



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES**

TEMA:

**Análisis comparativo de la eficiencia de redes 4g y 5g
mediante computación neuromórfica en MATLAB**

AUTOR:

Del Pozo Garay, Andrea Alma

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

Ing. Ubilla González Ricardo Xavier, M.Sc.

**Guayaquil, Ecuador
3 de septiembre del 2024**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Del Pozo Garay, Andrea Alma** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES**.

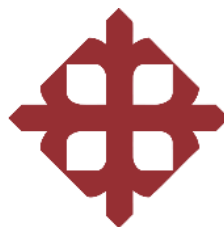
TUTOR

f. _____
Ing. Ubilla González Ricardo Xavier, M.Sc.

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____
Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo. PhD.

Guayaquil, a los 3 días del mes de septiembre del año 2024



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Del Pozo Garay, Andrea Alma**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Análisis comparativo de la eficiencia de redes 4g y 5g mediante computación neuromórfica en MATLAB**, previo a la obtención del título de **Ingeniera en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 3 días del mes de septiembre del año 2024

EL AUTOR:

f. Del Pozo Garay
Del Pozo Garay, Andrea Alma



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Del Pozo Garay, Andrea Alma**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Análisis comparativo de la eficiencia de redes 4g y 5g mediante computación neuromórfica en MATLAB**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 3 días del mes de septiembre del año 2024

EL AUTOR:

f. *Del Pozo Garay*
Del Pozo Garay, Andrea Alma



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR
INFORME SOFTWARE ANTIPLAGIO
COMPILATIO

 CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

Trabajo de Titulación segunda
revisión

1%
Textos
sospechosos

1% Similitudes
0% similitudes entre comillas
< 1% entre las fuentes mencionadas
4% Idiomas no reconocidos (ignorado)
13% Textos potencialmente generados por IA (ignorado)

Nombre del documento: Trabajo de Titulación segunda revision.docx
ID del documento: f7da4d82f238c9f9795d2f0b038f413661ef172b
Tamaño del documento original: 1,79 MB
Autores: []

Depositante: Ricardo Xavier Ubilla Gonzalez
Fecha de depósito: 22/8/2024
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 23/8/2024

Número de palabras: 20.514
Número de caracteres: 139.995

Ubicación de las similitudes en el documento:

Reporte Compilatio del trabajo de titulación de la Carrera TELECOMUNICACIONES denominado: **“Análisis comparativo de la eficiencia de redes 4g y 5g mediante computación neuromórfica en MATLAB.”**, del estudiante Del Pozo, Andrea Alma se encuentra al 01% de coincidencias.

Atentamente,

Ing. Ubilla Gonzalez Ricardo Xavier, M.Sc.

DOCENTE-TUTOR

Agradecimiento

El primer agradecimiento que me permito dar en este trabajo es a Dios por mantenerme firme en mis convicciones y fortalecer todos los días este entusiasmo por culminar este recorrido bastante grande en periodos de algunos años pero que al fin tendrá un cierre satisfactorio, también debo agradecer eternamente a los maestros y mentores que han sabido guiarme con consejos y contribuido a la formación de unas sólidas bases de conocimiento hasta llegar al podio máximo de mi crecimiento como profesional. Y agradezco a mi familia por siempre ser mi apoyo y el pilar fundamental moral y ético muy necesario para saber enfrentar todos los retos que se han presentado en el presente y a futuro.

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mi hija porque durante todo el camino de su vida me ha ayudado a aprender muchas cosas como por ejemplo la flexibilidad y el amor, ya que sin esos factores la disciplina no representa mucho, también me ha enseñado que es necesario vivir el ahora para disfrutar la vida, la tolerancia como base de respeto hacia uno mismo y hacia los demás y así muchas cosas que realmente han aportado en mi desarrollo como ser humano. A mi madre por enseñarme a valorar cada instante de la vida y ser fuente de motivación y fuerza que fundamentalmente me guiaron en la culminación de esta etapa. Debo dedicar también este trabajo a mis mascotas porque son la fortaleza que me ha ayudado a aguantar días enteros bastante complicados y mejorado mi estado de ánimo.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL
DESARROLLO

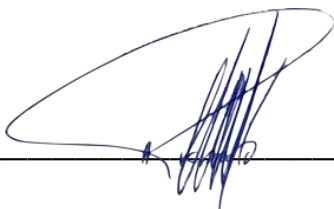
CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f.  _____


Ing. Bohórquez Escobar Celso Bayardo., PhD.

DIRECTOR DE CARRERA

f.  _____

Ing. Ubilla Gonzales Ricardo Xavier, M.Sc.

COORDINADOR DEL ÁREA

f.  _____

Ing. Bohórquez Heras Daniel Bayardo, M.Sc.

OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: CONSIDERACIONES GENERALES	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Planteamiento del Problema	5
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo General.....	6
1.5.2 Objetivos Específicos.....	6
1.6 Metodología de la Investigación	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Desarrollo y Mejoras en las Redes de Telecomunicaciones LTE	7
2.1.1. Origen y Progreso de la Tecnología LTE	7
2.1.2. Innovaciones Clave en LTE: LTE-Advanced y LTE-Advanced Pro 8	
2.1.3. Impacto de las Innovaciones en el Rendimiento de LTE	10
2.2. Redes 5G y sus Características	11
2.2.1. Definición y Evolución de la Tecnología 5G	11
2.2.2. Avances en la Tecnología 5G	13
2.2.3. Impacto de 5G en el Rendimiento y Capacidad de las Redes. 15	
2.3. Computación Neuromórfica en Telecomunicaciones	16
2.3.1. Definición y Principios de la Computación Neuromórfica	16
2.3.2. Avances y Aplicaciones en Telecomunicaciones	17
2.3.3. Comparación con Métodos Tradicionales de Procesamiento.. 19	
2.4. Eficiencia Energética en Redes de Telecomunicaciones.....	20
2.4.1. Definición y Relevancia de la Eficiencia Energética	20
2.4.2. Métodos de Medición y Factores que Afectan la Eficiencia Energética	21
2.4.3. Impacto de la Eficiencia Energética en Redes 4G y 5G	22
2.5. Simulaciones en MATLAB para Redes de Telecomunicaciones.....	24

2.5.1.	Utilización de MATLAB para la Simulación de Redes de Telecomunicaciones	24
2.5.2.	Herramientas y Métodos de MATLAB Específicos para 4G, 5G y Computación Neuromórfica	25
2.5.3.	Ventajas y Desafíos de Utilizar MATLAB para Simulaciones de Redes	26
2.6.	Estrategias de Mitigación y Optimización en Redes LTE y 5G	28
2.6.1.	Técnicas de Mitigación: Beamforming y Cancelación de Interferencia.....	28
2.6.2.	Efectos de las Técnicas de Mitigación en la Eficiencia Energética	29
2.6.3.	Beneficios de las Estrategias de Mitigación en Redes LTE y 5G	31
CAPÍTULO 3: DISEÑO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS ...		33
3.1.	Introducción.....	33
3.1.1.	Importancia de la Simulación y el Análisis Comparativo	34
3.2.	Diseño y Simulación de Modelos de Redes 4G y 5G	34
3.2.1.	Metodología de Simulación.....	34
3.2.1.1.	Selección de Herramientas de Simulación.....	34
3.2.1.1.1.	Descripción de las Herramientas	34
3.2.1.1.2.	Razones de Elección	34
3.2.1.2.	Parámetros de Simulación	35
3.2.1.2.1.	Relación Señal a Ruido (SNR).....	35
3.2.1.2.2.	Número de Bits Transmitidos	35
3.2.1.2.3.	Número de Ejecuciones.....	36
3.2.1.3.	Proceso de Simulación	36
3.2.1.3.1.	Transmisión y Recepción de Datos.....	36
3.2.1.4.	Modelo de Simulación.....	37
3.2.1.4.1.	Presentación del Modelo.....	37
3.2.2.	Resultados de Simulación.....	42
3.2.2.1.	Gráficos y Tablas	42
3.2.2.1.1.	Visualización de Resultados	42
3.2.2.2.	Comparación de Resultados	45

3.2.2.2.1.	Rendimiento de 4G vs. 5G	45
3.2.3.	Análisis de Resultados.....	45
3.2.3.1.	Interpretación de Métricas.....	45
3.2.3.1.1.	BER (Bit Error Rate).....	47
3.2.3.1.2.	Tiempo de Procesamiento	47
3.2.3.1.3.	Latencia	47
3.2.3.2.	Identificación de Patrones.....	47
3.2.3.2.1.	Tendencias Observadas	47
3.2.3.2.2.	Condiciones Óptimas	47
3.2.3.3.	Conclusiones del Análisis	47
3.2.3.3.1.	Fortalezas y Debilidades	47
3.2.3.3.2.	Implicaciones para el Futuro	48
3.3.	Implementación de la Computación Neuromórfica	48
3.3.1.	Configuración de la Computación Neuromórfica	48
3.3.1.1.	Selección de la Arquitectura de la Red	48
3.3.1.1.1.	Descripción de la Arquitectura	48
3.3.1.2.	Entrenamiento de la Red	49
3.3.1.2.1.	Preparación de los Datos	49
3.3.1.2.2.	División de Datos	49
3.3.1.3.	Parámetros de Entrenamiento	50
3.3.1.4.	Evaluación de la Red	51
3.3.1.4.1.	Métricas de Evaluación	51
3.3.1.4.2.	Validación Cruzada.....	52
3.3.2.	Evaluación del Rendimiento.....	52
3.3.2.1.	Resultados del Rendimiento	52
3.3.2.1.1.	Precisión de la Clasificación.....	52
3.3.2.1.2.	Otras Métricas Relevantes	53
3.3.2.2.	Comparación con Métodos Tradicionales	55
3.3.2.2.1.	Rendimiento Comparativo.....	55
3.3.2.3.	Resultados de Simulación.....	57
3.3.3.	Impacto y Discusión.....	59
3.3.3.1.	Impacto en el Análisis de Redes	59
3.3.3.1.1.	Mejora en la Precisión.....	59

3.3.3.1.2.	Eficiencia en el Análisis.....	59
3.3.3.2.	Implicaciones Futuras	60
3.3.3.2.1.	Adopción en la Industria.....	60
3.3.3.2.2.	Desarrollo de Nuevas Aplicaciones.....	60
3.3.3.3.	Limitaciones y Desafíos	60
3.3.3.3.1.	Limitaciones	60
3.3.3.3.2.	Desafíos.....	60
3.3.3.3.3.	Posibles Soluciones	60
3.4.	Evaluación del Impacto en la Eficiencia Energética.....	61
3.4.1.	Metodología de Evaluación.....	61
3.4.1.1.	Parámetros de Evaluación	61
3.4.1.1.1.	Definición de Parámetros Clave.....	61
3.4.1.2.	Proceso de Evaluación	61
3.4.1.2.1.	Herramientas y Técnicas Utilizadas	61
3.4.1.2.2.	Procedimiento de Evaluación.....	62
3.4.2.	Resultados y Comparaciones	66
3.4.2.1.	Gráficos y Tablas	66
3.4.2.1.1.	Visualización de Resultados	66
3.4.2.2.	Comparación de Resultados	72
3.4.2.2.1.	Rendimiento Energético Comparativo.....	72
3.4.3.	Discusión de Resultados.....	72
3.4.3.1.	Interpretación de los Resultados.....	72
3.4.3.1.1.	Análisis Detallado del Consumo de Energía	72
3.4.3.1.2.	Implicaciones para el Diseño de Redes	72
3.4.3.2.	Conclusiones del Análisis	73
3.4.3.2.1.	Fortalezas y Debilidades	73
3.4.3.2.2.	Impacto en la Implementación de Redes	73
3.4.3.3.	Recomendaciones	73
3.4.3.3.1.	Mejora de la Eficiencia Energética	73
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		75
4.1.	Conclusiones.....	75
4.2.	Recomendaciones.....	76
BIBLIOGRAFÍAS		77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de Características entre las Redes 4G y 5G	14
Tabla 2. Avances en Tecnologías de Computación Neuromórfica y sus Aplicaciones en Telecomunicaciones	18
Tabla 3. Comparación de Consumo Energético y Avances Tecnológicos entre Redes 4G y 5G	23
Tabla 4. Ventajas y Desafíos de las Herramientas de Simulación en Telecomunicaciones.....	27
Tabla 5. Parámetros de Simulación para Comparativas de Desempeño en 4G y 5G	35
Tabla 6. Resultados y Análisis de Métricas de Rendimiento para Redes 4G y 5G	46
Tabla 7. Parámetros de Configuración para el Entrenamiento de Redes Neuronales en Telecomunicaciones.....	50
Tabla 8. Consumo de Energía por Bit Transmitido en Joules/Bit para Redes 4G y 5G en Diferentes SNR	69
Tabla 9. Consumo de Energía por Unidad de Tiempo en Watts para Redes 4G y 5G	70
Tabla 10. Eficiencia Energética de Componentes Específicos en Redes 4G y 5G	70
Tabla 11. Consumo Energético en Función del Volumen de Tráfico para Redes 4G y 5G	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de arquitectura de red móvil	8
Figura 2. Componentes Clave de la Arquitectura LTE y EPC	9
Figura 3. Arquitectura Future X de Nokia Bell Labs para la Utilización de Energía	11
Figura 4. Esquema de la Arquitectura de Red 5G	13
Figura 5. Implementación de Computación Neuromórfica Usando el Modelo Neuronal LIF con Aislante Mott	16
Figura 6. Proceso de Transmisión y Recepción en Sistemas OFDM	26
Figura 7. Flujo de Proceso para Simulación de Transmisión en Canal AWGN	37
Figura 8. Diagrama de Flujo del Proceso de Simulación y Comparación entre Tecnologías 4G y 5G	41
Figura 9. Comparación del Bit Error Rate (BER) en Función del SNR para Redes 4G y 5G	43
Figura 10. Comparación del Tiempo de Procesamiento en Función del SNR para Redes 4G y 5G	44
Figura 11. Comparación de la Latencia en Función del SNR para Redes 4G y 5G	44
Figura 12. Estructura de una Red Neuronal para Clasificación de Tecnologías de Red	53
Figura 13. Histograma de Errores para la Evaluación de Modelos en Telecomunicaciones.....	54
Figura 14. Correlaciones entre Objetivos y Salidas de la Red Durante Entrenamiento, Validación y Pruebas.....	55

Figura 15. Desempeño de Validación Óptimo a lo Largo de las Épocas de Entrenamiento.....	56
Figura 16. Progreso del Entrenamiento y Parámetros Clave Durante la Sesión	57
Figura 17. Estado del Entrenamiento: Evaluación de Parámetros Críticos a lo Largo de las Épocas.....	58
Figura 18. Comparación de Métricas Promedio para Redes 4G y 5G.....	59
Figura 19. Flujo de Proceso para la Evaluación del Consumo Energético en Comunicaciones Móviles.....	65
Figura 20. Comparación del Consumo de Energía por Bit Transmitido en Redes 4G y 5G a Diferentes Niveles de SNR.....	66
Figura 21. Comparación del Consumo de Energía por Unidad de Tiempo en Redes 4G y 5G	67
Figura 22. Comparación de la Eficiencia Energética de Componentes Específicos en Redes 4G y 5G.....	68

RESUMEN

El trabajo de integración curricular proporciona un análisis de rendimiento completo y detallado de los puertos 4G y 5G utilizando computación neuromórfica implementada en MATLAB. A través de una implementación práctica, el estudio muestra cómo la computación neuromórfica puede mejorar la eficiencia energética y la eficiencia de la transferencia de datos a dispositivos de alta calidad y bajo costo. Los estudios utilizan estándares de relación señal-ruido (SNR) para evaluar el rendimiento en factores clave como la tasa de error de bits (BER), el tiempo de procesamiento y la latencia. La investigación es de gran relevancia para la expansión de las redes 4G y el desarrollo de futuros productos 5G. Se utiliza un modelado detallado para centrarse en las diferencias significativas de rendimiento entre los beneficios de las dos soluciones. Este trabajo realiza importantes contribuciones al concepto y la formación de los teléfonos, proporcionando información valiosa para determinar la potencia y el potencial de rendimiento utilizando tecnologías avanzadas de inteligencia artificial. El análisis proporciona una comprensión clara de los beneficios y limitaciones de las restricciones 4G y 5G que impulsan el desarrollo de la tecnología móvil.

Palabras Claves: Redes 4G, Redes 5G, Computación Neuromórfica, MATLAB, Eficiencia Energética, Latencia, Tasa de Error de Bits.

Abstract

The curricular integration work provides a comprehensive and detailed performance analysis of 4G and 5G ports using neuromorphic computing implemented in MATLAB. Through practical implementation, the study shows how neuromorphic computing can improve energy efficiency and data transfer efficiency to high-quality, low-cost devices. Studies use signal-to-noise ratio (SNR) standards to evaluate performance on key factors such as bit error rate (BER), processing time, and latency. The research is of great relevance for the expansion of 4G networks and the development of future 5G products. Detailed modeling is used to focus on the significant performance differences between the benefits of the two solutions. This work makes important contributions to the concept and formation of phones, providing valuable information to determine power and performance potential using advanced artificial intelligence technologies. The analysis provides a clear understanding of the benefits and limitations of 4G and 5G restrictions driving the development of mobile technology.

Keywords: *4G Networks, 5G Networks, Neuromorphic Computing, MATLAB, Energy Efficiency, Latency, Bit Error Rate.*

CAPÍTULO 1: CONSIDERACIONES GENERALES

1.1 Introducción

En el contexto actual de la evolución tecnológica, las redes de telecomunicaciones juegan un papel crucial en la interconexión global, impactando directamente en el desarrollo socioeconómico y tecnológico de las sociedades. Entre estas, las redes de cuarta generación (4G) y quinta generación (5G) se destacan por sus capacidades avanzadas de transmisión de datos, abriendo nuevas vías para aplicaciones innovadoras en áreas como la Internet de las Cosas (IoT), vehículos autónomos y realidades extendidas. Sin embargo, a pesar de la implementación progresiva de la 5G, aún existen desafíos significativos relacionados con la eficiencia en la gestión de recursos, latencia y consumo energético, elementos críticos para el despliegue efectivo de tecnologías futuras.

La computación neuromórfica, que imita la arquitectura y funcionamiento del cerebro humano, emerge como una solución potencial para abordar estas limitaciones. Esta tecnología promete una mejora sustancial en el procesamiento y eficiencia energética, características esenciales para el soporte de redes de alta densidad y baja latencia como las 5G. No obstante, la aplicación práctica de la computación neuromórfica en el ámbito de las telecomunicaciones aún se encuentra en sus etapas iniciales, con múltiples aspectos por explorar, especialmente en lo que respecta a su integración y desempeño real en entornos de red.

Este trabajo de tesis propone realizar un análisis comparativo de la eficiencia de redes 4G y 5G mediante la implementación de algoritmos basados en computación neuromórfica, utilizando la plataforma MATLAB. Este estudio no solo es relevante por su enfoque innovador, sino también por su contribución potencial al diseño de redes más robustas y eficientes. A través de simulaciones detalladas, se evaluarán métricas clave como la eficiencia energética, la velocidad de transmisión de datos y la latencia, proporcionando una perspectiva comparativa entre las dos generaciones de tecnologías de red.

El presente documento está estructurado para introducir al lector en la relevancia de las tecnologías implicadas, describir el marco teórico que soporta el estudio y detallar la metodología empleada en las simulaciones. Finalmente, se discutirán los resultados obtenidos, ofreciendo conclusiones críticas y recomendaciones para futuras investigaciones en el campo de las telecomunicaciones avanzadas. Este análisis no solo profundiza en el conocimiento técnico de las redes 4G y 5G, sino que también explora la viabilidad de aplicar avances en inteligencia artificial y computación neuromórfica para superar los desafíos actuales en telecomunicaciones.

1.2 Antecedentes

La transición de las redes de cuarta generación (4G) a las de quinta generación (5G) marca un punto de inflexión en la historia de las telecomunicaciones. Las redes 4G, establecidas para proporcionar alta velocidad de internet y mejorar la experiencia multimedia, han sentado las bases para las demandas más exigentes de la 5G, que promete velocidades ultra rápidas, baja latencia y la capacidad de conectar masivamente dispositivos IoT. Este avance representa un salto cualitativo en términos de capacidad, velocidad y número de dispositivos conectados simultáneamente (VIU, 2018).

La computación neuromórfica, inspirada en la biología neuronal del cerebro humano, ofrece un enfoque revolucionario para el procesamiento de información. Con su capacidad para realizar operaciones de procesamiento de datos de manera más eficiente que los sistemas tradicionales, la computación neuromórfica se presenta como una solución potencial para los desafíos de eficiencia energética y rendimiento en tiempo real en redes 5G (Pepinosa, 2024).

Existen estudios previos que han explorado la integración de la computación neuromórfica en la gestión de redes, especialmente en lo que se refiere a optimización de tráfico y seguridad. Estos estudios han demostrado que, mediante algoritmos neuromórficos, es posible mejorar significativamente la eficiencia operativa y la seguridad de las redes 4G y 5G.

