



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE TELEMÁTICA

Trabajo de Integración Curricular
previa la obtención del Grado
Académico de Ingeniero en
Telemática.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

**“EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE INTERNET DE LAS
COSAS EN REDES DE QUINTA GENERACIÓN”**

AUTOR:

JULIUS MANUEL VINUEZA LOOR

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

ING. DIEGO FERNANDO INTRIAGO RODRÍGUEZ, M. Sc

QUEVEDO – LOS RÍOS – ECUADOR

2024



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **JULIUS MANUEL VINUEZA LOOR**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

JULIUS MANUEL VINUEZA LOOR

C.I: 1250963657



CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Diego Fernando Intriago Rodríguez**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Julius Manuel Vinueza Loor**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado **“Eficiencia energética para sistemas de internet de las cosas en redes de quinta generación”**, previo a la obtención del título **Ingeniero Telemático**, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, M. Sc
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito, **Diego Fernando Intriago Rodríguez**, mediante el presente cumpla en presentar a usted, el informe de proyecto de Investigación titulado **“EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE INTERNET DE LAS COSAS EN REDES DE QUINTA GENERACIÓN”** Presentado por el estudiante, **Julius Manuel Vinueza Llor**, egresado de la Carrera de Telemática, que fue revisado bajo mi dirección según resolución del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, que se ha desarrollado de acuerdo al Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple con el requerimiento de análisis del sistema COMPILATIO el cual avala los niveles de originalidad en un 94% y similitud 6%, del trabajo investigativo. Valido este documento para que el estudiante siga con los trámites pertinentes, de acuerdo como lo establece el Reglamento.

Se adjunta imagen del sistema COMPILATIO.



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

Proyecto de investigación - Julius
Vinueza Llor

6%
Textos
sospechosos

3% Similitudes
3% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: Proyecto de investigación - Julius Vinueza Llor.pdf
ID del documento: 7e3b82188b10c5dad5a347859b70ee24835605a
Tamaño del documento original: 2.44 MB
Autores: []

Depositar: DIEGO FERNANDO INTRIAGO RODRIGUEZ
Fecha de depósito: 14/11/2024
Tipo de carga: Interfaz
Fecha de emisión: 14/11/2024

Número de palabras: 22.416
Número de caracteres: 167.906


Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, M. Sc
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE TELEMÁTICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

“Eficiencia energética para sistemas de internet de las cosas en redes de quinta generación”

Presentado al Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero Telemático.

Aprobado por:

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Anthony Limber Morán Cabezas, M. Sc

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Ángel Iván Torres Quijije, M. Sc

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Néstor Rafael Salinas Buestan, M. Sc

QUEVEDO – LOS RIOS – ECUADOR

2024

AGRADECIMIENTO

Al cerrar este importante capítulo de mi desarrollo académico en la carrera de Ingeniería en Telemática en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, quiero expresar mi sincero reconocimiento a todos aquellos que, con su apoyo y orientación, han sido esenciales para alcanzar este objetivo.

En primer lugar, agradezco a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo por ser el espacio donde no solo adquirí conocimientos técnicos, sino también valores fundamentales que me han fortalecido a nivel profesional y personal.

Agradezco profundamente a mis docentes, cuyo compromiso y dedicación fueron clave en mi formación. Su guía no solo amplió mis conocimientos, sino que también reforzó en mí los principios de ética y profesionalismo necesarios para avanzar con confianza en mi carrera. Asimismo, extendiendo mi gratitud a mi Tutor de Proyecto de Investigación, Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, M.Sc., por su apoyo constante y generosidad al compartir su conocimiento y experiencia.

A mis compañeros de clase, por su amistad y colaboración. Compartimos aprendizajes, superamos desafíos y nos apoyamos mutuamente en cada proyecto, haciendo del aprendizaje una experiencia compartida.

Por último, y no menos importante, expreso mi más profunda gratitud a mi familia, especialmente a mis padres, Eulalia y Julius, quienes han sido los pilares inquebrantables de mi vida. Su apoyo constante, junto con el cariño y la confianza de mi familia, me han dado la fortaleza para alcanzar esta meta. Sin ellos, este logro no habría sido posible.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de investigación, con infinito amor, a mis padres, Eulalia Llor Valencia y Julius Vinueza Esmeraldas, cuyo amor, esfuerzo y apoyo constante me han acompañado en cada paso de este camino. Gracias a su confianza y sacrificio, he tenido la oportunidad de alcanzar esta meta, que es tanto mía como suya.

A mis hermanas, Heidy Vinueza y Jeniffer Vinueza, cuyo aliento y compañía han sido fundamentales en esta travesía. Su confianza y palabras de ánimo me han impulsado a seguir adelante en cada desafío.

A mis amigos cercanos, quienes han sido una fuente constante de alegría y motivación a lo largo de este camino. Su presencia y sus palabras me recordaron la importancia de disfrutar cada paso del proceso y de seguir adelante con entusiasmo. Gracias por cada conversación, cada risa compartida y por su apoyo sincero.

Este logro es el reflejo del apoyo y cariño de cada uno de ustedes. Hoy lo celebro con profundo agradecimiento y la certeza de que sin ustedes no habría sido posible.

RESUMEN EJECUTIVO Y PALABRAS CLAVE

La presente investigación aborda la eficiencia energética de los sistemas de Internet de las Cosas (IoT) en el contexto de redes de quinta generación (5G). Mediante simulaciones en entornos controlados, se evaluó el consumo energético y se diseñaron estrategias de optimización basadas en técnicas avanzadas de gestión de energía, como los modos de reposo profundo y espera. Los resultados obtenidos evidencian una reducción significativa en el consumo energético, especialmente en escenarios de alta demanda, lo que permite mejorar la sostenibilidad y el rendimiento operativo de estos sistemas. Este trabajo también resalta el potencial de las redes 5G para soportar aplicaciones IoT en ámbitos como la salud, la agricultura y los hogares inteligentes, garantizando un uso más eficiente de los recursos. Las estrategias propuestas promueven una adopción tecnológica sostenible, contribuyendo al desarrollo de infraestructuras digitales más responsables con el medio ambiente y económicamente viables. Los hallazgos subrayan la importancia de integrar soluciones energéticamente eficientes en el diseño y despliegue de estas tecnologías para maximizar su impacto positivo en diversos sectores.

Palabras clave: Gestión de energía, MIMO Masivo, Optimización de recursos, Simulación de redes

ABSTRACT AND KEYWORDS

This research addresses the energy efficiency of Internet of Things (IoT) systems within fifth-generation (5G) networks. Through simulations in controlled environments, energy consumption was evaluated, and optimization strategies were developed based on advanced energy management techniques, such as deep sleep and standby modes. The results demonstrate a significant reduction in energy consumption, particularly in high-demand scenarios, enabling improved sustainability and operational performance of these systems. This study also highlights the potential of 5G networks to support IoT applications in fields such as healthcare, agriculture, and smart homes, ensuring more efficient resource utilization. The proposed strategies promote sustainable technological adoption, contributing to the development of environmentally responsible and economically viable digital infrastructures. The findings emphasize the importance of integrating energy-efficient solutions into the design and deployment of these technologies to maximize their positive impact across various sectors.

Keywords: Energy management, Massive MIMO, Resource optimization, Network simulation.

TABLA DE CONTENIDO

PORTADA.....	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	iii
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO	iv
CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA	vii
RESUMEN EJECUTIVO Y PALABRAS CLAVE.....	viii
ABSTRACT AND KEYWORDS	ix
CÓDIGO DUBLIN	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1.1 Problema de investigación	3
1.1.1 Planteamiento del problema	3
1.1.2 Formulación del problema.....	4
1.1.3 Sistematización del problema.....	4
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Alcance	5
1.4 Justificación	6
CAPÍTULO II.....	7
2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	7
2.1 Marco referencial	8

2.1.1	Investigaciones internacionales.	8
2.1.1.1	On Predicting Sensor Readings with Sequence Modeling and Reinforcement Learning for Energy-Efficient IoT Applications.	8
2.1.1.2	Study on Energy Consumption Optimization Scheduling for Internet of Things.	8
2.1.1.3	Energy Efficiency Perspectives of Femtocells in Internet of Things: Recent Advances and Challenges.	9
2.1.1.4	Modeling and Analysis of Data and Coverage Energy Efficiency for Different Demographic Areas in 5G Networks.	9
2.1.1.5	Energy Efficiency in Massive MIMO-Based 5G Networks: Opportunities and Challenges.	9
2.1.1.6	Privacy Protection and Energy Optimization for 5G-Aided Industrial Internet of Things.	10
2.1.1.7	Rate and Energy Efficiency Improvements for 5G-based IoT with Simultaneous Transfer.	10
2.1.1.8	Improving Energy Efficiency and Scalability for IoT Communications in 5G Networks.	10
2.1.1.9	One Integrated Energy Efficiency Proposal for 5G IoT Communications.	11
2.1.1.10	Procesamiento de señales para mejorar la eficiencia energética y la seguridad en internet de las cosas.	11
2.2	Marco conceptual.	11
2.2.1	Internet de las cosas.	11
2.2.2	Arquitectura simplificada en sistemas de internet de las cosas.	12
2.2.3	Protocolos de los sistemas de internet de las cosas.	13
2.2.3.1	Protocolo extensible de mensajería y presencia (XMPP).	13
2.2.3.2	Transporte de telemetría de cola de mensajes (MQTT).	13
2.2.3.3	Protocolo de Aplicaciones Restringidas (CoAP).	14
2.2.3.4	Protocolo avanzado de cola de mensajes (AMQP).	14
2.2.3.5	Servicio de distribución de datos (DDS).	14

2.2.3.6	Tecnologías de Comunicación en Redes de IoT: Protocolos y Aplicaciones en el Modelo TCP/IP.....	15
2.2.4	Redes de quinta generación 5G	15
2.2.5	Tecnología de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO).....	16
2.2.6	Ondas milimétricas (mmWave)	16
2.2.7	Arquitectura 5G	17
2.2.8	Eficiencia energética (EE)	17
2.2.9	Desafíos en Eficiencia Energética para IoT	18
2.2.10	Desafíos en Eficiencia Energética para redes 5G	18
2.3	Marco legal	19
2.3.1	Constitución de la República del Ecuador.....	19
2.3.2	Ley Orgánica de Telecomunicaciones	19
2.3.3	Reglamento General a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones	19
2.3.4	Política Nacional de Eficiencia Energética.....	19
CAPÍTULO III		20
3	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	20
3.1	Tipo de investigación	21
3.1.1	Investigación Descriptiva	21
3.1.2	Investigación Bibliográfica	21
3.2	Métodos de investigación	21
3.2.1	Método Cuantitativo	21
3.3	Fuentes de recopilación de información	22
3.3.1	Fuentes secundarias	22
3.4	Diseño de la investigación	22
3.5	Recursos humanos y materiales	23
3.5.1	Recursos humanos	23
3.5.2	Recursos y materiales	24

CAPÍTULO IV	25
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1 Cuantificación del consumo energético de sistemas IoT	26
4.1.1 Selección de software	26
4.2 Simulación del entorno	27
4.2.1 Característica del consumo energético de los dispositivos IoT	27
4.2.2 Diseño de la simulación.....	29
4.2.3 Parámetros de la red 5G.....	30
4.2.4 Diagrama de arquitectura de red.....	31
4.2.4.1 Escenario 1	31
4.2.4.2 Escenario 2.....	31
4.2.4.3 Escenario 3.....	32
4.2.5 Interpretación de los resultados	40
4.2.5.1 Primer escenario: Domótica.....	41
4.2.5.2 Segundo escenario: Salud.	43
4.2.5.3 Tercer escenario: Agricultura.	46
4.2.5.4 Comparación entre escenarios: domótica, salud y agricultura.....	49
4.3 Técnicas de gestión de energía	49
4.3.1 Idle mode	50
4.3.1.1 Implementación de Idle mode en los escenarios.	50
4.3.2 Deep sleep mode.....	52
4.3.2.1 Implementación de modo deep sleep en los escenarios.....	52
4.3.3 Sleep mode	54
4.3.3.1 Implementación de sleep mode en los escenarios.	54
4.3.4 Standby mode	56
4.3.4.1 Implementación de standby mode en los escenarios.	56

4.4	Propuestas de estrategias de optimización del consumo energético en sistemas IoT	59
4.4.1	Rendimiento de la red con técnicas de gestión energética	60
4.4.1.1	Latencia.....	60
4.4.1.2	Tasa de error de bits.	60
4.4.1.3	Tasa de errores de paquetes.....	61
4.4.1.4	Consumo energético por bit transmitido.....	62
4.4.1.5	Eficiencia energética en los diferentes escenarios.	64
4.4.1.6	Costo energético de la comunicación.	65
4.4.2	Justificación de la herencia del modo deep sleep	67
CAPÍTULO V.....		69
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
5.1	Conclusiones.....	70
5.2	Recomendaciones	70
CAPÍTULO VI		72
6	BIBLIOGRAFÍA.....	72
6.1	Referencias.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recursos humanos	23
Tabla 2. Requerimientos de hardware.....	24
Tabla 3. Requerimientos de software.....	24
Tabla 4. Características de software	26
Tabla 5. Característica de IoT en domótica	28
Tabla 6. Característica de IoT en la salud	28
Tabla 7. Característica de IoT en la agricultura	29
Tabla 8. Característica de la red 5G	30
Tabla 9. Consumo energético del primer escenario	41
Tabla 10. Eficiencia de los paquetes transmitidos vs. Primer escenario.....	42
Tabla 11. Rendimiento energético vs. Primer escenario	43
Tabla 12. Consumo energético del segundo escenario	44
Tabla 13. Eficiencia de los paquetes transmitidos vs. Segundo escenario	44
Tabla 14. Rendimiento energético vs. Segundo escenario.....	45
Tabla 15. Consumo energético del tercer escenario	46
Tabla 16. Eficiencia de los paquetes transmitidos vs. Tercer escenario	47
Tabla 17. Rendimiento energético vs. Tercer escenario.....	48
Tabla 18. Valores de latencia con diferentes técnicas de consumo energético	60
Tabla 19. Valores de BER con diferentes técnicas de consumo energético	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura de red del primer escenario	31
Figura 2. Arquitectura de red del segundo escenario	32
Figura 3. Arquitectura de red del tercer escenario.....	32
Figura 4. Parámetros de las antenas	33
Figura 5. Lista de dispositivos IoT	34
Figura 6. Cargar y extraer los datos del dataset.....	35
Figura 7. Distribución de los diferentes dispositivos para cada antena.....	35
Figura 8. Asignación del SNR para el escenario	36
Figura 9. Código para almacenar el consumo energético.....	36
Figura 10. Transmisión de los datos	37
Figura 11. Código para calcular el BER	37
Figura 12. Código para almacenar todo el consumo energético de la simulación	37
Figura 13. Código para calcular el PER	38
Figura 14. Comando para actualizar el consumo energético.....	38
Figura 15. Código para mostrar el consumo por celda.....	38
Figura 16. Código para mostrar consumo energético por retransmisiones	39
Figura 17. Cálculo del consumo energético por bit transmitido	39
Figura 18. Cálculo de la eficiencia energética.....	39
Figura 19. Mostrar resultados del BER y PER.....	40
Figura 20. Código para calcular los valores de latencia	40
Figura 21. Entornos no ideales vs. Idle mode	50
Figura 22. Entornos ideales vs. Idle mode	51
Figura 23. Retransmisiones vs. Idle mode	51
Figura 24. Entornos no ideales vs. Deep sleep mode	52
Figura 25. Entornos ideales vs. Deep sleep mode	53
Figura 26. Retransmisiones vs. Deep sleep mode	54
Figura 27. Entornos no ideales vs. Sleep mode.....	55
Figura 28. Entornos ideales vs. Sleep mode.....	55
Figura 29. Retransmisiones vs. Sleep mode.....	56
Figura 30. Entornos no ideales vs. Standby mode	57
Figura 31. Entornos ideales vs. Standby mode	57
Figura 32. Retransmisiones vs. Standby mode.....	58

Figura 33. Consumo energético por bit transmitido en escenarios no ideal vs Técnicas de gestión energéticas.....	62
Figura 34. Consumo energético por bit transmitido en escenarios no ideal vs Técnicas de gestión energéticas.....	63
Figura 35. Eficiencia energética en escenarios no ideal vs Técnicas de gestión energéticas	64
Figura 36. Eficiencia energética en escenarios ideal vs Técnicas de gestión energéticas..	65
Figura 37. Consumo energético de la comunicación en escenarios no ideal vs Técnicas de gestión energéticas.....	66
Figura 38. Consumo energético de la comunicación en escenarios ideal vs Técnicas de gestión energéticas.....	66

CÓDIGO DUBLIN

Título:	Eficiencia energética para sistemas de internet de las cosas en redes de quinta generación			
Autor:	Julius Manuel Vinueza Loor			
Palabras claves:	Gestión de energía	MIMO Masivo	Optimización de recursos	Simulación de redes
Fecha de publicación:	Noviembre del 2024			
Director del proyecto:	Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, M. Sc			
Editorial:	Quevedo- UTEQ “La María”, 2024			
Resumen:	La presente investigación aborda la eficiencia energética de los sistemas de Internet de las Cosas (IoT) en el contexto de redes de quinta generación (5G). Mediante simulaciones en entornos controlados, se evaluó el consumo energético y se diseñaron estrategias de optimización basadas en técnicas avanzadas de gestión de energía, como los modos de reposo profundo y espera. Los resultados obtenidos evidencian una reducción significativa en el consumo energético, especialmente en escenarios de alta demanda, lo que permite mejorar la sostenibilidad y el rendimiento operativo de estos sistemas. Este trabajo también resalta el potencial de las redes 5G para soportar aplicaciones IoT en ámbitos como la salud, la agricultura y los hogares inteligentes, garantizando un uso más eficiente de los recursos. Las estrategias propuestas promueven una adopción tecnológica sostenible, contribuyendo al desarrollo de infraestructuras digitales más responsables con el medio ambiente y económicamente viables. Los hallazgos subrayan la importancia de integrar soluciones energéticamente eficientes en el diseño y despliegue de estas tecnologías para maximizar su impacto positivo en diversos sectores.			
Abstract:	This research addresses the energy efficiency of Internet of Things (IoT) systems within fifth-generation (5G) networks. Through simulations in controlled environments, energy consumption was evaluated, and optimization strategies were developed based on advanced energy management techniques, such as deep sleep and standby modes. The results demonstrate a significant reduction in energy consumption, particularly in high-demand scenarios, enabling improved sustainability and operational performance of these systems. This study also highlights the potential of 5G networks to support IoT applications in fields such as healthcare, agriculture, and smart homes, ensuring more efficient resource utilization. The proposed strategies promote sustainable technological adoption, contributing to the development of environmentally responsible and economically viable digital infrastructures. The findings emphasize the importance of integrating energy-efficient solutions into the design and deployment of these technologies to maximize their positive impact across various sectors.			
Descripción:	97 hojas: dimensiones, 29 x 21 cm + CD-ROM 6162			
URI:				

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la rápida adopción de sistemas de Internet de las Cosas (IoT) y el despliegue de redes 5G están redefiniendo la conectividad y planteando desafíos significativos en términos de eficiencia energética y sostenibilidad, el alto consumo en estas nuevas implementaciones tecnológicas se evidencia en distintos escenarios, generando la necesidad de abordar críticamente este aspecto [1][2].

En Ecuador, la integración de IoT y 5G representa una oportunidad estratégica para impulsar la transformación digital como la educación e instituciones financieras [3][4]. Sin embargo, hasta el momento, no se han realizado estudios que aborden de manera integral la criticidad del consumo energético en las primeras experiencias locales de esta convergencia tecnológica, dada la proyección de un crecimiento continuo, es imperativo establecer las bases para una gestión eficiente de la energía.

La capacidad de virtualizar entornos 5G con sistemas IoT permite analizar el desempeño energético en un entorno controlado antes de su implementación real, lo que facilita la identificación de estrategias óptimas para mejorar la eficiencia energética [5][6]. Estudios han demostrado que estas simulaciones pueden proporcionar datos precisos y aplicables para la toma de decisiones en entornos reales [7].

Esta investigación propone la conceptualización de una red IoT sobre 5G en un entorno de simulación controlado, con el objetivo de analizar su desempeño energético. A través de la monitorización, caracterización del consumo y aplicación de mejoras, se buscarán estrategias que permitan la adopción sostenible de estas tecnologías en el país, sin comprometer la eficiencia energética.

