



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en
redes de sensores inalámbricos**

AUTOR:

Tobar Espinoza, Yurema Nathalie

Examen Complexivo previo a la obtención del Grado Académico de

MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, 12 de julio del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Tobar Espinoza, Yurema Nathalie** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 12 de julio del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Tobar Espinoza, Yurema Nathalie**

DECLARO QUE:

El Examen Complexivo **“Implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en redes de sensores inalámbricos”**, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizó del contenido, veracidad y alcance científico del Examen Complexivo del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 12 de julio del 2021

EL AUTOR

Tobar Espinoza, Yurema Nathalie



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Tobar Espinoza, Yurema Nathalie**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Examen Complexivo de Maestría titulado: **“Implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en redes de sensores inalámbricos”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 12 de julio del 2021

EL AUTOR

Tobar Espinoza, Yurema Nathalie

REPORTE DE URKUND

URKUND Fernando Palacios Meléndez (edwin_palacios)

Documento	Yurema Tobar_Final.docx (D107117942)
Presentado	2021-05-30 22:47 (-05:00)
Presentado por	fernandopm23@hotmail.com
Recibido	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje	Revisión TT de Yurema Tobar Mostrar el mensaje completo 1% de estas 22 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

<input type="checkbox"/>	http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/73...	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Roberto Dender_final.docx	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/85...	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Cabezas_Gloria_Final1.docx	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	TESIS ARMANDO ESPARZA V4.docx	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	http://192.188.52.94/bitstream/3317/15004/1/T-U...	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/672...	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	http://acikerisim.pau.edu.tr/xmlui/bitstream/han...	<input type="checkbox"/>

1 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en redes de sensores inalámbricos

AUTOR: Tobar Espinoza, Yurema Nathalie

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magister en Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc.

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, 8 de mayo del 2021

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo fue realizado

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios por darme la oportunidad de seguir luchando cada batalla que se ha presentado en mi vida. Y el ser más importante que puedo tener, mi hijo, te lo dedico no solo para que veas que no hay nada imposible, las cosas más difíciles no lo hacen todos, por eso lucha y alcanza tus metas, sueños y anhelos, que siempre estaré apoyándote.

En tercer lugar y también importante mis hermanos, siempre he querido demostrar que todo es posible, que todo sacrificio tiene su recompensa. Mis padres y abuelos, cada paso que he dado es por y para ustedes, para que siempre estén orgullosos de mí, y sé que lo están. Los amo incondicionalmente.

Te dedico esto, Yurema Tobar E. lo lograste, nada es pequeño ni nada es inalcanzable si tienes a Dios.

Tobar Espinoza, Yurema Nathalie

Agradecimientos

Agradezco a Dios por todo lo que me ha dado y por lo que no también, por unos padres ejemplares y abuelos orgullosos, hermanos que siempre me han inspirado a ser mejor cada día.

En mi corazón solo cabe agradecimiento con la vida, porque siempre me sorprende con personas extraordinarias que he conocido en la entidad educativa, gracias grupo patito (el grupo de los profesionales que también son amigos incondicionales.)

Decano, docentes, familiares y amigos siempre atentos y oportunos para brindar su apoyo.

Tobar Espinoza, Yurema Nathalie



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f.

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO

TUTOR

f.

M. Sc. QUEZADA CALLE, EDGAR RAUL

REVISOR

f.

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO

REVISOR

f.

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS

DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
Resumen	XIII
Abstract.....	XIV
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Antecedentes.....	16
1.3. Definición del problema a investigar.....	17
1.4. Justificación.....	17
1.5. Objetivos.....	17
1.6. Hipótesis.....	18
1.7. Metodología de investigación.....	18
Capítulo 2: Estado del arte.....	19
2.1. Introducción de tecnologías de radio de corto alcance.....	19
2.1.1. Redes inalámbricas de área local (WLAN).....	19
2.1.2. Redes inalámbricas de área personal - Bluetooth.....	21
2.1.3. Redes inalámbricas de área personal - ZigBee.....	22
2.2. Fundamentos de las redes de sensores.....	24
2.3. Requisitos del sistema en tecnologías inalámbricas de corto alcance.	29
2.4. Comparación de las tecnologías de corto alcance.....	31
2.4.1. Bluetooth.....	31
2.4.2. Estándar 802.14.5.....	33
2.4.3. Zigbee.....	35
Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados.....	38
3.1. Visión general de redes de sensores inalámbricos.....	38
3.2. Demostración experimental del efecto de recuperación de la batería en plataformas WSN	39
3.3. Compensación entre vida útil y latencia en redes de sensores a gran escala.....	42

3.3.1. Aplicación del modelo simplificado de la batería.	43
3.3.2. Diseño de la recuperación de la batería en las WSN a gran escala	43
3.3.3. Discusión de los resultados obtenidos.	45
Conclusiones	54
Recomendaciones	55
Bibliografía	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Arquitectura WLAN centralizada.....	20
Figura 2. 2: Funcionalidad de Piconet y Scatternet en Bluetooth.....	22
Figura 2. 3: Modelo de referencia IEEE 802.15.4 y ZigBee	23
Figura 2. 4: Topologías de redes de sensores inalámbricos.....	25
Figura 2. 5: Efectos de fallos en topologías de redes de sensores inalámbricos.	26
Figura 2. 6: Selección de canales IEEE 802.11b e IEEE 802.15.4.	27
Figura 2. 7: Representación esquemática de la unidad de radio y estación base en una WSN.....	28
Figura 2. 8: Ejemplo de salto de frecuencia en la que la señal original se reparte entre 79 bandas/canales de 1MHz.	33
Figura 2. 9: Formatos de trama en el estándar 802.15.4.	34