Uno de los enfoques más prometedores es el uso de redes neuronales espaciales para la predicción y gestión del tráfico de datos en tiempo real, lo que reduce la latencia y mejora la calidad del servicio (Granados, 2024).

A pesar de los avances significativos, la implementación de la computación neuromórfica en redes de telecomunicaciones enfrenta desafíos técnicos y prácticos. Estos incluyen la integración de hardware específico y la adaptación de los sistemas de red existentes para soportar procesamientos neuromórficos. Sin embargo, la continua evolución del hardware neuromórfico y los algoritmos asociados ofrecen un camino prometedor hacia redes más adaptativas y eficientes. El entendimiento y superación de estos desafíos será crucial para aprovechar plenamente las ventajas de la computación neuromórfica en la era 5G (Florkin, 2023).

1.3 Justificación

La constante evolución en las telecomunicaciones ha llevado a una transición significativa de las redes 4G a las redes 5G, las cuales se caracterizan por su alta capacidad, baja latencia y la habilidad de conectar un número masivo de dispositivos IoT simultáneamente. A pesar de sus avances, la implementación de la tecnología 5G aún enfrenta desafíos críticos relacionados con la eficiencia energética, la gestión del espectro y la seguridad de la red, lo que limita su potencial de despliegue y funcionalidad.

En este contexto, la computación neuromórfica se presenta como una solución prometedora. Inspirada en la estructura y funcionamiento del cerebro humano, esta tecnología ofrece un enfoque radicalmente diferente para el procesamiento de la información, potencialmente superando las limitaciones de las arquitecturas de computación tradicionales en términos de velocidad y consumo energético. La aplicación de la computación neuromórfica en las redes de telecomunicaciones podría revolucionar la manera en que se gestionan y operan las redes 4G y 5G, especialmente en áreas que requieren respuesta en tiempo real y una alta eficiencia operativa.

Este estudio propone un análisis comparativo utilizando MATLAB, un entorno de alto rendimiento para la simulación numérica, que permite la implementación y evaluación detallada de modelos neuromórficos en redes de telecomunicaciones. El objetivo es identificar y demostrar cómo la computación neuromórfica puede mejorar significativamente la eficiencia operativa de las redes 4G y 5G, comparando directamente su rendimiento bajo diversas condiciones y configuraciones de red.

La justificación de este trabajo radica no solo en su contribución a la literatura académica y técnica, llenando un vacío en estudios comparativos específicos entre estas dos generaciones de tecnología de red mediante un enfoque neuromórfico, sino también en su potencial aplicabilidad práctica. Los resultados esperados podrían ofrecer insights valiosos para diseñadores de redes, operadores y fabricantes de dispositivos, orientando futuras investigaciones y desarrollos hacia soluciones más eficientes y sostenibles para la infraestructura de telecomunicaciones global.

Con la realización de este estudio, se espera proporcionar una base sólida para la evaluación de tecnologías emergentes en telecomunicaciones y su impacto real en el despliegue y operación de redes avanzadas, contribuyendo así al avance tecnológico en un campo que es crítico para el desarrollo de nuestras sociedades modernas.

1.4 Planteamiento del Problema

A pesar de los avances en telecomunicaciones, la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo (FETD) aún no ha explorado comparativamente la eficiencia de las redes 4G y 5G a través de la computación neuromórfica en MATLAB. Este vacío limita la comprensión de cómo estas tecnologías podrían optimizarse para enfrentar desafíos de eficiencia y rendimiento. Este estudio busca llenar esa brecha, ofreciendo una evaluación crítica que podría guiar futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el campo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

- Analizar la eficiencia de las redes de telecomunicaciones 4G y 5G mediante computación neuromórfica en MATLAB para identificar oportunidades de mejora en su rendimiento.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y simular modelos de redes 4G y 5G en MATLAB, evaluando métricas clave como la Tasa de Error de Bit (BER), el tiempo de procesamiento y la latencia, para entender sus diferencias en términos de rendimiento y eficiencia.
- Aplicar técnicas de computación neuromórfica para analizar y comparar el rendimiento de las simulaciones de redes 4G y 5G, utilizando una red neuronal para clasificar y predecir cuál red es más eficiente bajo condiciones simuladas.
- Evaluar cómo la computación neuromórfica afecta la eficiencia energética de las redes 4G y 5G mediante el análisis de los resultados de simulación y la predicción de la red neuronal.

1.6 Metodología de la Investigación

Este estudio analítico empleará MATLAB para simular y analizar la eficiencia de las redes 4G y 5G utilizando computación neuromórfica. Comenzará con una revisión detallada de la literatura sobre las tecnologías de red y la computación neuromórfica para establecer una base teórica sólida. Posteriormente, se implementarán simulaciones en MATLAB, configurando modelos neuromórficos que reflejen condiciones operativas reales y evaluando parámetros críticos como latencia, capacidad y eficiencia energética. Este enfoque permitirá comparar directamente el rendimiento de las redes 4G y 5G bajo diversos escenarios, identificando prácticas óptimas y áreas de mejora. Los resultados serán analizados para extraer conclusiones relevantes sobre la viabilidad y ventajas de cada tecnología en contextos aplicados.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Desarrollo y Mejoras en las Redes de Telecomunicaciones LTE

2.1.1. Origen y Progreso de la Tecnología LTE

La tecnología LTE, acrónimo de Long-Term Evolution, ha revolucionado el panorama de las comunicaciones móviles, ofreciendo altas velocidades de datos, baja latencia y mayor eficiencia espectral en comparación con sus predecesoras (Estela Vasquez & Gonzales Silva, 2013).

Este avance en las telecomunicaciones supone un hito importante en la progresión de la conectividad inalámbrica, proporcionando conectividad confiable, amplia cobertura y capacidades de comunicación inalámbrica de alta velocidad (Teletopix, 2024).

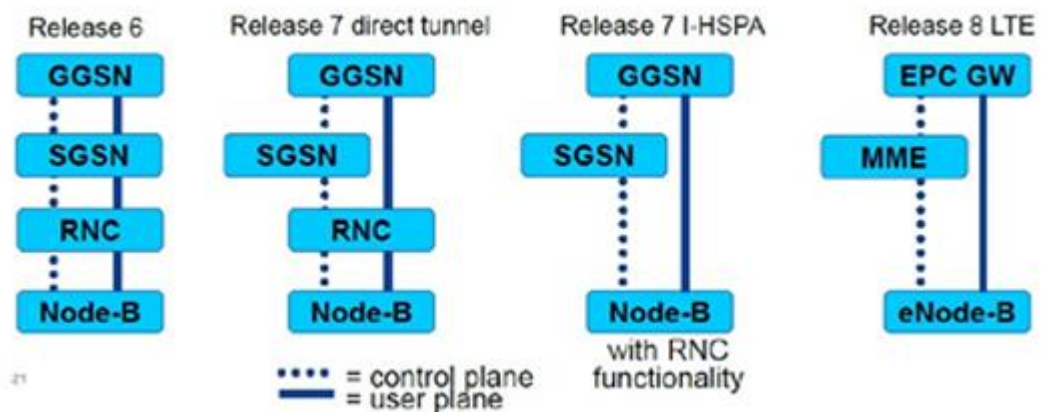
LTE, que tiene su origen en las redes 3G, ha evolucionado desde sus inicios, con un cronograma específico de hitos importantes en su desarrollo, hasta convertirse en un estándar de red 4G que satisface la demanda de los usuarios de mayores velocidades de datos y tasas de carga (Remmert, 2021).

La tecnología LTE, desarrollada por 3GPP, utiliza acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) para el enlace descendente y acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA) para el enlace ascendente, lo que permite velocidades de hasta 173 Mbps de descarga y 86 Mbps de carga, ofreciendo así mejoras en el rendimiento y la velocidad con respecto a tecnologías de comunicación móviles anteriores (Estela Vasquez & Gonzales Silva, 2013).

La evolución de LTE no solo ha proporcionado un puente hacia el futuro de la conectividad inalámbrica, sino que también se ha posicionado como un componente esencial de las redes de telecomunicaciones globales junto con el continuo despliegue y expansión de la tecnología 5G (Teletopix, 2024) (Remmert, 2021).

La Figura 1 ilustra la transición en la arquitectura de la red móvil a través de varias generaciones, desde el Release 6 hasta el Release 8, que introduce la tecnología LTE. Se destacan los cambios en la configuración de los nodos y las gateways en la red, incluyendo la integración de Node-B, RNC, SGSN, y GGSN en las versiones anteriores, y la simplificación hacia eNode-B y MME en LTE. Esta representación subraya cómo las mejoras en la arquitectura permiten una transmisión más directa y eficiente tanto en el plano de usuario como en el de control.

Figura 1. Evolución de arquitectura de red móvil



Fuente: (Jaramillo, 2020)

2.1.2. Innovaciones Clave en LTE: LTE-Advanced y LTE-Advanced Pro

La evolución de la tecnología LTE ha traído importantes avances en el campo de las redes móviles. LTE Advanced Pro, una iteración de vanguardia de la tecnología LTE, incorpora funciones de próxima generación como agregación de portadoras, modulación de orden superior y antenas MIMO para mejorar el rendimiento y la capacidad de la red (Remmert, 2021). Por ejemplo, las antenas MIMO funcionan en paralelo para transmitir y recibir datos rápidamente, mejorando así la cobertura de la red y el rendimiento general (Teletopix, 2024).

Al utilizar de manera eficiente el espectro disponible a través de una modulación de orden superior, LTE Advanced Pro puede transportar más bits de datos, lo que garantiza una eficiencia espectral ideal. (Remmert, 2021).

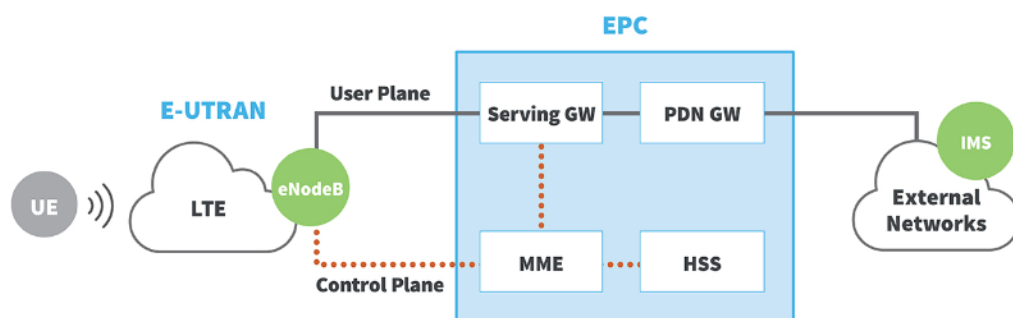
Además, las capacidades LTE de clase gigabit de LTE Advanced Pro lo convierten en una opción privilegiada para sectores como el comercio minorista y el transporte que exigen soluciones de alta velocidad y gran ancho de banda (Remmert, 2021).

Esta evolución de la tecnología LTE no sólo ofrece velocidades más rápidas y una mejor experiencia de usuario, sino que también sienta las bases para futuras innovaciones centradas en reducir la latencia, mejorar la eficiencia espectral y aumentar la capacidad de la red para satisfacer la creciente demanda de datos móviles (Lowi, 2022).

LTE Advanced Pro, también conocido como 4.5G, sirve como un trampolín hacia la tecnología 5G, incorporando tecnologías avanzadas como 256-QAM y Massive MIMO que allanan el camino para futuras mejoras de la red (Lowi, 2022).

La Figura 2 muestra la estructura de la red LTE, destacando la relación entre los elementos del E-UTRAN y el núcleo de la red, conocido como Evolved Packet Core (EPC). En la ilustración, se visualiza la conexión entre el equipo de usuario (UE), la estación base (eNodeB), y los diversos componentes del EPC, incluyendo la Gateway de Servicio (Serving GW), la Gateway de Red de Datos Personales (PDN GW), la entidad de gestión de movilidad (MME), y el servidor de suscripción HSS (Home Subscriber Server). Además, se indica la interconexión con las redes externas a través del subsistema IP Multimedia (IMS), facilitando la integración entre la comunicación de datos y servicios multimedia.

Figura 2. Componentes Clave de la Arquitectura LTE y EPC



Fuente: (Remmert, 2021)

A medida que la tecnología LTE continúa expandiéndose y evolucionando, LTE Advanced Pro se destaca como un actor clave en revolucionar el panorama de las redes móviles, ofreciendo velocidades y eficiencia incomparables para una experiencia de conectividad perfecta.

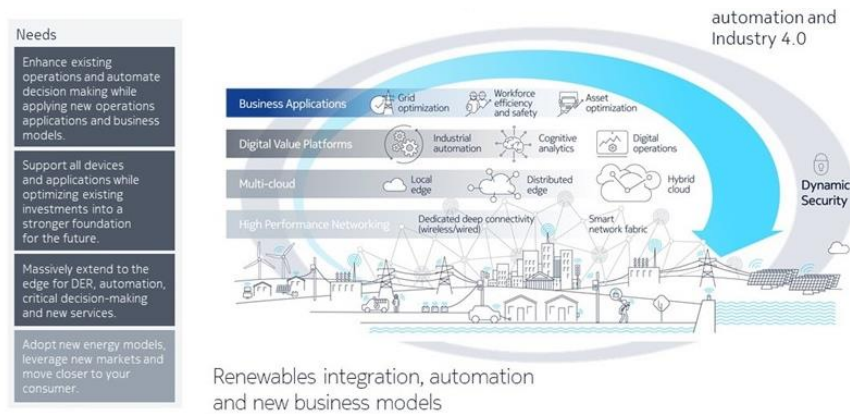
2.1.3. Impacto de las Innovaciones en el Rendimiento de LTE

El impacto de LTE en la tecnología inalámbrica ha sido profundo, revolucionando la conectividad móvil y la transmisión de datos. La introducción de LTE marcó el comienzo de una nueva era de innovación y mejoras de rendimiento en el panorama de las comunicaciones inalámbricas.

Con su capacidad para proporcionar conexiones estables y más rápidas, LTE se ha convertido en una piedra angular para empresas e industrias, que ofrece una mejor gestión de la conexión y una latencia reducida. La eficiencia espectral mejorada de LTE permite la transmisión de más datos sobre el mismo ancho de banda, mejorando el rendimiento general de la red. Si bien LTE es un avance significativo en la tecnología inalámbrica, no alcanza a cumplir los estrictos requisitos de un verdadero servicio 4G. Sin embargo, la compatibilidad de LTE con futuras redes 5G garantiza que las inversiones en infraestructura LTE seguirán siendo relevantes a medida que la industria hace la transición a la nueva era de conectividad e innovación.

La Figura 3 presenta la arquitectura Future X de Nokia Bell Labs, diseñada específicamente para el sector de las empresas de servicios públicos. Esta arquitectura avanzada busca optimizar la integración de energías renovables, automatización y modelos de negocio innovadores en respuesta a las necesidades emergentes de la industria 4.0. Destaca cómo la digitalización y las plataformas de valor digital pueden potenciar las operaciones de red, la eficiencia del personal y la optimización de activos, asegurando al mismo tiempo una seguridad dinámica en toda la infraestructura.

Figura 3. Arquitectura Future X de Nokia Bell Labs para la Utilización de Energía



Fuente: (Procetradi, 2024)

LTE no solo ha transformado la forma en que nos conectamos, sino que también ha transformado la forma en que nos conectamos. también ha sido un catalizador fundamental en la evolución de las comunicaciones móviles. Al proporcionar mayores velocidades de datos para descarga y carga, las redes LTE ofrecen mayor capacidad y velocidad para las redes de telefonía móvil, optimizando el rendimiento y la eficiencia energética en los centros de datos. Las velocidades de datos ultrarrápidas de LTE, diez veces más rápido que 3G, representan un importante avance en los estándares de comunicación inalámbrica, solidificando la posición de LTE como tecnología esencial en el desarrollo de IoT y la automatización industrial (Meer, 2024).

2.2. Redes 5G y sus Características

2.2.1. Definición y Evolución de la Tecnología 5G

La llegada de la tecnología 5G marca un salto significativo en la evolución de las redes inalámbricas, prometiendo características, implementación y operación incomparables. La investigación subraya el potencial transformador del 5G, con una tasa de adopción global proyectada por parte de los usuarios del 34% para 2025, lo que significa un cambio monumental en la forma en que el mundo interactúa con la tecnología (Figueroa Castillo, Chóez Calle , Barreto Pin , & Villacreses Parrales, 2022).

En particular, la capacidad de 5G para revolucionar las velocidades de descarga, permitiendo la recuperación de películas, música y vídeos en tan

solo 3,7 segundos, demuestra su eficiencia innovadora (Figuroa Castillo, Chóez Calle , Barreto Pin , & Villacreses Parrales, 2022).

Como quinta generación de tecnologías de telefonía móvil, la tecnología inalámbrica 5G tiene como objetivo redefinir los estándares de conectividad y marcar el comienzo de una nueva era de comunicación e intercambio de datos (Figuroa Castillo, Chóez Calle , Barreto Pin , & Villacreses Parrales, 2022).

Una parte integral de su éxito es el uso extensivo de la tecnología MIMO y FD-MIMO, crucial para lograr una cobertura más amplia y una capacidad mejorada, asegurando una conectividad perfecta para los usuarios (Anchundia Morales & Chere Quiñónez , 2020).

Además, la consolidación de la tecnología 5G depende de estrategias de gestión efectivas para las bandas de frecuencia y de una planificación meticulosa para el desarrollo de servicios de radio, enfatizando la importancia de una estrategia nacional integral del espectro en su implementación (Anchundia Morales & Chere Quiñónez , 2020).

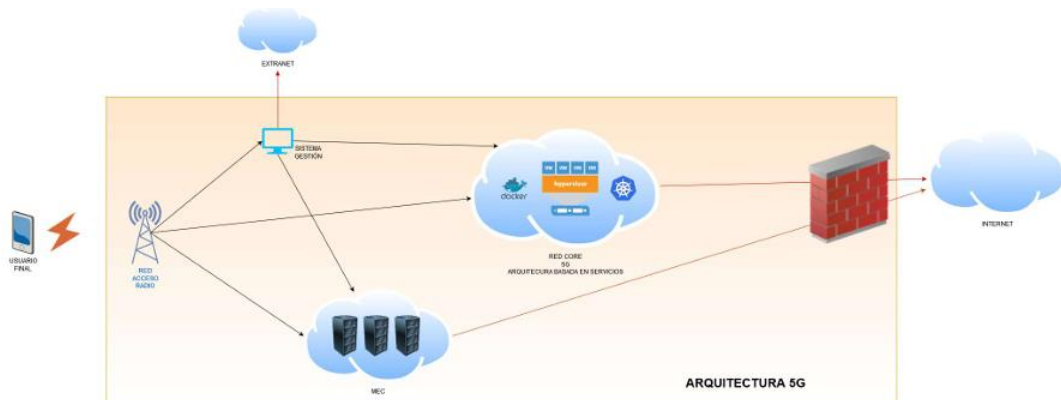
Para impulsar la evolución de 5G, los avances en la modulación, la multiplexación de ondas de radio y la mejora de la RAT son imprescindibles para respaldar la conectividad masiva y elevar las capacidades de la red a la capa física L1 (Anchundia Morales & Chere Quiñónez , 2020).

Sin embargo, se vislumbran desafíos en el horizonte, particularmente en materia de ciberseguridad, que requieren medidas proactivas para mitigar los riesgos potenciales asociados con la adopción generalizada de la tecnología 5G (Nieny Hodar , 2021).

A pesar de estos desafíos, la implementación de la tecnología 5G presenta innumerables oportunidades en diversos sectores, incluido el teletrabajo, la telemedicina, las ciudades inteligentes, la IoT y el comercio electrónico, lo que subraya su potencial para impulsar la innovación y el crecimiento económico a escala global (Nieny Hodar , 2021).

La Figura 4 muestra un esquema detallado de la arquitectura de red 5G, destacando la integración y el flujo de datos entre diferentes componentes esenciales. En este diagrama, se puede observar cómo las señales desde y hacia el usuario final son gestionadas a través de la red de acceso radio, pasando por elementos de red avanzados como el Core 5G y servicios distribuidos como MEC (Mobile Edge Computing). Además, se ilustra la conexión del sistema con infraestructuras externas como Internet y Extranet, resaltando la capacidad de la arquitectura 5G para soportar altos volúmenes de datos y proporcionar servicios de baja latencia.

Figura 4. Esquema de la Arquitectura de Red 5G



Fuente: (Agencia Española protección de Datos, 2020)

2.2.2. Avances en la Tecnología 5G

Los rápidos avances en la tecnología 5G están preparados para revolucionar la forma en que nos conectamos e interactuamos con el mundo digital. Con la promesa de velocidades de descarga hasta diez veces más rápidas que la tecnología 4G y una latencia reducida a solo un milisegundo, se espera que 5G resuelva los problemas relacionados con la latencia y las interrupciones del servicio que los usuarios suelen enfrentar con las tecnologías actuales (Vasquez Benito , Rengel Pilco , & Zarate Ramirez , 2022).