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Problema de investigación

1.1.1 Planteamiento del problema

La rápida adopción de sistemas de Internet de las Cosas (IoT) y el despliegue de redes de quinta generación están transformando la conectividad global, ofreciendo beneficios significativos en términos de velocidad, capacidad y eficiencia operativa [8][9]. Sin embargo, estos avances tecnológicos también traen consigo desafíos críticos relacionados con el consumo energético y la sostenibilidad [10][11]. Los dispositivos IoT, a menudo alimentados por baterías o fuentes de energía limitadas, deben operar de manera eficiente para garantizar una duración prolongada y una operatividad continua [12].

El alto consumo energético asociado con IoT puede limitar su adopción y expansión[13]. Además, la falta de datos y análisis sobre el consumo energético de estas tecnologías en Ecuador dificulta la planificación y la implementación de estrategias sostenibles.

En este contexto, surge la necesidad de una investigación que conceptualice y simule una red IoT sobre 5G en un entorno virtual, con el objetivo de analizar su eficiencia energética y desarrollar estrategias que puedan ser aplicadas en la práctica. Esta investigación no solo proporcionará un modelo para la implementación sostenible de IoT y 5G en Ecuador, sino que también contribuirá al conocimiento global sobre la gestión eficiente de la energía en estas tecnologías emergentes.

Enunciado del problema.

El enunciado del problema para este proyecto de investigación es:

¿Cómo se puede optimizar la eficiencia energética de los sistemas de internet de las cosas en entornos virtuales desplegados sobre redes de quinta generación para conservar la vida útil de estos sistemas?

Diagnóstico

La eficiencia energética representa uno de los mayores desafíos en el desarrollo y funcionamiento de dispositivos IoT, estos dispositivos suelen tener recursos energéticos limitados y deben operar de manera eficiente para prolongar su autonomía y reducir su impacto ambiental [14]. El consumo energético es una preocupación central, los dispositivos IoT deben realizar diversas tareas de manera continua, como recolección y transmisión de datos, procesamiento de información y ejecución de operaciones, todo ello con restricciones

de energía [12]. La optimización del consumo energético se vuelve crucial para maximizar la vida útil de la batería y reducir la necesidad de recarga o reemplazo frecuente. Además, la gestión eficiente de la energía es fundamental para garantizar un rendimiento óptimo del dispositivo y minimizar el desperdicio de energía.

Pronóstico

Se prevé que la implementación de técnicas de gestión de energía en un entorno virtual tenga un impacto significativo en la eficiencia energética de los dispositivos IoT. A medida que se desarrollen y apliquen estrategias de optimización de energía en este entorno simulado, es probable que se identifiquen y validen enfoques innovadores que puedan ser implementados en dispositivos reales.

Estas técnicas permitirán una mejor gestión y asignación de recursos energéticos, lo que resultará en una reducción del consumo energético y una prolongación de la vida útil de las baterías en los dispositivos IoT. Además, se espera que la investigación y simulación en entornos virtuales conduzca a avances significativos en la eficiencia energética de los dispositivos IoT, contribuyendo así a un desarrollo más sostenible y responsable de esta tecnología.

1.1.2 Formulación del problema

¿Cómo la optimización de la eficiencia energética de los sistemas de internet de las cosas en entornos virtuales sobre redes de quinta generación, pueden reducir el consumo energético y prolongar su vida útil?

1.1.3 Sistematización del problema

Establecido el problema principal de investigación, a continuación, las interrogantes que ayudarían a cumplir exitosamente con cada objetivo:

- i. ¿Cómo influye la cuantificación del consumo energético en sistemas de internet de las cosas desplegados en entornos virtuales de redes de quinta generación?
- ii. ¿Cómo las técnicas de gestión de energía pueden reducir el consumo energético de los sistemas de internet de las cosas?
- iii. ¿Qué beneficios proporciona la optimización de la eficiencia energética en estos sistemas mediante técnicas de gestión de energía?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar la eficiencia energética de los sistemas de internet de las cosas en entornos virtuales, desplegados sobre redes de quinta generación para la optimización del consumo energético.

1.2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar el consumo energético en sistemas de internet de las cosas desplegados en entornos virtuales sobre redes de quinta generación.
- Analizar técnicas de gestión de energía aplicable en entornos virtuales para la reducción del consumo energético de los dispositivos de internet de las cosas.
- Proponer estrategias para optimizar el consumo energético en sistemas del internet de las cosas en redes de quinta generación.

1.3 Alcance

Este trabajo de integración curricular se centrará en analizar la eficiencia energética de los sistemas de internet de las cosas desplegados en entornos virtuales sobre redes de quinta generación, se examinará el consumo energético de estos sistemas con el objetivo de identificar áreas de mejora y oportunidades para optimizar su eficiencia. Se investigarán diversas técnicas de gestión de energía aplicables a estos entornos, analizando su impacto en la reducción del consumo energético y en la prolongación de la vida útil de los dispositivos IoT. Además, se considerarán las características específicas de conectividad y los requisitos de las aplicaciones involucradas para proponer estrategias de optimización personalizadas.

1.4 Justificación

Esta investigación busca explorar métodos para analizar y optimizar la eficiencia energética (EE) de los sistemas del internet de las cosas implementados en redes de quinta generación. Esta necesidad surge de la intención de minimizar el consumo de energía y, por ende, extender la vida útil de los dispositivos.

El acelerado crecimiento de las implementaciones de sistemas de Internet de las cosas (IoT) a nivel mundial está causando un aumento exponencial en la demanda de energía, haciendo relevante este estudio, pues la optimización del uso de energía en estos sistemas resulta fundamental para asegurar la sostenibilidad de estas tecnologías emergentes.

Además, este estudio permitiría cuantificar los patrones de consumo de energía y proponer estrategias de gestión de energía que se adapten al contexto local, los principales beneficiarios serían los operadores de telecomunicaciones, los proveedores de sistemas de IoT y los primeros adoptantes de estas tecnologías en Ecuador. Sin embargo, los impactos positivos también se extenderían a los aspectos ambientales y a la sociedad en general.

Dada la posibilidad de mejora y la falta de investigaciones previas sobre este tema específico en el país, este estudio es factible y pertinente para generar conocimiento que sea aplicable en nuestra realidad local.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Marco referencial

El presente estudio se enmarca en la necesidad crítica de abordar la EE en los sistemas de IoT, especialmente en el contexto del despliegue acelerado de estos dispositivos y la habilitación de redes de quinta generación 5G. La optimización del consumo energético se ha convertido en un factor clave para garantizar la sostenibilidad del a nivel global.

2.1.1 Investigaciones internacionales.

2.1.1.1 On Predicting Sensor Readings with Sequence Modeling and Reinforcement Learning for Energy-Efficient IoT Applications.

El artículo presenta una solución novedosa para predecir las lecturas de sensores en sistemas de internet de las cosas basadas en eventos. La solución utiliza una red memoria larga a corto plazo (LSTM) para aprender patrones espacio-temporales y un agente de reforzamiento aprendiendo (RL) para equilibrar la precisión y el consumo de energía. Se evaluó con conjuntos de datos reales, encontrando que el modelo LSTM fue capaz de aprender dependencias espaciotemporales mejor que una red neuronal profunda (DNN) y enfoques estadísticos. Por otro lado, el agente de RL logró un rendimiento cercano al óptimo tanto para la solución basada en modelo como para la basada en modelo libre. El trabajo da un paso hacia la aplicación conjunta de aprendizaje profundo y aprendizaje por refuerzo para enfrentar una de las limitaciones de sistemas IoT: la duración de la batería de los dispositivos [15].

2.1.1.2 Study on Energy Consumption Optimization Scheduling for Internet of Things.

La presente investigación se enfoca en el desarrollo de un modelo de programación de equipos que considera la eficiencia de la programación de intervalos y la reducción del consumo de energía en el entorno de los sistemas de internet de las cosas, se propone el uso de un algoritmo difuso de múltiples objetivos para convertir problemas de pérdida de energía en problemas de un solo objetivo, lo que permite la optimización de la programación de equipos en el entorno de los sistemas IoT. Además, se abordan los desafíos de las redes de sensores inalámbricos y cómo estos afectan la programación de equipos en el entorno de IoT [16].

2.1.1.3 Energy Efficiency Perspectives of Femtocells in Internet of Things: Recent Advances and Challenges.

Este artículo revisa las perspectivas de eficiencia energética de las femtoceldas en aplicaciones de IoT. Introduce el rol de las femtoceldas como mecanismo de comunicación eficiente en energía para IoT, como redes y hogares inteligentes. Analiza métricas, modelos de consumo energético, esquemas de despliegue en redes heterogéneas y factores que afectan el consumo energético de las femtoceldas y el equipo usuario. Finalmente, destaca los principales desafíos y problemas abiertos de investigación en el uso de femtoceldas energéticamente eficientes para respaldar aplicaciones IoT y redes 5G [17].

2.1.1.4 Modeling and Analysis of Data and Coverage Energy Efficiency for Different Demographic Areas in 5G Networks.

Este artículo modela y analiza el impacto de las diferentes densidades de usuarios en áreas demográficas versátiles (puntos calientes en interiores, urbanas densas, urbanas y rurales) sobre las métricas estandarizadas de eficiencia energética de datos y cobertura para redes 5G heterogéneas. A través de simulaciones de cinco escenarios de despliegue y operación de estaciones base macro y pequeñas, se observa una tendencia opuesta al aumentar la densidad de usuarios: incremento de la eficiencia energética de datos y decremento de la de cobertura. Se identifican las mejores estrategias de instalación gradual de pequeñas estaciones base y escalamiento de potencia de transmisión según variaciones de tráfico [18].

2.1.1.5 Energy Efficiency in Massive MIMO-Based 5G Networks: Opportunities and Challenges.

Esta investigación analiza la eficiencia energética en redes 5G utilizando la tecnología Massive MIMO, destacando su importancia para el desarrollo sostenible de estas redes. Massive MIMO permite que una estación base con muchas antenas atienda a múltiples usuarios simultáneamente, mejorando significativamente la eficiencia espectral y energética en comparación con las redes LTE. Se presentan modelos de consumo de energía y técnicas para maximizar la eficiencia, como la simplificación de operaciones y la optimización del número de antenas y la potencia de transmisión. Además, se abordan desafíos en la implementación de Massive MIMO y se proponen estrategias para reducir el consumo de energía y mejorar la aceptación de esta tecnología [19].

2.1.1.6 Privacy Protection and Energy Optimization for 5G-Aided Industrial Internet of Things.

El artículo aborda la protección de la privacidad y la optimización de la energía en el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) potenciado por 5G. Argumenta que la tecnología 5G está revolucionando diversos sectores, proporcionando interconectividad a alta velocidad, pero también plantea desafíos en términos de privacidad y consumo energético. La interconexión masiva de dispositivos y la rápida transmisión de datos pueden comprometer la privacidad y aumentar el consumo energético, presenta un marco integral para optimizar la energía y mejorar la privacidad en la industria 4.0, que ahora depende en gran medida de dispositivos IoT y tecnología 5G. La privacidad debe ser mantenida en tres niveles: datos, identidad y ubicación, mientras que la optimización energética es crucial debido a los recursos limitados [20].

2.1.1.7 Rate and Energy Efficiency Improvements for 5G-based IoT with Simultaneous Transfer.

El artículo se enfoca en combinar la red 5G con IoT para mejorar la eficiencia de la comunicación. Propone dos modelos de transferencia simultánea, el de conmutación de tiempo y el de división de potencia, para transmitir información de 5G e IoT. Se plantea un problema de optimización para maximizar la tasa de transmisión de 5G, manteniendo las tasas de IoT y la potencia total dentro de límites. Se presenta un algoritmo de optimización y un modelo de eficiencia energética para minimizar el consumo de energía del IoT [21].

2.1.1.8 Improving Energy Efficiency and Scalability for IoT Communications in 5G Networks.

El artículo aborda el creciente uso de dispositivos IoT en redes móviles y cómo la transmisión ascendente en 5G está cambiando el panorama. Propone el algoritmo Enhanced OEA para mejorar la eficiencia energética y la escalabilidad en las comunicaciones IoT. Este algoritmo reduce la complejidad computacional y mejora la utilización de recursos y la eficiencia energética, manteniendo la calidad de servicio, se centra en optimizar la transmisión ascendente en redes 5G para satisfacer las demandas de los dispositivos IoT [22].

2.1.1.9 One Integrated Energy Efficiency Proposal for 5G IoT Communications.

El artículo propone una estructura integrada para mejorar la eficiencia energética (EE) en los sistemas IoT de redes 5G mediante la combinación holística de las partes inalámbricas y cableadas. Introduce un mecanismo de Zoom de Partición Celular (CPZ) y un mecanismo de pre-caché, optimizando el consumo energético al activar solo las antenas necesarias y almacenar localmente los contenidos frecuentemente solicitados. Las simulaciones muestran que estos mecanismos mejoran significativamente la EE en comparación con enfoques anteriores, especialmente en condiciones de baja demanda, logrando redes más sostenibles y eficientes [23].

2.1.1.10 Procesamiento de señales para mejorar la eficiencia energética y la seguridad en internet de las cosas.

El estudio se centra en la mejora de la eficiencia energética y la capacidad de comunicación en redes inalámbricas a través de la aplicación de algoritmos de optimización, tales como la búsqueda exhaustiva y la optimización alternante, se consideran las superficies inteligentes reflectantes (RIS) como una solución prometedora para ampliar el alcance de las señales y mejorar la cobertura sin un aumento significativo en el consumo de energía. Se incluye un análisis detallado de los modelos de amplificadores de potencia y dispositivos de recolección de energía, así como una evaluación del rendimiento de los algoritmos propuestos en diversos escenarios de comunicación. La investigación concluye que la implementación de RIS puede disminuir los requisitos de potencia y los costos de despliegue, al mismo tiempo que mejora la eficiencia energética global del sistema [24].

2.2 Marco conceptual

Este apartado se encuentra dirigido al proyecto de investigación fundamental de forma teórica el contenido científico de la propuesta.

2.2.1 Internet de las cosas

El IoT es un sistema que conecta dispositivos, máquinas y objetos físicos a través del internet para recopilar, intercambiar y analizar datos para mejorar la eficiencia, la toma de decisiones y la calidad de vida, esta tecnología permite la comunicación entre dispositivos, la automatización de procesos y la creación de entornos inteligentes que impactan positivamente en los sectores industriales, comerciales y en la vida diaria de las personas. Es

una herramienta clave para la transformación digital de las empresas y la mejora de la competitividad en el mercado [25].

Los datos generados a través de sensores y dispositivos interconectados permiten entonces realizar análisis y tomar decisiones informadas para mejorar la eficiencia operacional, reducir costos, crear nuevos modelos de negocio y mejorar la experiencia del cliente. En ese sentido, se consolida como una pieza fundamental de la transformación digital [26].

A nivel técnico, la implementación de sistemas de IoT integra tecnologías como identificación por radiofrecuencia (RFID), redes inalámbricas, sistemas embebidos, sensores inteligentes y métodos de análisis de big data. La sinergia entre estas tecnologías hace viable el despliegue de soluciones en entornos industriales, ciudades, hogares y vehículos [27].

2.2.2 Arquitectura simplificada en sistemas de internet de las cosas

Las capas en la arquitectura de sistemas de IoT son componentes esenciales que organizan y estructuran el flujo de información en estos sistemas. Cada capa desempeña un papel específico, desde la recopilación de datos en la capa de percepción hasta la provisión de servicios para el usuario final en la capa de aplicación. Entender estas capas proporciona una base crucial para analizar cómo estos sistemas se interconectan, comunican y procesan datos a lo largo de su ciclo operativo [28].

- 1. Capa de percepción:** En la arquitectura de los sistemas de internet de las cosas, situada en la posición más baja, tiene la tarea fundamental de recopilar datos de sensores y dispositivos, representando el nivel físico de los objetos y su interacción con el entorno circundante [29].
- 2. Capa de red:** La capa de red desempeña un papel crucial al gestionar la comunicación entre los sistemas de IoT y la nube o el servidor. Funcionando como el nivel de comunicación, esta capa se encarga de la transmisión eficiente de datos hacia la capa de aplicación mediante diversas tecnologías y protocolos [29][30].
- 3. Capa de aplicación:** En la capa de aplicación, los datos recopilados y procesados se transforman en información significativa para los usuarios finales. Este nivel es el espacio en el cual se desarrollan y ejecutan aplicaciones específicas, ofreciendo servicios como monitoreo remoto, análisis de datos y control de dispositivos, entre otros [30].

2.2.3 Protocolos de los sistemas de internet de las cosas

2.2.3.1 Protocolo extensible de mensajería y presencia (XMPP).

El protocolo extensible de mensajería y presencia (XMPP) constituye un protocolo de mensajería instantánea y presencia basado en el lenguaje de marcado extensible (XML), este opera en un modelo cliente-servidor y se utiliza en diversas aplicaciones de comunicación en tiempo real, tales como mensajería instantánea, chat grupal, llamadas de voz y video, colaboración, así como en el enrutamiento generalizado de datos XML [31].

XMPP utiliza XML como su formato subyacente para el intercambio de datos y se ejecuta sobre TCP/IP, siendo diseñado adecuadamente para entornos cliente-servidor distribuidos y respaldando tanto la autenticación simple como el mecanismo nivel de seguridad y autenticación simples (SASL)[32]. Su alta extensibilidad se atribuye a su base en XML; no obstante, presenta desventajas notables, como la falta de cifrado de extremo a extremo, la carencia de soporte para la calidad de servicio (QoS) y la carga adicional en términos de procesamiento y comunicación en dispositivos IoT debido al formato de mensaje XML [33].

2.2.3.2 Transporte de telemetría de cola de mensajes (MQTT).

Es un protocolo de mensajería eficiente y ligero diseñado para facilitar la comunicación entre dispositivos, especialmente en entornos con ancho de banda limitado y condiciones de conexión inestable. Este protocolo se ha convertido en una herramienta fundamental en el ámbito del internet de las cosas, donde la eficiencia en la transmisión de datos es esencial [34].

Algunos de los principios fundamentales que definen MQTT incluyen su modelo de Publicación/Suscripción (Pub/Sub), que permite a los dispositivos actuar como editores y suscriptores, estos mensajes se publican en tópicos, que actúan como identificadores temáticos, facilitando la organización y difusión de información específica [35].

El protocolo MQTT se fundamenta en la arquitectura protocolo de control de transmisión/ protocolo de internet (TCP/IP) para facilitar la conectividad de los sistemas IoT con la nube, la comunicación MQTT opera mediante el triple handshake del protocolo TCP. Cada mensaje transmitido a través de TCP se envía como un paquete TCP, al que inicialmente se le añaden encabezados correspondientes, confiriéndole las características propias de un paquete TCP. Posteriormente, se incorporan los encabezados de IP y Ethernet antes de que

el mensaje sea enviado al suscriptor, la información transmitida atraviesa las diversas capas ilustradas en la Figura 3 y se dirige hacia la computadora receptora en forma de un paquete ethernet. En este contexto, administra la capa inferior, mientras que las operaciones subsiguientes implican el control del sistema operativo [36].

2.2.3.3 *Protocolo de Aplicaciones Restringidas (CoAP).*

El protocolo de aplicaciones restringidas (CoAP) es un protocolo de capa de servicio diseñado para sensores y dispositivos de baja potencia con recursos limitados, conectados a través de redes propensas a pérdidas, se basa en la transferencia de estado representacional (REST), mejorando su interoperabilidad y su capacidad de adaptarse a dispositivos con restricciones en batería, memoria y almacenamiento [37].

CoAP opera sobre protocolo de datagrama de usuario (UDP), y los clientes se comunican con los servidores mediante 4 mensajes: GET, PUT, POST y DELETE. Su diseño particularmente ligero lo convierte en una opción prometedora para dispositivos integrados. Además de ejecutarse sobre UDP, CoAP integra seguridad de la capa de transporte de datagramas (DTLS), siendo compatible el estándar de cifrado avanzado (AES) [38].

2.2.3.4 *Protocolo avanzado de cola de mensajes (AMQP).*

El Protocolo Avanzado de Cola de Mensajes (AMQP) es un protocolo de aplicación que opera sobre TCP/IP, diseñado para la transmisión de mensajes entre aplicaciones, destaca por ser un protocolo de mensajería ligero y adaptable, centrado en la interoperabilidad y la flexibilidad [39].

AMQP es un protocolo binario que admite una amplia gama de aplicaciones de mensajería y patrones de comunicación, siendo compatible con los modelos de comunicación de solicitud-respuesta y publicación-suscripción y también proporciona soporte para enrutamiento flexible y transacciones comerciales [40]. La estructura de un mensaje AMQP abarca componentes como encabezado, mensaje y anotaciones de entrega.

2.2.3.5 *Servicio de distribución de datos (DDS).*

Servicio de distribución de datos (DDS) representa un protocolo de mensajería de tipo pub/sup, desarrollado por el Object Management Group (OMG) con el propósito específico de facilitar las comunicaciones máquina a máquina (M2M) y las aplicaciones relacionadas con el IoT, [39][41].