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Obtención de la vida útil normalizada con un tiempo activo constante.	40
Figura 3. 2: La ganancia de vida normalizada con tiempo de inactividad constante.	41
Figura 3. 3: Espectro de la señal RF para una frecuencia de trabajo de 5 GHz.	44
Figura 3. 4: Rendimiento del paquete de transmisión individual.....	46
Figura 3. 5: Tiempo de actividad o de vida del sistema.	47
Figura 3. 6: Rendimiento energético del algoritmo de recuperación de la batería.....	47
Figura 3. 7: Rendimiento de la latencia del algoritmo de recuperación de la batería.....	48
Figura 3. 8: Rendimiento del escenario con múltiples saltos.	49

Figura 3. 9: Rendimiento del tiempo de vida de un escenario con múltiples saltos.	50
Figura 3. 10: Ganancia de tiempo de vida normalizada del escenario con múltiples saltos.	51
Figura 3. 11: Rendimiento del tiempo de vida de un escenario con múltiples saltos.	52
Figura 3. 12: Cambio elrendimiento con la variación de $B_{\text{máx}}$	52

Resumen

El presente proyecto de maestría consiste en la implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en redes de sensores inalámbricos (WSN). Las WSN están formadas por un gran número de nodos sensores de comunicación inalámbrica distribuidos espacialmente y desplegados para realizar diversas tareas de detección en un entorno sin interferencias. Estas WSN se alimentan de la limitada fuente de alimentación instalada en el nodo sensor. El consumo de energía del nodo sensor desempeña un papel importante a la hora de determinar la vida útil de la WSN, ya que la energía no puede sustituirse porque es inaccesible. El consumo de energía y la eficiencia energética de las WSN son cuestiones importantes para su funcionamiento. Finalmente, se utiliza el software OMNeT++ para la implementación de la red (especialmente la ubicación del nodo receptor) y el control de la topología de las WSN tienen un impacto significativo en la eficiencia energética de las WSN.

Palabras claves: INALÁMBRICO, PROTOCOLOS, INACTIVIDAD, EFICIENCIA, NODOS, TOPOLOGÍA.

Abstract

The present master project consists of the implementation of energy saving algorithms and protocols in wireless sensor networks (WSNs). WSNs consist of many spatially distributed wireless communication sensor nodes deployed to perform various sensing tasks in an interference-free environment. These WSNs are powered by the limited power supply installed at the sensor node. The power consumption of the sensor node plays an important role in determining the lifetime of the WSN, as the power cannot be replaced because it is inaccessible. The energy consumption and energy efficiency of WSNs are important issues for their operation. Finally, OMNeT++ software is used for network implementation (especially the receiver node location) and topology control of WSNs have a significant impact on the energy efficiency of WSNs.

Keywords: WIRELESS, PROTOCOLS, IDLE, EFFICIENCY, NODES, TOPOLOGY.

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

En el presente capítulo se describe las generalidades del proyecto relacionado al consumo de energía en redes de sensores inalámbricos.

1.1. Introducción.

El consumo de energía y el modelado de la energía son cuestiones importantes en el diseño e implementación de las redes de sensores inalámbricas (WSN), que ayudan a los diseñadores a optimizar el consumo de energía en los nodos de las WSN. Un buen conocimiento de las fuentes de consumo de energía en las WSN es el primer paso para reducir el consumo de energía. Por lo tanto, se requiere un modelo energético preciso para la evaluación de los protocolos de comunicación (Abo-Zahhad et al., 2015).

Los paneles solares comunican su consumo de forma inalámbrica. En los invernaderos se utilizan sensores de humedad para permitir un crecimiento óptimo. Las máquinas están equipadas con sensores de vibración para detectar los más mínimos fallos en la mecánica. Esta tarea puede resolverse con redes de sensores. Por definición, una red de sensores es un sistema de larga duración formado por un gran número de nodos sensores situados cerca unos de otros y que miden cantidades físicas durante su funcionamiento.

Este sistema permite una gran variedad de escenarios, tanto en el sector privado (por ejemplo, la domótica) como en el industrial. Los datos recogidos por los nodos sensores pueden mostrarse visualmente, por ejemplo, o proporcionar información útil para los sistemas acoplados. Los nodos de una red de sensores inalámbricos suelen estar alimentados por una o varias baterías (Haas et al., 2012).

Según el ámbito de aplicación, es muy posible que las baterías se agoten tras un breve periodo de funcionamiento. Un campo de investigación que trata de la extracción de energía del medio ambiente se llama "aprovechamiento de energía". Por ejemplo, la energía de una carretera muy transitada se

aprovecha recogiendo las vibraciones y convirtiéndolas en tensión eléctrica (Adu-Manu et al., 2018).

