grid on;
saveas(gcf,'BER_vs_SNR_V2X.png');
figure;
plot(snrRange, energy_per_bit, 'k-d', 'LineWidth', 2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Energía por bit (J/bit)');
```

```
title('Consumo energético vs SNR - Escenario V2X');
grid on;
saveas(gcf,'Energia_vs_SNR_V2X.png');

%% === IMAGEN RESUMEN CON 4 SUBGRÁFICAS ===
figure('Position',[100 100 1000 700]);
subplot(2,2,1);
scatter(real(rxConstellationBefore(:)), imag(rxConstellationBefore(:)), 'filled');
title('Constelación 16-QAM (Antes del Canal)'); xlabel('In-phase');
ylabel('Quadrature'); grid on;

subplot(2,2,2);
scatter(real(rxConstellationAfter(:)), imag(rxConstellationAfter(:)), 'filled');
title(['Constelación 16-QAM (Después del Canal, SNR = ' num2str(snrRange(end)) '
dB)']);
xlabel('In-phase'); ylabel('Quadrature'); grid on;

subplot(2,2,3);
semilogy(snrRange, ber, 'b-s','LineWidth',2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('BER'); title('Tasa de Error de Bits (BER)'); grid on;

subplot(2,2,4);
plot(snrRange, capacity, 'b-o','LineWidth',2);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Capacidad (bps/Hz)'); title('Capacidad del Canal MIMO
8x8'); grid on;
saveas(gcf,'Resumen_V2X.png');
%% === TABLA DE RESULTADOS ===
fprintf('\n=== Resultados Escenario V2X ===\n');
fprintf('%-8s %-20s %-15s %-
15s\n','SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER','Energia_Joule');
for i = 1:length(snrRange)
    fprintf('%-8d %-20.4f %-15.6f %-15.6e\n', snrRange(i), capacity(i), ber(i),
energy_per_bit(i));
end
%% === EXPORTAR A CSV ===
T = table(snrRange.', capacity.', ber.', energy_per_bit.', ...
    'VariableNames', {'SNR_dB','Capacidad_bpsHz','BER','Energia_Joule'});
writetable(T,'Resultados_V2X.csv');
disp('☑ Gráficas generadas y resultados exportados a Resultados_V2X.csv');

%% === INTERPRETACIÓN AUTOMÁTICA ===
disp('Interpretación del escenario V2X:');
disp('- La capacidad aumenta con el SNR, alcanzando valores altos en entornos
vehiculares.');
disp('- El BER disminuye significativamente a partir de 15 dB, asegurando
confiabilidad.');
disp('- El consumo energético por bit decrece al aumentar el SNR, mejorando
eficiencia.');
disp('- MIMO 8x8 es clave para soportar movilidad y altas velocidades en redes V2X.');
```