Este protocolo adopta un enfoque de pub/sup, donde los publicadores transmiten datos asociados a un tema, y los suscriptores reciben datos sobre los temas de su interés, incluye capacidades que aseguran la calidad de servicio (QoS) y la confiabilidad, características esenciales en entornos característicos de IoT y M2M [41].

El publicador utiliza un DataWriter para publicar datos sobre un tema específico, mientras que el suscriptor emplea un DataReader para suscribirse a ese mismo tema y recibir los datos asociados. DDS se destaca por requerir menos ancho de banda y reducir la complejidad de la red en comparación con otros protocolos de mensajería [42].

2.2.3.6 Tecnologías de Comunicación en Redes de IoT: Protocolos y Aplicaciones en el Modelo TCP/IP.

Los dispositivos que participan en una red de IoT necesitan implementar diversos protocolos para facilitar la conexión entre la parte física y digital, permitiendo la recopilación y el procesamiento en tiempo real de la información proveniente de los nodos, en entornos de IoT, se pueden emplear varios protocolos de comunicación, [43].

La IoT, siguiendo la estructura de la pila de protocolos TCP/IP, incorpora protocolos de red específicos y opera según un modelo de 4 capas, resultando beneficioso para sus múltiples aplicaciones [43]. A continuación, se presenta una clasificación detallada de los protocolos asociados al modelo TCP/IP, donde se observa que algunos son reconocidos, mientras que otros han sido desarrollados específicamente para aplicaciones en IoT.

2.2.4 Redes de quinta generación 5G

Las redes 5G representan la próxima evolución de las redes móviles, teniendo velocidades de datos ultra rápidas, menor latencia y mayor capacidad. Para lograr estas mejoras, las redes 5G hacen uso de frecuencias de onda milimétrica, lo que plantea desafíos únicos en términos de propagación de señales, cobertura y capacidad de penetración [44].

En términos de funcionamiento, las redes 5G utilizan una combinación de tecnologías avanzadas, como la modulación mmWave, la tecnología de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), el procesamiento de señales digitales y la virtualización de redes [45]. La modulación de mmWave permite transmitir grandes cantidades de datos a través de frecuencias de mmWave, lo que proporciona velocidades de datos significativamente más rápidas en comparación con las redes 4G actuales.

2.2.5 *Tecnología de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO)*

La tecnología de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO) representa una técnica avanzada en sistemas de comunicación inalámbrica que, en lugar de utilizar una sola antena para la transmisión y recepción de datos, emplea múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor. Esta estrategia permite aprovechar las propiedades espaciales del canal de comunicación para mejorar el rendimiento del sistema, y el uso de múltiples antenas conlleva beneficios significativos, como el aumento de la capacidad del sistema, la mejora de la calidad de la señal y la reducción de la interferencia y el desvanecimiento del canal [46].

- **MIMO convencional:** En el MU-MIMO convencional, tanto la estación base (BS) como los usuarios necesitan conocer el estado del canal en todo momento, lo que requiere recursos considerables en términos de tiempo, frecuencia y energía [47].
- **Massive MIMO:** Massive MIMO es una tecnología de comunicación inalámbrica que utiliza estaciones base con un gran número de antenas para mejorar la eficiencia y capacidad del sistema. Proporciona beneficios como la reducción de la interferencia entre usuarios y la simplificación de la gestión de recursos. Se ha convertido en un componente clave de las redes 5G NR y ha sido adoptado comercialmente por empresas líderes en telecomunicaciones [48].
- **MIMO Adaptativo:** El MIMO adaptativo es una técnica avanzada, pero con la capacidad adicional de adaptarse dinámicamente a cambios en el entorno de comunicación. En lugar de utilizar un número fijo de antenas como en el MIMO convencional, el MIMO adaptativo puede ajustar dinámicamente el número de antenas y sus configuraciones espaciales para optimizar el rendimiento de la comunicación inalámbrica [49].

2.2.6 *Ondas milimétricas (mmWave)*

Las bandas mmWave, que abarcan frecuencias aproximadas de 24 GHz a 300 GHz, han atraído significativa atención debido a su generoso ancho de banda. Estas comunicaciones presentan diversas ventajas en comparación con las tecnologías inalámbricas existentes, las cuales se detallan a continuación [50].

- **Amplitudes de banda sumamente extensas:** En contraste con las redes inalámbricas actuales, las comunicaciones mmWave hacen uso de frecuencias mucho

más elevadas (30–300 GHz) como portadoras, proporcionando así un recurso de espectro mucho más abundante (270 GHz). Este aspecto las convierte en una opción atractiva en situaciones de saturación de espectro [50].

- **Dimensiones reducidas de los elementos:** Gracias a las longitudes de onda cortas, los dispositivos mmWave permiten compactar conjuntos extensos de antenas en dimensiones físicas reducidas [51].
- **Haces estrechos:** Con el mismo tamaño de antena, es posible incorporar más elementos de antena en frecuencias de onda milimétrica que en microondas. Por consiguiente, el haz formado puede ser más angosto, facilitando aún más el desarrollo de otras aplicaciones, como los radares de detección [51].

2.2.7 Arquitectura 5G

La arquitectura de red 5G mejora significativamente respecto a las arquitecturas anteriores, las redes celulares densas permiten un salto cuántico en el rendimiento. Además, la arquitectura de red 5G ofrece una mayor seguridad en comparación con las actuales redes 4G LTE [52].

La red central de 5G, que habilita la funcionalidad avanzada de las redes 5G, es uno de los tres componentes principales del sistema 5G, también conocido como 5GS (fuente). Los otros dos componentes son la red de acceso 5G (5G-AN) y el equipo de usuario (UE). La red central de 5G utiliza una arquitectura de servicios basada en la nube (SBA) para admitir autenticación, seguridad, gestión de sesiones y agregación de tráfico de dispositivos conectados, todo lo cual requiere la compleja interconexión de funciones de red [52].

2.2.8 Eficiencia energética (EE)

La eficiencia energética implica la capacidad de alcanzar los mejores resultados en cualquier actividad utilizando la menor cantidad posible de recursos energéticos, su enfoque principal reside en la reducción del consumo de energía, abordando así los posibles impactos ambientales asociados. Este principio es aplicable a lo largo de todas las fases, desde la generación inicial de energía hasta su consumo final, busca mantener el mismo rendimiento en la actividad mediante la integración de modelos de gestión sostenible, la adopción de hábitos responsables e inversiones estratégicas en innovación tecnológica [53].

2.2.9 Desafíos en Eficiencia Energética para IoT

La eficiencia energética en el contexto de sistemas IoT presenta desafíos significativos que deben abordarse para garantizar el rendimiento óptimo de los dispositivos conectados, estos desafíos incluyen la limitación de energía en dispositivos IoT, que suelen tener recursos energéticos limitados, principalmente baterías, planteando así dificultades para mantener la conectividad y funcionalidad a largo plazo. Además, la escalabilidad del IoT, con la interconexión de miles de millones de dispositivos inteligentes, genera desafíos en términos de gestión de recursos, evitando la desconexión prematura y asegurando la entrega eficiente de servicios [54].

La consideración de las limitaciones de los dispositivos, como la presencia de restricciones en la memoria, capacidad de procesamiento y vida útil de la batería, impone desafíos adicionales en el diseño e implementación de soluciones IoT que deben trabajar eficientemente dentro de estos límites[54]. Asimismo, el desafío reside en implementar estrategias de procesamiento inteligente para minimizar la transmisión innecesaria de datos y optimizar el uso de la energía, ya que la gestión ineficiente de datos puede agotar rápidamente la energía de los dispositivos IoT [55].

2.2.10 Desafíos en Eficiencia Energética para redes 5G

Las redes 5G enfrentarán grandes desafíos en términos de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental, esperándose que emitan hasta 235 millones de toneladas de CO₂ para el 2020, cifra considerablemente superior a los 170 millones de toneladas de las redes 4G actuales, debido principalmente al explosivo crecimiento proyectado en el número de dispositivos conectados y en el tráfico de datos móviles. A su vez, el consumo energético de la red de acceso radioeléctrica (RAN) podría aumentar a 86 teravatios-hora en las redes 5G para 2026, en comparación con solo 77 teravatios-hora en 4G [56].

Si bien existen diversas técnicas prometedoras para mejorar la eficiencia energética, como MIMO masivo, redes heterogéneas, comunicaciones D2D y Internet de las cosas verde, estas enfrentan desafíos en términos de costos de implementación, eficiencia espectral, ancho de banda disponible, seguridad, entre otros. También existe una compensación fundamental entre maximizar la capacidad de red y la tasa de datos, y minimizar el consumo energético [38].

2.3 Marco legal

Para el desarrollo de este trabajo de integración curricular, se han revisado y analizado las normativas legales vigentes en el Ecuador que regulan tanto la eficiencia energética, como la implementación y operación de sistemas de Internet de las Cosas (IoT) y redes de quinta generación (5G) en Ecuador.

2.3.1 Constitución de la República del Ecuador

Artículo 15.- Establece el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, promoviendo el uso de tecnologías limpias y energéticamente eficientes [57].

2.3.2 Ley Orgánica de Telecomunicaciones

Artículo 4.- Regula el uso del espectro radioeléctrico, asegurando su aprovechamiento eficiente y sostenible para garantizar el desarrollo de las telecomunicaciones en el país [58].

Artículo 20.- Fomenta la modernización de las redes de telecomunicaciones, incluida la implementación de redes de nueva generación como 5G, priorizando la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental [58].

2.3.3 Reglamento General a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones

Artículo 45.- Establece las condiciones para el uso del espectro radioeléctrico, incluyendo las tecnologías de IoT y las redes 5G, promoviendo prácticas que optimicen el consumo energético [59].

Artículo 53.- Detalla los requisitos técnicos y operativos para la instalación y operación de redes de telecomunicaciones, con énfasis en la eficiencia energética y la reducción de emisiones de carbono [59].

2.3.4 Política Nacional de Eficiencia Energética

Promueve el uso eficiente de la energía en todos los sectores, incluyendo el sector de las telecomunicaciones, incentivando la adopción de tecnologías que reduzcan el consumo energético y las emisiones contaminantes [60].

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo de investigación

3.1.1 Investigación Descriptiva

El propósito principal de este estudio es cuantificar y analizar el consumo energético en sistemas de IoT sobre redes 5G, su objetivo principal es proponer estrategias específicas de optimización, siguiendo un enfoque metodológico que primero describe, mide y caracteriza la problemática antes de sugerir soluciones.

Para alcanzar este objetivo, se llevarán a cabo mediciones detalladas del consumo energético, identificación de patrones y correlación de variables. Estas acciones proporcionarán una visión completa y detallada, estableciendo así las bases necesarias para la formulación de recomendaciones y estrategias destinadas a mejorar la eficiencia energética.

3.1.2 Investigación Bibliográfica

La elección de una investigación bibliográfica se justifica por la necesidad de compilar y analizar información existente sobre la eficiencia energética de los sistemas IoT desplegados y redes 5G, se utilizará para identificar patrones, tendencias y mejores prácticas documentadas, proporcionando una base sólida para la propuesta de estrategias de optimización del consumo energético. Este enfoque no solo permitirá una comprensión profunda de las soluciones ya exploradas y su efectividad, sino que también facilitará la identificación de lagunas en el conocimiento y áreas que requieren investigación adicional.

3.2 Métodos de investigación

3.2.1 Método Cuantitativo

Esta metodología permitió la utilización de herramientas de simulación y software especializado para obtener datos numéricos relacionados con la transmisión de datos de sistemas IoT. Posteriormente, se aplicaron ecuaciones diseñadas para estimar el consumo energético asociado. Se garantizó la objetividad y cuantificación de los datos recopilados, lo cual facilitará la realización de análisis estadísticos para valorar la eficiencia energética en diversas configuraciones y contextos de despliegue.

3.3 Fuentes de recopilación de información

3.3.1 Fuentes secundarias

Para obtener información, se recurrió a diversas fuentes, como investigaciones científicas, artículos técnicos y libros. Además, se realizaron pruebas experimentales mediante simulación para recopilar datos específicos sobre la eficiencia energética en sistemas IoT sobre redes 5G. En el ámbito científico, se realizó una revisión exhaustiva de investigaciones anteriores, artículos científicos, informes técnicos y documentos académicos que provienen de publicaciones científicas especializadas en el área de estudio de este proyecto como:

- Springer.
- Scopus.
- ScienceDirect

3.4 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación se planificó en múltiples fases con el fin de alcanzar los objetivos establecidos. A continuación, se detalló la estructuración del problema en distintas etapas de desarrollo:

Fase 1: Revisión bibliográfica

La investigación comenzó con una revisión de la literatura existente sobre eficiencia energética en sistemas IoT y redes 5G. Se recopiló y analizó una amplia gama de documentos relevantes para establecer un marco teórico sólido.

Fase 2: Recolección de datos cuantitativos

Posteriormente, se procedió a la recolección de datos cuantitativos, se diseñaron experimentos y escenarios de simulación para medir el consumo energético en sistemas IoT sobre redes 5G. Tras la implementación de estos escenarios, se recopilaron datos numéricos detallados sobre el consumo energético en diferentes contextos.

Fase 3: Análisis de datos y identificación de patrones

Luego, se llevó a cabo un análisis de los datos recolectados, para identificar patrones y correlaciones relevantes. Este análisis proporcionó información crucial sobre los factores que influyen en el consumo energético de los sistemas IoT en redes 5G.

Fase 4: Formulación de estrategias de optimización

Finalmente, basado en la revisión bibliográfica y el análisis de datos, se formularon estrategias específicas para optimizar el consumo energético en sistemas IoT sobre redes 5G. Estas estrategias se basaron en las mejores prácticas identificadas en la literatura y en los patrones observados en los datos analizados. El resultado fue un conjunto de recomendaciones prácticas y aplicables para mejorar la eficiencia energética en sistemas IoT sobre redes 5G.

3.5 Recursos humanos y materiales

3.5.1 Recursos humanos

La metodología implementada en esta investigación se realizó en base a dos roles fundamentales: el director del proyecto y el investigador principal. Cada uno de estos roles desempeñó funciones específicas y complementarias que aseguraron el avance exitoso del estudio.

El director del proyecto supervisó cada etapa de la investigación, garantizando que el proceso se ajustara a los más altos estándares de calidad académica. Su rol fue clave para coordinar las actividades, orientar la metodología y asegurar que se cumplieran los plazos establecidos.

El investigador principal, autor de esta tesis, llevó a cabo la ejecución práctica de la investigación. Sus tareas incluyeron la creación de los entornos de simulación, la implementación de estrategias de gestión energética en los sistemas IoT y la recopilación de datos para su posterior análisis.

Tabla 1. *Recursos humanos*

Personal	Descripción
Autor	Julius Manuel Vinueza Loor
Director	Diego Fernando Intriago Rodríguez

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

3.5.2 Recursos y materiales

Tabla 2. *Requerimientos de hardware.*

Cantidad	Equipo	Costo
1	DESKTOP-KL21K1J	\$750

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

Tabla 3. *Requerimientos de software.*

Nombre	Descripción	Costo
Matlab	• Lenguaje de programación propio y soporte para otros lenguajes como C, C++, Python y Java.	De pago; licencias académicas
	• Amplias capacidades de simulación.	
	• Interfaz gráfica con herramientas de visualización avanzadas.	
	• Integración con otros sistemas y tecnologías, como Simulink y bibliotecas de terceros.	

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Juliu

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Cuantificación del consumo energético de sistemas IoT

4.1.1 Selección de software

En la tabla 4, presenta tres programas con distintas propiedades, los cuales son comúnmente empleados en ámbitos como la ingeniería, la investigación y la evolución de redes.

Tabla 4. *Características de software*

Características	OMNeT++	NS-3	MATLAB
Función	Simulación de diversos tipos de redes y tecnologías	Investigaciones, simulaciones y propósitos educativos	Investigaciones y estudios derivados de las disciplinas de ingeniería, ciencias y finanzas
Lenguaje de programación	C++ y Python	C++ y Python	Propietario (basado en estructuras matriciales)
Desempeño	Altamente adecuado para simulaciones de eventos discretos	Altamente adecuado para simulaciones de redes detalladas	Altamente adecuado para realizar análisis de datos y cálculos números
Caja de herramientas	Versátil en la modelización y simulación de redes de comunicación y sistemas distribuidos, ofreciendo herramientas poderosas para análisis y desarrollo de protocolos y algoritmos	Destaca por su robustez en la simulación de redes de comunicaciones, permitiendo la evaluación precisa de protocolos y tecnologías de red en diversos entornos y escenarios	Versátil en un abanico de aplicaciones, desde el procesamiento de datos hasta la optimización de sistemas

Costo	Libre de costo y con código abierto	Libre de costo, pero con limitaciones	De pago (con múltiples opciones de licencia).
-------	-------------------------------------	---------------------------------------	---

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

Matlab

La elección de MATLAB sobre otro software, como OMNeT++ y NS-3, responde a una serie de ventajas técnicas y funcionales que resultan determinantes en el contexto de la investigación planteada.

MATLAB se distingue por proporcionar un entorno robusto y versátil, idóneo para la realización de análisis avanzados de datos y simulaciones complejas, mientras que a diferencia de OMNeT++ y NS-3, que son principalmente herramientas enfocadas en la simulación de redes de comunicación y la evaluación de protocolos específicos, MATLAB ofrece un abanico más amplio de capacidades que incluye tanto el modelado numérico como el análisis detallado de datos.

Al mismo tiempo, incorpora un conjunto integrado de herramientas y funciones que facilita el modelado de diversos aspectos relacionados con las redes 5G y los dispositivos IoT. La plataforma permite simular con alta precisión el comportamiento de estos dispositivos, incluyendo la gestión del consumo energético, la asignación de recursos, y el rendimiento de la red bajo diferentes condiciones operativas.

4.2 Simulación del entorno

4.2.1 *Característica del consumo energético de los dispositivos IoT*

Para seleccionar los dispositivos apropiados para los distintos escenarios, se tomaron como referencia investigaciones previas sobre el uso de dispositivos IoT. Con base en estas investigaciones, se recopiló información detallada sobre las características de sistemas IoT en aplicaciones de domótica, agricultura y salud, antes de proceder a la cuantificación del consumo energético, [61], [62]. Esta fase inicial, guiada por los estudios anteriores, incluyó la recolección de parámetros eléctricos específicos de los dispositivos, como el voltaje de alimentación y la corriente de operación.

Tabla 5. *Característica de IoT en domótica*

Dispositivo	Voltaje de alimentación	Corriente de operación
iHome plug	15V	2A
Smart Things hub	12V	1.5A
Samsung SmartCam	12V	1A
Amazon Echo	12V	1.25A
Withings Smart Baby	5V	2A
Withings Aura smart sleep	3V	2A
Tribby Speaker	15V	2A
PIX-STAR Photo-frame	5V	1.5A
Dropcam	5V	2A
TP-Link Smart plug	9V	1.5A
NEST Protect smoke alarm	3V	0.5A
Netatmo Welcome	5V	2 A
TP-Link Day Night Cloud camera	9V	2A

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

Tabla 6. *Característica de IoT en la salud*

Dispositivo	Voltaje de alimentación	Corriente de operación
Air Humidity Sensor	20V	0.1A
Air Temperature Sensor	5V	0.02A
CO Sensor	5V	0.01A
Fire Sensor	5V	0.015A
Smoke Sensor	9V	0.01 A
Barometer	12V	12 A
Solar Radiation Sensor	24V	0.05A
Remote Electrocardiogram	3.7V	0.01 A
Infusion Pump	3.7V	1.2 A
TPulsoximeter	3.7V	0.01 A
Nasal/Mouth AirFlow	3.7V	0.50A
Blood pressure monitor	10V	5A

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

Tabla 7. *Característica de IoT en la agricultura*

Dispositivo	Voltaje de alimentación	Corriente de operación
Decagon 5TE	15V	0.1A
Sentek Drill & Drop	5V	0.02A
Davis Vantage Connect	18V	2A
FarmBot Genesis	12V	1.68A
Hugo RT Gen. III	12V	2A
Luna TRIC	24V	1.5A
Orbit B-hyve	24V	1A
Netafim NMC Pro	24V	5A

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

4.2.2 *Diseño de la simulación*

La implementación de sistemas IoT en redes 5G, involucra la creación de un entorno virtual que simula el funcionamiento de una red de comunicaciones 5G para analizar el consumo energético y la eficiencia operativa. Este análisis es crucial para entender cómo los sistemas IoT pueden operar de manera más sostenible y eficiente dentro de la infraestructura avanzada que ofrecen las redes 5G.