Otra técnica para conseguir el mayor tiempo de funcionamiento posible es "poner el microcontrolador en reposo". En este estado de reposo, casi todos los componentes de hardware están apagados. Así, el microcontrolador sólo consume una fracción de su energía disponible que en el estado de funcionamiento normal. Este estado de reposo está directamente relacionado con el tiempo de funcionamiento, por lo que el tiempo de funcionamiento de un dispositivo en disposición operativa permanente sería bastante corto con las baterías actuales.

1.2. Antecedentes.

En las redes telemáticas, la simulación de redes es una de las metodologías de evaluación más utilizadas y potentes. Se ha utilizado para el diseño y desarrollo de arquitecturas de comunicación y protocolos de red, así como para verificar, gestionar y predecir sus comportamientos. Dado que las redes de sensores inalámbricos (WSN) proporcionan un medio para captar y comprender la realidad e interactuar sobre la respuesta de los datos recogidos, han ganado atractivo en los ámbitos de investigación. Así, los simuladores también son herramientas útiles para evaluar las WSN.

Hoy en día, existe un gran número de simuladores de red disponibles, que difieren en su diseño, objetivos y características. Los usuarios que tienen que decidir qué simulador es el más adecuado para sus necesidades particulares, se encuentran hoy perdidos, ante una panoplia de simuladores dispares y diversos. De ahí que sea evidente la necesidad de establecer directrices que apoyen a los usuarios en las tareas de selección y personalización de un simulador que se adapte a sus preferencias y necesidades.

1.3. Definición del problema a investigar.

En las redes de sensores inalámbricos el consumo de energía en las baterías sigue siendo un tema muy abordado por investigadores, y por este motivo el presente proyecto surge como la necesidad de la implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en redes de sensores inalámbricos.

1.4. Justificación.

En las últimas décadas, varios simuladores han sido ampliados para incluir WSNs o construidos como simuladores de WSNs desde el principio. Diferentes grupos de investigación desarrollan varios simuladores según sus necesidades. Por ejemplo, algunos simuladores están diseñados para simular todo el sistema. Estos simuladores se centran en la escalabilidad, por lo que su rendimiento es una piedra angular en este sentido. Otros se preocupan por la estructura del nodo y su consumo de energía. Para estos simuladores, el modelado de la propagación inalámbrica y el consumo de energía es lo que atrae la atención.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

Realizar la implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en redes de sensores inalámbricos utilizando el software de simulación OMNeT++.

1.5.2. Objetivos específicos:

- ✓ Describir el estado del arte de las comunicaciones inalámbricas de corto alcance y de las redes de sensores inalámbricos.
- ✓ Implementar algoritmos y protocolos de ahorro energético en una red de sensores inalámbricos.

- ✓ Evaluar las métricas de rendimiento en la red de sensores inalámbricos para el ahorro energético.

1.6. Hipótesis

A través de los algoritmos y protocolos de ahorro energético en la simulación propuesta se demostrará como el rendimiento de la red de sensores inalámbricos incide en el ahorro energético de la batería en los nodos sensores utilizando el software de simulación OMNeT++.

1.7. Metodología de investigación.

La investigación es sistemática en el sentido de que sigue pasos lógicamente ordenados:

- a. Comprender la naturaleza del problema que se estudia e identificar los campos de conocimiento relacionados con dicho problema;
- b. Establecer el estado del arte, es decir, recopilar/estudiar la bibliografía para comprender cómo han abordado el problema otros investigadores;
- c. Recoger datos de forma organizada y controlada para llegar a decisiones válidas;
- d. Analizar los datos apropiados para el problema que se estudia;
- e. Obtener conclusiones y hacer las generalizaciones oportunas.

El presente trabajo emplea la Investigación descriptiva, que se encarga de la recogida de datos y comprobación de hipótesis sobre el estado actual del tema de investigación. Se trata de determinar la práctica, el estado o las características actuales de la situación estudiada. Los datos se recogen mediante observaciones de la ejecución de las simulaciones propuestas.

Capítulo 2: Estado del arte.

En este capítulo se explican los fundamentos teóricos y técnicos necesarios para entender el presente proyecto. Se trata primero los fundamentos de la transmisión por radio, que se utiliza en las redes de sensores como interfaz de comunicación. Se identifica importantes áreas de aplicación y considera el consumo de energía de los nodos sensores típicos.

2.1. Introducción de tecnologías de radio de corto alcance

En la actualidad, en las actividades cotidianas, entran en contacto con las tecnologías inalámbricas con gran frecuencia. En casa, muchas personas están conectadas a Internet de forma inalámbrica en sus computadores, celulares inteligentes y tablets. En los centros comerciales, los productos están equipados con chips de radio de corto alcance para protegerlos de los robos. Con la ayuda de amigos y conocidos, los datos pueden transferirse de un teléfono móvil a otro. Y como se explicó en el capítulo 1, las redes de sensores se comunican en gran medida con tecnología inalámbrica (Rueda & Talavera Portocarrero, 2017). Dado que las tecnologías de radio son la base de cualquier red de sensores inalámbricos, esta sección se presentan las tecnologías más utilizadas.