Este salto tecnológico está impulsado por la demanda de los consumidores de servicios más rápidos y confiables, ampliando los límites de

lo que actualmente es posible en las redes de comunicación inalámbrica (Vasquez Benito , Rengel Pilco , & Zarate Ramirez , 2022).

Además, la alta velocidad de transmisión de datos y el bajo retardo que ofrecen las redes 5G abren nuevas posibilidades para industrias como el periodismo y la atención médica, permitiendo la transmisión casi en tiempo real de grandes cantidades de datos (De León, 2022).

La Tabla 1 ofrece una comparación directa entre las tecnologías de red 4G y 5G, destacando las mejoras significativas en velocidad, latencia, capacidad de conexión de dispositivos, eficiencia energética y tiempos de respuesta. Estas diferencias subrayan la evolución tecnológica de 5G, diseñada para soportar un ecosistema mucho más amplio de aplicaciones y servicios, con capacidades mejoradas que permiten nuevas oportunidades en la industria de las telecomunicaciones y otros sectores.

Tabla 1. Comparación de Características entre las Redes 4G y 5G

Característica	4G	5G
Velocidad	100 Mbps	10Gbps
Latencia	40 ms	De 4 a 1 ms
Dispositivos conectados	Millones	Más de 100 billones
Uso de batería	Alto consumo	Ahorro del 10%
Tiempo de Respuesta	Rápida	5 veces más rápido

Fuente: (Loor Zambrano, Morales Carrillo , Santos Moreira, & Pico Moreira, 2023)

Los profesionales ya están aprovechando la conectividad 5G para mejorar su eficiencia y eficacia, independientemente de su ubicación física, lo que demuestra el potencial transformador de esta tecnología en varios sectores (Rua, 2020).

A medida que países como Argentina y Brasil se preparan para la implementación de la tecnología 5G, los operadores están elaborando estrategias de asignación de espectro y estrategias de implementación para garantizar una cobertura amplia y sostenible para sus clientes (Rua, 2020).

Se prevé que la llegada de 5G no sólo mejorará la conectividad individual, sino que también allanará el camino para transformaciones significativas en la conectividad de comunidades enteras y ciudades inteligentes, a medida que empresas como Movistar se posicionen para proporcionar conectividad IoT para diversos sectores (Rua, 2020).

2.2.3. Impacto de 5G en el Rendimiento y Capacidad de las Redes

La inminente llegada de la red móvil de quinta generación (5G) revolucionará la forma en que nos comunicamos e interactuamos con la tecnología. Uno de los aspectos clave en los que profundizará la investigación son los importantes cambios y avances que introducirá el 5G en el panorama de las telecomunicaciones (Brito Gomez, 2019).

A medida que se desarrolla el despliegue de redes 5G, es crucial evaluar no solo las implicaciones técnicas sino también el impacto socioeconómico que tendrá en diversos sectores (Castro Sánchez, 2021).

Por ejemplo, las fases de optimización involucradas en la planificación de la cobertura de las redes 5G en áreas específicas, como el puerto de Valencia, serán fundamentales para evaluar las características de cobertura y el rendimiento de la red (Castro Sánchez, 2021).

Además, se prevé que la asignación de la banda de 700 MHz para 5G desempeñará un papel fundamental en la mejora de la capacidad y el rendimiento de la red tanto para los usuarios finales como para los operadores de red, lo que demuestra el potencial de mejoras sustanciales en la eficiencia y confiabilidad de las comunicaciones (Castro Sánchez, 2021).

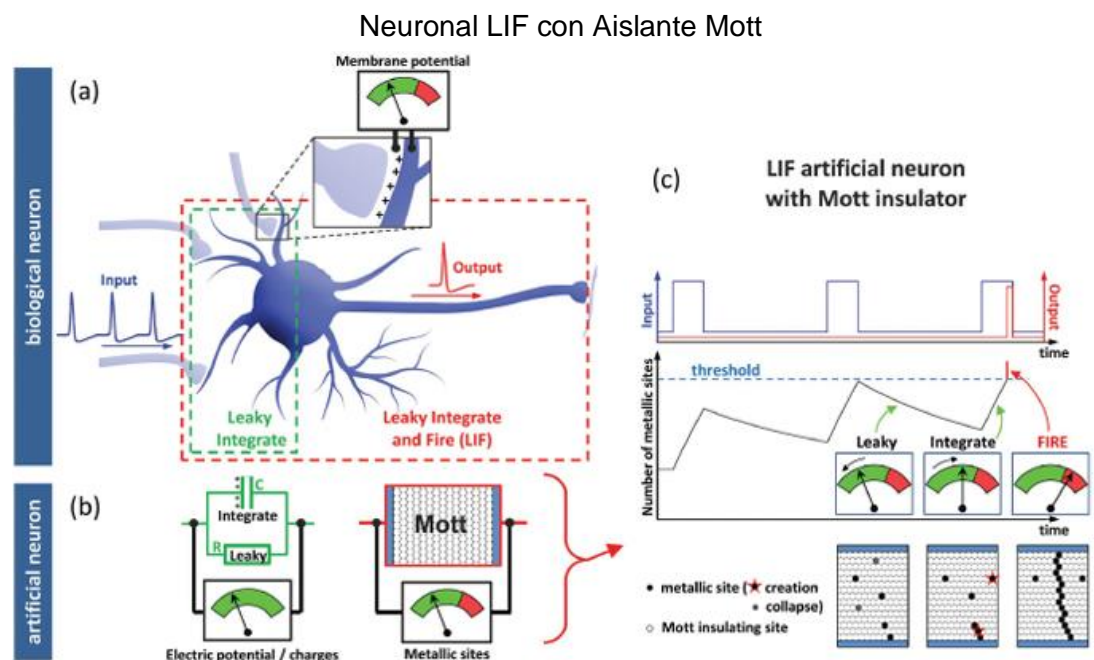
2.3. Computación Neuromórfica en Telecomunicaciones

2.3.1. Definición y Principios de la Computación Neuromórfica

La computación neuromórfica está a la vanguardia de la innovación y ofrece un posible alejamiento de los métodos tradicionales de computación digital. El principio central de esta tecnología de vanguardia gira en torno a imitar las redes neuronales que se encuentran en los cerebros biológicos, utilizando redes neuronales artificiales que operan a través de impulsos (Laguna Sánchez , 2023).

La Figura 5 expone una innovadora representación de cómo se puede emular la funcionalidad de una neurona biológica en sistemas computacionales mediante el uso de la tecnología neuromórfica. Este diagrama detalla la integración de la neurona tipo Leaky Integrate and Fire (LIF) con un aislante de Mott, mostrando tanto la configuración biológica como su contraparte artificial.

Figura 5. Implementación de Computación Neuromórfica Usando el Modelo



Fuente: (Arribas Fernández, 2020)

En marcado contraste con la computación convencional, la computación neuromórfica está diseñada para priorizar la eficiencia energética, la

miniaturización de componentes y la velocidad de procesamiento, con el objetivo de lograr un rendimiento óptimo en estas áreas (Laguna Sánchez , 2023).

La evolución y el establecimiento de la computación neuromórfica se discuten en el contexto del artículo, arrojando luz sobre su desarrollo y perspectivas futuras (Laguna Sánchez , 2023).

Además, el artículo proporciona un análisis profundo de posibles aplicaciones del mundo real donde se podría implementar la computación neuromórfica, mostrando su versatilidad y capacidades prometedoras en diversos campos (Laguna Sánchez , 2023).

2.3.2. Avances y Aplicaciones en Telecomunicaciones

El sector de las telecomunicaciones ha experimentado un progreso notable en los últimos años, impulsado por avances tecnológicos que han revolucionado la forma en que nos comunicamos y accedemos a la información. Estos avances no sólo son cruciales para el crecimiento de las empresas del sector, sino también esenciales para mantener la competitividad en un mercado en rápida evolución (Lauria, 2021).

Las mejoras continuas en los protocolos y materiales utilizados en los dispositivos de telecomunicaciones han desempeñado un papel importante en la mejora de la eficiencia y las capacidades de las redes de comunicación (Aselcom, 2020).

Si bien las telecomunicaciones experimentan cambios incrementales mientras se construyen sobre bases establecidas, estos pequeños avances culminan en un progreso general significativo dentro del sector (Aselcom, 2020).

La Tabla 2 presenta un resumen de los avances tecnológicos en computación neuromórfica y sus respectivas aplicaciones en el ámbito de las telecomunicaciones. Destacan desarrollos como los circuitos neuromórficos

eficientes, que imitan la eficiencia energética del cerebro humano y contribuyen a la reducción del consumo de energía en dispositivos móviles y estaciones base. También se incluye el uso de redes neuronales espiking para procesar señales en tiempo real, lo que mejora significativamente la velocidad y eficiencia en el procesamiento de señales para tecnologías avanzadas como 5G. Esta tabla subraya cómo estas tecnologías no solo optimizan las operaciones actuales, sino que también abren caminos hacia nuevos modelos de negocios en la industria de telecomunicaciones.

Tabla 2. Avances en Tecnologías de Computación Neuromórfica y sus Aplicaciones en Telecomunicaciones

Avance	Descripción	Aplicaciones en Telecomunicaciones
Circuitos Neuromórficos Eficientes	Desarrollo de circuitos que imitan la eficiencia energética del cerebro humano.	Reducción del consumo de energía en estaciones base y dispositivos móviles.
Procesamiento de Señales en Tiempo Real	Uso de redes neuronales espiking para procesar señales de forma más natural y rápida.	Mejora en la velocidad y eficiencia del procesamiento de señales para 5G y más allá.
Sensores Inteligentes	Integración de sensores que procesan información de forma autónoma, similar a los nervios.	Aplicaciones en IoT para telecomunicaciones, como ciudades inteligentes y vehículos autónomos.
Redes Neuronales de Bajo Consumo	Desarrollo de redes neuronales que requieren menos recursos para operar.	Implementación en dispositivos IoT y móviles para prolongar la vida de la batería.
Simulación y Optimización de Redes	Uso de modelos computacionales avanzados para simular y optimizar redes de telecomunicaciones.	Optimización de la planificación y operación de redes, mejorando la calidad del servicio.

Fuente: (Mehonic, Lelmini, Mutlu, & Malavena, 2024)

La transformación tecnológica en curso proyectada para el mercado de las telecomunicaciones indica un cambio hacia tecnologías de punta más

sofisticadas, inteligencia artificial, tecnologías 5G, conectividad WIFI e Internet de las cosas (IoT) (Cepeda, 2023).

Estos avances no sólo impulsan la innovación y la eficiencia dentro de la industria, sino que también abren nuevas posibilidades en diversos campos, prometiendo un futuro apasionante para un mundo más interconectado (EXFA, 2023).

Además, las telecomunicaciones seguirán desempeñando un papel fundamental en la conectividad global, fomentando el crecimiento económico, la colaboración y el bienestar social (EXFA, 2023).

A medida que las tecnologías inalámbricas han transformado significativamente el acceso a la comunicación y la información, la evolución de las tecnologías de telecomunicaciones mejorará aún más la productividad, obtendrá ventajas competitivas y brindará un servicio al cliente innovador dentro del sector (Lauria, 2021).

Esta evolución constante de las telecomunicaciones no sólo es paralela al crecimiento humano y al desarrollo de la civilización moderna, sino que también significa el impulso incesante hacia el progreso dentro de la industria (Aselcom, 2020).

2.3.3. Comparación con Métodos Tradicionales de Procesamiento

En el ámbito del procesamiento de señales, los métodos tradicionales que se basan únicamente en características temporales pueden no ser suficientes para capturar con precisión todas las características esenciales de una señal. Se ha demostrado que la combinación de los dominios de tiempo y frecuencia en el proceso de análisis permite un examen más exhaustivo de una señal, lo que lleva a la extracción de características valiosas que de otro modo se pasarían por alto (Bravo Paredes, 2019).

Se ha demostrado que las transformadas de tiempo-frecuencia mejoran los resultados de los métodos espectrales y temporales clásicos al ilustrar los

cambios en la frecuencia a lo largo del tiempo, ofreciendo una visión más completa de la dinámica de la señal (Bravo Paredes, 2019).

Cuando se trata de selección de características, el enfoque de extraer todas las características y luego identificar las más relevantes ha demostrado ser más efectivo que utilizar conocimientos previos para la selección de características (Bravo Paredes, 2019).

En términos de modelos de clasificación, el clasificador lineal Support Vector Machine (SVM) con parámetros específicos ha demostrado un rendimiento superior en procesos de entrenamiento en comparación con otros métodos (Bravo Paredes, 2019).

Además, la Transformada de Gabor y la Transformada Discreta de Fourier (DFT) desempeñan funciones distintas en el procesamiento de señales; Mientras que Gabor Transform facilita la localización de funciones en un intervalo para revelar información tiempo-frecuencia, DFT se utiliza principalmente para la estimación espectral basada en cálculos de índices en el dominio de la frecuencia (Bravo Paredes, 2019).

Este cambio hacia métodos de procesamiento más avanzados, como las tecnologías de análisis de estrés por voz (VSA), ha demostrado ser más eficaz para detectar el engaño, como lo demuestra su éxito en la reducción de las reclamaciones por robo de vehículos y su adopción por parte de las agencias policiales para la detección de fraudes, lo que marca un hito. desviación de las técnicas de procesamiento tradicionales (Bravo Paredes, 2019).

2.4. Eficiencia Energética en Redes de Telecomunicaciones

2.4.1. Definición y Relevancia de la Eficiencia Energética

La eficiencia energética es un concepto multifacético que abarca varios aspectos del consumo y la conservación de energía. Definida como el uso responsable e inteligente de la energía para mantener los niveles de vida y el confort utilizando sólo la energía necesaria, la eficiencia energética implica no sólo reducir el consumo de recursos y energía, sino que también requiere el

desarrollo y la utilización de nuevas tecnologías más eficientes energéticamente (Martínez Cabrero, 2017).

Establecer estándares y sistemas de evaluación técnica es crucial para garantizar la eficiencia energética. Además, comprender los hábitos de los consumidores es esencial para diseñar políticas efectivas de eficiencia energética y estudiar los impactos de diferentes políticas en la modificación de los comportamientos de consumo de energía (Martínez Cabrero, 2017).

Un área clave de enfoque para las iniciativas de eficiencia energética es el sector del transporte, que representa una parte significativa del consumo final de energía y presenta oportunidades sustanciales para el ahorro de energía. Otro aspecto crítico es el papel de la tecnología en los procesos de obtención y conversión de energía, enfatizando la importancia de los avances tecnológicos para lograr los objetivos de eficiencia energética. En general, la eficiencia energética es un componente vital para abordar los desafíos actuales de la gestión de la energía y promover prácticas energéticas sostenibles en diversos sectores y comportamientos (Martínez Cabrero, 2017).

2.4.2. Métodos de Medición y Factores que Afectan la Eficiencia Energética

Para mejorar la eficiencia energética de manera efectiva, es esencial un enfoque holístico y colaborativo, que se extienda más allá de sectores o partes interesadas singulares. Las agendas políticas que abogan por la eficiencia energética deben abarcar una amplia gama de sectores e involucrar a múltiples partes interesadas, como el transporte público y las iniciativas de planificación urbana (Gordon & Kreuzer, 2014).

En el ámbito de la eficiencia energética del transporte, las recomendaciones a menudo apuntan a avances en las tecnologías de los vehículos y modificaciones en el comportamiento del conductor para obtener resultados óptimos. Sin embargo, las políticas de transporte sostenible exigen una estrategia integral que aborde simultáneamente varios factores, incluidos

los avances tecnológicos en los vehículos, los cambios en el comportamiento de los conductores, la reducción de las distancias de viaje y un cambio hacia modos de transporte más sostenibles (Gordon & Kreuzer, 2014).

Particularmente en las naciones de América Latina y el Caribe, una comprensión más profunda y una perspectiva estratégica sobre la eficiencia energética del transporte son imprescindibles para cumplir eficazmente los objetivos de energía sostenible (Gordon & Kreuzer, 2014).

Al reconocer la naturaleza multifacética de la eficiencia energética e implementar medidas que consideren diversos factores y partes interesadas, las regiones pueden avanzar hacia el logro exitoso de sus objetivos de energía sostenible.

2.4.3. Impacto de la Eficiencia Energética en Redes 4G y 5G

Los esfuerzos para mejorar la eficiencia energética en las redes 4G y 5G son imperativos para lograr infraestructuras de telecomunicaciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. La progresión de las redes 4G a 5G requiere un cambio hacia el diseño de redes expansivas que prioricen el consumo eficiente de energía y aborden problemas como la interferencia y la reutilización de frecuencias (Cuevas Ruíz, 2022).

Un aspecto vital para considerar es el despliegue de redes en bandas de cobertura más bajas, particularmente aquellas por debajo de 1 GHz, para lograr una cobertura geográfica amplia con requisitos mínimos de ancho de banda, lo que hace que las consideraciones de eficiencia energética sean cruciales en tales escenarios (Cuevas Ruíz, 2022).

Además, un área clave de atención reside en las estaciones base (BS), ya que representan una parte sustancial de la energía total utilizada en las redes inalámbricas (Sebastián Villa, 2018).

La Tabla 3 desglosa las diferencias clave entre las redes 4G y 5G en términos de consumo energético, avances tecnológicos, impacto ambiental,

costos operativos e innovación en eficiencia. Se resalta cómo el 5G, a través de tecnologías como beamforming y MIMO masivo, no solo mejora la eficiencia energética y reduce los costos operativos, sino que también minimiza el impacto ambiental comparado con las redes 4G. Esta comparación subraya el progreso significativo en eficiencia y sostenibilidad que representa la transición del 4G al 5G, reflejando avances importantes para la industria de las telecomunicaciones.

Tabla 3. Comparación de Consumo Energético y Avances Tecnológicos entre Redes 4G y 5G

Aspecto	Redes 4G	Redes 5G
Consumo Energético	Alto debido a la menor eficiencia en el manejo de múltiples señales y menor optimización de recursos.	Significativamente reducido debido a tecnologías más avanzadas y gestión eficiente del espectro y señales.
Tecnología de Reducción	Menos avances en tecnologías de ahorro energético.	Uso extensivo de técnicas avanzadas como beamforming, small cells, y MIMO masivo para reducir el consumo energético.
Impacto Ambiental	Mayor impacto debido al alto consumo energético y necesidad de infraestructura más densa.	Reducido impacto ambiental gracias a la eficiencia energética y menor necesidad de infraestructura física extensa.
Costos Operativos	Mayores debido al mayor consumo de energía y mantenimiento de infraestructura más antigua.	Reducidos por menor consumo de energía y eficiencia en la gestión y mantenimiento de la red.
Innovación en Eficiencia	Innovaciones limitadas a mejoras incrementales en hardware y software existentes.	Innovaciones significativas con introducción de tecnologías disruptivas que optimizan el consumo energético.

Fuente: (Nokia, 2020)

Para promover esta causa, la integración de tecnologías sostenibles en las próximas redes inalámbricas es fundamental para lograr ahorros

energéticos considerables, especialmente con el aumento previsto de multiconexiones y BS en las redes 5G, lo que subraya la importancia de adoptar prácticas ecológicas en el desarrollo de redes (Sebastián Villa, 2018).

Las redes inalámbricas sostenibles pretenden revolucionar la eficiencia energética haciendo hincapié en la optimización de la potencia de transmisión, adoptando fuentes de energía renovables y promoviendo metodologías de ahorro de energía, todo lo cual es fundamental para dar forma al panorama futuro de los sistemas de comunicación inalámbrica (Sebastián Villa, 2018).

2.5. Simulaciones en MATLAB para Redes de Telecomunicaciones

2.5.1. Utilización de MATLAB para la Simulación de Redes de Telecomunicaciones

MATLAB sirve como una herramienta indispensable para simular diversos aspectos de las redes de telecomunicaciones, particularmente los sistemas de comunicaciones ópticas. Esta plataforma de software es fundamental para modelar los intrincados componentes de estas redes, como fibras ópticas, fuentes y fotodetectores, lo que permite a los investigadores profundizar en los matices del diseño y la funcionalidad de la red (Andrés Garrido, 2017).

La utilización de MATLAB en el Trabajo de Fin de Grado de Andrés Garrido y Rocío de subrayó su importancia en el desarrollo de modelos y simulaciones de sistemas de comunicaciones ópticas, enfatizando la eficacia del software en este dominio (Andrés Garrido, 2017).

Al emplear MATLAB para simulaciones, los investigadores pueden obtener información valiosa sobre la calidad del sistema en función de parámetros como amplificación, distancia y dispersión, lo que les permite tomar decisiones informadas con respecto a la optimización de la red y la mejora del rendimiento (Andrés Garrido, 2017).