Para valorar el consumo energético, se consideran varios parámetros clave: voltaje de alimentación, que define el rango de voltaje necesario para el funcionamiento de los dispositivos IoT y la corriente de operación, que es la cantidad de corriente consumida por los dispositivos durante su funcionamiento. La recopilación de datos detallados sobre estos parámetros asegura que las simulaciones reflejen con la mayor precisión posible el comportamiento real de consumo energético de estos dispositivos.

Para poder analizar el desempeño de la red se analizó el Bit Error Rate (BER), esta es una medida de número de bits que se reciben de forma errónea en comparación de todos los bits

transmitidos, el BER se interpreta como una probabilidad de 10^{-6} esto nos representa que por cada millón de bits enviados existe un error.

$$BER = \frac{\text{Números de bits recibidos de forma errónea}}{\text{Total de bits transmitidos}}$$

El Packet Error Rate (PER) esta es una medida del número de paquetes que se reciben de forma errónea en comparación con todos los paquetes transmitidos. El PER se interpreta como una probabilidad de 0.005, lo que nos representa que por cada 10,000 paquetes enviados existen 50 errores.

$$PER = \frac{\text{Número de paquetes recibidos de forma errónea}}{\text{Total de paquetes transmitidos}}$$

El análisis del PER es crucial para observar la calidad de la red, especialmente en aplicaciones que requieren alta fiabilidad en la transmisión de datos, como las comunicaciones de voz y video en tiempo real. Un alto PER puede indicar problemas en la red, como interferencias, degradación de la señal, o problemas de hardware que necesitan ser corregidos para mejorar el desempeño general.

4.2.3 Parámetros de la red 5G

Los parámetros seleccionados para la configuración de la red 5G en este estudio se fundamentan en una investigación sobre la optimización del espectro electromagnético mediante tecnologías MIMO en redes 5G [63].

Tabla 8. Característica de la red 5G

Parámetros	
Números de antenas de recepción (Rx)	128
Números de antenas de transmisión (Tx)	128
Número de dispositivos	128
Frecuencia portadora	3.5 GHz
Número de subportadoras OFDM	64
Rango de SNR en decibelios	20 – 40

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

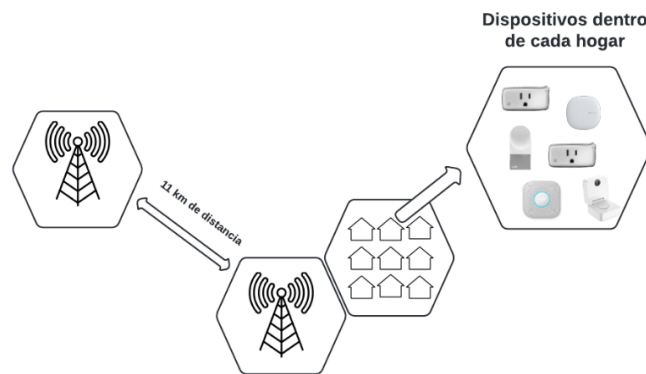
4.2.4 Diagrama de arquitectura de red

4.2.4.1 Escenario 1

La red se segmenta en ocho secciones debido a la particularidad de las tecnologías MIMO, las cuales requieren que el número de usuarios no exceda el número de Rx y Tx. Cada sección contiene 128 dispositivos IoT para cada arreglo de antena MIMO, lo que da un total de 1,024 dispositivos distribuidos uniformemente. Los nodos gNodeB se posicionan estratégicamente en cada sección para asegurar la cobertura completa de todos los dispositivos en el área. La distancia máxima entre las antenas se establece en 11 km, basada en la teoría de antenas que indica que, para evitar la necesidad de considerar la curvatura de la Tierra, las antenas no deben superar esta separación.

Cada sección cuenta con una variedad de dispositivos IoT, seleccionados aleatoriamente de una lista predefinida. Esta lista incluye dispositivos como enchufes inteligentes ihome, hubs smart things, cámaras samsung smartcam, Amazon Echo, monitores de bebé inteligentes withings, sensores de sueño withings aura, altavoces triby, marcos de fotos pix-star, cámaras dropcam, enchufes inteligentes TP-Link, alarmas de humo nest protect, cámaras netatmo welcome, y cámaras de día y noche TP-Link Cloud que se dividen en diferentes casas, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Arquitectura de red del primer escenario



Nota: Representación gráfica de la arquitectura de red del escenario de domótica.

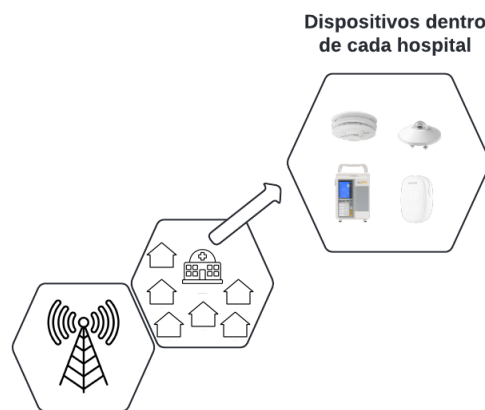
4.2.4.2 Escenario 2

La arquitectura de red representa a la simulación de dispositivos IoT en un entorno hospitalario como se muestra en la Figura 2. En esta configuración, se distribuyen dispositivos IoT a través de ocho hospitales, cada uno con ocho habitaciones, y cada

habitación contiene 16 dispositivos IoT, sumando un total de 1024 dispositivos en toda la red.

La lista de dispositivos incluye una variedad de sensores y equipos médicos, tales como sensores de humedad del aire, sensores de temperatura del aire, sensores de CO, detectores de incendios, detectores de humo, barómetros, sensores de radiación solar, equipos de monitoreo remoto de electrocardiograma (ECG), bombas de infusión, oxímetros de pulso (SPO2), sensores de flujo de aire nasal/bucal, monitores de presión arterial y sensores de respuesta galvánica de la piel (GSR).

Figura 2. *Arquitectura de red del segundo escenario*

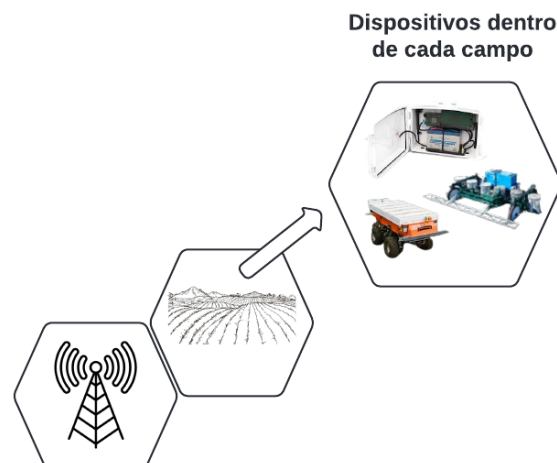


Nota: Representación gráfica de la arquitectura de red del escenario de IoMT.

4.2.4.3 Escenario 3

El diagrama de arquitectura de red presentado en la Figura 3 muestra una simulación de dispositivos IoT en un entorno agrícola.

Figura 3. *Arquitectura de red del tercer escenario*



Nota: Representación gráfica de la arquitectura de red del escenario de IoT en la agricultura.

Dentro de cada campo, los dispositivos IoT se distribuyen aleatoriamente. La movilidad de los dispositivos está desactivada para esta simulación, lo que significa que permanecen en sus posiciones iniciales durante toda la duración de la simulación.

La lista de dispositivos incluye una variedad de sensores y equipos agrícolas, tales como sensores decagon 5TE, sensores sentek drill & drop, conectores davis vantage, sistemas farmbot genesis, robots de control de plagas con luz uv Luna tric, controladores de riego orbit b-hyve y sistemas de control netafim nmc pro.

Código de la implementación de la red 5G con sistemas IoT para ver el consumo energético

Figura 4. *Parámetros de las antenas*

```
% Parámetros de los gNodeB
numTxAntennas = 128; % Número de antenas de transmisión
numRxAntennas = 128; % Número de antenas de recepción
carrierFrequency = 3.5e9; % Frecuencia de portadora en Hz (3.5 GHz)
numSubcarriers = 64; % Número de subportadoras OFDM
cpllen = 16; % Longitud del prefijo cíclico
bandwidth = 100e6; % Ancho de banda en Hz (100 MHz)
subcarrierSpacing = bandwidth / numSubcarriers; % Espaciado de subportadoras en Hz
```

Nota: Parámetros configurados en las antenas del gNodeB.

numTxAntennas = 128; Este parámetro configura la implementación de un sistema con 128 antenas de transmisión, característico de la tecnología MIMO masivo. Esta configuración ofrece una capacidad mejorada de diversidad espacial y permite la formación de haces, optimizando así la eficiencia en la transmisión.

NumRxAntenna = 128; Se configuran 128 antenas de recepción para optimizar la colaboración con las antenas de transmisión, lo que permite una recepción de datos más eficiente y un rendimiento superior en el sistema.

CarrierFrequency = 3.5e9; Se configura la frecuencia portadora del sistema a 3.5 GHz. Esta frecuencia es común en aplicaciones de redes 5G y proporciona un equilibrio entre el alcance y la capacidad de transmisión de datos, optimizando así el rendimiento del sistema en entornos de alta densidad de usuarios.

NumSubcarriers = 64; Se define el número de subportadoras que se utilizarán, dividiendo el espectro de frecuencia total en 64 bandas más estrechas, lo cual ayuda a mejorar la resistencia a la interferencia y puede aumentar la tasa de datos, dependiendo de la modulación empleada.

CpLen = 16; En un sistema OFDM define la longitud del prefijo cíclico (CP), es una porción del final de la señal OFDM que se copia al principio de cada símbolo OFDM. Este prefijo ayuda a mitigar la interferencia de múltiples trayectorias y facilita la sincronización en el receptor

bandwidth = 100e6; Se establece el ancho de banda total del sistema en 100 MHz, este ancho de banda es un recurso crítico en las comunicaciones, ya que determina la cantidad máxima de datos que se pueden transmitir. Un ancho de banda de 100 MHz es considerablemente amplio, permitiendo una alta capacidad de transmisión de datos.

subcarrierSpacing = bandwidth / numSubcarriers; El espaciamiento entre subportadoras se establece dividiendo el ancho de banda total del sistema, que es 100 MHz, por el número de subportadoras, que es 64. Este espaciamiento, aproximadamente 1.5625 MHz, es crucial porque determina cómo se distribuyen las subportadoras a lo largo del ancho de banda disponible. Asegura que las subportadoras estén adecuadamente separadas, minimizando la interferencia entre ellas y optimizando la eficiencia del sistema OFDM.

$$\text{SubcarrierSpacing} = \frac{100 \text{ MHz}}{64} = 1.5625 \text{ MHz}$$

Figura 5. Lista de dispositivos IoT

```
devices = {
    struct('name', 'iHome plug', 'voltage', 15, 'current', 2),
    struct('name', 'Smart Things hub', 'voltage', 12, 'current', 1.5),
    struct('name', 'Samsung SmartCam', 'voltage', 12, 'current', 1),
    struct('name', 'Amazon Echo', 'voltage', 12, 'current', 1.25),
    struct('name', 'Withings Smart Baby Monitor', 'voltage', 5, 'current', 2),
    struct('name', 'Withings Aura smart sleep sensor', 'voltage', 3, 'current', 2),
    struct('name', 'Tribby Speaker', 'voltage', 15, 'current', 2),
    struct('name', 'PIX-STAR Photo-frame', 'voltage', 5, 'current', 1.5),
    struct('name', 'Dropcam', 'voltage', 5, 'current', 2),
    struct('name', 'TP-Link Smart plug', 'voltage', 9, 'current', 1.5),
    struct('name', 'NEST Protect smoke alarm', 'voltage', 3, 'current', 0.5),
    struct('name', 'Netatmo Welcome', 'voltage', 5, 'current', 2),
    struct('name', 'TP-Link Day Night Cloud camera', 'voltage', 9, 'current', 2)
};
```

Nota: Estructura utilizada para definir los parámetros de los dispositivos IoT en la simulación.

Esta configuración permite simular el comportamiento de estos dispositivos IoT en base a las características recolectas, esto datos nos permitirá realizar el cálculo del consumo energético.

Figura 6. Cargar y extraer los datos del dataset

```
% Cargar los datos del archivo CSV
data = readtable('C:\Users\Julia\OneDrive\Desktop\Universidad\Tesis\IMPORTANTE\data\ppp0_ppp_packets_db.csv');

% Extraer los parámetros de tráfico
trafficConfig = repmat(struct('range', [], 'voltage', [], 'current', []), numSections, 1);
deviceCounter = 0;
```

Nota: Código para la carga de datos desde un archivo CSV y la configuración de parámetros de tráfico.

`data = readtable(dirección del archivo);` se cargan datos de un archivo CSV utilizando la función `readtable`, especificando la ruta completa del archivo, y almacenan estos datos en la variable `data`. Se implementa una matriz de estructuras con campos `range`, `voltage`, y `current` inicializados como vectores vacíos, repitiendo esta estructura `numSections` veces mediante la función `repmat`, almacenándolo en la variable `trafficConfig`.

Figura 7. Distribución de los diferentes dispositivos para cada antena

```
% Asignar aleatoriamente los dispositivos a las secciones
for section = 1:numSections
    trafficConfig(section).range = deviceCounter + (0:(devicesPerSection - 1));
    for i = 1:devicesPerSection
        % Seleccionar aleatoriamente un dispositivo de la lista
        randomDevice = devices(randi(length(devices)));

        % Asignar valores
        trafficConfig(section).voltage = [trafficConfig(section).voltage, randomDevice.voltage];
        trafficConfig(section).current = [trafficConfig(section).current, randomDevice.current];
    end
    deviceCounter = deviceCounter + devicesPerSection;
end
```

Nota: Distribución de dispositivos IoT en distintas celdas, respetando el alcance de radiación de la antena.

El propósito de estas líneas de código es asignar los dispositivos aleatoriamente a secciones específicas, se utiliza un bucle `for` que recorre cada sección desde 1 hasta `numSections`, definiendo el rango de dispositivos para cada sección con `'deviceCounter'` y `devicesPerSection`. Dentro de este bucle, otro bucle `for` recorre cada dispositivo en la sección, seleccionando aleatoriamente un dispositivo de la lista `devices` usando `randi` para generar un índice aleatorio, el voltaje y la corriente del dispositivo seleccionado se añaden a los campos correspondientes en la estructura `trafficConfig` de la sección actual, y `deviceCounter` se incrementa en `devicesPerSection` al final de cada iteración del primer bucle `for`.

Figura 8. Asignación del SNR para el escenario

```
% Adición de un canal AWGN para simular un canal fijo con SNR controlado
SNR = 48; % Relación señal-ruido en dB
channel = comm.AWGNChannel('NoiseMethod', 'Signal to noise ratio (SNR)', 'SNR', SNR);
```

Nota: Configuración de un canal AWGN para simular un escenario con un SNR específico.

Se añade un canal AWGN (Additive White Gaussian Noise) para simular un canal con una relación señal-ruido (SNR) controlada. Primero, se define la variable SNR con un valor de 48, que representa la relación señal-ruido en decibelios (dB). Luego, se crea un objeto de canal AWGN utilizando la función `comm.AWGNChannel`, especificando el método de ruido como SNR y asignando el valor de SNR definido anteriormente al parámetro Signal to noise ratio (SNR).

Figura 9. Código para almacenar el consumo energético

```
% Función para calcular el consumo de energía
calculateEnergyConsumption = @(voltage, current, sendInterval, numMessages) ...
    numMessages * voltage * current * sendInterval;
```

Nota: Formula implementada para calcular el consumo energético.

Para calcular el consumo de energía la función se llama calculateEnergyConsumption y toma como parámetros voltage, current, sendInterval y numMessages. La fórmula para calcular el consumo de energía en un sistema de comunicación se deriva de principios básicos de la física y la ingeniería eléctrica. El consumo de energía (E) se calcula típicamente como la potencia (P) multiplicada por el tiempo (t).

$$E = P \times t$$

La potencia, a su vez, es el producto del voltaje (V) y la corriente (I).

$$P = V \times I$$

Teniendo como resultado:

$$E = V \times I \times t$$

En el contexto de un sistema de comunicación, donde se envían múltiples mensajes, el tiempo total puede ser expresado como el número de mensajes (numMessages) multiplicado por el intervalo de envío (sendInterval). Esto lleva a la fórmula utilizada en el código:

$$\text{Consumo de energía} = \text{numMessages} \times \text{voltageDC} \times \text{currentDC} \times \text{sendInterval}$$

Figura 10. Transmisión de los datos

```
% Generación de datos de transmisión
messagelengthBits = messagelength * 8; % Convertir a bits
fprintf('Dispositivo %d en Sección %d: Enviando paquete de %d bytes\n', device, section, messagelength);

% Preparar los datos de transmisión
txData = randi([0 1], messagelengthBits, 1);
tic;
retransmissions = 0;
success = false;
```

Nota: Código implementado para la simulación de transmisión de datos.

El código genera y prepara los datos de transmisión para un dispositivo en una sección específica. Convierte la longitud del mensaje de bytes a bits, imprime un mensaje indicando el envío del paquete, y prepara los datos de transmisión. También inicializa las variables de retransmisiones y éxito, y comienza a medir el tiempo.

Figura 11. Código para calcular el BER

```
% Calcular BER
errors = sum(txData ~= decodedData);
totalErrors = totalErrors + errors;
totalBits = totalBits + length(txData);
```

Nota: Código implementado en Matlab para el cálculo del BER.

Se calcula la tasa de error de bit (BER). Primero, cuenta el número de errores comparando los datos transmitidos (txData) con los datos decodificados (decodedData) y suma el resultado. Luego, actualiza el contador total de errores (totalErrors) agregando el número de errores actuales. Por último, actualiza el contador total de bits (totalBits) agregando la longitud de los datos transmitidos.

Figura 12. Código para almacenar todo el consumo energético de la simulación

```
totalCommunicationCost = totalCommunicationCost + (txPower * transmissionTime + rxPower * transmissionTime);
```

Nota: Código implementado en Matlab para almacenar todo el consumo energético de la simulación.

En este caso, totalCommunicationCost se incrementa sumando el resultado de la expresión entre paréntesis. Esta expresión está compuesta por dos términos principales: txPower * transmissionTime y rxPower * transmissionTime, ambos términos son productos de la potencia y el tiempo de transmisión o recepción, respectivamente.

El primer término, $\text{txPower} * \text{transmissionTime}$, representa el costo energético asociado a la transmisión de datos. Aquí, txPower es la potencia de transmisión utilizada, mientras que transmissionTime es el tiempo que toma enviar la información, el segundo término, $\text{rxPower} * \text{transmissionTime}$, hace referencia al costo energético relacionado con la recepción de datos, en el que rxPower indica la potencia de recepción y transmissionTime se mantiene constante, ya que el tiempo de transmisión y recepción suelen ser equivalentes en muchos casos.

Se incrementa el contador de paquetes totales (totalPackets) en 1 por cada paquete procesado para luego actualizar el contador de errores de paquetes (totalPacketErrors) sumando 1 si el paquete no se recibe correctamente, lo cual se determina por la variable success .

Figura 13. Código para calcular el PER

```
% Calcular PER
totalPackets = totalPackets + 1;
totalPacketErrors = totalPacketErrors + (~success);
```

Nota: Código implementado en Matlab para el cálculo del BER.

Se actualiza el consumo energético total del dispositivo y la sección correspondiente, la variable $\text{energyConsumption}(\text{device}+1)$ se asigna el valor de totalDeviceEnergy , mientras que $\text{retransmissionEnergyConsumption}(\text{device}+1)$ se asigna el valor de $\text{totalRetransmissionDeviceEnergy}$.

Figura 14. Comando para actualizar el consumo energético

```
% Actualizar el consumo energético total del dispositivo
energyConsumption(device + 1) = totalDeviceEnergy;
retransmissionEnergyConsumption(device + 1) = totalRetransmissionDeviceEnergy;
sectionEnergyConsumption(section) = sectionEnergyConsumption(section) + totalDeviceEnergy;
sectionRetransmissionEnergyConsumption(section) = sectionRetransmissionEnergyConsumption(section) + totalRetransmissionDeviceEnergy;
```

Nota: Código que nos permite actualizar de manera constante el consumo energético.