2.1.1. Redes inalámbricas de área local (WLAN).

WLAN es la abreviatura de Wireless Local Area Network (red inalámbrica local) y pertenece a la familia IEEE 802.11. Es una red de radiocomunicación espacialmente local (por ejemplo, en edificios). Se utiliza tanto en los hogares como en las empresas. Las frecuencias utilizadas están en la gama de 2.4 GHz o, en los estándares más recientes, en la gama de 5 GHz. (Alvarado Medellín et al., 2019)

Para los operadores de este tipo de redes WLAN, el alcance, el ancho de banda y la seguridad en dichas redes son de especial importancia. Para el cifrado en las redes WLAN, debe seleccionarse un método de cifrado

suficientemente fuerte; la BSI recomienda actualmente el estándar de cifrado WPA2 (véase BSI 2009). De lo contrario, existe el riesgo de que los datos privados o confidenciales puedan ser espiados. Por lo tanto, no deben utilizarse los métodos de encriptación más antiguos.

Un gran ancho de banda es especialmente importante para los grandes volúmenes de datos, por lo que la familia de protocolos apoyó cada vez más el ancho de banda en el curso de la estandarización, empezando en 802.11 con 2 Mbps hasta el último borrador 802.11ac, en el que se prevén varios Gbps. Muchos operadores de WLAN quieren la mayor cobertura radioeléctrica posible.

Una posibilidad es establecer varios puntos de acceso para la red de radio. Además, la tecnología de múltiples entradas múltiples salidas (Multiple Input Multiple Output, MIMO), que ya está integrada en muchos dispositivos. Esto no sólo permite salvar más distancias y alcanzar mayores velocidades, sino que también reduce la tasa de errores. La figura 2.1 muestra la arquitectura de una red inalámbrica local centralizado.

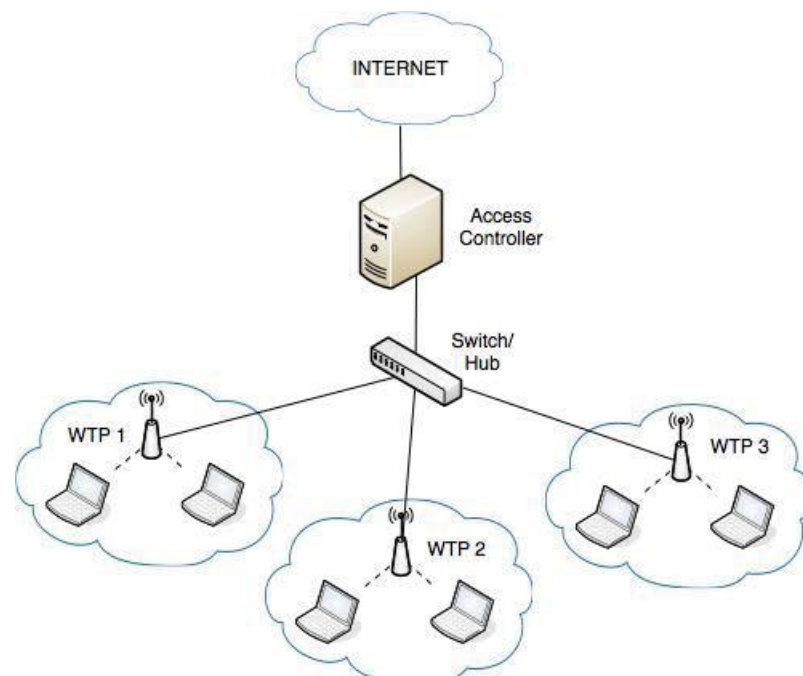


Figura 2. 1: Arquitectura WLAN centralizada.
Fuente: (Ariffin et al., 2012)

2.1.2. Redes inalámbricas de área personal - Bluetooth.

Bluetooth es un estándar según el estándar IEEE 802.15.1, que permite el intercambio de datos en distancias cortas. Debido a los nuevos avances, el estado de la versión se ha incrementado cada pocos años y actualmente se encuentra en la versión cinco. Al igual que las WLAN's, el rango de frecuencias utilizado está en la gama de 2 GHz. Dependiendo del modo de funcionamiento seleccionado (perfil), se puede alcanzar en velocidad básica (Basic Rate, BR) hasta 1 Mbps, en velocidad de datos mejorada (Enhanced Data Rate, EDR) hasta 3 Mbps.

Por ejemplo, el alcance se especifica en la cuarta versión hasta 100 m. En la última actualización de la versión, se ha prestado atención a los aspectos de ahorro de energía y ofrece el perfil "low energy". Hoy en día, muchos dispositivos técnicos disponen de este tipo de interfaz, tales como, portátiles, teléfonos móviles, cámaras, impresoras, dispositivos de manos libres y muchos otros dispositivos pueden comunicarse a través de Bluetooth. (Cao et al., 2009)

No sólo son posibles las conexiones entre dos dispositivos. En las llamadas redes Piconet pueden existir hasta 255 dispositivos, de los cuales hasta 8 pueden estar activos simultáneamente. Se utiliza un canal común para la transmisión de datos. Una Piconet requiere siempre un nodo maestro (Master, M), por lo que pueden estar activos hasta 7 esclavos (Slave, S). Un esclavo también puede ser el maestro de otra Piconet en paralelo. Esta conexión de dos redes se denomina entonces red de dispersión (Scatternet). En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de ello.