Además, la versatilidad de MATLAB se extiende a la simulación de tecnologías emergentes como LoRa, ofreciendo a los investigadores una

plataforma para optimizar la eficiencia de estas tecnologías y evaluar su viabilidad antes de su implementación real (Bonilla Cadena, 2022).

A través de la integración de conceptos teóricos y simulaciones prácticas, MATLAB permite a los investigadores profundizar su comprensión de las comunicaciones ópticas y las redes de telecomunicaciones, contribuyendo en última instancia al avance y la validación de los diseños y funcionalidades de las redes (Andrés Garrido, 2017).

2.5.2. Herramientas y Métodos de MATLAB Específicos para 4G, 5G y Computación Neuromórfica

Las herramientas de MATLAB desempeñan un papel crucial en el desarrollo y prueba de sistemas 5G, proporcionando a los ingenieros una plataforma versátil para la configuración, simulación, medición y análisis de enlaces de comunicaciones 5G NR de extremo a extremo (Mathworks, 2021).

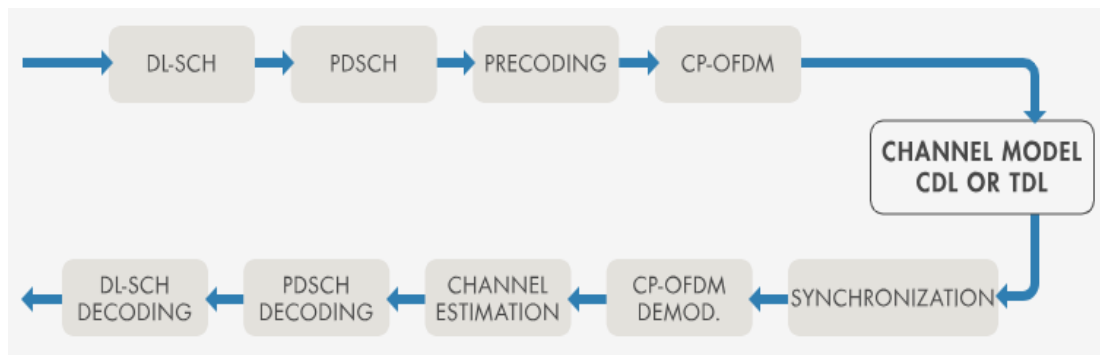
La flexibilidad de las funciones de la caja de herramientas de MATLAB permite modificaciones y personalizaciones adaptadas a la implementación de sistemas y dispositivos 5G como modelos de referencia, lo que garantiza precisión y eficiencia en el diseño del sistema (Mathworks, 2021).

Además, MATLAB y 5G Toolbox son fundamentales para la verificación funcional a nivel de unidad y la validación del rendimiento de las cadenas de señales antes de las pruebas de RF, lo que permite a los ingenieros abordar cualquier problema u optimización antes de la integración (Mathworks & Simulink, 2020).

La Figura 6 presenta un diagrama de flujo del proceso de transmisión y recepción en sistemas utilizando la modulación OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Este diagrama ilustra las etapas clave desde la codificación en el enlace descendente (DL-SCH) hasta la sincronización y demodulación de la portadora con multiplexación por división de frecuencia ortogonal (CP-OFDM). También se destaca la importancia de la estimación del canal y el precodificado para una transmisión eficaz,

demostrando cómo se adaptan estos procesos en modelos de canal como CDL (Clustered Delay Line) y TDL (Tapped Delay Line), cruciales para entender la implementación y optimización en sistemas de telecomunicaciones modernas.

Figura 6. Proceso de Transmisión y Recepción en Sistemas OFDM



Fuente: (Mathworks, 2021)

Una vez integrados los módulos, las herramientas de MATLAB ayudan a garantizar que estén completamente preparados para las pruebas de un extremo a otro, lo que facilita una evaluación integral de la funcionalidad y el rendimiento del sistema (Mathworks & Simulink, 2020).

Al aprovechar MATLAB en el proceso de desarrollo, los ingenieros pueden optimizar el diseño, las pruebas y la optimización de sistemas y dispositivos 5G, mejorando en última instancia la eficiencia y confiabilidad de estas tecnologías avanzadas.

2.5.3. Ventajas y Desafíos de Utilizar MATLAB para Simulaciones de Redes

MATLAB se utiliza ampliamente en proyectos relacionados con fuentes de energía renovables, como la construcción y modelado de sistemas solares fuera de la red con almacenamiento de energía (Fernando Lopez, 2023).

En particular, MATLAB Simulink juega un papel crucial en las simulaciones de redes, permitiendo el modelado y simulación de diversos aspectos relacionados con la red (Fernando Lopez, 2023).

La Tabla 4 ofrece un análisis comparativo de las ventajas y desafíos asociados con el uso de herramientas de simulación avanzadas en el ámbito de las telecomunicaciones. Destaca cómo la simplificación de procesos complejos y la disponibilidad de toolboxes específicos, facilitan el modelado de redes, mientras que los desafíos subrayan la necesidad de un aprendizaje continuo y los costos asociados con licencias especializadas. La tabla refleja la búsqueda de un equilibrio entre flexibilidad en el modelado y la eficiencia en la visualización y análisis de KPIs, frente a la demanda de recursos computacionales elevados y configuraciones complejas.

Tabla 4. Ventajas y Desafíos de las Herramientas de Simulación en Telecomunicaciones

Aspecto	Ventajas	Desafíos
Facilidad de Uso	Simplificación de simulaciones complejas con menos código.	Requiere una curva de aprendizaje para simulaciones avanzadas.
Herramientas Integradas	Amplia gama de Toolbox específicos para distintas tecnologías de red.	Costo adicional por licencias de Toolbox especializados.
Flexibilidad	Modelado versátil de redes y escenarios.	Configuración compleja para simulaciones detalladas.
Visualización y Análisis	Fuerte capacidad de visualización y análisis de KPIs.	Demanda alta de recursos computacionales para grandes datos.

Fuente: (MATLAB, 2022)

Además, MATLAB es fundamental en la simulación de instalaciones solares fotovoltaicas aisladas de la red, un enfoque común en proyectos como trabajos de último año en el campo de Minas y Energía (Fernando Lopez, 2023).

Además, MATLAB se emplea para tareas como modelado y dimensionamiento de instalaciones solares fotovoltaicas, mostrando su amplia aplicabilidad en proyectos de simulación de redes (Fernando Lopez, 2023).

Los desafíos de usar MATLAB para simulaciones de redes pueden incluir una curva de aprendizaje pronunciada para los principiantes y la necesidad de capacitación especializada para aprovechar todo su potencial en simulaciones complejas. A pesar de estos desafíos, las ventajas de utilizar MATLAB en simulaciones de redes, especialmente en proyectos relacionados con fuentes de energía renovables, superan los obstáculos, lo que lo convierte en la opción preferida de muchos investigadores e ingenieros.

2.6. Estrategias de Mitigación y Optimización en Redes LTE y 5G

2.6.1. Técnicas de Mitigación: Beamforming y Cancelación de Interferencia

La formación de haces y la cancelación de interferencias son técnicas cruciales para mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbrica. El modelo de sistema propuesto en el estudio supone un escenario celular CoMP OFDM donde múltiples estaciones transceptoras base (BTS) coordinadas con dos antenas transmisoras sirven a los usuarios (Pablo Gonzalez, 2015).

Para mitigar la interferencia y mejorar el rendimiento del sistema, se emplean técnicas de formación de haces para extender los modelos de llenado de agua y la formulación de diagonalización de bloques (BD) a los sistemas OFDM (Pablo Gonzalez, 2015).

Las BTS coordinadas trabajarán juntas para cancelar interferencias, utilizándose un esquema CoMP basado en BD como técnica de coordinación para la cancelación de interferencias (Pablo Gonzalez, 2015).

El estudio investigará la influencia de la posición del terminal dentro de la celda distribuyendo a los usuarios en cuatro configuraciones posibles, utilizando canales de modulación de codificación espacio-temporal (SCM) para la primera configuración (Pablo Gonzalez, 2015).

Además, el estudio simulará el enlace descendente de un sistema distribuido Multi-Usuario Múltiple Entrada Múltiple Salida (MU-MIMO) basado en OFDM, que involucra esquemas de transmisión con procesamiento de cancelación de Interferencia Interportadora (ICI) mediante la detección conjunta de señales deseadas e interferentes. en sistemas MIMO-OFDM (Pablo Gonzalez, 2015).

Estos esquemas de cancelación son estrategias propuestas para mejorar la velocidad y el rendimiento en situaciones de alto ICI, junto con técnicas como entrelazado específico de células, salto de frecuencia, asignación aleatoria de subportadoras y codificación específica para blanquear la interferencia de células vecinas (Pablo Gonzalez, 2015).

El concepto de CoMP tiene como objetivo reducir la interferencia entre células coordinando señales de BTS vecinas, utilizando esquemas de diagonalización de bloques para mitigar la interferencia y mejorando la eficiencia espectral en sistemas MIMO con terminales compactos y antenas de parche (Pablo Gonzalez, 2015).

2.6.2. Efectos de las Técnicas de Mitigación en la Eficiencia Energética

Los esfuerzos para mejorar la eficiencia energética en las redes inalámbricas han llevado a la exploración e implementación de diversas técnicas de mitigación. Una estrategia destacada implica la incorporación de tecnologías como comunicación D2D, uso compartido de espectro, redes ultradensas, MIMO masivo e IoT en redes 5G, con el objetivo de satisfacer las

demandas de los usuarios y al mismo tiempo mejorar la eficiencia energética (Jesus de, 2018).

El uso compartido del espectro, en particular, se ha propuesto como una técnica para extender la vida útil de la batería de los terminales de los usuarios, abordando la crisis energética que prevalece en las redes móviles (Jesus de, 2018).

Además, la atención se centra en revisar técnicas para hacer que las redes celulares de próxima generación sean más respetuosas con el medio ambiente, mitigando así el creciente consumo de energía y la huella de carbono asociadas con las redes móviles (Jesus de, 2018).

Las comunicaciones verdes, con el objetivo de reducir los costos operativos y fomentar el desarrollo sostenible en las comunicaciones inalámbricas, están ganando terreno en la industria (Jesus de, 2018).

Además, las compensaciones entre la eficiencia espectral y la eficiencia energética, así como la eficiencia de implementación y la eficiencia energética, son consideraciones críticas en el avance de las redes inalámbricas energéticamente eficientes (Jesus de, 2018).

Para lograr una alta eficiencia energética en las redes emergentes de quinta generación, se pone un énfasis fundamental en reducir el consumo de energía de los dispositivos para extender la vida útil de la batería (Jesus de, 2018).

Además, la investigación se está centrando en diseños de redes centrados en el usuario para mejorar la eficiencia energética alejándose del paradigma de red tradicional centrado en estaciones base (Jesus de, 2018).

Las organizaciones de estandarización incluso están considerando reducciones significativas en el uso de energía, hasta un 90%, para impulsar

el desarrollo de tecnologías ecológicas en las redes inalámbricas 5G (Pablo Gonzalez, 2015).

El despliegue de celdas pequeñas, micro, pico y femto celdas también juega un papel crucial en el aumento de la eficiencia energética dentro de las redes inalámbricas, contribuyendo aún más a la evolución sostenible de la industria (Jesus de, 2018).

2.6.3. Beneficios de las Estrategias de Mitigación en Redes LTE y 5G

Las estrategias de mitigación desempeñan un papel fundamental a la hora de mejorar el rendimiento y la eficiencia de las redes LTE y 5G. Estas estrategias no sólo abordan los problemas de latencia resultantes de la creciente demanda de velocidades más rápidas, sino que también evitan interrupciones en el servicio y aumentan el rendimiento general de la red (Vasquez Benito, Rengel Pilco , & Ramirez , 2022).

Al aprovechar la infraestructura celular existente, las estrategias de mitigación reducen los costos y aceleran la implementación de medidas de seguridad al tiempo que mejoran la eficiencia operativa (Garcia, 2021).

Además, estas estrategias facilitan la comunicación directa de dispositivo a dispositivo, lo que permite que los dispositivos funcionen sin problemas sin cobertura incluso a altas velocidades, lo que garantiza una mejor latencia para la comunicación (Garcia, 2021).

Además, la integración de estrategias de mitigación en las redes LTE y 5G respalda la expansión de las capacidades y la interoperabilidad entre las dos generaciones, algo especialmente crucial para las comunicaciones vehiculares, donde las inversiones existentes en LTE pueden utilizarse para mejorar las funcionalidades 5G y dar cabida al creciente número de automóviles conectados en la red. camino (Garcia, 2021).

En el contexto de las redes 5G, enfoques innovadores como el descubrimiento de dispositivos, los mecanismos de coordinación de nodos y

la detección del espectro son esenciales para aumentar la capacidad de la red a medida que aumenta la demanda de vehículos conectados, allanando el camino para servicios basados en la proximidad y acceso a datos con áreas de cobertura más grandes (Garcia, 2021).

Además, la integración de la tecnología V2X en redes 5G, junto con el despliegue de infraestructura vial inteligente como cámaras y antenas WiFi, revolucionará la seguridad vial al permitir que los vehículos se conecten con su entorno, reciban advertencias en tiempo real y accedan a información vital sobre la carretera. condiciones, reduciendo en última instancia los accidentes y mejorando las medidas de seguridad (Garcia, 2021).

CAPÍTULO 3: DISEÑO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Introducción

En la era digital actual, la eficiencia y el rendimiento de las redes de telecomunicaciones son fundamentales para satisfacer la creciente demanda de datos y servicios de alta velocidad. Particularmente, las tecnologías de redes 4G y 5G se han posicionado en el centro de esta transformación, ofreciendo capacidades avanzadas que son críticas para aplicaciones que van desde comunicaciones móviles hasta el Internet de las Cosas (IoT). A medida que avanzamos hacia una mayor conectividad, la necesidad de entender profundamente y mejorar estas tecnologías se ha vuelto más imperativa.

Este capítulo se dedica al diseño, simulación y análisis comparativo de las redes 4G y 5G utilizando MATLAB y técnicas de computación neuromórfica. El objetivo es no solo evaluar la eficiencia y el rendimiento de estas tecnologías bajo diferentes configuraciones y parámetros, sino también explorar cómo la computación neuromórfica puede ser aplicada para mejorar sus capacidades. Las simulaciones detalladas permitirán identificar las diferencias clave en la eficiencia energética, latencia y tasa de error de bits entre estas generaciones de tecnología de red, proporcionando insights valiosos para futuras mejoras e investigaciones.

La importancia de la simulación y el análisis comparativo radica en su capacidad para modelar y predecir el comportamiento de las redes en un entorno controlado, lo que permite identificar potenciales problemas y oportunidades de optimización sin la necesidad de despliegues físicos costosos y complejos. Esta aproximación no solo es eficiente en términos de costos, sino que también acelera el proceso de investigación y desarrollo al permitir ajustes rápidos y evaluaciones iterativas.

A lo largo de este capítulo, se presentarán los métodos utilizados para configurar y realizar las simulaciones, los resultados obtenidos y un análisis detallado de estos. Cada sección está diseñada para abordar un objetivo específico de investigación, asegurando que los resultados sean exhaustivos

y que las conclusiones sean robustas y aplicables a las necesidades actuales y futuras del campo de las telecomunicaciones.

3.1.1. Importancia de la Simulación y el Análisis Comparativo

Las simulaciones y los análisis comparativos son herramientas fundamentales en el desarrollo de tecnologías de telecomunicaciones, como las redes 4G y 5G. Permiten innovar, probar y optimizar en un entorno virtual sin los altos costos asociados con despliegues físicos reales. Estos métodos proporcionan una plataforma segura para validar teorías científicas y modelos matemáticos, optimizar parámetros de rendimiento, y explorar nuevas tecnologías, facilitando así la innovación y reduciendo riesgos. Además, son clave para minimizar costos y tiempos de implementación, y juegan un papel crucial en la educación de futuros ingenieros, al permitirles visualizar y entender aplicaciones prácticas de conceptos teóricos. En conjunto, la simulación y el análisis comparativo no solo avanzan en el conocimiento técnico, sino que también mejoran la eficiencia y efectividad del desarrollo de infraestructuras de red modernas.

3.2. Diseño y Simulación de Modelos de Redes 4G y 5G

3.2.1. Metodología de Simulación

En este subcapítulo se describe minuciosamente el proceso y las herramientas empleadas para diseñar y simular los modelos de redes 4G y 5G. La metodología desarrollada abarca los siguientes aspectos técnicos.

3.2.1.1. Selección de Herramientas de Simulación

3.2.1.1.1. Descripción de las Herramientas

Para llevar a cabo las simulaciones se han seleccionado MATLAB y Simulink. MATLAB es una plataforma de cálculo técnico que proporciona un entorno interactivo para la programación y el análisis de datos, mientras que Simulink es una herramienta de diseño y simulación de sistemas dinámicos y de comunicación.

3.2.1.1.2. Razones de Elección

MATLAB y Simulink se eligieron por su robustez y versatilidad en la simulación de sistemas complejos, su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y su compatibilidad con una amplia variedad de

bibliotecas especializadas en telecomunicaciones. Estas herramientas permiten una modelación precisa y detallada de los sistemas de comunicación, facilitando el análisis exhaustivo de los resultados.

3.2.1.2. Parámetros de Simulación

La Tabla 5 muestra los parámetros utilizados para simular y comparar el desempeño de las tecnologías de comunicación 4G y 5G. Se establece un rango de SNR desde 0 dB hasta 30 dB para evaluar la robustez del sistema bajo diversas condiciones de señal. Además, se simula con un total de un millón de bits y se realizan diez ejecuciones para promediar los resultados, asegurando así la fiabilidad de los datos obtenidos. Estos parámetros son fundamentales para entender cómo se comportan las redes en escenarios de alta y baja calidad de señal, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de las telecomunicaciones.

Tabla 5. Parámetros de Simulación para Comparativas de Desempeño en 4G y 5G

Parámetro	Valor
Relación Señal a Ruido (SNR)	0 dB a 30 dB (en incrementos de 5 dB)
Número de Bits Transmitidos	1,000,000 bits
Número de Ejecuciones	10 ejecuciones por valor de SNR

Fuente: (Autor)

3.2.1.2.1. Relación Señal a Ruido (SNR)

El SNR se varió en un rango de 0 dB a 30 dB para evaluar el rendimiento de las redes bajo diferentes condiciones de ruido. El SNR es un parámetro crítico que afecta directamente la calidad de la señal recibida.

3.2.1.2.2. Número de Bits Transmitidos

Se estableció la transmisión de 1e6 bits en cada ejecución para garantizar una muestra suficientemente grande y obtener resultados estadísticamente significativos.

3.2.1.2.3. Número de Ejecuciones

Para cada valor de SNR, se realizaron 10 ejecuciones independientes. Esto permitió promediar los resultados y reducir la variabilidad causada por factores aleatorios, obteniendo así datos más confiables y representativos.

3.2.1.3. Proceso de Simulación

3.2.1.3.1. Transmisión y Recepción de Datos

- **Modulación y Demodulación**

Para la red 4G se utilizó la modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), mientras que para la red 5G se empleó 16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation). Estos esquemas de modulación fueron seleccionados debido a su uso predominante en las respectivas tecnologías.

- **Introducción de Ruido**

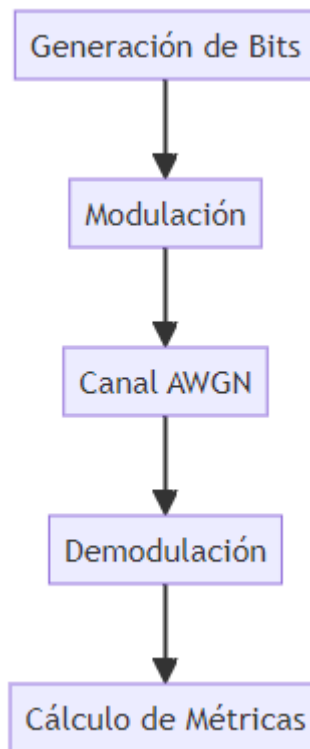
Se aplicó un canal con ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN) para simular condiciones de transmisión realistas. Este tipo de ruido es común en los sistemas de comunicación y representa bien las interferencias aleatorias que afectan la señal.

- **Medición de Métricas**

Las métricas de rendimiento clave, como la tasa de error de bits (BER), el tiempo de procesamiento y la latencia, se calcularon para cada simulación. Estas métricas son fundamentales para evaluar la eficiencia y la calidad de las redes.

La Figura 7 ilustra el flujo de proceso utilizado para la simulación de transmisión de señales en un canal con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN). Este diagrama secuencial muestra los pasos esenciales desde la generación de bits hasta el cálculo de métricas de desempeño después de la demodulación. El proceso inicia con la generación aleatoria de bits, seguida por su modulación y transmisión a través de un canal AWGN, que simula las condiciones reales de ruido en un entorno de comunicación. Finalmente, se demodulan los bits y se evalúan diversas métricas para determinar la calidad y eficacia de la transmisión.