$\text{SectionEnergyConsumption}(\text{section})$ se incrementa sumando totalDeviceEnergy y $\text{sectionRetransmissionEnergyConsumption}(\text{section})$ se incrementa sumando $\text{totalRetransmissionDeviceEnergy}$

Figura 15. Código para mostrar el consumo por celda

```
% Mostrar el consumo energético por sección en kWh
for section = 1:numSections
    sectionEnergykWh = sectionEnergyConsumption(section) / 3.6e6;
    fprintf('Consumo energético de la Sección %d: %.6f kWh\n', section, sectionEnergykWh);
end
```

Se calcula consumo energético por sección en kWh. Para cada sección, se calcula `sectionEnergykWh` dividiendo `sectionEnergyConsumption(section)` por 3.6×10^6 , que convierte joules a kilovatios-hora (kWh). Se imprime el consumo energético de la sección utilizando `fprintf`, que muestra el número de la sección y su consumo energético en kWh con una precisión de seis decimales.

Figura 16. Código para mostrar consumo energético por retransmisiones

```
totalEnergykWh = sum(sectionEnergyConsumption) / 3.6e6;
totalRetransmissionEnergykWh = sum(sectionRetransmissionEnergyConsumption) / 3.6e6;
fprintf('Consumo energético total: %.6f kWh\n', totalEnergykWh);
fprintf('Consumo energético total por retransmisiones: %.6f kWh\n', totalRetransmissionEnergykWh);
```

Nota: Imprime el consumo energético de todas las retransmisiones realizadas.

La variable `totalEnergykWh` se calcula sumando todos los valores de `sectionEnergyConsumption` y dividiéndolos por 3.6×10^6 para convertir de joules a kWh. De manera similar, `totalRetransmissionEnergykWh` se calcula sumando todos los valores de `sectionRetransmissionEnergyConsumption` y dividiéndolos por 3.6×10^6 . Por último, se imprime el consumo energético total y el consumo energético total por retransmisiones utilizando `fprintf` con una precisión de seis decimales.

Figura 17. Cálculo del consumo energético por bit transmitido

```
% Calcular consumo energético por bit transmitido en kWh/bit
energyPerBit = totalEnergykWh / totalSuccessfulBits;
fprintf('Consumo energético por bit transmitido: %.6e kWh/bit\n', energyPerBit);
```

Nota: Imprime el consumo energético por cada bits transmitido.

Se calcula y muestra el consumo energético por bit transmitido, expresado en kWh/bit. se define la variable `energyPerBit` como el cociente entre `totalEnergykWh` y `totalSuccessfulBits`. Aquí, `totalEnergykWh` representa la energía total consumida en kilovatios-hora, mientras que `totalSuccessfulBits` indica el número total de bits transmitidos exitosamente.

Figura 18. Cálculo de la eficiencia energética

```
% Calcular eficiencia energética (bits útiles por kWh)
energyEfficiency = totalSuccessfulBits / totalEnergykWh;
fprintf('Eficiencia Energética: %.6e bits/kWh\n', energyEfficiency);
```

Nota: Imprime el consumo de solo los bits útiles.

El resultado de este cálculo se almacena en `energyPerBit`, que refleja la eficiencia energética del sistema de comunicación, es decir, cuánta energía se consume por cada bit de información transmitido.

Se calcula la eficiencia energética de un sistema de comunicación, expresada como la cantidad de bits útiles transmitidos por cada kilovatio-hora (bits/kWh). La variable `energyEfficiency` se define como el cociente entre `totalSuccessfulBits` y `totalEnergykWh`, donde `totalSuccessfulBits` representa el número de bits transmitidos con éxito y `totalEnergykWh` el consumo total de energía en kilovatios-hora.

Figura 19. *Mostrar resultados del BER y PER*

```
% Mostrar métricas de rendimiento
fprintf('Tasa de error de bits (BER): %.6e\n', totalErrors / totalBits);
fprintf('Tasa de error de paquetes (PER): %.6e\n', totalPacketErrors / totalPackets);
```

Nota: Imprime los valores calculados del BER y PER.

Se muestran métricas de rendimiento de un sistema de comunicación digital utilizando la función `fprintf`. Se imprimen la BER, la PER y el número de mensajes retransmitidos y el número de retransmisiones exitosas.

Figura 20. *Código para calcular los valores de latencia*

```
% Calcular y mostrar la latencia media
meanLatency = mean(latencies);
fprintf('Latencia media de la red: %.6f segundos\n', meanLatency);
```

Nota: Se imprime la latencia obtenida en la simulación.

Se calcula la latencia media de la red, se utiliza la función `mean` sobre el vector `latencies`, y se imprime con `fprintf` con una precisión de seis decimales.

4.2.5 Interpretación de los resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de la simulación del consumo energético en sistemas IoT operando sobre redes 5G, los resultados fueron organizados en tres escenarios distintos: domótica, salud y agricultura. Para cada uno de estos escenarios, pudiendo recopilar datos específicos sobre el consumo de energía de diferentes dispositivos IoT, los cuales fueron utilizados en simulaciones detalladas con el objetivo de analizar el rendimiento y la eficiencia energética de los sistemas en cada contexto particular.

Cada simulación se llevó a cabo durante un período de una hora por escenario y se repitió diez veces con el fin de identificar patrones consistentes en el consumo de energía, para modelar adecuadamente el tráfico de datos, se emplearon tres bases de datos de acceso libre, cada una correspondiente a un escenario específico. Estas bases de datos contenían al menos 20,000 registros cada una, proporcionando datos realistas y representativos sobre los patrones de tráfico de los dispositivos IoT. Los tipos de tráfico considerados en las simulaciones incluyeron TCP, MQTT y UDP, cubriendo así una variedad de comportamientos de red que reflejan diferentes necesidades de transmisión de datos y calidad de servicio, [61], [62].

4.2.5.1 *Primer escenario: Domótica.*

En el primer escenario, se recopiló el consumo energético de dispositivos IoT en un entorno doméstico.

Tabla 9. *Consumo energético del primer escenario*

	SNR 20	SNR 40
Sección 1	1.75 kWh	1.83 kWh
Sección 2	1.73 kWh	1.78 kWh
Sección 3	1.80 kWh	1.77 kWh
Sección 4	1.79 kWh	1.85 kWh
Sección 5	1.77 kWh	1.74 kWh
Sección 6	1.62 kWh	1.83 kWh
Sección 7	1.77 kWh	1.76 kWh
Sección 8	1.59 kWh	1.83 kWh
Consumo en retransmisión	41.48 kWh	0 kWh
Consumo total	55.31 kWh	14.39 kWh

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loo Julius

Cada sección representa una celda específica con varios entornos domésticos, los valores de consumo energético varían ligeramente entre estas secciones y entre los diferentes niveles de SNR, mostrando cómo la calidad de la señal puede impactar el rendimiento energético de los dispositivos IoT.

En el escenario con altos niveles de ruido las secciones muestran un consumo energético promedio elevado debido a la saturación del canal y la gran actividad de los dispositivos. Además, el consumo energético en retransmisión es significativamente alto, lo que lleva a un consumo total considerablemente mayor en comparación con los otros escenarios, este alto consumo en retransmisión sugiere que se destina una mayor cantidad de energía a mantener la comunicación de los dispositivos IoT en condiciones de señal subóptima.

En el escenario de un entorno ideal, las secciones presentan el consumo más bajo en promedio. Se evidencia que no hay consumo en retransmisión, lo que resulta en el consumo total más bajo entre los tres escenarios. Esto indica que, con un SNR óptimo, los dispositivos IoT pueden operar de manera mucho más eficiente, minimizando la energía requerida para mantener la comunicación.

Tabla 10. *Eficiencia de los paquetes transmitidos vs. Primer escenario*

	SNR 20	SNR 40
BER	4.63×10^{-1}	Entorno ideal
PER	1×10^0	Entorno ideal
Mensajes retransmitidos	117009	Entorno ideal
Mensajes retransmitidos de forma exitosa	0	Entorno ideal
Latencia	0.10 s	0.01 s

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

A medida que aumenta el SNR, se observa una mejora significativa en la calidad de la transmisión. En términos de BER, esta disminuye considerablemente conforme se incrementa el SNR, lo que indica una menor cantidad de errores en la transmisión de bits individuales. De manera similar, el PER también muestra una reducción notable con el aumento del SNR, reflejando una mejora en la integridad de los paquetes de datos transmitidos.

El número de mensajes que necesitan ser retransmitidos disminuye con el aumento del SNR. en condiciones de bajo SNR, una gran cantidad de mensajes debe ser retransmitida, pero este número se reduce a medida que mejora la calidad de la señal. En un entorno ideal, no es necesario retransmitir mensajes, lo que sugiere una transmisión casi perfecta, mientras que la latencia de la transmisión se mantiene constante y baja en los diferentes niveles de SNR.

Se aprecia una mejora significativa en la eficiencia del sistema (ver Tabla 11), tanto en términos de consumo de energía por bit transmitido como en la eficiencia energética global, cuando las condiciones de transmisión son más favorables.

Tabla 11. *Rendimiento energético vs. Primer escenario*

	SNR 20	SNR 40
Consumo energético por bit transmitido	2.48×10^{-8} kWh/bit	2.32×10^{-8} kWh/bit
Eficiencia Energética	4.02×10^7 bits/kWh	4.31×10^7 bits/kWh
Costo energético de la comunicación	0.017 kWh	0.010 kWh

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

Bajo condiciones optimizadas, el sistema logra transmitir más información utilizando menos energía, lo que se traduce en una reducción del costo energético total de la comunicación. Esto pone de manifiesto la importancia de optimizar los parámetros de transmisión para alcanzar un rendimiento energético más eficiente y sostenible.

4.2.5.2 Segundo escenario: Salud.

Los datos se presentan para ocho hospitales ubicados en diferentes celdas, incluyendo tanto el consumo energético individual como el consumo en retransmisión y el consumo total. A medida que aumenta el SNR, el consumo energético de cada hospital tiende a disminuir, lo que indica una mayor eficiencia energética con una mejor calidad de señal. Esta tendencia se observa en todos los hospitales listados, mostrando una disminución progresiva del consumo energético a medida que mejora el SNR.

El consumo en retransmisión también muestra una notable disminución con el incremento del SNR. En cuanto en un entorno con altos niveles de ruidos, el consumo en retransmisión es considerablemente alto, lo que refleja la cantidad de energía utilizada en retransmitir datos debido a errores. Sin embargo, a medida que el SNR mejora, este consumo disminuye drásticamente, siendo casi nulo cuando se llega a un entorno ideal, lo que indica que en condiciones de alta calidad de señal, la necesidad de retransmitir datos y el consumo energético asociado son prácticamente eliminados.

Tabla 12. *Consumo energético del segundo escenario*

	SNR 20	SNR 40
Hospital 1	1.96 kWh	1.55 kWh
Hospital 2	2.80 kWh	1.82 kWh
Hospital 3	2.64 kWh	2.28 kWh
Hospital 4	2.33 kWh	2.09 kWh
Hospital 5	2.15 kWh	1.21 kWh
Hospital 6	1.93 kWh	2.16 kWh
Hospital 7	2.02 kWh	2.34 kWh
Hospital 8	2.41 kWh	1.69 kWh
Consumo en retransmisión	55.05 kWh	0 kWh
Consumo total	73.29 kWh	15.14 kWh

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

El consumo total de energía, que incluye tanto el consumo individual de los hospitales como el consumo en retransmisión, sigue una tendencia decreciente con el aumento del SNR. Esto significa que en un entorno con mejor calidad de señal, la eficiencia energética general del sistema de internet de las cosas médicas (IoMT) es significativamente mejorada, resultando en un menor consumo total de energía.

Tabla 13. *Eficiencia de los paquetes transmitidos vs. Segundo escenario*

	SNR 20	SNR 40
BER	4.62×10^{-1}	Entorno ideal
PER	1×10^0	Entorno ideal
Mensajes retransmitidos	117711	Entorno ideal
Mensajes retransmitidos de forma exitosa	0	Entorno ideal
Latencia	0.08 s	0.01 s

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

Se observa una clara disminución en la BER con niveles de SNR más altos, indicando una mejora en la calidad de la transmisión de bits. Del mismo modo, la PER también disminuye notablemente, reflejando una mayor integridad en los paquetes de datos transmitidos.

En cuanto a la retransmisión de mensajes, se nota que cuando existes niveles alto de ruido, el número de mensajes que requieren retransmisión es elevado, lo que sugiere un alto volumen de datos con errores, mientras que en un entorno ideal no existe la necesidad de retransmitir mensajes y ofreciendo un alta buena experiencia al usuario.

La latencia, por otro lado, se mantiene baja y constante en todos los niveles de SNR analizados, lo que demuestra una transmisión eficiente y rápida de los datos debido a las características que ofrece las redes 5G, en términos de rendimiento, hay un notable incremento conforme se mejora el SNR.

Los datos revelan una disminución en el consumo energético por bit transmitido y un aumento en la eficiencia energética cuando se mejoran las condiciones de transmisión, lo que indica una mayor eficiencia en la utilización de la energía para cada bit de información procesado. Esto se refleja en un menor valor de kWh/bit, que sugiere una reducción en la energía requerida para cada unidad de información, optimizando así el desempeño del sistema.

Tabla 14. *Rendimiento energético vs. Segundo escenario*

	SNR 20	SNR 40
Consumo energético por bit transmitido	2.47×10^{-8} kWh/bit	2.30×10^{-8} kWh/bit
Eficiencia Energética	4.05×10^7 bits/kWh	4.35×10^7 bits/kWh
Costo energético de la comunicación	0.016 kWh	0.011 kWh

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

Se evidencia la eficiencia energética global (ver Tabla 14), medida en bits transmitidos por cada kWh consumido, presenta un cambio positivo implica que, con un mismo consumo energético, se logra transmitir un mayor volumen de datos, lo que se traduce en una mejora de la capacidad del sistema para gestionar información de manera eficiente. Además, el costo energético total de la comunicación muestra una reducción significativa, evidenciando que el uso eficiente de los recursos energéticos no solo impacta el consumo específico por bit, sino también el gasto energético global del sistema.

4.2.5.3 Tercer escenario: Agricultura.

Tabla 15. Consumo energético del tercer escenario

	SNR 20	SNR 40
Campo 1	5.44 kWh	3.89 kWh
Campo 2	5.00 kWh	4.44 kWh
Campo 3	5.64 kWh	4.34 kWh
Campo 4	5.08 kWh	4.50 kWh
Campo 5	5.54 kWh	3.89 kWh
Campo 6	5.46 kWh	4.31 kWh
Campo 7	4.96 kWh	4.15 kWh
Campo 8	5.42 kWh	4.01 kWh
Consumo en retransmisión	127.60 kWh	0 kWh
Consumo total	170.13 kWh	33.54 kWh

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

En este escenario, los dispositivos IoT fueron ubicados a mayores distancias de las estaciones base, lo que resultó en una mayor tasa de retransmisión debido a la pérdida de paquetes, las diferentes características de los dispositivos y el gran tamaño de los paquetes.

El consumo energético de los diferentes campos disminuye con niveles de SNR más altos, el Campo 1 presenta un consumo energético mayor a un SNR de 20 y menor a un SNR de 40, indicando una mayor eficiencia energética con mejor calidad de señal. Esta tendencia es consistente en todos los campos listados, donde el consumo energético disminuye progresivamente conforme mejora el SNR.

El consumo en retransmisión también muestra una reducción notable con niveles de SNR más altos. A un SNR de 20, el consumo energético debido a la retransmisión es considerablemente alto, reflejando la energía utilizada para retransmitir paquetes perdidos. Sin embargo, este consumo elimina por completo en un entorno ideal con un SNR de 40, indicando que la necesidad de retransmisión y el consumo energético asociado son prácticamente inexistentes en condiciones de alta calidad de señal.

El consumo total de energía, que incluye tanto el consumo de los campos como el consumo en retransmisión, sigue una tendencia decreciente a medida que se incrementa el SNR. Esto

implica que en un entorno con mejor calidad de señal, la eficiencia energética global del sistema IoT es significativamente mejorada, resultando en un menor consumo total de energía.

Tabla 16. *Eficiencia de los paquetes transmitidos vs. Tercer escenario*

	SNR 20	SNR 40
BER	5.60×10^{-1}	Entorno ideal
PER	1×10^0	Entorno ideal
Mensajes retransmitidos	1107498	Entorno ideal
Mensajes retransmitidos de forma exitosa	0	Entorno ideal
Latencia	0.10 s	0.02 s

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

En el contexto de los dispositivos IoT en diferentes campos, una peor calidad de señal resulta en una alta BER, indicando un gran número de errores en la transmisión de bits. Esto se traduce en un aumento significativo en el número de mensajes retransmitidos, elevando el consumo energético, como se observó previamente en los datos de consumo de los campos. Conforme la calidad de la señal mejora, la BER disminuye drásticamente, lo que reduce la necesidad de retransmisiones y, por lo tanto, el consumo de energía.

La PER sigue una tendencia similar, siendo muy alta con un SNR de 20, lo que refleja la gran cantidad de paquetes perdidos y la consecuente necesidad de retransmisión. En un entorno ideal, la PER es casi inexistente, indicando una transmisión de datos eficiente y sin pérdidas significativas.

El número de mensajes retransmitidos con éxito es inexistente a un SNR de 20, debido a la alta tasa de error, en un entorno ideal la calidad de la señal es tan alta que no se requieren retransmisiones. Esto se alinea con el menor consumo de energía observado en los campos con mejores niveles de SNR, destacando la relación directa entre la calidad de la señal y la eficiencia energética.

La latencia se mantiene baja y constante en todos los niveles de SNR, lo que indica que, independientemente de la calidad de la señal, el tiempo de retraso en la transmisión de datos es mínimo.

En la Tabla 17 se aprecia una reducción en el consumo energético por bit transmitido, lo que sugiere una optimización en el uso de la energía a medida que se incrementa la calidad de la señal, se evidencia una mejora en la eficiencia energética, manifestada en la capacidad del sistema para transmitir un mayor número de bits por cada kilovatio-hora consumido. Esta tendencia refleja una gestión más efectiva de los recursos energéticos disponibles, lo cual es fundamental para aplicaciones donde la eficiencia y la sostenibilidad son críticas.

Tabla 17. *Rendimiento energético vs. Tercer escenario*

	SNR 20	SNR 40
Consumo energético por bit transmitido	3.44×10^{-8} kWh/bit	3.22×10^{-8} kWh/bit
Eficiencia Energética	2.91×10^7 bits/kWh	3.11×10^7 bits/kWh
Costo energético de la comunicación	0.032 kWh	0.021 kWh

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loo Julius

El costo energético de la comunicación también experimenta una disminución significativa en escenarios con SNR más elevados. Esto subraya la importancia de operar en condiciones óptimas de SNR para minimizar el impacto energético y reducir los costos asociados con la transmisión de datos. En conjunto, estos resultados destacan la relación directa entre una mejor calidad de señal y una mayor eficiencia en el desempeño energético del sistema.

Los resultados obtenidos muestran una clara relación entre la calidad de la señal (medida a través del SNR) y el consumo energético de los dispositivos IoT en redes 5G. En todos los escenarios simulados (domótica, salud y agricultura), se observó que un SNR más alto conduce a un consumo energético significativamente menor. Esto se debe a la reducción en la necesidad de retransmisiones y a una mejor integridad de los datos transmitidos, lo que mejora la eficiencia global del sistema.

En el escenario de domótica, por ejemplo, el consumo energético total se redujo drásticamente de 55.31 kWh con un entorno no ideal bajo a 14.39 kWh en un entorno ideal con SNR de 40. Esta tendencia se repitió en los escenarios de salud y agricultura, destacando cómo una mejora en la calidad de la señal no solo optimiza la transmisión de datos, sino que también tiene un impacto directo en la sostenibilidad energética de los sistemas IoT.

4.2.5.4 Comparación entre escenarios: domótica, salud y agricultura.

El análisis comparativo entre los diferentes escenarios revela diferencias importantes en el consumo energético, vinculadas tanto a la naturaleza de los dispositivos IoT empleados como a las características del entorno simulado.

- Domótica: Este escenario, que involucra principalmente dispositivos de consumo doméstico, mostró el menor consumo energético en condiciones ideales, lo que sugiere que los dispositivos IoT en entornos controlados (como el hogar) pueden ser optimizados más fácilmente para una eficiencia energética superior.
- Salud: El entorno hospitalario presentó un consumo energético mayor comparado con la domótica, reflejando la mayor complejidad y criticidad de los dispositivos IoT empleados, como sensores médicos. Aquí, la eficiencia energética es crucial no solo para la sostenibilidad sino también para la fiabilidad en aplicaciones críticas.
- Agricultura: Este escenario mostró el consumo energético más elevado, especialmente en condiciones de bajo SNR. La gran cantidad de datos transmitidos y la mayor distancia entre dispositivos y estaciones base contribuyen a un consumo mayor, lo que resalta la necesidad de desarrollar soluciones específicas para la agricultura que minimicen la energía necesaria para mantener la conectividad en áreas rurales o remotas.