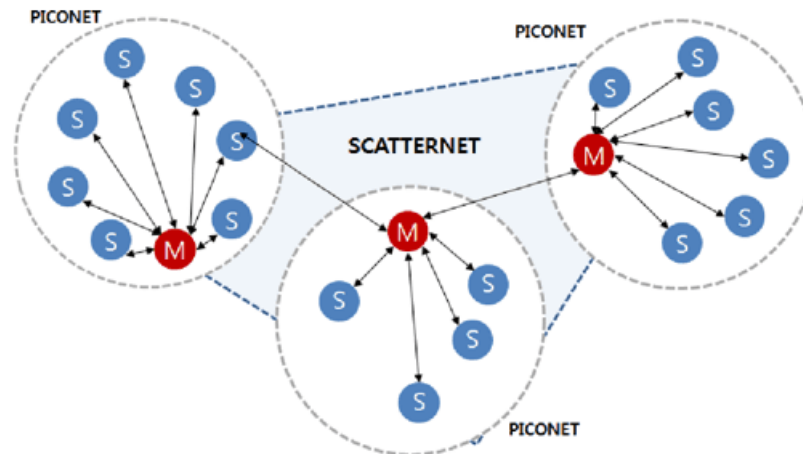


Figura 2. 2: Funcionalidad de Piconet y Scatternet en Bluetooth.
Fuente: (Jung et al., 2013)

En el perfil de baja energía (low energy) hubo algunos cambios en comparación con los otros perfiles BR y EDR: a diferencia de BR/EDR los esclavos no comparten un canal físico común con el maestro. Cada esclavo se comunica en un canal físico independiente con el maestro. Así, hay un canal independiente para cada conexión con el maestro; en los otros dos modos de funcionamiento, los esclavos los esclavos y el maestro comparten el canal.

2.1.3. Redes inalámbricas de área personal - ZigBee.

Este estándar IEEE también se denomina muy a menudo ZigBee, porque se basa en el estándar 802.15.4. El propio ZigBee surgió de la idea de desarrollar un protocolo independiente del fabricante. La organización asociada, la ZigBee Alliance, cuenta ya con más de 200 empresas. Sin embargo, 802.15.4 no sólo puede utilizarse para Zigbee, ya que esta norma se especifica hasta la capa MAC. Basándose en esto, se pueden desarrollar muchos protocolos. La figura 2.3 muestra la estructura de capas.

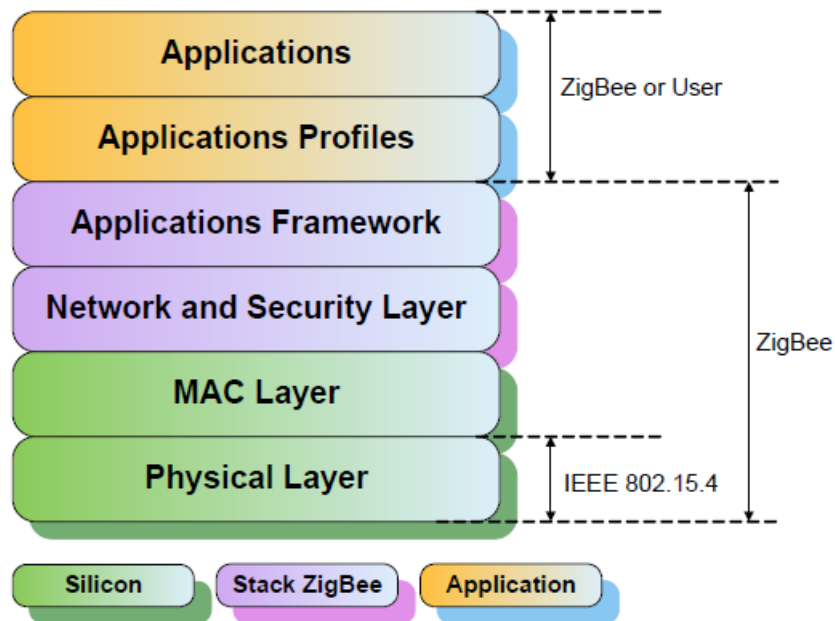


Figura 2. 3: Modelo de referencia IEEE 802.15.4 y ZigBee
Fuente: (Srbinovska & Gavrovski, 2021)

A continuación, se ofrecen algunos datos clave sobre el estándar 802.15.4: el estándar 802.15.4 utiliza varias bandas de frecuencia, por ejemplo, puede utilizar la gama de 800 MHz (Europa), la gama de 900 MHz (EE.UU.), y también la banda de 2.4 GHz como Bluetooth y WLAN. Esto significa que las colisiones con estas tecnologías de radio son posibles. La velocidad de transmisión es de 250 kbps. Como ocurre con otros estándares de la familia, las aplicaciones propietarias pueden basarse directamente en la capa MAC y desarrollar sus propios protocolos de comunicación. Por tanto, los algoritmos de enrutamiento deben implementarse en la propia capa superior. En consecuencia, la topología de la red no es fija y son posibles las redes totalmente malladas.

Hay dos tipos de dispositivos de red en el estándar 802.15.4, que son: (1) RFD (Reduced Function Device) es un dispositivo con menos funcionalidad, ya que es más fácil de desarrollar. (2) FFD (Full Function Device) es un dispositivo con una gama completa de funciones y que también puede utilizarse como enrutador (router); lo que un RFD no es capaz de lograrlo.