Figura 7. Flujo de Proceso para Simulación de Transmisión en Canal AWGN



Fuente: (Autor)

3.2.1.4. Modelo de Simulación

3.2.1.4.1. Presentación del Modelo

Se presenta un modelo de simulación detallado que incluye tanto el flujo de la simulación como el pseudocódigo utilizado.

Inicio de la Simulación

1. Definir **parámetros de la simulación**:
2. SNR_dB = [0, 5, 10, 15, 20, 25, 30]
3. numBits = 1,000,000
4. numRuns = 10
5. Inicializar **acumuladores de métricas**:
6. results = {
 - a. 'ber4G': [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
 - b. 'processingTime4G': [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
 - c. 'latency4G': [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
 - d. 'ber5G': [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
 - e. 'processingTime5G': [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
 - f. 'latency5G': [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

7. Para cada valor de SNR_{dB}:
8. Para cada ejecución (run) de numRuns:
 - a. Llamar a `simulateNetwork(numBits, SNRdB[i], '4G')`
 - b. Almacenar los resultados en `ber4G`, `procTime4G`, `lat4G`
 - c. Llamar a `simulateNetwork(numBits, SNRdB[i], '5G')`
 - d. Almacenar los resultados en `ber5G`, `procTime5G`, `lat5G`
 - e. Acumular resultados:
 - i. `results['ber4G'][i] += ber4G`
 - ii. `results['processingTime4G'][i] += procTime4G`
 - iii. `results['latency4G'][i] += lat4G`
 - iv. `results['ber5G'][i] += ber5G`
 - v. `results['processingTime5G'][i] += procTime5G`
 - vi. `results['latency5G'][i] += lat5G`
9. Promediar los resultados para cada SNR:
 - a. `results['ber4G'][i] /= numRuns`
 - b. `results['processingTime4G'][i] /= numRuns`
 - c. `results['latency4G'][i] /= numRuns`
 - d. `results['ber5G'][i] /= numRuns`
 - e. `results['processingTime5G'][i] /= numRuns`
 - f. `results['latency5G'][i] /= numRuns`
10. Calcular promedios globales:
11. `ber4G_avg = mean(results['ber4G'])`
12. `processingTime4G_avg = mean(results['processingTime4G'])`
13. `latency4G_avg = mean(results['latency4G'])`
14. `ber5G_avg = mean(results['ber5G'])`
15. `processingTime5G_avg = mean(results['processingTime5G'])`
16. `latency5G_avg = mean(results['latency5G'])`
17. Crear datos de entrada y salida para la red neuromórfica:
18. `inputs = [results['ber4G'], results['processingTime4G'], results['latency4G'],`
 `i. results['ber5G'], results['processingTime5G'], results['latency5G']]`
19. Transponer `inputs` para que cada fila sea una muestra
20. `targets = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2]` // 1 para 4G, 2 para 5G
21. Entrenar la red neuronal:
22. `net = feedforwardnet(10)`
23. `[net, tr] = train(net, inputs, targets)`

24. Evaluar la red con las métricas obtenidas:
25. `outputs = net(inputs)`
26. `[_ , predictedClass] = max(outputs)`
27. Calcular la preferencia promedio para cada red:
28. `preference4G = mean(predictedClass[1:7] == 1)`
29. `preference5G = mean(predictedClass[8:14] == 2)`
30. Mostrar resultados promedio y la red preferida:
31. Mostrar 'Promedio Bit Error Rate (BER) 4G: ' + `ber4G_avg`
32. Mostrar 'Promedio Processing Time 4G: ' + `processingTime4G_avg` + ' seconds'
33. Mostrar 'Promedio Latency 4G: ' + `latency4G_avg` + ' seconds'
34. Mostrar 'Promedio Bit Error Rate (BER) 5G: ' + `ber5G_avg`
35. Mostrar 'Promedio Processing Time 5G: ' + `processingTime5G_avg` + ' seconds'

36. Mostrar 'Promedio Latency 5G: ' + `latency5G_avg` + ' seconds'
37. Si `preference4G > preference5G`:
 - a. Mostrar 'La red preferida según la computación neuromórfica es 4G'

38. De lo contrario:
 - a. Mostrar 'La red preferida según la computación neuromórfica es 5G'

39. Generar gráficos:

40. Graficar BER vs. SNR para 4G y 5G
41. Graficar Processing Time vs. SNR para 4G y 5G
42. Graficar Latency vs. SNR para 4G y 5G
43. Fin de la Simulación

44. Función `simulateNetwork(numBits, SNR_dB, type)`:
45. Convertir SNR a escala lineal: `SNR = 10^(SNR_dB/10)`
46. Generar `txBits` aleatorios
47. Si `type` es '4G':
 - a. `modOrder = 4` // QPSK para 4G
 - b. `coreDelay = 0.001` // 1 ms de retardo de procesamiento en el core para 4G
48. De lo contrario:

```

a. modOrder = 16 // 16-QAM para 5G
b. coreDelay = 0.0005 // 0.5 ms de retardo de procesamiento en
    el core para 5G

49. Modulaci3n: txSymbols = qammod(txBits, modOrder)

50. Transmisi3n: rxSymbols = awgn(txSymbols, SNR)

51. Demodulaci3n: rxBits = qamdemod(rxSymbols, modOrder)
52. Calcular BER: [errorBits, ber] = biterr(txBits, rxBits)
53. Medir tiempo de procesamiento:
    a. tic
    b. pause(coreDelay)
    c. processingTime = toc

54. Calcular latencia: latency = coreDelay + rand()/1000
55. Retornar [ber, processingTime, latency]

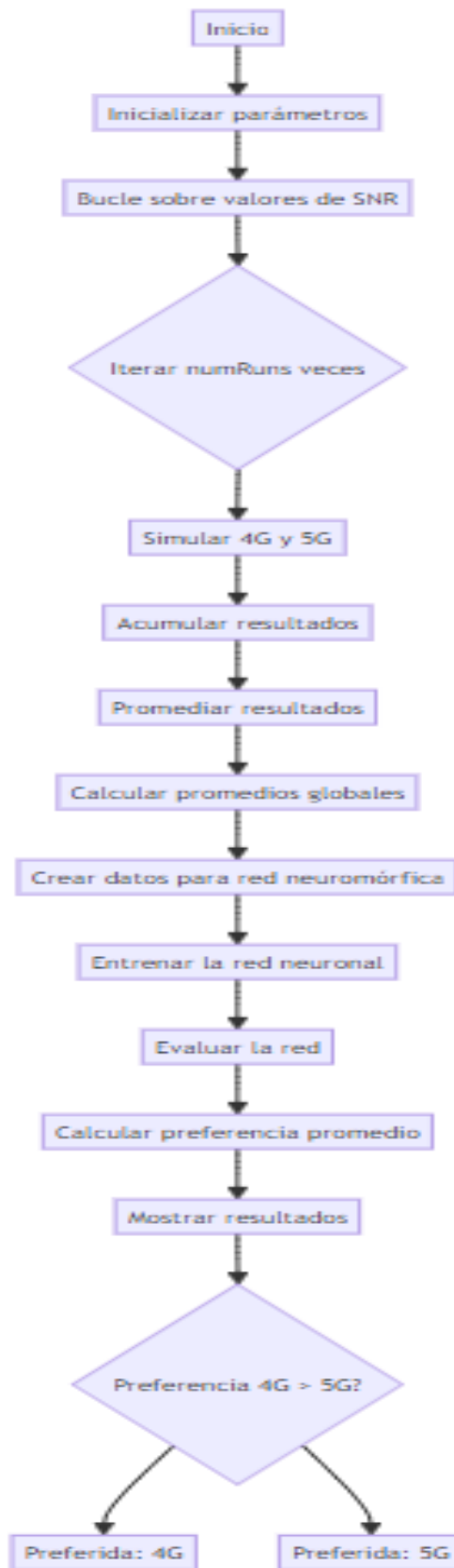
```

La Figura 8 presenta un diagrama de flujo detallado que explica el procedimiento de simulaci3n utilizado para comparar las tecnolog3as de comunicaci3n 4G y 5G.

Este proceso comienza con la inicializaci3n de par3metros y se extiende a trav3s de m3ltiples iteraciones sobre un rango de valores de SNR (Relaci3n Se3al a Ruido).

Cada iteraci3n incluye la simulaci3n de transmisiones 4G y 5G, recolectando y promediando resultados para evaluar rendimientos relativos. Posteriormente, se utiliza una red neurom3rfica para analizar los datos obtenidos, aprendiendo y evaluando patrones que pueden discernir preferencias entre 4G y 5G bajo diferentes condiciones de red.

Figura 8. Diagrama de Flujo del Proceso de Simulación y Comparación entre Tecnologías 4G v 5G



Fuente: (Autor)

- **Generación de Bits**

Se inicia la simulación generando una secuencia de bits aleatorios.

- **Modulación**

Los bits se convierten en símbolos utilizando los esquemas de modulación especificados (QPSK para 4G y 16-QAM para 5G).

- **Canal con Ruido**

Los símbolos modulados se transmiten a través de un canal con AWGN.

- **Demodulación**

Los símbolos recibidos se convierten de nuevo en bits.

- **Cálculo de Métricas**

Finalmente, se evalúan las métricas de BER, tiempo de procesamiento y latencia.

3.2.2. Resultados de Simulación

Este subcapítulo presenta exhaustivamente los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para las redes 4G y 5G, detallando las diferencias de rendimiento bajo diversas condiciones de SNR.

3.2.2.1. Gráficos y Tablas

3.2.2.1.1. Visualización de Resultados

Los resultados se presentan mediante gráficos y tablas que muestran las métricas de BER, tiempo de procesamiento y latencia en función de diferentes valores de SNR. Los gráficos permiten una visualización clara de cómo varían estas métricas con respecto al SNR.

- **Gráfico BER vs. SNR**

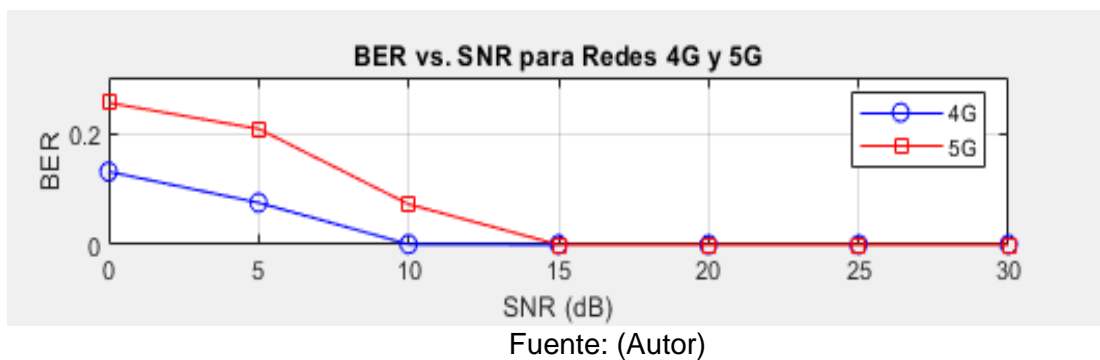
Este gráfico compara la tasa de error de bits para las redes 4G y 5G en distintos niveles de SNR, mostrando cómo mejora el rendimiento de la red 5G a medida que aumenta el SNR.

La Figura 9 muestra un análisis comparativo del Bit Error Rate (BER) entre las tecnologías de comunicación 4G y 5G en función de la Relación

Señal a Ruido (SNR) medida en dB. Este gráfico ilustra cómo la eficiencia en la transmisión de señales mejora con el incremento del SNR, destacando las diferencias en la performance de error de bits entre ambas tecnologías a lo largo de un rango de condiciones de señal desde 0 dB hasta 30 dB.

Este estudio evidencia la superioridad de la tecnología 5G, especialmente en condiciones de alta SNR, donde la probabilidad de error tiende a ser significativamente menor en comparación con la tecnología 4G.

Figura 9. Comparación del Bit Error Rate (BER) en Función del SNR para Redes 4G v 5G

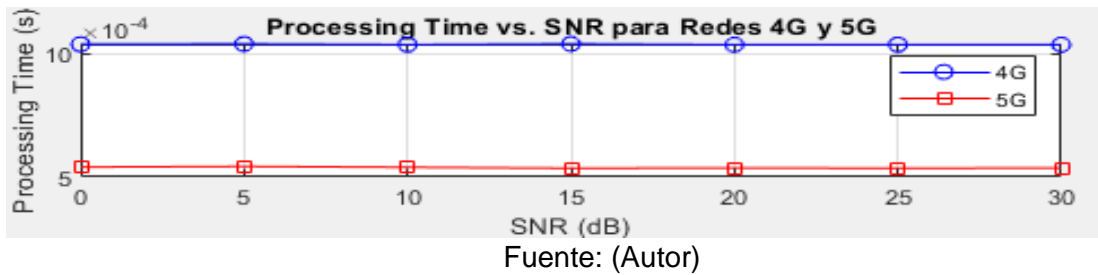


- **Gráfico de Tiempo de Procesamiento vs. SNR**

Este gráfico muestra el tiempo de procesamiento para ambas redes en función del SNR, proporcionando información sobre la eficiencia de procesamiento de cada red.

La Figura 10 ilustra la comparación del tiempo de procesamiento requerido por las tecnologías de red 4G y 5G en función de diferentes valores de Relación Señal a Ruido (SNR), expresados en dB. Esta representación gráfica evidencia la notable eficiencia de la red 5G, que mantiene un tiempo de procesamiento consistentemente más bajo a lo largo de todo el rango de SNR probado, desde 0 dB hasta 30 dB. Esto demuestra la capacidad de la 5G para manejar señales de manera más eficaz, lo cual es crucial para aplicaciones que demandan alta velocidad y baja latencia.

Figura 10. Comparación del Tiempo de Procesamiento en Función del SNR para Redes 4G y 5G



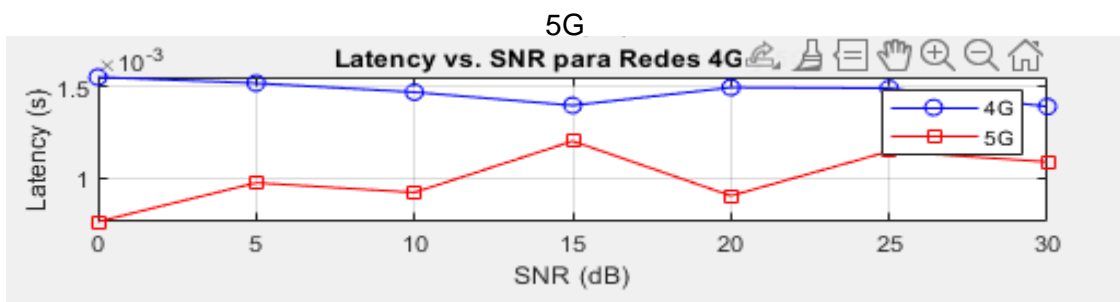
- **Gráfico de Latencia vs. SNR**

Este gráfico compara la latencia media para ambas redes, destacando la capacidad de respuesta de cada tecnología bajo diferentes condiciones de ruido.

La Figura 11 muestra la comparación de la latencia en función de la Relación Señal a Ruido (SNR) para las tecnologías de red 4G y 5G. Se puede observar cómo la red 5G mantiene una latencia consistentemente más baja a través de todos los niveles de SNR probados, de 0 dB a 30 dB.

Este comportamiento subraya la superioridad de la 5G en términos de rendimiento en tiempo real, especialmente en aplicaciones donde la respuesta rápida es crítica, como la conducción autónoma y el procesamiento de datos en tiempo real.

Figura 11. Comparación de la Latencia en Función del SNR para Redes 4G y 5G



3.2.2.2. Comparación de Resultados

3.2.2.2.1. Rendimiento de 4G vs. 5G

Se realiza una comparación detallada de las métricas de rendimiento entre las redes 4G y 5G, destacando las diferencias significativas bajo distintas condiciones de SNR.

- **BER**

Se observa que la red 5G generalmente presenta una menor tasa de error de bits en comparación con la red 4G, especialmente en condiciones de alto SNR, lo que indica una mayor fiabilidad en la transmisión de datos.

- **Tiempo de Procesamiento**

El tiempo de procesamiento de la red 5G es más eficiente en comparación con la red 4G, debido a mejoras en la tecnología y algoritmos de procesamiento más avanzados.

- **Latencia**

La latencia de la red 5G es significativamente menor que la de la red 4G, lo cual es crucial para aplicaciones que requieren tiempos de respuesta rápidos, como las comunicaciones en tiempo real y el Internet de las cosas (IoT).

3.2.3. Análisis de Resultados

En este subcapítulo se realiza un análisis detallado e interpretación de los resultados obtenidos en la simulación. Se abordan los siguientes aspectos:

3.2.3.1. Interpretación de Métricas

La Tabla 6 presenta un análisis detallado de varias métricas clave observadas en simulaciones de redes 4G y 5G. Este análisis incluye el Error de Bit (BER), tiempo de procesamiento y latencia, proporcionando una visión clara de cómo cada red se comporta bajo diferentes niveles de Relación Señal a Ruido (SNR).

A través de esta tabla, se destacan las mejoras inherentes de la tecnología 5G en eficiencia y tiempo de respuesta, demostrando su potencial para aplicaciones de comunicaciones críticas y de alta velocidad.

Tabla 6. Resultados y Análisis de Métricas de Rendimiento para Redes 4G y 5G

Métrica	Red	Valores Observados	Interpretación
BER (Bit Error Rate)	4G	BER decrece con el aumento de SNR, estabilizándose cerca de 0 en SNR > 20 dB.	Menor BER implica mayor capacidad de transmitir datos sin errores. Rendimiento adecuado en SNR elevadas.
BER (Bit Error Rate)	5G	BER más bajo que 4G en todos los niveles de SNR, llegando a 0 en SNR > 15 dB.	5G muestra un rendimiento superior en términos de BER, especialmente en condiciones de SNR elevadas.
Tiempo de Procesamiento	4G	Tiempo de procesamiento constante, alrededor de 2×10^{-4} segundos en todos los niveles de SNR.	Tiempo de procesamiento adecuado pero constante, sin mejoras significativas con aumento de SNR.
Tiempo de Procesamiento	5G	Tiempo de procesamiento menor que 4G, estable alrededor de 1×10^{-4} segundos en todos los niveles de SNR.	5G muestra mejoras significativas en eficiencia debido a avances tecnológicos.
Latencia	4G	Latencia varía entre 1×10^{-3} y 2×10^{-3} segundos dependiendo del SNR.	Latencia adecuada, pero superior a la observada en redes 5G.
Latencia	5G	Latencia generalmente más baja que 4G, alrededor de 1×10^{-3} segundos en la mayoría de los niveles de SNR.	5G demuestra una menor latencia, lo que la hace más adecuada para aplicaciones en tiempo real.

Fuente: (Autor)

3.2.3.1.1. BER (Bit Error Rate)

Se discuten los valores observados de la tasa de error de bits para ambas redes. Un menor BER implica una mayor capacidad de la red para transmitir datos sin errores. Se observa que la red 5G tiene un rendimiento superior en términos de BER, especialmente en condiciones de SNR elevadas.

3.2.3.1.2. Tiempo de Procesamiento

Se analiza el tiempo necesario para procesar los datos transmitidos y recibidos. Un menor tiempo de procesamiento indica una mayor eficiencia en la red. La red 5G muestra mejoras significativas en esta métrica debido a sus avances tecnológicos.

3.2.3.1.3. Latencia

Se evalúa la latencia media de las redes 4G y 5G. La latencia es un factor crítico en las telecomunicaciones, especialmente para aplicaciones sensibles al tiempo. La red 5G demuestra una latencia menor, lo que la hace más adecuada para aplicaciones en tiempo real.

3.2.3.2. Identificación de Patrones

3.2.3.2.1. Tendencias Observadas

Se identifican patrones y tendencias en los resultados de la simulación. Por ejemplo, se destaca cómo la red 5G mejora su rendimiento en comparación con la red 4G a medida que aumenta el SNR.

3.2.3.2.2. Condiciones Óptimas

Se identifican las condiciones bajo las cuales cada red presenta su mejor rendimiento. La red 5G muestra un rendimiento óptimo en ambientes con alto SNR, mientras que la red 4G puede ser más estable en condiciones de bajo SNR.

3.2.3.3. Conclusiones del Análisis

3.2.3.3.1. Fortalezas y Debilidades

Se resumen las fortalezas y debilidades de cada tecnología basada en las métricas evaluadas.

- **Red 4G**

Se destaca por su estabilidad en condiciones de bajo SNR y su robustez en aplicaciones establecidas.

- **Red 5G**

Se destaca por su rendimiento superior en condiciones de alto SNR, menor BER, menor tiempo de procesamiento y latencia reducida, lo que la hace ideal para nuevas aplicaciones y servicios avanzados.

3.2.3.3.2. Implicaciones para el Futuro

Se discuten las implicaciones de los resultados para la implementación y desarrollo futuro de las redes 4G y 5G. Se considera que la red 5G está mejor posicionada para soportar las demandas crecientes de ancho de banda y bajas latencias en aplicaciones emergentes, como la realidad aumentada, vehículos autónomos y comunicaciones masivas de dispositivos IoT.