4.3 Técnicas de gestión de energía

Para la implementación de técnicas de gestión energética, se realizó una revisión exhaustiva de los dispositivos disponibles en el mercado, cada uno caracterizado por perfiles específicos de consumo de energía. En el sleep mode (modo de suspensión), se estableció a milivatios (mW), que corresponde a períodos de inactividad con consumo energético mínimo.

Idle mode (modo inactivo) se configuró a 27.29 mW, manteniendo algunos componentes del dispositivo permanecen operativos, aunque sin una carga de trabajo significativa, para el standby mode (modo de espera) se simuló con un consumo energético de 5 mW. En cuanto al deep sleep mode (modo de sueño profundo), esta técnica de gestión energética se estableció con un consumo mínimo de 2 mW, ideal para dispositivos que operan en condiciones de recursos extremadamente limitados, optimizando así la autonomía en entornos de baja disponibilidad energética.

4.3.1 Idle mode

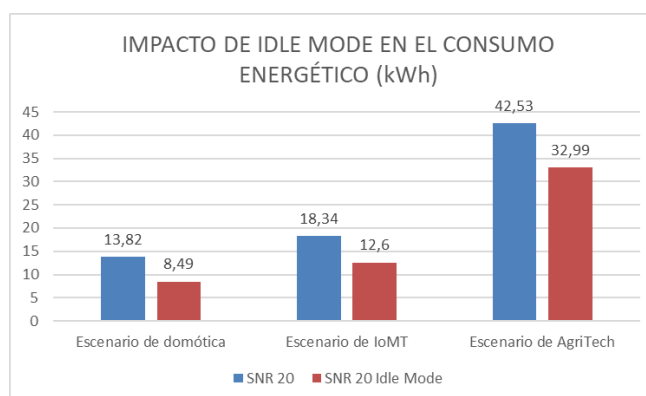
4.3.1.1 Implementación de Idle mode en los escenarios.

Escenarios con altos niveles de ruido

En el primer escenario, el impacto del modo de inactividad en el consumo energético para aplicaciones de domótica es significativo. Con la activación del idle mode, se logra una reducción del consumo energético del 38.57%, mostrando una notable disminución en el uso de energía.

Para el segundo escenario, centrado en el IoMT, se observa una tendencia similar, al implementar el modo de inactividad, el consumo energético disminuye en un 31%. Esta reducción evidencia la eficiencia energética que puede lograrse mediante el uso de modos de inactividad en aplicaciones médicas.

Figura 21. Entornos no ideales vs. Idle mode



Nota: Gráfico de barras entre entornos saturados vs. Idle mode, elaborado por Vinueza Loor Julius.

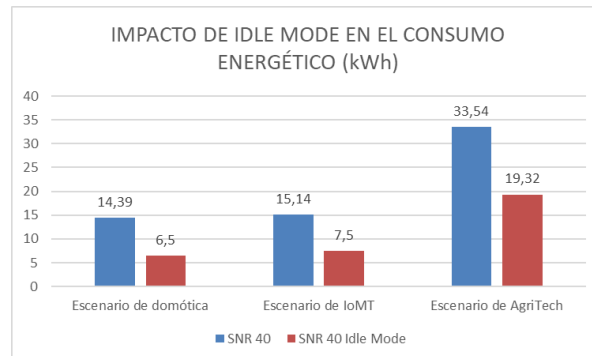
En el escenario de AgriTech, la diferencia en el consumo energético es aún más pronunciada, la implementación del modo de inactividad reduce el consumo en un 22%, demostrando el potencial de ahorro energético en aplicaciones agrícolas con la utilización de modos de inactividad.

Escenarios en un entorno ideal

En el ámbito de la domótica, la adopción del modo de inactividad resulta en una impresionante reducción del 54.83% en el consumo energético. Este considerable ahorro destaca la eficiencia del modo de inactividad en aplicaciones de hogar inteligente, permitiendo una gestión más sostenible de los recursos energéticos.

Para el escenario de IoMT, la implementación del modo de inactividad también muestra una significativa mejora en la eficiencia energética, con una reducción del consumo del 50.46%, contribuyendo a una mayor sostenibilidad en el ámbito de la tecnología médica.

Figura 22. *Entornos ideales vs. Idle mode*



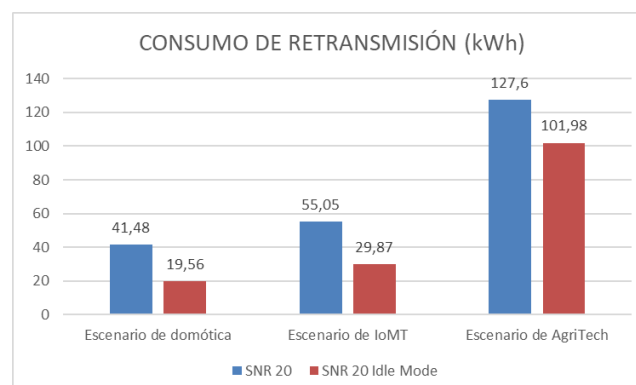
Nota: Gráfico de barras entre entornos ideales vs. Idle mode, elaborado por Vinueza Loor Julius.

En el caso de AgriTech, el impacto del modo de inactividad es igualmente relevante, con una reducción del 42.40% en el consumo energético, se evidencia la eficacia de esta estrategia en la optimización del uso de energía en aplicaciones agrícolas.

Impacto de idle mode en las retransmisiones

En el sector de la domótica, la activación del idle mode reduce el consumo energético de retransmisión en un 52.84%. Esta reducción significativa permite que las redes 5G y los sistemas IoT funcionen de manera más eficiente, aliviando la carga en la infraestructura de red y mejorando la gestión de energía en dispositivos conectados.

Figura 23. *Retransmisiones vs. Idle mode*



Nota: Gráfico de barras entre las retransmisiones vs. Idle mode, elaborado por Vinueza Loor Julius.

Mientras que en IoMT, se demostró como disminuye el consumo energético en un 45.74%, esta optimización es crucial para redes 5G y sistemas IoT, ya que reduce la demanda energética, mejora la duración de la batería de los dispositivos médicos y permite una operación más sostenible y fiable en entornos de salud.

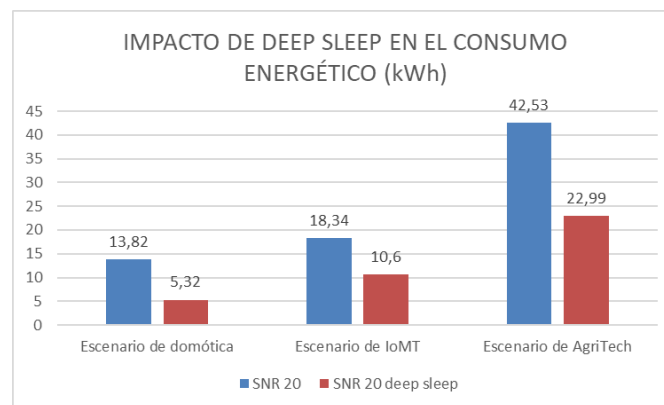
4.3.2 Deep sleep mode

4.3.2.1 Implementación de modo deep sleep en los escenarios.

Escenarios con altos niveles de ruido

En el contexto de la domótica, se observa una diferencia notable en la reducción del consumo energético entre el idle mode y el deep sleep. Con el idle mode, el consumo energético se reduce en un 38.57%. En cambio, al aplicar el deep sleep, la reducción es significativamente mayor, alcanzando un 61.51%.

Figura 24. Entornos no ideales vs. Deep sleep mode



Nota: Gráfico de barras entre entornos saturados vs. Deep sleep mode, elaborado por Vinuesa Loor Julius.

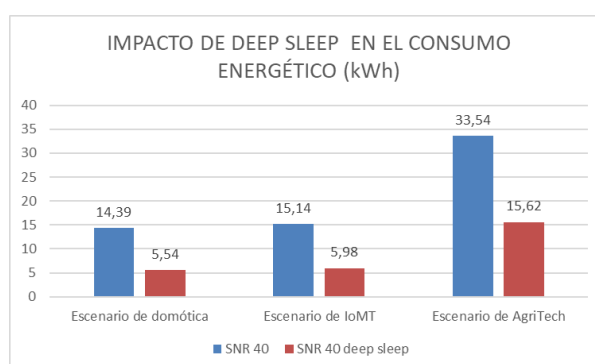
Para el escenario de IoMT, el impacto también es significativo, al aplicar la técnica idle mode, el consumo energético disminuye en un 31.30%. Sin embargo, con el deep sleep, la reducción es más pronunciada, logrando un 42.20%.

En el sector de AgriTech, el idle mode reduce el consumo de energía en un 22.43%, mientras que el deep sleep consigue una reducción mucho mayor, equivalente al 45.94%. Al comparar ambos modos, el deep sleep demuestra ser claramente más eficaz en la reducción del consumo energético en todos los escenarios analizados.

Escenarios en un entorno ideal

En la evaluación del consumo energético, el modo de deep sleep en un entorno ideal demuestra ser significativamente más eficiente que el idle mode en varios contextos. En el ámbito de la domótica, la aplicación del deep sleep resulta en una notable reducción del 61.50% en el consumo energético, en comparación con el 54.83% alcanzado con el idle mode.

Figura 25. *Entornos ideales vs. Deep sleep mode*



Nota: Gráfico de barras entre entornos ideales vs. Deep sleep mode, elaborado por Vinueza Loor Julius.

En el caso de IoMT, el deep sleep también muestra una clara ventaja, logrando una disminución del 60.50% en el consumo energético frente al 50.46% obtenido con el idle mode, esta diferencia destaca la efectividad superior del deep sleep en entornos médicos, donde la gestión eficiente de la energía es crucial.

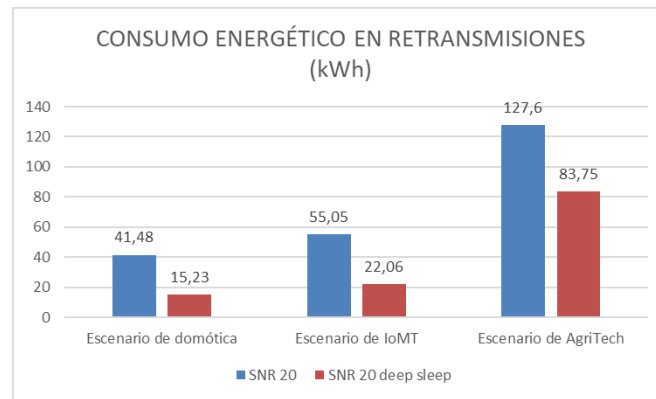
En el escenario agrícola, el impacto del deep sleep es igualmente significativo, con una reducción del 53.43% en el consumo energético, mientras que el idle mode proporciona una reducción del 42.40%.

Impacto de deep sleep en las retransmisiones

En el ámbito de la domótica, el uso del deep sleep produce una disminución del 63.28% en el consumo de energía de retransmisiones, esta notable reducción pone de manifiesto la eficacia del deep sleep para mejorar la eficiencia energética en aplicaciones de hogar inteligente. En el sector de IoMT, el deep sleep logra reducir el consumo energético en retransmisiones un 59.93%, este importante descenso resalta la capacidad del deep sleep para gestionar de manera eficiente la energía en entornos médicos, optimizando el uso de recursos.

Para IoT en la agricultura el deep sleep también muestra un impacto considerable, reduciendo el consumo energético en un 34.37%, aunque la reducción es menor en comparación con otros contextos, sigue siendo significativa y demuestra la utilidad del deep sleep en aplicaciones agrícolas.

Figura 26. *Retransmisiones vs. Deep sleep mode*



Nota: Gráfico de barras entre las retransmisiones vs. Deep sleep mode, elaborado por Vinuesa Loor Julius.

Estos resultados indican que la implementación del modo de deep sleep en diversos escenarios de sistemas IoT lleva a una notable disminución del consumo energético en retransmisiones, mejorando la eficiencia en el uso de recursos en cada aplicación.

4.3.3 Sleep mode

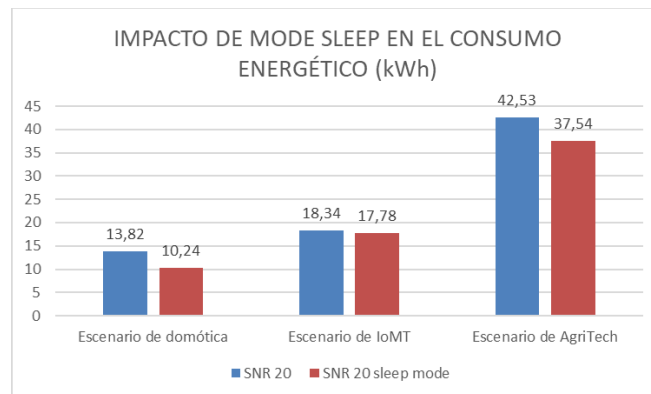
4.3.3.1 Implementación de sleep mode en los escenarios.

Escenarios con altos niveles de ruido

Para aplicaciones de domótica, se registra una disminución del 25.90% en el consumo energético al emplear el modo de sleep, esta reducción indica que el modo de sleep puede mejorar la eficiencia energética en sistemas de hogar inteligente.

En cuanto a IoMT, el impacto del modo de sleep es menos pronunciado, logrando solo una reducción del 3.05% en el consumo de energía, este pequeño descenso sugiere que el modo de sleep tiene una efectividad limitada en la optimización energética en entornos médicos.

Figura 27. *Entornos no ideales vs. Sleep mode*



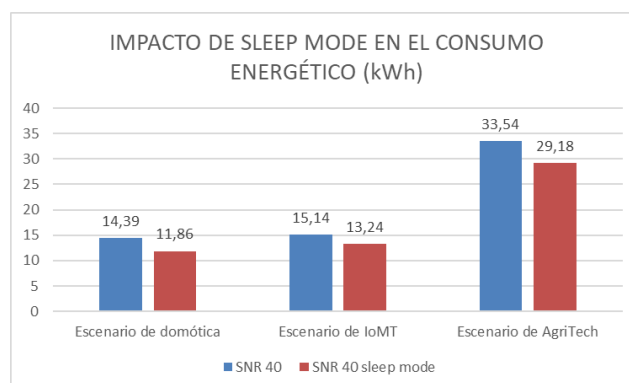
Nota: Gráfico de barras entre entornos no ideales vs. Sleep mode, elaborado por Vinueza Loor Julius.

Respecto a la tecnología agrícola (AgriTech), el modo de sleep permite una reducción del 11.73% en el consumo energético. Aunque la disminución es moderada, muestra que el modo de sleep puede contribuir a la eficiencia energética en aplicaciones agrícolas.

Escenarios en un entorno ideal

En el escenario de domótica, el modo de sleep mode resulta en una disminución del 17.58% en el consumo energético, esta reducción muestra que el sleep mode puede mejorar la eficiencia energética en sistemas de hogar inteligente, aunque de manera menos significativa en comparación con otros métodos de ahorro de energía.

Figura 28. *Entornos ideales vs. Sleep mode*



Nota: Gráfico de barras entre entornos ideales vs. Sleep mode, elaborado por Vinueza Loor Julius.

De igual manera en el escenario de IoT, el sleep mode logra una reducción del 12.55% en el consumo de energía, este descenso moderado indica que el sleep mode tiene una efectividad limitada en la optimización del uso de energía en entornos médicos. En el

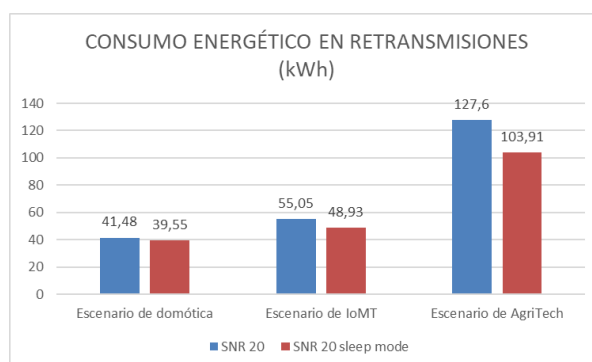
escenario de agricultura, el modo de sleep mode permite una reducción del 13.00% en el consumo energético, sin embargo, la disminución no es tan pronunciada, demuestra que el sleep mode puede contribuir a la eficiencia energética en aplicaciones agrícolas

Impacto de sleep mode en las retransmisiones

En el caso de los sistemas IoT en domótica, se detecta una disminución del 4.65% en el consumo energético al utilizar el modo de sleep mode, esta disminución implica una mejora marginal en la eficiencia energética de los sistemas de hogar inteligente.

Para los sistemas IoMT, el modo de sleep mode consigue una reducción del 11.12% en el consumo energético, este descenso moderado sugiere que la efectividad del sleep mode para optimizar el uso de energía en entornos médicos es limitada.

Figura 29. *Retransmisiones vs. Sleep mode*



Nota: Gráfico de barras entre las retransmisiones vs. Sleep mode, elaborado por Vinueza Looor Julius.

En el ámbito de la agricultura el modo de sleep mode permite una reducción del 18.57% en el consumo energético. Aunque esta disminución no es particularmente alta, demuestra que el sleep mode puede ser útil para mejorar la eficiencia energética en aplicaciones agrícolas.

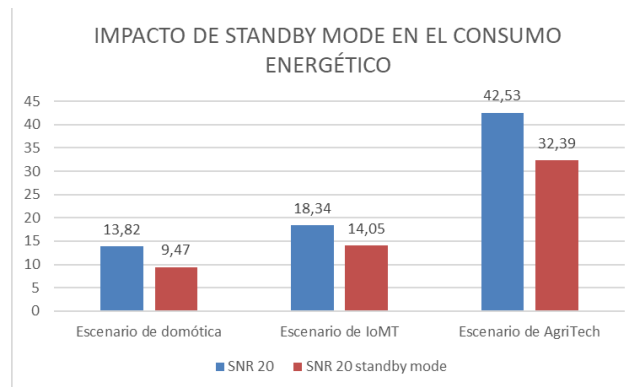
4.3.4 Standby mode

4.3.4.1 Implementación de standby mode en los escenarios.

Escenarios con altos niveles de ruido

En el escenario de domótica, el modo de standby mode reduce el consumo energético en un 31.48%, esta reducción es significativa y demuestra la capacidad del standby mode para mejorar la eficiencia energética en sistemas de hogar inteligente

Figura 30. *Entornos no ideales vs. Standby mode*



Nota: Gráfico de barras entre entornos no ideales vs. Standby mode, elaborado por Vinueza Loor Julius.

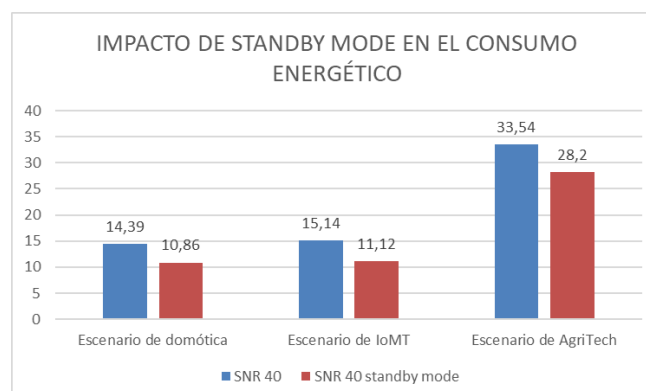
En el escenario de IoMT, el modo de standby mode logra una disminución del 23.39% en el consumo energético, este descenso es notable y sugiere que el standby mode es efectivo para optimizar el uso de energía en entornos médicos.

Para el escenario de AgriTech, el modo de standby mode permite una reducción del 23.84% en el consumo de energía, esta disminución es considerable y destaca la utilidad del standby mode en la mejora de la eficiencia energética en aplicaciones agrícolas.

Escenarios en un entorno ideal

En el escenario de domótica, el modo de standby mode resulta en una disminución del 24.53% en el consumo energético, se observó una reducción significativa indica que el standby mode puede mejorar la eficiencia energética en sistemas de hogar inteligente, ofreciendo una considerable optimización del uso de energía.

Figura 31. *Entornos ideales vs. Standby mode*



Nota: Gráfico de barras entre entornos ideales vs. Standby mode, elaborado por Vinueza Loor Julius.

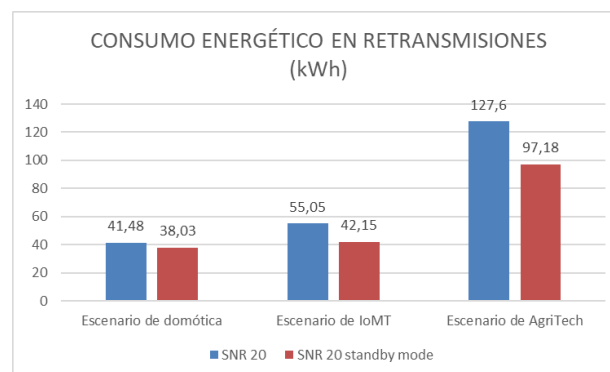
Para el escenario de IoMT, el modo de standby mode logra una reducción del 26.55% en el consumo energético, este descenso sugiere que el standby mode es efectivo para mejorar la eficiencia en el uso de energía en entornos médicos, proporcionando un ahorro energético significativo.