Esta clasificación permite a un RFD reducir el coste de un dispositivo, ya que requiere menos recursos de sistema y hardware. Normalmente, un FFD estándar se conecta a una fuente de alimentación externa, mientras que un RFD utiliza sus propias reservas de energía. Para ahorrar las reservas de energía esta norma está diseñada específicamente para un bajo consumo de energía. Para una mayor solidez durante la transmisión, se utiliza CSMA/CA. Aquí se comprueba primero la interfaz de radio para ver si hay transmisiones en curso antes de enviar los datos pendientes.

Zigbee puede utilizarse ya para numerosas aplicaciones. Hay un dispositivo especial de la clase FFD, el coordinador. Suele tener una interfaz con otras redes y se congestiona permanentemente como coordinador. Gestiona la red, proporciona información y es responsable de la creación de la red. En caso de fallo, un segundo dispositivo debe ser seleccionado como coordinador, porque de lo contrario una red de radio no puede ser gestionada posteriormente o no se puede establecer la red. Los llamados routers (FFD) sirven como pares de comunicación para los RFD y, opcionalmente, envían datos a través de otros routers al coordinador.

2.2. Fundamentos de las redes de sensores.

En la introducción (sección 1.1) ya se dio una breve explicación de las redes de sensores. Esta sección pretende ofrecer una visión más profunda del campo, donde, se describen los conceptos básicos y los problemas que hay que resolver en las redes de sensores. La red se compone de las unidades de radio, así como de una o varias estaciones base que están conectados físicamente entre sí.

La estructura de las conexiones se llama topología. Esta topología presenta varias ventajas e inconvenientes. Sin embargo, no se tratan aquí todas las topologías, sino sólo las relevantes para las redes de sensores. La figura 2.4 muestra un breve resumen de las topologías utilizadas en redes de sensores inalámbricos (WSN). (Egas & Gil-Castiñeira, 2020)

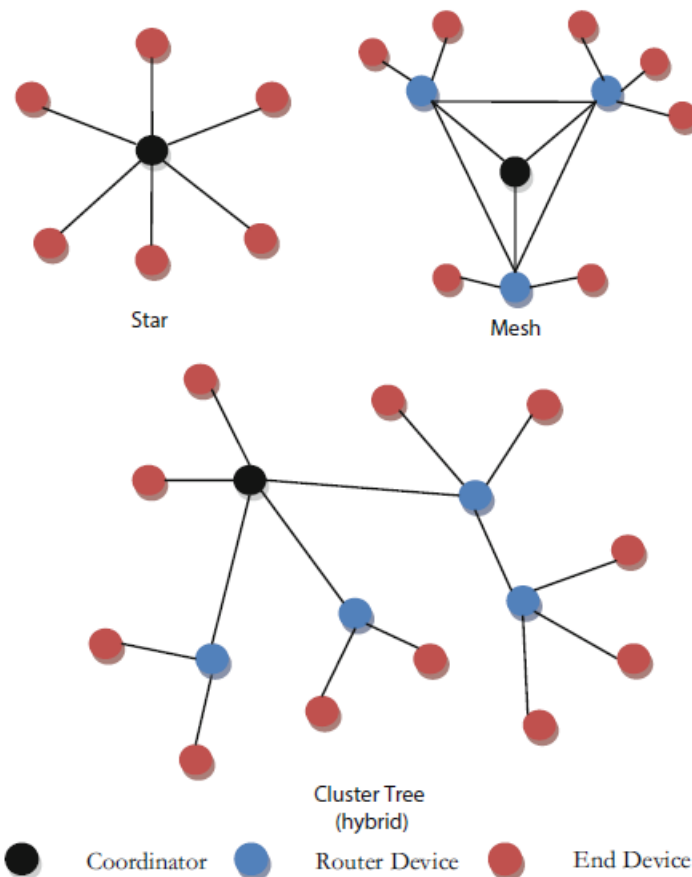


Figura 2. 4: Topologías de redes de sensores inalámbricos
Fuente: (Normie, 2015)

La topología en estrella (Star) es una conexión sencilla entre los dispositivos, ya que es fácil de implementar y los errores se pueden eliminar rápidamente. Sin embargo, la conexión directa es una desventaja; no hay más caminos hacia una unidad de radio.

En la topología peer-to-peer o también llamada red mallada (mesh), pueden existir varios caminos entre los usuarios. Debido a los numerosos puntos de conexión, las rutas también pueden fallar sin que una unidad de radio sea inalcanzable. La organización de la transmisión de datos es más compleja en comparación con, por ejemplo, la topología en estrella. Como hay varios caminos hacia un destino, hay que utilizar un algoritmo de enrutamiento.

En la topología de árbol, ya existe un cierto orden y sólo hay un camino desde un mismo punto hasta la raíz. No es necesario un algoritmo especial

para ello. El fallo de un nodo hoja no afecta a los demás dispositivos. Si el fallo se produce en medio de la estructura del árbol, los nodos que se encuentran por debajo del nodo que ha fallado ya no pueden enviar datos a la raíz. En la figura 2.5 se muestra un ejemplo de fallos en topologías de WSN.