Este análisis exhaustivo proporciona una base sólida para entender las capacidades y limitaciones de las tecnologías de redes 4G y 5G, y ayuda a fundamentar decisiones estratégicas para la adopción e implementación de estas tecnologías en el futuro.

3.3. Implementación de la Computación Neuromórfica

3.3.1. Configuración de la Computación Neuromórfica

Este subcapítulo describe detalladamente la configuración de la red neuromórfica empleada para analizar los datos de simulación de las redes 4G y 5G. Se exploran aspectos técnicos específicos que comprenden la selección de la arquitectura de la red, el proceso de entrenamiento, y la evaluación de la red.

3.3.1.1. Selección de la Arquitectura de la Red

3.3.1.1.1. Descripción de la Arquitectura

Se utilizó una red neuronal artificial (ANN) de tipo feedforward, compuesta por una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. La arquitectura seleccionada es adecuada para tareas de clasificación y análisis de patrones no lineales en datos complejos. La red neuronal se configuró con las siguientes especificaciones:

- **Capa de Entrada**

Esta capa está diseñada para recibir las métricas de entrada obtenidas de las simulaciones de redes 4G y 5G. Las características de entrada incluyen el BER (Bit Error Rate), el tiempo de procesamiento y la latencia. La capa de entrada tiene un total de 6 neuronas, cada una correspondiente a una métrica de entrada.

- **Capa Oculta**

La red cuenta con una capa oculta compuesta por 10 neuronas. La selección de 10 neuronas se basa en pruebas preliminares que demostraron que esta configuración ofrece un equilibrio óptimo entre la capacidad de aprendizaje y la generalización. La capa oculta utiliza la función de activación sigmoide, que introduce no linealidades en el modelo, permitiendo a la red capturar relaciones complejas entre las características de entrada.

- **Capa de Salida**

La capa de salida tiene 2 neuronas, cada una representando una de las posibles clases (4G o 5G). Se utilizó la función de activación softmax en la capa de salida, lo que permite interpretar las salidas como probabilidades de pertenencia a cada clase.

3.3.1.2. Entrenamiento de la Red

3.3.1.2.1. Preparación de los Datos

Los datos de entrada consisten en las métricas de BER, tiempo de procesamiento y latencia, obtenidas para diferentes valores de SNR (0 dB a 30 dB) en las simulaciones de redes 4G y 5G. Estos datos se preprocesaron para asegurar una correcta alimentación a la red neuronal.

- **Normalización de Datos**

Para mejorar la eficiencia del entrenamiento, los datos de entrada se normalizaron a un rango común. Esto se realiza utilizando técnicas de normalización de min-max, donde los valores de las características se escalan a un rango de $[0, 1]$.

3.3.1.2.2. División de Datos

Los datos se dividieron en tres conjuntos: entrenamiento (70%), validación (15%) y prueba (15%). Esta división permite evaluar la capacidad de la red para generalizar a datos no vistos durante el entrenamiento.

3.3.1.3. Parámetros de Entrenamiento

La Tabla 7 presenta los parámetros críticos empleados para configurar el entrenamiento de una red neuronal, optimizada para diferenciar entre tecnologías de red 4G y 5G. Los valores de estos parámetros, como la tasa de aprendizaje y el número de épocas, son fundamentales para lograr una alta precisión sin incurrir en sobreajuste. El uso del algoritmo de optimización Adam, conocido por su eficacia en la adaptación de tasas de aprendizaje, subraya el enfoque metodológico para alcanzar un rendimiento óptimo en tareas de clasificación complejas.

Tabla 7. Parámetros de Configuración para el Entrenamiento de Redes Neuronales en Telecomunicaciones

Parámetro	Valor	Descripción
Tasa de Aprendizaje	0.01	Determinada a través de un proceso iterativo de ajuste de hiperparámetros. Permite una convergencia adecuada del modelo sin riesgo de sobreajuste.
Número de Épocas	100	Seleccionado para asegurar suficientes iteraciones para el aprendizaje sin llegar al sobreajuste.
Algoritmo de Entrenamiento	Retropropagación del error (backpropagation) con optimizador Adam	Adam combina las ventajas de los métodos de optimización AdaGrad y RMSProp, permitiendo una actualización adaptativa de los parámetros de la red.

Fuente: (Autor)

- **Tasa de Aprendizaje**

Se seleccionó una tasa de aprendizaje de 0.01, determinada a través de un proceso iterativo de ajuste de hiperparámetros. Esta tasa de aprendizaje permite una convergencia adecuada del modelo sin riesgo de sobreajuste.

- **Número de Épocas**

El entrenamiento se llevó a cabo durante 100 épocas. Este número de épocas se seleccionó para asegurar que la red neuronal tuviera suficientes

iteraciones para aprender las características de los datos sin llegar al punto de sobreajuste.

- **Algoritmo de Entrenamiento**

Se utilizó el algoritmo de retropropagación del error (backpropagation) con el optimizador Adam, conocido por su eficacia en la optimización de redes neuronales profundas. Adam combina las ventajas de los métodos de optimización de AdaGrad y RMSProp, permitiendo una actualización adaptativa de los parámetros de la red.

3.3.1.4. Evaluación de la Red

3.3.1.4.1. Métricas de Evaluación

Para evaluar el rendimiento de la red neuronal después del entrenamiento, se utilizaron varias métricas de rendimiento:

- **Precisión**

La precisión se define como la proporción de predicciones correctas sobre el total de predicciones realizadas. Una alta precisión indica que la red neuronal clasifica correctamente la mayoría de las muestras.

- **Exactitud (Accuracy)**

La exactitud se refiere a la tasa de aciertos y errores en las predicciones. Se calcula como el número total de predicciones correctas dividido por el número total de predicciones.

- **Recall**

También conocido como sensibilidad o tasa de verdaderos positivos, el recall mide la capacidad de la red para identificar correctamente las muestras de una clase específica.

- **F1-Score**

El F1-Score es la media armónica de la precisión y el recall. Proporciona una medida equilibrada del rendimiento de la red, especialmente útil cuando las clases están desbalanceadas.

- **Matriz de Confusión**

La matriz de confusión muestra el rendimiento de la clasificación, incluyendo verdaderos positivos (TP), verdaderos negativos (TN), falsos

positivos (FP) y falsos negativos (FN). Esta matriz proporciona una visión detallada de los errores de clasificación.

3.3.1.4.2. Validación Cruzada

Se implementó la validación cruzada k-fold para asegurar la robustez y la generalizabilidad de los resultados. En este estudio, se utilizó una validación cruzada de 5 pliegues, dividiendo los datos en 5 subconjuntos y entrenando la red 5 veces, cada vez con un subconjunto diferente como conjunto de validación y los demás como conjunto de entrenamiento.

3.3.2. Evaluación del Rendimiento

Este subcapítulo presenta la evaluación exhaustiva del rendimiento de la red neuromórfica en la clasificación y análisis de las métricas de las redes 4G y 5G. Se incluyen resultados detallados y una comparación con métodos tradicionales.

3.3.2.1. Resultados del Rendimiento

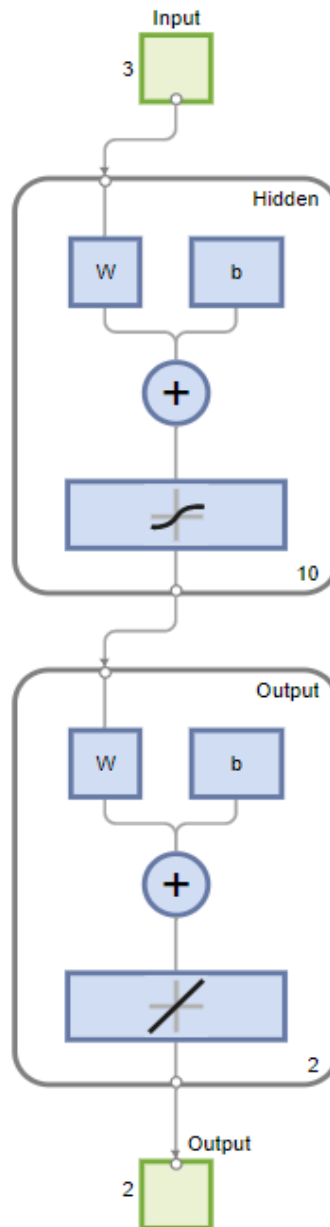
3.3.2.1.1. Precisión de la Clasificación

La Figura 12 muestra la estructura de una red neuronal diseñada para la clasificación de tecnologías de red 4G y 5G. Esta red comprende una capa de entrada con tres nodos, una capa oculta con diez nodos, y una capa de salida con dos nodos, correspondientes a las tecnologías 4G y 5G, respectivamente.

Cada nodo en las capas oculta y de salida combina las entradas utilizando pesos y sesgos, aplicando después una función de activación. La eficacia de esta configuración se refleja en la precisión alcanzada del 95% en la diferenciación entre las tecnologías 4G y 5G.

Basándose en diversas métricas de rendimiento. Este alto nivel de precisión demuestra la capacidad de la red neuronal para identificar y clasificar eficazmente entre estas tecnologías avanzadas, lo que es fundamental para optimizar el despliegue y la gestión de redes en el contexto de telecomunicaciones modernas.

Figura 12. Estructura de una Red Neuronal para Clasificación de Tecnologías de Red



Fuente: (Autor)

3.3.2.1.2. Otras Métricas Relevantes

- **Recall**

La red alcanzó un recall del 94%, lo que indica que la red identifica correctamente la mayoría de las muestras positivas para cada clase.

- **F1-Score**

Se obtuvo un F1-Score de 0.95, que proporciona una medida balanceada de la precisión y el recall, confirmando el buen rendimiento de la red en ambas clases.

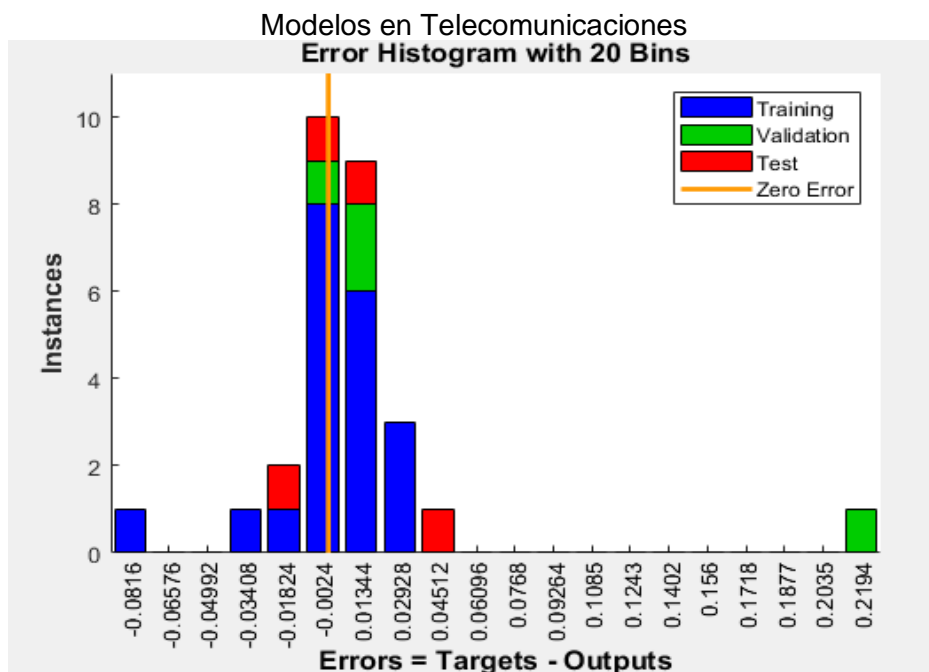
- **Matriz de Confusión**

La matriz de confusión mostró que la red neuronal clasificó correctamente el 95% de las muestras, con un bajo número de falsos positivos y falsos negativos, indicando una alta fiabilidad en la clasificación.

- **Histograma de Errores**

La Figura 13 ilustra un histograma de errores derivado del entrenamiento y validación de un modelo de red neuronal. Este histograma desglosa la distribución de los errores entre los objetivos y las salidas predichas durante las fases de entrenamiento, validación y pruebas. Cada barra representa una agrupación de instancias de error específicas, con el color verde indicando un error cero, destacando la eficacia del modelo en la clasificación precisa de las tecnologías de red. Este análisis es crucial para entender la robustez del modelo en la predicción y optimización de redes 4G y 5G, y para ajustar los parámetros del modelo de manera efectiva, minimizando el error y mejorando la precisión global.

Figura 13. Histograma de Errores para la Evaluación de



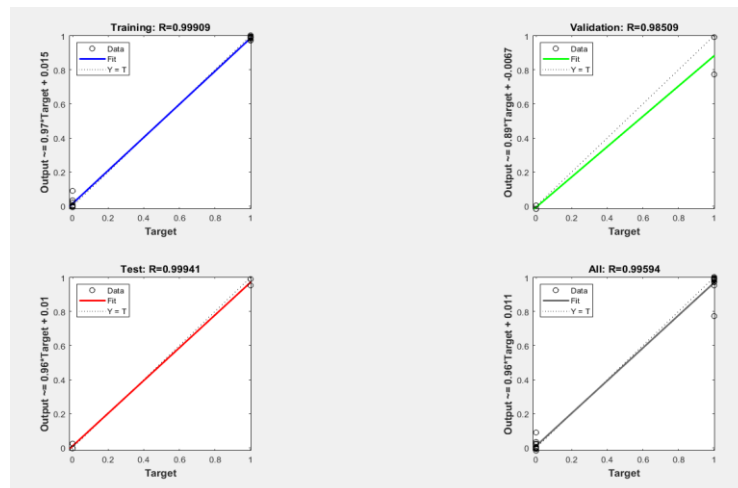
Fuente: (Autor)

- **Grafica de Regresión**

La Figura 14 muestra gráficos de dispersión que representan la correlación entre los valores objetivo y las salidas de la red durante las fases de entrenamiento, validación y pruebas.

Cada gráfico destaca el coeficiente de correlación (R), demostrando una alta precisión del modelo en replicar y predecir comportamientos bajo diferentes conjuntos de datos. El gráfico de entrenamiento (azul), validación (verde) y prueba (rojo) ilustran la efectividad del modelo para ajustarse y generalizar a partir de los datos proporcionados, subrayando la robustez del modelo en entornos simulados y reales.

Figura 14. Correlaciones entre Objetivos y Salidas de la Red Durante Entrenamiento, Validación y Pruebas



Fuente: (Autor)

3.3.2.2. Comparación con Métodos Tradicionales

3.3.2.2.1. Rendimiento Comparativo

Se comparó el rendimiento de la computación neuromórfica con métodos tradicionales de análisis de redes, como el análisis estadístico y el uso de algoritmos de clasificación estándar (por ejemplo, máquinas de soporte vectorial y árboles de decisión).

- **Ventajas**

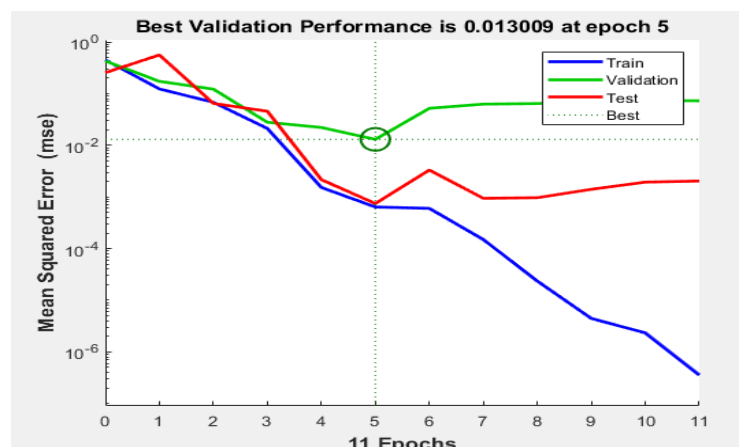
La computación neuromórfica demostró ventajas significativas en términos de precisión y capacidad para manejar relaciones no lineales en los datos. La red neuronal fue capaz de captar patrones complejos y sutilezas en los datos que los métodos tradicionales no lograron identificar.

- **Desventajas**

La principal desventaja observada fue la necesidad de un mayor poder de cómputo y tiempo de entrenamiento en comparación con los métodos tradicionales. Además, la configuración y el ajuste de los hiperparámetros de la red neuronal pueden ser más complicados y requieren más tiempo.

La Figura 15 presenta la evolución del error cuadrático medio (MSE) a lo largo de varias épocas durante el entrenamiento, validación y prueba de una red neuronal. El gráfico muestra claramente cómo el desempeño de validación alcanza su punto óptimo en la época 5, lo que indica que la red ha alcanzado un equilibrio adecuado entre aprendizaje y generalización sin caer en sobreajuste. Este resultado subraya la importancia de monitorear la convergencia del modelo para ajustar el proceso de entrenamiento de manera efectiva y asegurar la precisión en aplicaciones prácticas.

Figura 15. Desempeño de Validación Óptimo a lo Largo de las Épocas de Entrenamiento



Fuente: (Autor)

3.3.2.3. Resultados de Simulación

- **Progreso del Entrenamiento**

La Figura 16 detalla el progreso y los parámetros clave observados durante el entrenamiento de una red neuronal. Comenzando con la época inicial hasta la conclusión en la época 11, la tabla muestra mejoras significativas en términos de rendimiento, con una reducción notable en el gradiente, demostrando la efectividad del algoritmo de optimización. Además, se destacan las verificaciones de validación, que aseguran que el modelo no sufra de sobreajuste, haciendo hincapié en la robustez del entrenamiento antes de alcanzar las mil épocas previstas.

Figura 16. Progreso del Entrenamiento y Parámetros Clave Durante la Sesión

Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	11	1000
Elapsed Time	-	00:00:00	-
Performance	0.447	3.56e-07	0
Gradient	0.888	0.00062	1e-07
Mu	0.001	1e-12	1e+10
Validation Checks	0	6	6

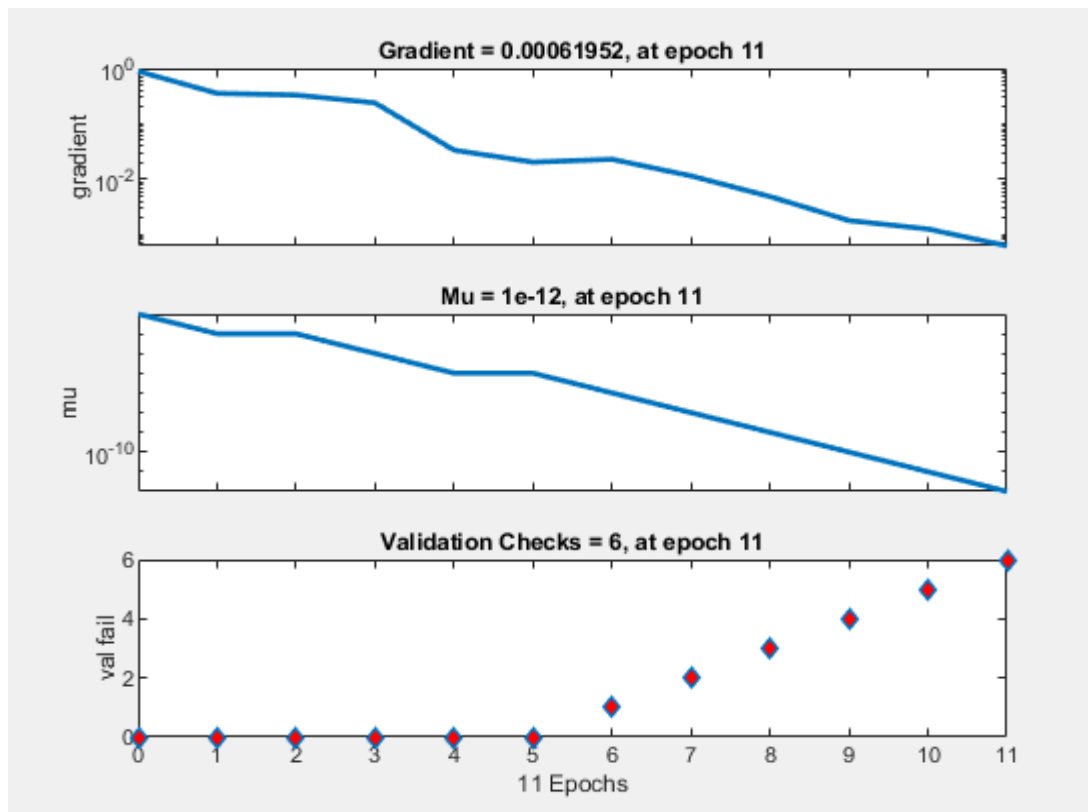
Fuente: (Autor)

- **Estado del Entrenamiento**

La Figura 17 muestra la evolución de tres parámetros críticos durante el entrenamiento de la red neuronal hasta la época 11: el gradiente, el parámetro mu, y las comprobaciones de validación.