En el escenario AgriTech, el modo de standby mode permite una reducción del 15.92% en el consumo energético. Si bien la disminución no es tan pronunciada como en otros contextos, demuestra que el standby mode puede contribuir a la eficiencia energética en aplicaciones agrícolas, mejorando el uso de recursos energéticos en este ámbito.

Impacto de standby mode en las retransmisiones

En el escenario de domótica, se observa que el modo de standby reduce el consumo energético en un 8.32%. Esta reducción, aunque modesta, indica una mejora en la eficiencia energética al aplicar el modo de standby en sistemas de hogar inteligente.

Figura 32. *Retransmisiones vs. Standby mode*



Nota: Gráfico de barras entre las retransmisiones vs. Standby mode, elaborado por Vinueza Loor Julius.

Para el escenario de IoMT, el modo de standby logra una reducción significativa del 23.43% en el consumo energético, la reducción del consumo sugiere que el modo de standby tiene efectividad en la optimización del uso de energía en entornos médicos.

En el escenario de AgriTech, el modo de standby permite una disminución del 23.84% en el consumo energético, se obtuvo una reducción que evidencia que el modo de standby puede contribuir sustancialmente a la eficiencia energética en aplicaciones agrícolas.

La eficacia del modo deep sleep como una técnica clave para reducir el consumo energético en sistemas IoT en redes 5G. Al comparar esta técnica con las soluciones descritas en el

marco referencial, como el uso de LSTM y Reinforcement Learning para la predicción energética o el algoritmo difuso de múltiples objetivos para la optimización, se observa que el modo deep sleep ofrece una solución más simple y directa, especialmente adecuada para entornos donde la implementación de algoritmos complejos no es viable.

En comparación con enfoques avanzados como las femtoceldas o Massive MIMO, el modo deep sleep presenta ventajas significativas en términos de simplicidad y costo, especialmente en entornos rurales o con infraestructuras limitadas. Aunque estas técnicas avanzadas tienen su lugar, el modo deep sleep proporciona una eficiencia energética constante y aplicable en una amplia gama de escenarios, sin los desafíos de implementación asociados a tecnologías más complejas.

Sin embargo, es importante considerar las limitaciones como su inadecuación para aplicaciones que requieren respuestas inmediatas. En estos casos, combinar esta técnica con otras más avanzadas podría ofrecer un equilibrio óptimo entre eficiencia energética y rendimiento.

4.4 Propuestas de estrategias de optimización del consumo energético en sistemas IoT

Para seleccionar la técnica adecuada para la reducción del consumo energético, se consideraron aspectos relacionados con la disminución del consumo y efectos colaterales sobre el rendimiento general de la red. El análisis incluyó la valoración de la latencia, la reducción del consumo energético en retransmisiones, PER, BER, entre otros.

Estos parámetros proporcionaron una visión integral de cómo cada técnica impacta tanto en la eficiencia energética como en la estabilidad operativa de la red, se examinó la capacidad de las técnicas seleccionadas para mantener un desempeño óptimo en condiciones de carga variable y diferentes niveles de interferencia. Esto permitió identificar la estrategia de gestión energética minimiza el consumo de energía, manteniendo un alto nivel de rendimiento y confiabilidad en la transmisión de datos dentro de la red.

4.4.1 Rendimiento de la red con técnicas de gestión energética

4.4.1.1 Latencia.

Tras la implementación de las técnicas de gestión de energía, se observaron tanto mejoras como incrementos en los tiempos de latencia, dependiendo del modo de operación y las condiciones del entorno. En un entorno ideal, los modos standby e Idle lograron mantener latencias bajas; en domótica, standby aumento la latencia a 0.02 segundos y Idle a 0.04 segundos, mientras que en salud, respecto a el entorno en agricultura, aunque standby mostró un ligero incremento a 0.06 segundos, se mantuvo dentro de un rango aceptable.

Tabla 18. Valores de latencia con diferentes técnicas de consumo energético

Escenario	Entorno	Modo	Modo	Modo	Modo
		Sleep	Deep Sleep	Standby	Idle
Domótica	Ideal	0.03s	0.05s	0.02s	0.04s
	No ideal	0.11s	0.15s	0.10s	0.12s
Salud	Ideal	0.03s	0.06s	0.04s	0.03s
	No ideal	0.09s	0.10s	0.09s	0.10s
Agricultura	Ideal	0.05s	0.09s	0.06s	0.07s
	No ideal	0.13s	0.17s	0.12s	0.11s

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

Por el contrario, los modos sleep y deep sleep, diseñados para un mayor ahorro energético a costa de la rápida respuesta, siendo así que presentaron incrementos de latencia. En domótica, se elevaron a 0.03 y 0.05 segundos; en salud, deep sleep alcanzó 0.06 segundos, en agricultura fue el escenario más afectado, con aumentos hasta 0.09 segundos en deep Sleep.

En entornos no ideales, la latencia aumentó en todos los modos: en domótica, sleep y deep sleep llegaron a 0.11 y 0.15 segundos; en salud, variaron entre 0.09 y 0.10 segundos; en agricultura, alcanzaron 0.13 y 0.17 segundos, respectivamente.

4.4.1.2 Tasa de error de bits.

Es importante destacar que, aunque estas técnicas son efectivas para reducir el consumo de energía, introducen un nivel adicional de complejidad en la gestión de la red, al entrar en estados de bajo consumo los dispositivos disminuyen significativamente su actividad, lo que

se traduce en menores transmisiones de datos y, por ende, menos consumo de batería. Sin embargo, esta reducción en la actividad también implica que los dispositivos tardan más tiempo en despertarse y sincronizarse con el resto de la red, lo cual puede causar latencia adicional (ver Tabla 15) y afectar la rapidez con la que los datos son enviados y recibidos.

Tabla 19. *Valores de BER con diferentes técnicas de consumo energético*

Escenario	Entorno	BER inicial	Modo Sleep	Modo Deep Sleep	Modo Standby	Modo Idle
Domótica	No ideal	46.4%	47.9%	52.69%	44.27%	45.42%
Salud	No ideal	46.2%	44.27%	51.56%	43.22%	45.67%
Agricultura	No ideal	56%	52.32%	60.25%	53.32%	55.12%

Fuente: La investigación

Elaborado por: Vinueza Loor Julius

En este contexto, el impacto combinado del BER y la latencia muestra que el ahorro energético mediante modos como sleep mode y deep sleep mode puede tener efectos contraproducentes en aplicaciones donde la integridad y la puntualidad de los datos son críticas. En entornos no ideales, donde las condiciones de transmisión ya son desfavorables, los modos de energía restrictivos no solo incrementan la latencia, sino que también agravan la tasa de errores (ver Tabla 19).

4.4.1.3 Tasa de errores de paquetes.

EL PER que se presenta del 100% en los diferentes escenarios se debe a las condiciones de un entorno no ideal, donde factores como la interferencia, la baja calidad de la señal, o la congestión de la red influyen negativamente en la transmisión de datos. En estos entornos, todos los paquetes enviados experimentan errores y requieren ser retransmitidos, lo que incrementa significativamente tanto la latencia como el consumo energético, contrarrestando los beneficios que se podrían obtener mediante técnicas de ahorro de energía.

Sin embargo, es importante destacar que en un entorno ideal, estos problemas no se presentan, con una señal clara y sin interferencias, se demuestra que PER se mantiene en niveles nulos debido a las grandes ventajas que ofrece las redes 5G, permitiendo aprovechar las ventajas de los modos de bajo consumo energético sin afectar la integridad o puntualidad de los datos transmitidos. Esto subraya la importancia de considerar el contexto y las

características del entorno en el que se implementan las estrategias de ahorro energético, ya que su efectividad puede variar significativamente en función de las condiciones de operación.

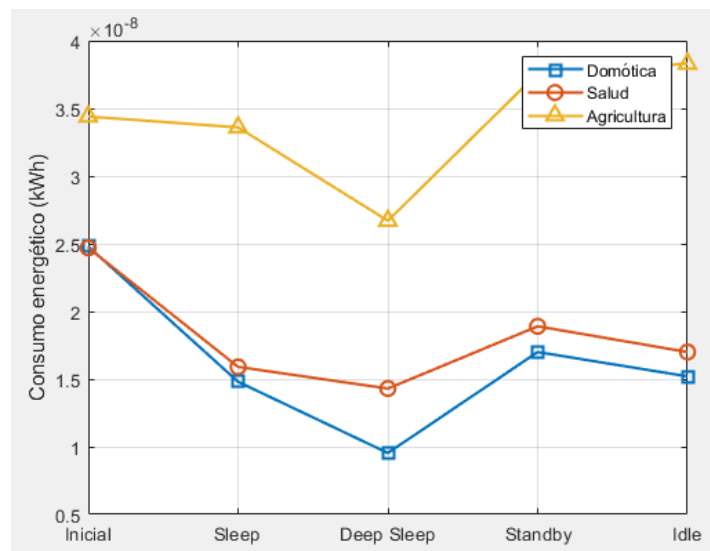
4.4.1.4 Consumo energético por bit transmitido.

Entorno no ideal

Se realizó el análisis del impacto de diversas estrategias de gestión energética sobre el consumo de energía por bit transmitido en sistemas IoT en diferentes contextos de aplicación, los resultados indican una reducción significativa en el consumo energético al implementar estas estrategias, optimizando la eficiencia de los dispositivos conectados en redes 5G. Esta disminución es crítica para maximizar la autonomía de los dispositivos y minimizar el consumo de recursos, especialmente en aplicaciones donde la sostenibilidad energética es un factor determinante.

El análisis sugiere que ajustar el nivel de actividad de los dispositivos en función de sus necesidades operativas permite una gestión eficiente del consumo energético, se refleja en la reducción de la energía requerida para la transmisión de datos, manteniendo un equilibrio entre la operatividad y el ahorro energético

Figura 33. Consumo energético por bit transmitido en escenarios no ideal vs Técnicas de gestión energética



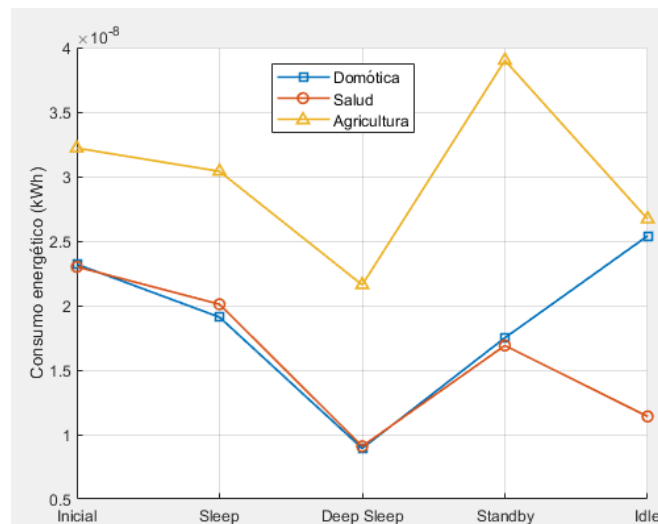
Nota: Comparación del consumo energético por bit transmitido en escenarios no ideal vs. Técnicas de gestión energética, elaborado por Vinueza Loor Julius.

Es importante seleccionar adecuadamente el estado operativo de los dispositivos según las condiciones de funcionamiento y los requisitos de la red. La capacidad de reducir el consumo de energía sin afectar el rendimiento del sistema es fundamental para garantizar la viabilidad y sostenibilidad de las redes IoT, particularmente en entornos con recursos limitados o donde la operación continua es crítica.

Entorno ideal

En el escenario ideal, se observa una mejora sustancial en la eficiencia en todos los contextos analizadas, destacándose el impacto positivo de mantener los dispositivos en estados de baja actividad. Esto se traduce en un consumo energético optimizado que no compromete la capacidad de respuesta del sistema, logrando un equilibrio óptimo entre operatividad y ahorro de energía.

Figura 34. Consumo energético por bit transmitido en escenarios no ideal vs Técnicas de gestión energéticas



Nota: Comparación del consumo energético por bit transmitido en escenarios ideales vs. Técnicas de gestión energética, elaborado por Vinueza Loor Julius.

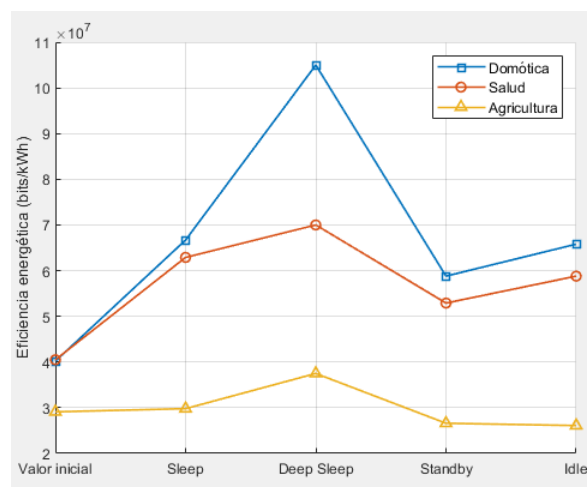
En un contexto ideal, el ahorro energético demuestra el potencial máximo de estas configuraciones para mejorar la sostenibilidad y la autonomía de los dispositivos IoT, adaptándose de manera eficiente a las demandas energéticas sin comprometer su funcionalidad. La capacidad de lograr un consumo mínimo en condiciones ideales sugiere que, con un ajuste adecuado, es posible alcanzar niveles similares de eficiencia en escenarios más complejos, contribuyendo a la sostenibilidad general de los sistemas IoT en redes 5G.

4.4.1.5 Eficiencia energética en los diferentes escenarios.

Entorno no ideal

Los datos evidencian cómo, pese a las condiciones adversas, es posible alcanzar mejoras significativas en la eficiencia energética a través de técnicas que ayuden a reducir el consumo energético de los dispositivos IoT, se observa que los valores de eficiencia energética iniciales experimentan un aumento significativo al aplicar diferentes configuraciones que reducen la actividad del sistema

Figura 35. Eficiencia energética en escenarios no ideal vs Técnicas de gestión energética



Nota: Comparación de la eficiencia energética en escenarios no ideales vs. Técnicas de gestión energética, elaborado por Vinueza Loor Julius.

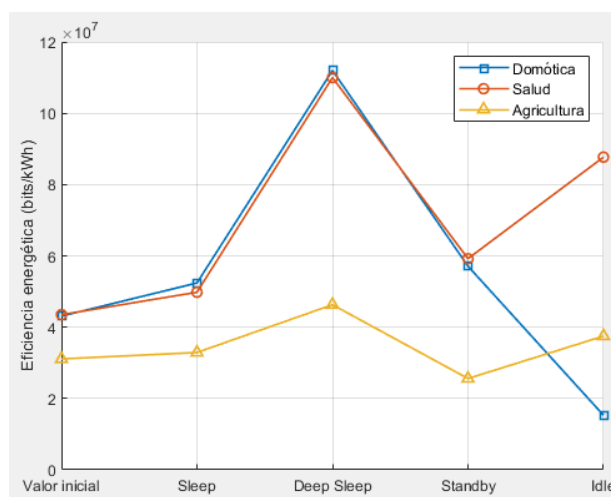
Los resultados muestran la importancia de una gestión dinámica de los recursos energéticos en entornos no ideales, la optimización del consumo incluso en condiciones adversas, permite prolongar la vida útil de los dispositivos y mejorar la sostenibilidad de la red IoT. A pesar de los desafíos presentados por este entorno, es posible implementar estrategias que incrementen la eficiencia energética.

Entorno ideal

En el entorno ideal, se observa que los dispositivos logran alcanzar niveles de eficiencia energética significativamente mejores en comparación con el entorno no ideal (ver Figura 35), esto se debe a que las condiciones de operación óptimas como la ausencia de interferencias y una menor necesidad de retransmisiones, permiten a los dispositivos operar con menor consumo de energía por bit transmitido.

En particular, se destaca una reducción notable en el consumo cuando los dispositivos se encuentran en estados de baja actividad, logrando optimizar su eficiencia sin comprometer la capacidad de respuesta del sistema.

Figura 36. *Eficiencia energética en escenarios ideal vs Técnicas de gestión energética*



Nota: Comparación de la eficiencia energética en escenarios ideales vs. Técnicas de gestión energética, elaborado por Vinuesa Loor Julius.

Se evidencia que la efectividad de las estrategias de gestión energética es significativamente mayor en entornos ideales. Sin embargo, los resultados en condiciones no ideales subrayan la importancia de adaptar dinámicamente estas estrategias para enfrentar los desafíos operativos, maximizando la eficiencia en contextos donde las condiciones pueden variar de manera impredecible.

4.4.1.6 Costo energético de la comunicación.

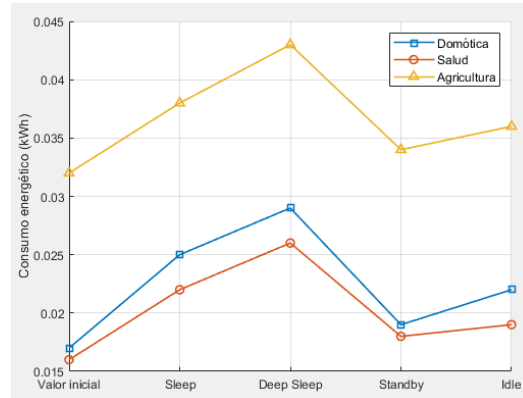
Entorno no ideal

Un aspecto notable es el comportamiento del modo deep sleep, que, aunque en otros contextos se ha demostrado como una estrategia efectiva para reducir el consumo energético, en este caso específico presenta un consumo más elevado en comparación con otras técnicas.

Este fenómeno se explica por los altos niveles de latencia asociados al modo deep sleep en entornos con condiciones adversas. La necesidad de que los dispositivos entren y salgan repetidamente de un estado de inactividad profunda para procesar o retransmitir datos genera un incremento en el gasto energético, a medida que los dispositivos reactivan sus funciones

para reestablecer la comunicación, el consumo energético adicional se acumula, resultando en un costo energético mayor.

Figura 37. Consumo energético de la comunicación en escenarios no ideal vs Técnicas de gestión energéticas



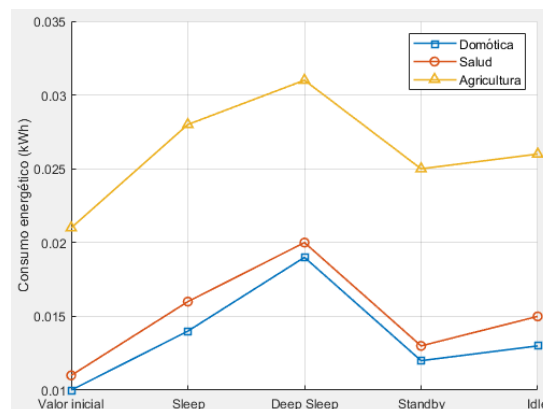
Nota: Comparación del costo energético de la comunicación en escenarios no ideales vs. Técnicas de gestión energética, elaborado por Vinueza Loor Julius.

Si bien otras técnicas permiten a los dispositivos mantenerse en un estado de actividad reducida pero constante, como el modo standby o idle, logrando un balance más eficiente entre consumo energético de la comunicación y latencia.

Entorno ideal

Se observa que en condiciones óptimas, el consumo energético es significativamente menor en todos los modos de operación, reflejando una eficiencia mejorada debido a la estabilidad de la red y la ausencia de interferencias y pérdida de paquetes.

Figura 38. Consumo energético de la comunicación en escenarios ideal vs Técnicas de gestión energéticas



Nota: Comparación de la eficiencia energética en escenarios ideales vs. Técnicas de gestión energética, elaborado por Vinueza Loor Julius.

Al comparar estos resultados con el entorno no ideal (ver Figura 37) se evidencia que las estrategias de gestión energética que involucren una reducción drástica de la actividad de los dispositivos, como el modo deep sleep, pueden ser altamente efectivas en entornos controlados, donde la latencia es elevada y la comunicación es estable.

A pesar del mejor rendimiento en escenarios ideales, el modo deep sleep sigue mostrando un consumo energético superior en comparación con otras estrategias de gestión, si bien su eficiencia mejora respecto a entornos no ideales, su gasto energético continúa siendo más elevado que en modos como standby o idle debido a su alta latencia. La necesidad de reactivar los dispositivos desde un estado de inactividad profunda implica un costo energético adicional cada vez que estos deben procesar datos o restablecer la comunicación.