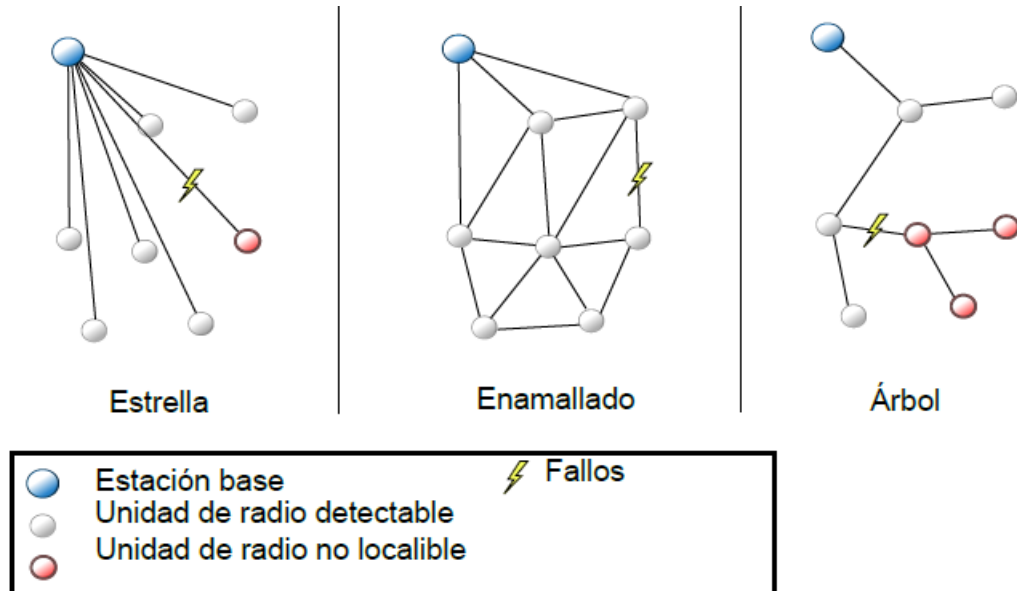


Figura 2. 5: Efectos de fallos en topologías de redes de sensores inalámbricos.
Fuente: (Normie, 2015)

Como se ha explicado en la introducción a las tecnologías inalámbricas (sección 2.1), una tecnología inalámbrica utiliza una gama de frecuencias para transmitir datos. Dependiendo del país, las autoridades liberan ciertos rangos de frecuencia o no los utilizan. Todas las tecnologías presentadas aquí utilizan la banda ISM. Las siglas significan Industrial Scientific Medical Band. Originalmente se destinaba a fines industriales, médicos y científicos, pero hoy en día también se utiliza para la transmisión de datos en general. La banda de frecuencias puede ser utilizada por cualquier persona sin permiso, pero existen normas sobre la potencia de transmisión y para evitar interferencias con las gamas de frecuencias vecinas. Esta gama de frecuencias puede utilizarse a nivel internacional (véase UIT 2007).

Por su parte, el espacio aéreo permite que la comunicación tenga características especiales. Dado que el medio es utilizado por todos los participantes de la red, el ancho de banda disponible debe dividirse. Esto es posible mediante procedimientos de multiplexación. Estos procedimientos

permiten un uso económico de los recursos radioeléctricos. En redes inalámbricas como WLAN, Bluetooth y 802.15.4, se utiliza el método de multiplexación de frecuencias.

En este proceso, el espectro de frecuencias disponible se divide en bandas, cada una de las cuales tiene su propia frecuencia portadora. A continuación, la información a transmitir se modula a la respectiva frecuencia portadora para su transmisión (cf. Schmidt 2011, página 27). Por ejemplo, la gama en la banda de 2,4 GHz se divide en canales, que pueden funcionar en paralelo. La figura 2.6 muestra la división de la banda de 802.11 y 802.15.4.

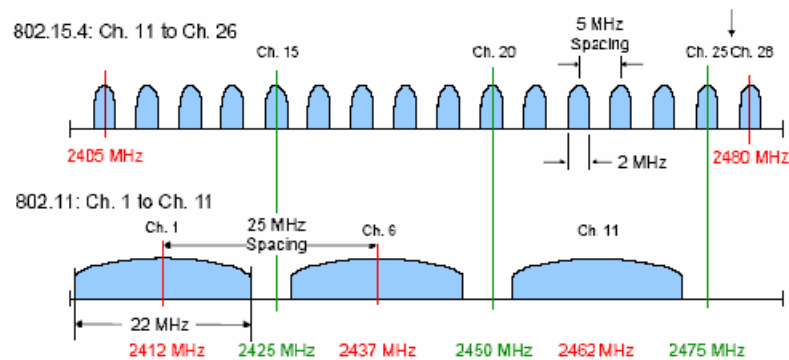


Figura 2. 6: Selección de canales IEEE 802.11b e IEEE 802.15.4.

Fuente: (Ali et al., 2007)

Sin embargo, ahora hay que garantizar que los datos se transmitan de forma organizada dentro del canal. Esto significa que las unidades de radio no pueden simplemente enviar datos en el canal de manera incontrolada. Si varios emisores envían datos al mismo tiempo, los mensajes ya no pueden mantenerse separados en el receptor. Por lo tanto, hay que seguir utilizando un método de acceso.

Una posibilidad es el acceso múltiple con detección de portadora/evitación de colisiones (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance, CSMA/CA). Se trata de un procedimiento que evita las colisiones mediante un abonado de la red que escucha el medio para las transmisiones de datos en curso y espera su propia transmisión de datos si el medio está ocupado. Durante la espera, se ejecuta un temporizador de retroceso para volver a comprobar el medio cuando expira. Las esperas repetidas pueden

aumentar el tiempo del temporizador de retorno. Los tiempos exactos dependen de la tecnología y del hardware.