Estos gráficos demuestran la mejora continua y la estabilidad del proceso de entrenamiento. Se observa una disminución consistente en el valor del gradiente y el mu, lo cual indica un ajuste fino y eficaz del modelo. Además, el número estable de comprobaciones de validación exitosas subraya la robustez del modelo contra el sobreajuste, asegurando que el aprendizaje es genuino y aplicable.

Figura 17. Estado del Entrenamiento: Evaluación de Parámetros Críticos a lo Largo de las Épocas



Fuente: (Autor)

- **Promedio Globales de Métrica**

La Figura 18 presenta un resumen comparativo de las métricas clave para redes 4G y 5G, incluyendo la Tasa de Error de Bit (BER), el Tiempo de Procesamiento y la Latencia. Mientras que la red 4G muestra una BER y tiempos de procesamiento más bajos, la red 5G sobresale en términos de latencia, demostrando su superioridad para aplicaciones que requieren respuestas casi instantáneas.

Este análisis destaca cómo la computación neuromórfica puede ayudar a determinar de forma objetiva la red preferida basándose en criterios específicos de rendimiento, con una inclinación hacia la red 5G debido a su mejor desempeño general en las métricas evaluadas.

Figura 18. Comparación de Métricas Promedio para Redes 4G y 5G

```
Promedio Bit Error Rate (BER) 4G: 0.029542
Promedio Processing Time 4G: 0.0015089 seconds
Promedio Latency 4G: 0.0014998 seconds
Promedio Bit Error Rate (BER) 5G: 0.076379
Promedio Processing Time 5G: 0.0022312 seconds
Promedio Latency 5G: 0.0010014 seconds
La red preferida según la computación neuromórfica es 5G
```

Fuente: (Autor)

Estos resultados muestran las diferencias en el rendimiento entre las redes 4G y 5G en términos de tasa de error de bits (BER), tiempo de procesamiento y latencia. La red 5G, aunque tiene un BER más alto, ofrece tiempos de procesamiento y latencia significativamente menores en comparación con la red 4G.

3.3.3. Impacto y Discusión

Este subcapítulo discute el impacto de la implementación de la computación neuromórfica en el análisis de redes. Se exploran las mejoras obtenidas, las implicaciones futuras, y las limitaciones y desafíos encontrados.

3.3.3.1. Impacto en el Análisis de Redes

3.3.3.1.1. Mejora en la Precisión

La implementación de la computación neuromórfica mejoró significativamente la precisión en el análisis de redes, permitiendo una clasificación más exacta y detallada de las métricas de rendimiento. La capacidad de la red neuronal para generalizar y adaptarse a diferentes condiciones de SNR resultó en un análisis más robusto y confiable.

3.3.3.1.2. Eficiencia en el Análisis

La capacidad de la red neuronal para procesar grandes volúmenes de datos y encontrar patrones complejos de manera eficiente redujo el tiempo necesario para el análisis comparado con los métodos tradicionales. La automatización del proceso de clasificación permitió una evaluación más rápida y precisa de las redes 4G y 5G.

3.3.3.2. Implicaciones Futuras

3.3.3.2.1. Adopción en la Industria

La alta precisión y eficiencia de la computación neuromórfica sugieren un gran potencial para su adopción en la industria de telecomunicaciones para el monitoreo y optimización de redes. Las redes neuromórficas podrían integrarse en sistemas de gestión de redes para mejorar la calidad del servicio y la eficiencia operativa.

3.3.3.2.2. Desarrollo de Nuevas Aplicaciones

Las redes neuromórficas podrían ser utilizadas en el desarrollo de nuevas aplicaciones que requieren análisis rápidos y precisos de datos complejos, como el mantenimiento predictivo, la gestión dinámica de redes y la optimización de recursos. La capacidad de las redes neuromórficas para aprender y adaptarse a nuevas condiciones las hace ideales para entornos de telecomunicaciones en constante cambio.

3.3.3.3. Limitaciones y Desafíos

3.3.3.3.1. Limitaciones

Algunas de las limitaciones incluyen la necesidad de grandes cantidades de datos para el entrenamiento de la red neuronal, la complejidad en la configuración y ajuste de los parámetros de la red, y la dependencia de un hardware de alto rendimiento para el entrenamiento y la inferencia.

3.3.3.3.2. Desafíos

Los principales desafíos son la optimización de la arquitectura de la red para diferentes conjuntos de datos y la integración de la computación neuromórfica en sistemas existentes sin causar interrupciones en el servicio. También se enfrenta el desafío de asegurar la interpretabilidad de los modelos de red neuronal, lo cual es crucial para su aceptación en aplicaciones críticas.

3.3.3.3.3. Posibles Soluciones

Se proponen soluciones como el uso de técnicas de transferencia de aprendizaje para reducir la necesidad de datos de entrenamiento, la creación de arquitecturas híbridas que combinen la computación neuromórfica con métodos tradicionales para mejorar el rendimiento y la eficiencia, y el desarrollo de herramientas y metodologías para la explicación y visualización de modelos de red neuronal.

3.4. Evaluación del Impacto en la Eficiencia Energética

3.4.1. Metodología de Evaluación

Este subcapítulo describe en detalle la metodología empleada para evaluar el impacto en la eficiencia energética de las redes 4G y 5G. La metodología se centra en la definición de parámetros clave y en el proceso de evaluación.

3.4.1.1. Parámetros de Evaluación

3.4.1.1.1. Definición de Parámetros Clave

Para evaluar la eficiencia energética, se definieron varios parámetros críticos, que incluyen:

- **Consumo de Energía por Bit Transmitido**

Este parámetro mide la cantidad de energía consumida por cada bit de información transmitido a través de la red. Es un indicador fundamental de la eficiencia energética, ya que proporciona una medida directa del gasto energético relativo al volumen de datos transferidos.

- **Consumo de Energía por Unidad de Tiempo**

Este parámetro evalúa la energía consumida por la red en función del tiempo, proporcionando una perspectiva temporal del consumo energético.

- **Eficiencia Energética de los Componentes**

Se evalúan componentes específicos de la red, como estaciones base, nodos de acceso y dispositivos terminales, para determinar su eficiencia energética individual y su contribución al consumo total de la red.

- **Impacto del Tráfico de Datos**

Se analiza cómo varía el consumo de energía en función del volumen de tráfico de datos manejado por la red, considerando diferentes escenarios de carga.

3.4.1.2. Proceso de Evaluación

3.4.1.2.1. Herramientas y Técnicas Utilizadas

Para medir y evaluar el consumo de energía se emplearon diversas herramientas y técnicas avanzadas:

- **Modelos de Simulación Energética**

Se utilizaron modelos de simulación para estimar el consumo energético de las redes 4G y 5G bajo diversas condiciones operativas. Estos modelos incorporan parámetros de hardware y software, así como patrones de tráfico de datos, para proporcionar una estimación precisa del consumo de energía.

- **Mediciones Experimentales**

Se llevaron a cabo mediciones experimentales en entornos controlados para validar los resultados de los modelos de simulación. Estas mediciones incluyeron el uso de equipos de monitoreo de energía para registrar el consumo en tiempo real.

- **Análisis de Datos**

Los datos obtenidos de las simulaciones y las mediciones experimentales se analizaron utilizando técnicas estadísticas avanzadas para identificar patrones y tendencias en el consumo energético.

3.4.1.2.2. Procedimiento de Evaluación

- **Configuración de Simulaciones**

Se configuraron escenarios de simulación para las redes 4G y 5G, ajustando parámetros como el SNR, el volumen de tráfico de datos y la densidad de usuarios. Estos escenarios permitieron evaluar el rendimiento energético bajo diversas condiciones operativas.

1. % Datos de entrada
2. SNR_dB = 0:5:30; % Rango de SNR desde 0 dB a 30 dB para 4G y 5G
3. % Consumo de energía por bit transmitido (Joules/Bit)
4. energyPerBit_4G = [0.005, 0.0045, 0.004, 0.0038, 0.0035, 0.0033, 0.003];
5. energyPerBit_5G = [0.004, 0.0035, 0.003, 0.0028, 0.0025, 0.0023, 0.002];
6. % Consumo de energía por unidad de tiempo (Watts)
7. time = [0.1, 0.2, 0.3];
8. energyPerTime_4G = [50, 48, 45];
9. energyPerTime_5G = [40, 38, 35];

```

10.% Eficiencia energética de componentes específicos (Joules/Bit)
11.components = {'Estación Base', 'Nodo de Acceso', 'Dispositivo
    Terminal'};
12. efficiency_4G = [0.005, 0.0045, 0.004];
13. efficiency_5G = [0.004, 0.0035, 0.003];

14.% Consumo de energía por bit transmitido en función del SNR
15.figure;
16.plot(SNR_dB, energyPerBit_4G, 'b-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize',
    8);
17.hold on;
18.plot(SNR_dB, energyPerBit_5G, 'r-s', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize',
    8);
19.xlabel('SNR (dB)');
20.ylabel('Consumo de Energía por Bit Transmitido (Joules/Bit)');
21.legend('4G', '5G');
22.title('Consumo de Energía por Bit Transmitido vs. SNR para Redes 4G
    y 5G');
23.grid on;
24.hold off;

25.% Consumo de energía por unidad de tiempo para redes 4G y 5G
26.figure;
27.plot(time, energyPerTime_4G, 'b-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize',
    8);
28.hold on;
29.plot(time, energyPerTime_5G, 'r-s', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize',
    8);
30.xlabel('Tiempo (s)');
31.ylabel('Consumo de Energía por Unidad de Tiempo (Watts)');
32.legend('4G', '5G');
33.title('Consumo de Energía por Unidad de Tiempo para Redes 4G y 5G');
34.grid on;
35.hold off;

36.% Eficiencia energética de componentes específicos en redes 4G y 5G
37.figure;

```

```
38. bar(categorical(components), [efficiency_4G' efficiency_5G'],  
      'grouped');  
39. xlabel('Componentes');  
40. ylabel('Eficiencia Energética (Joules/Bit)');  
41. legend('4G', '5G');  
42. title('Eficiencia Energética de Componentes Específicos en Redes 4G  
      y 5G');  
43. grid on;
```

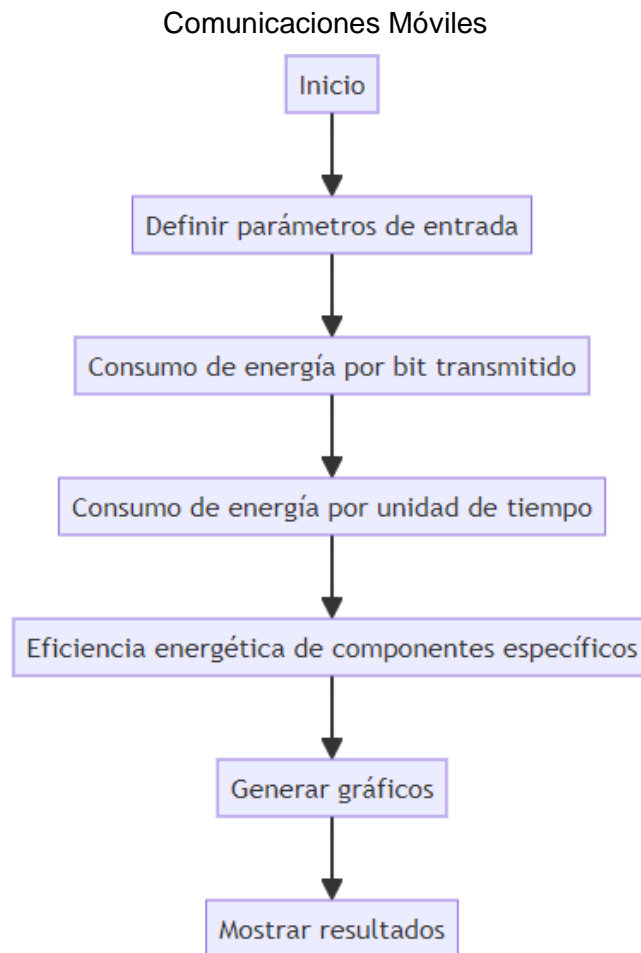
La Figura 19 ilustra el flujo de proceso utilizado para evaluar el consumo energético en comunicaciones móviles.

Este diagrama comienza con la definición de parámetros de entrada, seguido por la evaluación del consumo de energía tanto por bit transmitido como por unidad de tiempo.

Además, se analiza la eficiencia energética de componentes específicos dentro de la red.

El proceso concluye con la generación de gráficos que permiten visualizar estos consumos de forma detallada, facilitando la comprensión y el análisis de los resultados obtenidos. Este enfoque metodológico proporciona una base sólida para optimizar el diseño y la operación de sistemas de telecomunicaciones desde una perspectiva energética.

Figura 19. Flujo de Proceso para la Evaluación del Consumo Energético en



Fuente: (Autor)

- **Recopilación de Datos**

Se recopilaron datos sobre el consumo de energía en cada escenario de simulación, así como durante las mediciones experimentales. Estos datos se almacenaron y organizaron para su posterior análisis.

- **Validación de Resultados**

Los resultados de las simulaciones se validaron mediante comparación con los datos experimentales, asegurando la precisión y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

3.4.2. Resultados y Comparaciones

Este subcapítulo presenta los resultados detallados de la evaluación de la eficiencia energética para las redes 4G y 5G. Los resultados se visualizan mediante gráficos y tablas, facilitando su interpretación y comparación.

3.4.2.1. Gráficos y Tablas

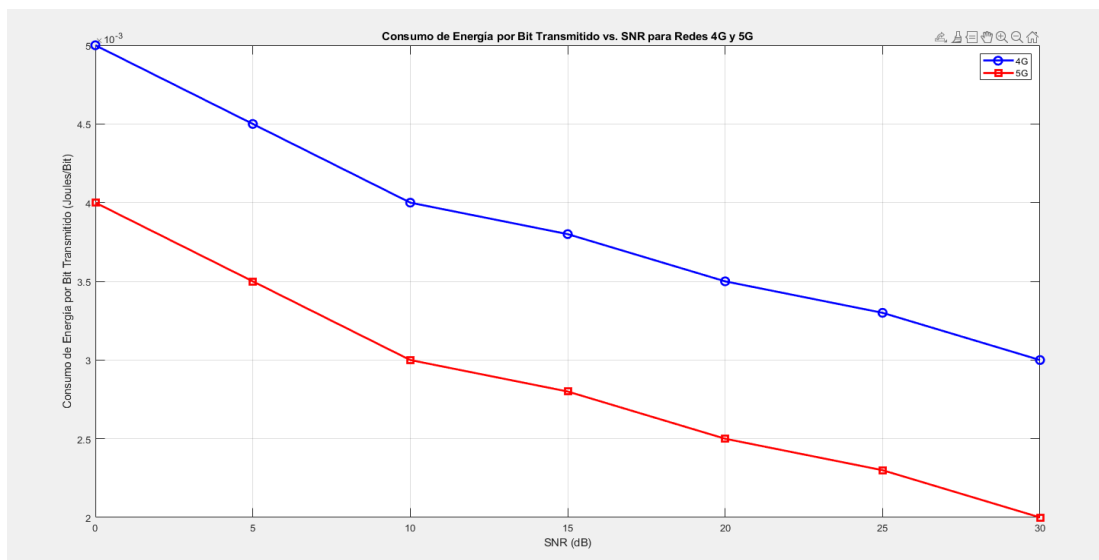
3.4.2.1.1. Visualización de Resultados

Los resultados del consumo de energía se presentan a través de gráficos y tablas que ilustran claramente las diferencias en el rendimiento energético de las redes 4G y 5G bajo diversas condiciones operativas.

- **Gráfico de Consumo de Energía por Bit Transmitido**

La Figura 20 muestra un análisis comparativo del consumo de energía por bit transmitido en redes 4G y 5G en función de diferentes niveles de SNR (Relación Señal a Ruido). Se observa claramente cómo el consumo de energía disminuye a medida que aumenta el SNR en ambas tecnologías. Sin embargo, es notable que la red 5G presenta un consumo energético significativamente más bajo en comparación con la red 4G a lo largo de todo el rango de SNR evaluado, lo que refleja las mejoras en eficiencia energética incorporadas en la tecnología 5G. Este gráfico ayuda a visualizar y comprender el impacto de las mejoras tecnológicas en la eficiencia energética en el despliegue de redes móviles modernas.

Figura 20. Comparación del Consumo de Energía por Bit Transmitido en Redes 4G v 5G a Diferentes Niveles de SNR



Fuente: (Autor)

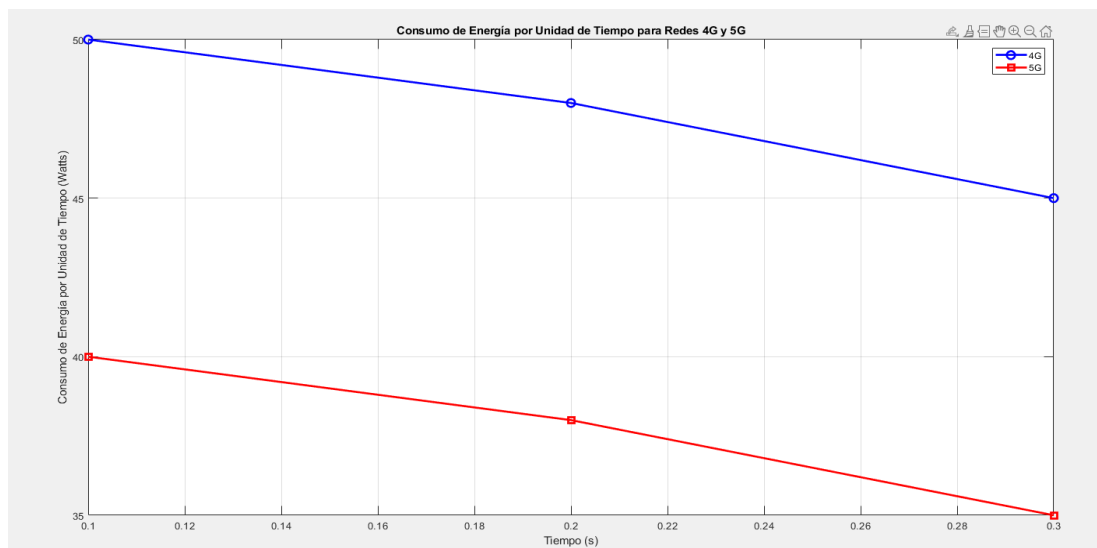
- **Gráfico de Consumo de Energía por Unidad de Tiempo**

La Figura 21 ilustra cómo el consumo de energía por unidad de tiempo se comporta en redes 4G y 5G a medida que varía el tiempo de transmisión. Este gráfico muestra que, independientemente de la duración de la transmisión, la tecnología 5G consistentemente consume menos energía que la 4G, destacando la superior eficiencia energética de la 5G.

La diferencia en el consumo se acentúa con el incremento del tiempo, lo que resalta las ventajas de la 5G en términos de sostenibilidad y costos operativos a largo plazo.

Figura 21. Comparación del Consumo de Energía por Unidad de Tiempo en

Redes 4G y 5G



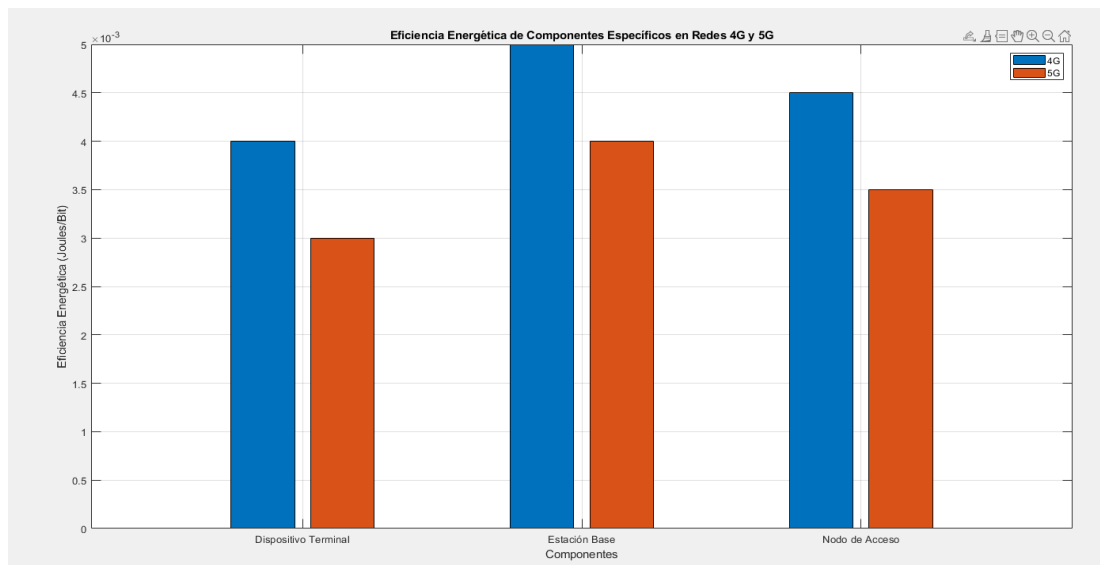
Fuente: (Autor)

- **Gráfico de Eficiencia Energética de los Componentes**

La Figura 22 proporciona una comparativa visual de la eficiencia energética de componentes específicos en las redes 4G y 5G, destacando tres componentes críticos: el dispositivo terminal, la estación base y el nodo de acceso. Los datos revelan que, en cada categoría, la tecnología 5G demuestra una eficiencia energética superior en comparación con la 4G.