4.4.2 Justificación de la herencia del modo deep sleep

El modo deep sleep ha demostrado ser la técnica más eficaz para la reducción del consumo energético en diversos contextos de IoT, incluidos entornos de domótica, salud y agricultura. Su capacidad para minimizar el consumo de energía sin comprometer significativamente la capacidad de respuesta de los dispositivos lo convierte en una opción ideal para las aplicaciones IoT en redes 5G, su implementación ha mostrado consistentemente mejores resultados en comparación con otras técnicas como el modo inactivo y el modo de espera.

La adopción del modo deep sleep permite a los dispositivos IoT conservar energía de manera óptima durante largos periodos de inactividad sin comprometer su capacidad de respuesta cuando se necesitan. Esto es crucial para aplicaciones donde el reemplazo o recarga de baterías es difícil o costoso, como en dispositivos médicos o sensores desplegados en áreas rurales.

No solo optimiza el consumo energético, sino que también mejora la sostenibilidad operativa de los dispositivos IoT en diversos entornos. Esta técnica heredada es fundamental para la viabilidad a largo plazo de las aplicaciones IoT en la era de las redes 5G, proporcionando una solución eficaz para uno de los desafíos más importantes de la tecnología moderna.

Al desarrollar estrategias de optimización del consumo energético en sistemas IoT sobre redes 5G, se ha identificado el modo deep sleep como una técnica central debido a su eficacia comprobada en la reducción del consumo energético durante los periodos de inactividad de los dispositivos. Sin embargo, para maximizar la eficiencia energética y abordar las diversas

necesidades de las aplicaciones IoT, es crucial considerar la integración de esta técnica con otras estrategias que puedan adaptarse a diferentes escenarios operativos.

Aunque es altamente efectivo puede complementarse con otras técnicas para mejorar aún más el rendimiento energético, en aplicaciones donde la rapidez de respuesta es fundamental, como en sistemas de seguridad o salud, combinar el modo deep sleep con técnicas como el uso de LSTM y reinforcement learning para predecir momentos óptimos de inactividad, podría ofrecer un equilibrio ideal entre ahorro de energía y rendimiento operativo.

En entornos rurales, donde el acceso a fuentes de energía es limitado, el modo deep sleep puede ser la estrategia principal, proporcionando una solución eficiente sin necesidad de infraestructura adicional. Por otro lado, en entornos urbanos densos, técnicas como femtoceldas podrían integrarse para manejar mejor la alta densidad de dispositivos y optimizar la eficiencia energética en situaciones de tráfico intenso.

Es fundamental evaluar la viabilidad práctica de implementar estas estrategias en sistemas IoT reales. Aunque el modo deep sleep es fácil de implementar y ofrece una solución rentable, la integración con tecnologías más avanzadas como las superficies inteligentes reflectantes (RIS) podría requerir inversiones adicionales y una infraestructura más compleja. Por lo tanto, cualquier estrategia de optimización energética debe considerar tanto los beneficios en términos de ahorro energético como los costos y la complejidad asociados a su implementación.

Las estrategias propuestas en esta investigación abren la puerta a futuras exploraciones que podrían centrarse en la automatización de la selección de técnicas energéticas en tiempo real, utilizando inteligencia artificial para adaptar dinámicamente las estrategias según las condiciones operativas del entorno IoT. Además, la combinación de técnicas avanzadas con soluciones más accesibles podría proporcionar un enfoque integral para maximizar la eficiencia energética en redes 5G, adaptándose a las necesidades específicas de cada aplicación y entorn

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El análisis del consumo energético en sistemas IoT desplegados sobre redes 5G reveló variaciones significativas dependiendo del entorno y las condiciones operativas, como la calidad de la señal. Estos resultados subrayan la importancia de considerar las características específicas de cada escenario al diseñar estrategias de optimización energética, ya que los patrones de consumo difieren considerablemente entre aplicaciones como domótica, salud y agricultura.
- El análisis de técnicas de gestión de energía mostró que el modo deep sleep es una solución altamente efectiva para reducir el consumo energético durante los periodos de inactividad en dispositivos IoT. Este enfoque sobresale por su simplicidad y eficiencia en comparación con métodos más complejos, como el uso de algoritmos de aprendizaje automático. Sin embargo, se reconocen sus limitaciones en aplicaciones que requieren una respuesta inmediata, lo que resalta la necesidad de combinarlo con otras técnicas para lograr un equilibrio óptimo entre eficiencia y rendimiento.
- Al proponer estrategias de optimización energética que combinan el modo deep sleep con otras técnicas, adaptando las soluciones a las características específicas de cada entorno IoT. Estas estrategias demostraron ser no solo efectivas, sino también viables en términos de implementación práctica, proporcionando un enfoque equilibrado para mejorar la sostenibilidad energética en redes 5G. Este enfoque integral permite abordar las necesidades particulares de cada contexto operativo, ofreciendo un camino claro hacia la optimización energética en la creciente infraestructura IoT.

5.2 Recomendaciones

- Implementar protocolos de comunicación adaptativos que permitan seleccionar automáticamente modos de transmisión óptimos en función de la calidad de señal (SNR) y los requisitos de cada dispositivo. Por ejemplo, el uso de protocolos como CoAP o MQTT en aplicaciones que requieren una transmisión de baja latencia puede reducir el consumo energético, mejorando la eficiencia en la transmisión de datos en situaciones de tráfico alto.
- Adaptar los modos de ahorro energético, como deep sleep e idle, según el contexto de aplicación. En escenarios donde las condiciones de señal son ideales, estos modos

permiten una reducción significativa del consumo, como se observó en los entornos simulados de domótica y agricultura. Sin embargo, en contextos con condiciones menos favorables, como hospitales, puede ser más eficiente utilizar modos de energía reducida (standby) que aseguren conectividad constante sin el consumo excesivo de reactivación frecuente, mejorando así la sostenibilidad en entornos variados

- Implementar algoritmos adaptativos basados en inteligencia artificial para optimizar dinámicamente el consumo energético. Estos algoritmos pueden prever los momentos de mayor y menor uso y ajustar automáticamente el consumo en función de la carga de trabajo. Este enfoque es ideal para entornos de alta variabilidad en el consumo, como la domótica, donde los dispositivos pueden pasar de inactivos a activos en función de la demanda de los usuarios

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

6.1 Referencias

- [1] R. Kanehisa, F. Barbosa, and A. De Castro, “5G energy efficiency for Internet of Things,” *Academic Journal on Computing, Engineering and Applied Mathematics*, vol. 1, no. 2, pp. 14–23, Jun. 2020, doi: 10.20873/uft.2675-3588.2020.v1n2.p14-23.
- [2] L. Farhan *et al.*, “Energy Efficiency for Green Internet of Things (IoT) Networks: A Survey,” *Network*, vol. 1, no. 3, pp. 279–314, Nov. 2021, doi: 10.3390/network1030017.
- [3] D. A. González and E. C. Martínez, “Implicaciones del proceso de transformación digital en las instituciones educativas de la Armada del Ecuador,” *Revista Científica Ciencia y Tecnología*, vol. 21, no. 29, Jan. 2021, doi: 10.47189/rcct.v21i29.418.
- [4] A. : Erick and J. Barrera Gonzabay, “MODELO DE GESTIÓN DE DATOS PARA ATENCIÓN A CLIENTES EN UNA AGENCIA BANCARIA DEL ECUADOR MEDIANTE IOT,” 2023.
- [5] A. Katal, S. Dahiya, and T. Choudhury, “Energy efficiency in cloud computing data centers: a survey on software technologies,” *Cluster Comput*, vol. 26, no. 3, pp. 1845–1875, Jun. 2023, doi: 10.1007/s10586-022-03713-0.
- [6] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, and M. K. Marina, “Network Slicing in 5G: Survey and Challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 94–100, May 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600951.
- [7] P. Graubner, M. Schmidt, and B. Freisleben, “Energy-Efficient Virtual Machine Consolidation,” *IT Prof*, vol. 15, no. 2, pp. 28–34, Mar. 2013, doi: 10.1109/MITP.2012.48.
- [8] P. Brous, M. Janssen, and P. Herder, “The dual effects of the Internet of Things (IoT): A systematic review of the benefits and risks of IoT adoption by organizations,” *Int J Inf Manage*, vol. 51, p. 101952, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.008.
- [9] L. Fetahu, A. Maraj, and A. Havolli, “Internet of Things (IoT) benefits, future perspective, and implementation challenges,” in *2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*, IEEE, May 2022, pp. 399–404. doi: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803487.

- [10] R. van Kranenburg and A. Bassi, "IoT Challenges," *Communications in Mobile Computing*, vol. 1, no. 1, Dec. 2012, doi: 10.1186/2192-1121-1-9.
- [11] N. Srivastava and P. Pandey, "Internet of things (IoT): Applications, trends, issues and challenges," *Mater Today Proc*, vol. 69, pp. 587–591, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.490.
- [12] R. Almutairi, G. Bergami, and G. Morgan, "Advancements and Challenges in IoT Simulators: A Comprehensive Review," *Sensors*, vol. 24, no. 5, p. 1511, Feb. 2024, doi: 10.3390/s24051511.
- [13] B. B. Gupta and M. Quamara, "An overview of Internet of Things (IoT): Architectural aspects, challenges, and protocols," *Concurr Comput*, vol. 32, no. 21, Nov. 2020, doi: 10.1002/cpe.4946.
- [14] F. Pereira, R. Correia, P. Pinho, S. I. Lopes, and N. B. Carvalho, "Challenges in resource-constrained iot devices: Energy and communication as critical success factors for future iot deployment," Nov. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s20226420.
- [15] R. Laidi, D. Djenouri, and I. Balasingham, "On Predicting Sensor Readings with Sequence Modeling and Reinforcement Learning for Energy-Efficient IoT Applications," 2021.
- [16] X. Ding and J. Wu, "Study on Energy Consumption Optimization Scheduling for Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70574–70583, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919769.
- [17] F. M. Al-Turjman, M. Imran, and S. T. Bakhsh, "Energy Efficiency Perspectives of Femtocells in Internet of Things: Recent Advances and Challenges," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26808–26818, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2773834.
- [18] J. Lorincz, Z. Klarin, and D. Begusic, "Modeling and Analysis of Data and Coverage Energy Efficiency for Different Demographic Areas in 5G Networks," *IEEE Syst J*, vol. 16, no. 1, pp. 1056–1067, May 2021, doi: 10.1109/JSYST.2021.3074100.
- [19] K. N. R. S. V. Prasad, E. Hossain, and V. K. Bhargava, "Energy Efficiency in Massive MIMO-Based 5G Networks: Opportunities and Challenges," *IEEE Wirel Commun*, vol. 24, no. 3, pp. 86–94, Jan. 2017, doi: 10.1109/MWC.2016.1500374WC.

- [20] M. Humayun, N. Z. Jhanjhi, M. Alruwaili, S. S. Amalathas, V. Balasubramanian, and B. Selvaraj, "Privacy protection and energy optimization for 5G-aided industrial internet of things," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 183665–183677, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028764.
- [21] X. Liu and X. Zhang, "Rate and Energy Efficiency Improvements for 5G-Based IoT with Simultaneous Transfer," *IEEE Internet Things J*, vol. 6, no. 4, pp. 5971–5980, Aug. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2863267.
- [22] G. Su and M. Moh, "Improving energy efficiency and scalability for IoT communications in 5G networks," in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Jan. 2018. doi: 10.1145/3164541.3164547.
- [23] D. Zhang, Z. Zhou, S. Mumtaz, J. Rodriguez, and T. Sato, "One Integrated Energy Efficiency Proposal for 5G IoT Communications," *IEEE Internet Things J*, vol. 3, no. 6, pp. 1346–1354, Dec. 2016, doi: 10.1109/JIOT.2016.2599852.
- [24] S. Fernández, "Procesamiento de señales para mejorar la eficiencia energética y la seguridad en internet de las cosas," 2023.
- [25] S. Villamil, C. Hernández, and G. Tarazona, "An overview of internet of things," *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 18, no. 5, pp. 2320–2327, Oct. 2020, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v18i5.15911.
- [26] L. F. Gélvez-Rodríguez and L. M. Santos-Jaimes, "Internet de las Cosas: una revisión sobre los retos de seguridad y sus contramedidas," *Revista Ingenio*, vol. 17, no. 1, pp. 56–64, Jan. 2020, doi: 10.22463/2011642x.2370.
- [27] R. A. Radouan Ait Mouha, "Internet of Things (IoT)," *Journal of Data Analysis and Information Processing*, vol. 09, no. 02, pp. 77–101, 2021, doi: 10.4236/jdaip.2021.92006.
- [28] M. Lombardi, F. Pascale, and D. Santaniello, "Internet of things: A general overview between architectures, protocols and applications," *Information (Switzerland)*, vol. 12, no. 2, pp. 1–21, Feb. 2021, doi: 10.3390/info12020087.

- [29] A. Pacheco, J. E. Mendoza, and E. Trujillo, "Uso de patrones de diseño y metaprogramación para construir APIs de IoT usando C++." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/354694385>
- [30] F. Firouzi, B. Farahani, M. Weinberger, G. DePace, and F. S. Aliee, "IoT Fundamentals: Definitions, Architectures, Challenges, and Promises," in *Intelligent Internet of Things*, Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 3–50. doi: 10.1007/978-3-030-30367-9_1.
- [31] R. Bhowmik and Md. H. Riaz, "An extended review of the application layer messaging protocol of the internet of things," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 12, no. 5, pp. 3134–3141, Oct. 2023, doi: 10.11591/eei.v12i5.5236.
- [32] N. Nikolov, "Research of MQTT, CoAP, HTTP and XMPP IoT Communication protocols for Embedded Systems," in *2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET)*, IEEE, Sep. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/ET50336.2020.9238208.
- [33] M. I. Malik, I. N. McAteer, P. Hannay, S. N. Firdous, and Z. Baig, "XMPP ARCHITECTURE AND SECURITY CHALLENGES IN AN IOT ECOSYSTEM," in *Proceedings of the 16th Australian Information Security Management Conference, AISMC 2018*, Edith Cowan University, 2018, pp. 62–73. doi: 10.25958/5c52735166690.
- [34] S. Kaganurmah, "Simulation of Message Queuing Telemetry Protocol in IoT Environment," 2021.
- [35] M. A. Khan *et al.*, "A deep learning-based intrusion detection system for mqtt enabled iot," Nov. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/s21217016.
- [36] C. Bayilmis, M. Ali Ebleme, and U. Cavusoglu, "UBMK 18 Examination and Performance Evaluation of MQTT Examination and Performance Evaluation of MQTT." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/330193900>
- [37] D. Silva, L. I. Carvalho, J. Soares, and R. C. Sofia, "A performance analysis of internet of things networking protocols: Evaluating MQTT, CoAP, OPC UA," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/app11114879.

- [38] V. Seoane, C. Garcia-Rubio, F. Almenares, and C. Campo, "Performance evaluation of CoAP and MQTT with security support for IoT environments," *Computer Networks*, vol. 197, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.comnet.2021.108338.
- [39] E. Al-Masri *et al.*, "Investigating Messaging Protocols for the Internet of Things (IoT)," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 94880–94911, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993363.
- [40] C. B. Gemirter, C. Senturca, and S. Baydere, "A Comparative Evaluation of AMQP, MQTT and HTTP Protocols Using Real-Time Public Smart City Data," in *2021 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, IEEE, Sep. 2021, pp. 542–547. doi: 10.1109/UBMK52708.2021.9559032.
- [41] A. Yudidharma, N. Nathaniel, T. N. Gimli, S. Achmad, and A. Kurniawan, "A systematic literature review: Messaging protocols and electronic platforms used in the internet of things for the purpose of building smart homes," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2023, pp. 194–203. doi: 10.1016/j.procs.2022.12.127.
- [42] A. Ioana and A. Korodi, "Dds and opc ua protocol coexistence solution in real-time and industry 4.0 context using non-ideal infrastructure," *Sensors*, vol. 21, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/s21227760.
- [43] M. E. Ciencias Y Tecnologías De La Computación Trabajo De Titulación, M. Blacio, and M. Asdrual, "Redes definidas por software para redes móviles en arquitectura de IoT." Accessed: Jan. 15, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.utpl.edu.ec/jspui/handle/20.500.11962/28279>
- [44] A. N. Uwaechia and N. M. Mahyuddin, "A comprehensive survey on millimeter wave communications for fifth-generation wireless networks: Feasibility and challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 62367–62414, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984204.
- [45] M. Vera Lady Estefania Zamora Arias Denisse Kathiusca and I. Emilio Zhuma Mera, "ANÁLISIS TÉCNICO PARA EL DESPLIEGUE DE UNA RED 5G EN EL ECUADOR," Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, 2021. Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/563c37ba-4498-444a-8710-76c280d98223>

- [46] S. Ahmad *et al.*, “A Compact CPW-Fed Ultra-Wideband Multi-Input-Multi-Output (MIMO) Antenna for Wireless Communication Networks,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25278–25289, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3155762.
- [47] T. F. Kruger Silva Bartolomeu Uchôa-Filho, “Proposta de Esquema de Transmissão MIMO Assistido por RIS com IM e STBC Não Ortogonal.”
- [48] Giovanni. Interdonato, *Cell-Free Massive MIMO Scalability, Signal Processing and Power Control*. Linköping University Electronic Press, 2020.
- [49] R. Feng, C.-X. Wang, J. Huang, and X. Gao, “Recent Advances of Ultramassive Multiple-Input, Multiple-Output Technologies: Realizing a Sixth-Generation Future in Spatial and Beam Domains,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 18, no. 1, pp. 70–79, Mar. 2023, doi: 10.1109/MVT.2022.3231711.
- [50] J. Sebastián Chávez Martínez, “Estudio de la aplicabilidad de modelos estándar de propagación electromagnética en la banda de ondas milimétricas para sistemas 5G en Bogotá,” 2023. Accessed: Jan. 15, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/84396>
- [51] A. Bairon, C. Betancourt, U. Distrital, F. José, and D. E. Caldas, “EVALUACIÓN DE UN CANAL DE ONDAS MILIMÉTRICAS EN ESCENARIOS 5G CON NYUSIM.” Accessed: Jan. 15, 2024. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/30115>
- [52] E. Z. Mera, B. Oviedo Bayas, and D. Zamora, “Identification Of Current Network Conditions In Ecuador And Analysis For The Implementation Of A 5g Technology Identification of current network conditions in Ecuador and analysis for the implementation of a 5g technology”, doi: 10.14704/nq.2022.20.6.NQ22147.
- [53] C. Técnicas Aplicadas Artículo de Revisión and A. I. Stefania Olarte-Zamora, “La eficiencia energética, Desafíos y oportunidades en Ecuador Energy efficiency, challenges and opportunities in Ecuador Eficiência energética, desafios e oportunidades no Equador,” *Abril-Junio*, vol. 8, no. 2, pp. 1434–1441, 2022, doi: 10.23857/dc.v8i2.2714.
- [54] C. C. Sobin, “A Survey on Architecture, Protocols and Challenges in IoT,” Jun. 01, 2020, *Springer*. doi: 10.1007/s11277-020-07108-5.

- [55] B. Rana, Y. Singh, and P. K. Singh, "A systematic survey on internet of things: Energy efficiency and interoperability perspective," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 32, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.1002/ett.4166.
- [56] M. A. Inamdar and H. V. Kumaraswamy, "Energy Efficient 5G Networks: Techniques and Challenges," in *2020 International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, IEEE, Sep. 2020, pp. 1317–1322. doi: 10.1109/ICOSEC49089.2020.9215362.
- [57] "CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR 2008." [Online]. Available: www.lexis.com.ec
- [58] "LEY ORGÁNICA DE TELECOMUNICACIONES."
- [59] "REGLAMENTO GENERAL A LA LEY ORGANICA DE TELECOMUNICACIONES." [Online]. Available: www.lexis.com.ec
- [60] "Plan Nacional de Eficiencia Energética".
- [61] R. Ferreira, I. A. Bispo, C. Rabadão, L. Santos, and R. Costa, "Farm-Flow | AG-IoT Security: Intrusion Detection in Smart Agriculture Dataset," Apr. 2024, doi: <https://zenodo.org/records/10964648>.
- [62] F. Hussain *et al.*, "A Framework for Malicious Traffic Detection in IoT Healthcare Environment," *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 3025, Apr. 2021, doi: 10.3390/s21093025.
- [63] A. Allisson, T. Ángel, and Q. M. Sc, "OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO PARA COMUNICACIONES MÓVILES MEDIANTE TECNOLOGÍAS MIMO EN REDES DE QUINTA GENERACIÓN," Quevedo, 2024. Accessed: Sep. 13, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/7244>