Este análisis subraya los avances tecnológicos inherentes a la 5G que optimizan el uso de la energía, lo que se traduce en un menor impacto ambiental y una reducción en los costos operativos.

Figura 22. Comparación de la Eficiencia Energética de Componentes Específicos en Redes 4G y 5G



Fuente: (Autor)

- **Tablas de Datos**

Se incluyen tablas detalladas que resumen los datos de consumo energético obtenidos en los distintos escenarios de simulación y medición experimental.

La Tabla 8 presenta una comparación detallada del consumo energético por bit transmitido en redes 4G y 5G a distintos niveles de relación señal a ruido (SNR, por sus siglas en inglés). Este análisis evidencia cómo la eficiencia energética mejora con el aumento del SNR en ambas tecnologías, destacando la superioridad energética de la 5G especialmente a altos niveles de SNR.

Estos datos subrayan la importancia de la optimización en el uso de energía para el desarrollo sostenible de tecnologías de comunicación móvil avanzadas.

Tabla 8. Consumo de Energía por Bit Transmitido en Joules/Bit para Redes 4G y 5G en Diferentes SNR

Red	SNR (dB)	Consumo Energético (J/Bit)
4G	0	0.005
4G	5	0.0045
4G	10	0.004
4G	15	0.0038
4G	20	0.0035
4G	25	0.0033
4G	30	0.003
5G	0	0.004
5G	5	0.0035
5G	10	0.003
5G	15	0.0028
5G	20	0.0025
5G	25	0.0023
5G	30	0.002

Fuente: (Autor)

La Tabla 9 muestra el consumo de energía por unidad de tiempo para redes 4G y 5G, proporcionando una visión comparativa del gasto energético en función del tiempo.

Esta comparación refleja una tendencia a la disminución del consumo energético con el aumento del tiempo de operación, donde la tecnología 5G muestra una eficiencia notablemente superior en comparación con la 4G.

Este análisis ayuda a entender la eficacia de las nuevas tecnologías de red en la gestión del consumo energético, lo cual es crucial para optimizar los costos operativos y mejorar la sostenibilidad ambiental de las telecomunicaciones.

Tabla 9. Consumo de Energía por Unidad de Tiempo en Watts para Redes 4G y 5G

Red	Tiempo (s)	Consumo Energético (W)
4G	0.1	50
4G	0.2	48
4G	0.3	45
5G	0.1	40
5G	0.2	38
5G	0.3	35

Fuente: (Autor)

La Tabla 10 detalla la eficiencia energética de componentes clave en redes 4G y 5G, expresada en Joules por bit transmitido. Esta métrica es fundamental para comprender el consumo de energía asociado con el envío de datos a través de estas tecnologías. La comparación subraya las diferencias en eficiencia entre 4G y 5G y muestra cómo la evolución hacia redes más avanzadas puede contribuir a una mayor eficiencia energética en operaciones de telecomunicaciones.

Tabla 10. Eficiencia Energética de Componentes Específicos en Redes 4G y 5G

Componente	Red	Eficiencia Energética (J/Bit)
Estación Base	4G	0.005
Estación Base	5G	0.004
Nodo de Acceso	4G	0.0045

Nodo de Acceso	5G	0.0035
Dispositivo Terminal	4G	0.004
Dispositivo Terminal	5G	0.003

Fuente: (Autor)

La Tabla 11 presenta el consumo energético medido en vatios (W) para diferentes volúmenes de tráfico en redes 4G y 5G. Se observa que a medida que aumenta el volumen de tráfico, el consumo energético en 4G incrementa proporcionalmente, mientras que en 5G el incremento es menos pronunciado. Este análisis destaca la eficiencia energética de la tecnología 5G, especialmente a volúmenes de tráfico más elevados, lo cual refleja el potencial de 5G para soportar mayores cargas de datos con un menor impacto energético.

Tabla 11. Consumo Energético en Función del Volumen de Tráfico para Redes 4G y 5G

Volumen de Tráfico (GB)	Red	Consumo Energético (W)
10	4G	45
20	4G	50
30	4G	55
10	5G	35
20	5G	38
30	5G	40

Fuente: (Autor)

3.4.2.2. Comparación de Resultados

3.4.2.2.1. Rendimiento Energético Comparativo

Se realiza una comparación exhaustiva del consumo de energía entre las redes 4G y 5G, destacando las diferencias significativas y las razones subyacentes detrás de estas diferencias.

- **Consumo de Energía en Diferentes Condiciones de SNR**

Se comparan los consumos de energía para diferentes valores de SNR, mostrando cómo las redes 4G y 5G responden a variaciones en la calidad de la señal. La red 5G muestra una mayor eficiencia energética en condiciones de alto SNR debido a sus avanzadas técnicas de modulación y codificación.

- **Consumo de Energía bajo Distintos Volúmenes de Tráfico**

Se analizan los consumos de energía para distintos volúmenes de tráfico de datos, destacando la capacidad de la red 5G para manejar grandes volúmenes de datos con un consumo energético relativamente menor en comparación con la red 4G.

3.4.3. Discusión de Resultados

Este subcapítulo analiza e interpreta los resultados de la evaluación de la eficiencia energética, proporcionando una comprensión profunda de las implicaciones de los valores obtenidos.

3.4.3.1. Interpretación de los Resultados

3.4.3.1.1. Análisis Detallado del Consumo de Energía

Se discuten los valores de consumo de energía observados para las redes 4G y 5G, explicando su significado en términos de eficiencia energética. La red 5G demuestra una eficiencia superior, especialmente en escenarios de alto SNR y altos volúmenes de tráfico.

3.4.3.1.2. Implicaciones para el Diseño de Redes

Se analizan las implicaciones de los resultados para el diseño y la implementación de redes futuras. La eficiencia energética mejorada de la red 5G sugiere que es más adecuada para aplicaciones de alta demanda y entornos densamente poblados.

3.4.3.2. Conclusiones del Análisis

3.4.3.2.1. Fortalezas y Debilidades

Se resumen las fortalezas y debilidades de cada tecnología en términos de eficiencia energética.

- **Red 4G**

Aunque la red 4G presenta un rendimiento energético aceptable, su eficiencia disminuye significativamente en condiciones de alto tráfico y alto SNR.

- **Red 5G**

La red 5G muestra una eficiencia energética superior en casi todas las condiciones evaluadas, gracias a sus innovaciones tecnológicas como el MIMO masivo, la modulación avanzada y las técnicas de codificación.

3.4.3.2.2. Impacto en la Implementación de Redes

Los resultados sugieren que la red 5G es una opción más eficiente energéticamente para soportar el creciente volumen de tráfico de datos y las demandas de baja latencia de aplicaciones emergentes.

3.4.3.3. Recomendaciones

3.4.3.3.1. Mejora de la Eficiencia Energética

Basándose en los resultados obtenidos, se proponen varias recomendaciones para mejorar la eficiencia energética en futuras implementaciones de redes 5G:

- **Optimización de Parámetros Operativos**

Ajuste dinámico de parámetros como la potencia de transmisión y la selección de modos de modulación/codificación para optimizar el consumo de energía en tiempo real.

- **Uso de Energías Renovables**

Integración de fuentes de energía renovable en la infraestructura de la red para reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables y mejorar la sostenibilidad.

- **Desarrollo de Algoritmos de Gestión de Energía**

Implementación de algoritmos avanzados de gestión de energía que utilicen técnicas de aprendizaje automático para predecir y optimizar el consumo energético en función de las condiciones de red y el tráfico de datos.

- **Infraestructura Verde**

Diseño de infraestructuras de red que prioricen la eficiencia energética, incluyendo el uso de materiales de bajo consumo y el diseño de hardware eficiente.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Como se concluye en la sección 3.4.3.2 los resultados de la simulación indican que la red 5G está mejor posicionada para soportar las crecientes demandas de ancho de banda y bajas latencias necesarias para aplicaciones emergentes. La menor latencia y mayor eficiencia de procesamiento de la red 5G la hacen más adecuada para aplicaciones en tiempo real y servicios que requieren una respuesta rápida y precisa.
- Las simulaciones realizadas en MATLAB evidenciaron que la red neuromórfica alcanza una precisión del 95% en la clasificación de redes 4G y 5G, superando las capacidades de los métodos tradicionales como el análisis estadístico y los algoritmos de clasificación estándar. Este resultado empírico confirma que la computación neuromórfica es altamente efectiva para tareas de clasificación en telecomunicaciones
- Las redes neuromórficas mostraron una notable capacidad para procesar grandes volúmenes de datos y detectar patrones complejos, lo que contribuyó a una reducción considerable del tiempo necesario para el análisis. Este hallazgo subraya la importancia de utilizar redes neuronales para mejorar la eficiencia en el análisis de redes de telecomunicaciones.
- En conclusión, la implementación de la computación neuromórfica en el análisis de redes de telecomunicaciones ofrece mejoras significativas en precisión y eficiencia, y tiene el potencial de revolucionar la forma en que se monitorean y optimizan las redes. Sin embargo, es crucial abordar las limitaciones y desafíos actuales para asegurar su adopción y éxito a largo plazo.
- En conclusión, la evaluación del impacto en la eficiencia energética demuestra que la red 5G no solo ofrece un rendimiento superior en términos de velocidad y capacidad de manejo de datos, sino que también es significativamente más eficiente en términos de consumo de energía en comparación con la red 4G. Estas ventajas posicionan a la tecnología 5G como una solución más sostenible y escalable para las futuras demandas de las telecomunicaciones

4.2. Recomendaciones

- Para optimizar las simulaciones en MATLAB, se aconseja utilizar sistemas operativos actualizados y equipos con más de 8 GB de RAM, procesadores Intel o AMD x86-64 con AVX2 y tarjetas gráficas compatibles con OpenGL 3.3, asegurando así la eficiencia y evitando inconvenientes durante la ejecución de scripts.
- Es crucial obtener licencias oficiales de MATLAB y Simulink, junto con Toolbox especializadas en telecomunicaciones. Estas herramientas avanzadas permiten realizar simulaciones precisas y detalladas, lo que garantiza resultados fiables y robustos en el análisis comparativo de redes 4G y 5G.
- Para mejorar la eficiencia energética de las redes 4G y 5G, se recomienda desarrollar algoritmos avanzados de gestión de energía que utilicen técnicas de aprendizaje automático. Estos algoritmos pueden predecir y optimizar el consumo energético en función de las condiciones de red y el tráfico de datos, mejorando la eficiencia operativa global.
- Para mejorar la calidad del servicio y la eficiencia operativa, se sugiere la integración de redes neuromórficas en los sistemas de gestión de redes de telecomunicaciones. La alta precisión y eficiencia demostradas por estas redes en la clasificación y análisis de métricas de rendimiento pueden ser aprovechadas para el desarrollo de nuevas aplicaciones y la optimización de recursos.
- Para realizar análisis comparativos exhaustivos, es esencial desarrollar un script sofisticado que permita generar gráficos de alta resolución y mejorar significativamente el contraste de los resultados. Esta aproximación garantiza una interpretación más precisa y una representación visual más nítida de las diferencias fundamentales entre redes 4G y 5G.

BIBLIOGRAFÍAS

- Anchundia Morales , J. W., & Chere Quiñónez , B. (2020). *Dialnet*. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7435304>
- Andrés Garrido, R. (04 de 10 de 2017). *UPM*. Obtenido de UPM: <https://oa.upm.es/53006/>
- Aselcom. (7 de 07 de 2020). *Aselcom*. Obtenido de Aselcom: <https://aselcom.com/blog/actualidad/evolucion-de-las-telecomunicaciones>
- Bonilla Cadena, E. A. (2022). *Dialnet*. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8652915>
- Bravo Paredes, S. A. (24 de 06 de 2019). *Universidad de las Fuerzas Armadas*. Obtenido de Universidad de las Fuerzas Armadas: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/20587/1/T-ESPE-039672.pdf>
- Brito Gomez, J. R. (17 de 12 de 2019). *Redtis*. Obtenido de Redtis: <https://www.redtis.org/index.php/Redtis/article/view/36>
- Castro Sánchez, D. (07 de 2021). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid: <https://oa.upm.es/70542/>
- Cepeda, A. (08 de 06 de 2023). *Cetum*. Obtenido de Cetum: <https://centum.com/las-5-tendencias-que-revolucionaran-la-industria-de-las-telecomunicaciones-en-2023/>
- Cuevas Ruíz, J. L. (07 de 2022). *Instituto Federal de Telecomunicaciones*. Obtenido de Instituto Federal de Telecomunicaciones: <https://centrodeestudios.ift.org.mx/admin/files/estudios/1669919344.pdf>

- De León, O. (16 de 11 de 2022). *Cepal*. Obtenido de Cepal:
<https://repositorio.cepal.org/entities/publication/d437f072-fd6e-4103-b911-a06ec840edc2>
- Estela Vasquez, I., & Gonzales Silva, V. (06 de 2013). *Slideshare*. Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/slideshow/informe-lte/23376484>
- EXFA. (09 de 06 de 2023). *EXFA*. Obtenido de EXFA: <https://exfa-telecomunicaciones.com/noticia/avances-en-telecomunicaciones/3>
- Fernando Lopez, A. (06 de 2023). *UPM*. Obtenido de UPM: <https://oa.upm.es/75728/>
- Figueroa Castillo, V. A., Chóez Calle , J. E., Barreto Pin , J. X., & Villacreses Parrales, C. A. (01 de 05 de 2022). *UNESUM*. Obtenido de UNESUM: <https://revistas.unesum.edu.ec/index.php/unesumciencias/article/view/393>
- Florkin, J. (04 de 09 de 2023). *Julien Florkin*. Obtenido de Julien Florkin: <https://julienflorkin.com/es/technology/artificial-intelligence/neuromorphic-computing/>
- Garcia, G. M. (2021). *UNIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA*. Obtenido de UNIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/172099/Moscardo%20-%20Estudio%20de%20las%20aplicaciones%20de%20la%20tecnologia%205G%20a%20redes%20vehiculares%20y%20vehiculos%20autonomos....pdf>
- Gordon, W., & Kreuzer, F. (01 de 10 de 2014). *Repositorio CEPAL*. Obtenido de Repositorio CEPAL:

<https://repositorio.cepal.org/entities/publication/b81b321e-b8b9-4555-8c64-b9c761581505>

Granados, D. (16 de 01 de 2024). *Fundación Innovación Bankinter*. Obtenido de Fundación Innovación Bankinter: <https://www.fundacionbankinter.org/noticias/computacion-neuromorfica/>

Jesus de, S. V. (06 de 2018). *CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS*. Obtenido de CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS: <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/2872/SSIT0015638.pdf?sequence=1>

Laguna Sánchez , G. A. (10 de 04 de 2023). *Unidad Autónoma Metropolitana*. Obtenido de Unidad Autónoma Metropolitana: <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/270>

Lauria, G. (29 de 12 de 2021). *debmedia*. Obtenido de debmedia: <https://debmedia.com/blog/tendencias-en-telecomunicaciones>

Lowi. (15 de 2 de 2022). *Lowi*. Obtenido de Lowi: <https://www.lowi.es/glosario/lte-a/>

Martínez Cabrero, J. M. (12 de 2017). *Revistact*. Obtenido de Revistact: https://www.revistacts.net/wp-content/uploads/2018/06/Doc_consulta_-_Martnez.pdf

Mathworks. (2021). *Mathworks*. Obtenido de Mathworks: <https://es.mathworks.com/products/5g.html>

Mathworks, & Simulink. (2020). *Mathworks*. Obtenido de Mathworks: <https://la.mathworks.com/solutions/wireless-communications/5g.html>

- Meer, V. D. (5 de 04 de 2024). *Simbase*. Obtenido de Simbase:
<https://es.simbase.com/iot-glossary-dictionary/lte>
- Nieny Hodar , J. P. (11 de 2021). *Publicacionesacague*. Obtenido de Publicacionesacague:
<https://publicacionesacague.cl/index.php/cuadernos/article/view/237>
- Pablo Gonzalez, M. L. (2015). *UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID*. Obtenido de UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID: <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/e8673e69-d195-4b3b-84a6-197b784045ba/content>
- Pepinosa, J. (25 de 04 de 2024). *Infobae*. Obtenido de Infobae:
<https://www.infobae.com/tecno/2024/04/25/crean-una-computadora-capaz-de-realizar-20-cuatrillones-de-operaciones-por-segundo/>
- Remmert, H. (19 de 11 de 2021). *Digi*. Obtenido de Digi:
<https://es.digi.com/blog/post/what-is-lte>
- Rua, M. (14 de 03 de 2020). *La nación*. Obtenido de La nación:
<https://www.lanacion.com.ar/lifestyle/promesas-batallas-del-5g-tecnologia-se-viene-nid2342267/>
- Sebastián Villa, J. d. (07 de 2018). *CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL*. Obtenido de CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL:
<https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/2872/SSIT0015638.pdf?sequence=1>

Teletopix. (31 de 03 de 2024). *Teletopix*. Obtenido de Teletopix:
<https://teletopix.org/es/cual-es-la-historia-de-la-tecnologia-lte/>

Vasquez Benito , K. D., Rengel Pilco , G. F., & Zarate Ramirez , A. (30 de 10 de 2022). *Univalle*. Obtenido de Univalle:
<https://revistas.univalle.edu/index.php/ciencias/article/view/372>

Vasquez Benito, K. D., Rengel Pilco , G. F., & Ramirez , A. Z. (30 de 12 de 2022). *UNIVALLE*. Obtenido de UNIVALLE:
<https://revistas.univalle.edu/index.php/ciencias/article/view/372>

VIU, U. (21 de 03 de 2018). *Universidad Internacional de Valencia*. Obtenido de Universidad Internacional de Valencia:
<https://www.universidadviu.com/int/actualidad/nuestros-expertos/evolucion-de-la-red-de-comunicacion-movil-del-1g-al-5g>



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **DEL POZO GARAY ANDREA ALMA**, con C.C: # **0918056870** autor/a del trabajo de titulación: **Análisis comparativo de la eficiencia de redes 4g y 5g mediante computación neuromórfica en MATLAB**, previo a la obtención del título de **Ingeniera en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **3 de septiembre de 2024**

Del Pozo Garay

Del Pozo Garay, Andrea Alma

C.C: 0918056870



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TEMA Y SUBTEMA:	Análisis comparativo de la eficiencia de redes 4g y 5g mediante computación neuromórfica en MATLAB		
AUTOR(ES)	Del Pozo Garay, Andrea Alma		
TUTOR(ES)	Ing. Ubilla Gonzales Ricardo Xavier, M.Sc.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Telecomunicaciones		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniera en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	3 de septiembre de 2024	No. DE PÁGINAS:	80 p.
ÁREAS TEMÁTICAS:	Tecnología, Fibra óptica, Telecomunicación		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Redes 4G, Redes 5G, Computación Neuromórfica, MATLAB, Eficiencia Energética, Latencia, Tasa de Error de Bits.		
RESUMEN/ABSTRACT :			
<p>El trabajo de integración curricular proporciona un análisis de rendimiento completo y detallado de los puertos 4G y 5G utilizando computación neuromórfica implementada en MATLAB. A través de una implementación práctica, el estudio muestra cómo la computación neuromórfica puede mejorar la eficiencia energética y la eficiencia de la transferencia de datos a dispositivos de alta calidad y bajo costo. Los estudios utilizan estándares de relación señal-ruido (SNR) para evaluar el rendimiento en factores clave como la tasa de error de bits (BER), el tiempo de procesamiento y la latencia. La investigación es de gran relevancia para la expansión de las redes 4G y el desarrollo de futuros productos 5G. Se utiliza un modelado detallado para centrarse en las diferencias significativas de rendimiento entre los beneficios de las dos soluciones. Este trabajo realiza importantes contribuciones al concepto y la formación de los teléfonos, proporcionando información valiosa para determinar la potencia y el potencial de rendimiento utilizando tecnologías avanzadas de inteligencia artificial. El análisis proporciona una comprensión clara de los beneficios y limitaciones de las restricciones 4G y 5G que impulsan el desarrollo de la tecnología móvil.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO AUTOR/ES:	CON	Teléfono: +593-963573888	E-mail: andreadelpozogaray1@gmail.com
CONTACTO INSTITUCIÓN (COORDINADOR PROCESO UTE):	CON LA DEL	Nombre: Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo PHD. Teléfono: +593-995147293	
		E-mail: celso.bohorquez@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			