Si el canal está libre, puede enviar sus datos. Con este método, los nodos de la red compiten y hay que dedicar tiempo a las escuchas. En una variante no competitiva, el canal se asigna a un abonado durante un periodo de tiempo determinado. Por lo tanto, puede enviar sus datos sin escuchas adicionales. Sin embargo, esto requiere una organización de los tiempos de transmisión, lo que supone una desventaja en comparación con la transmisión competitiva.

Una unidad de radio se encarga de medir los datos, los almacena y los envía a la estación base. Por lo tanto, una unidad de radio debe tener un sensor para la cantidad física y la interfaz adecuada para el sensor. El microcontrolador es la base y utiliza un módulo de radio para la comunicación. Una estación base tiene básicamente la misma estructura, pero cuenta con una interfaz adicional para la comunicación con otras estaciones base o para la transferencia de datos a otros sistemas. Ambos equipos se muestran en la figura 2.7. En este ejemplo, la unidad de radio tiene una conexión con un sensor a través del ADC (convertidor analógico-digital). En este caso, el nivel de tensión está relacionado con el valor medido y, por tanto, puede calcularse. La estación base dispone de una interfaz de datos destinada a la comunicación en grupo y a la transferencia de datos.

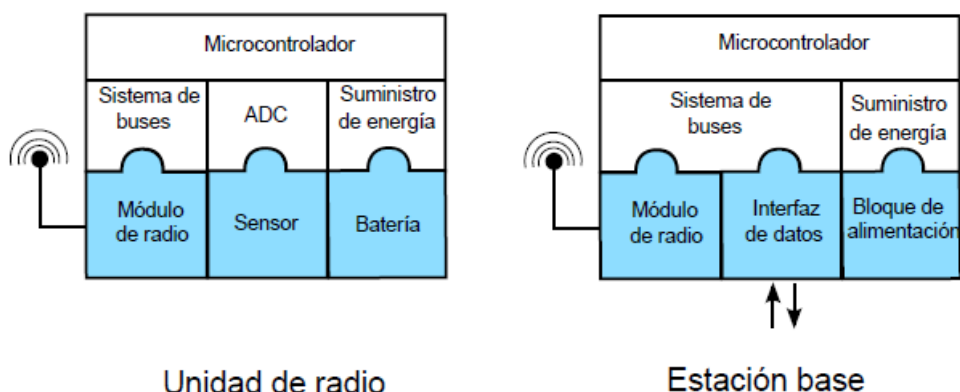


Figura 2. 7: Representación esquemática de la unidad de radio y estación base en una WSN.

Fuente: (Ali et al., 2007)

2.3. Requisitos del sistema en tecnologías inalámbricas de corto alcance.

En la sección 2.2 se han descrito los objetivos de la red de sensores por radio. A continuación, se formulan en forma de requisitos para obtener una visión clara de las funcionalidades que deben cumplirse. Además, hay una breve explicación para cada punto.

- a) Para la transmisión de datos de usuario pura, se garantiza a cada unidad de radio una determinada cantidad de datos durante la fase de transmisión de datos obtenidos. Sin embargo, una unidad de radio puede enviar al menos 10 bytes durante esta fase.
 - La cantidad de datos del usuario depende fundamentalmente del hardware utilizado y del número de unidades de radio de la red. La capacidad de almacenamiento de las unidades de radio es limitada y sólo una determinada cantidad de datos puede ser almacenada temporalmente por otros abonados de radio. Con el número de abonados en la red, hay problemas de sincronización a partir de cierto tamaño. Cuanto más tiempo haya pasado desde la última sincronización, mayor será la inexactitud de un reloj en cada unidad de radio. Si pasa demasiado tiempo, existe el riesgo de que dos unidades de radio se pierdan durante una transmisión.

- b) El sistema de radio admite múltiples estaciones base, al menos una es necesaria para el funcionamiento.
 - Uno de los objetivos más importantes es garantizar el uso de múltiples estaciones base. Por lo tanto, las estaciones base tienen su propio medio de transmisión para la comunicación en grupo. Si ya no se puede acceder a una estación base, otra estación base ocupa su lugar (si hay varias estaciones base disponibles).

- c) La asignación de la ruta se realiza según una función de costes.
 - Esta función de coste evalúa una conexión con una unidad de radio remota basándose en la intensidad de la recepción y en la

información operativa de una unidad de radio. Durante el funcionamiento, una unidad de radio, por ejemplo, sumará su tiempo de funcionamiento del sistema y/o el número de mensajes enviados y recibidos y lo transmitirá cuando se le solicite. El objetivo es evitar los saltos basándose en esta información. Los saltos son estaciones intermedias de un mensaje hasta su destino. Por ejemplo, una unidad de radio es un salto porque reenvía mensajes. Esto es para evitar los saltos cuando las unidades de radio están demasiado cerca unas de otras. También se seleccionan rutas alternativas si las reservas de energía de las unidades de radio ya están agotadas por los altos costes de comunicación (reenvío de datos).

- d) El tiempo de funcionamiento de las unidades de radio debe ser lo más largo posible, al menos medio año una unidad de radio debe pasar sin cambiar la batería.
- Normalmente, el microcontrolador de una unidad de radio está en un bucle principal y espera hasta que se produzca un evento. Para este estado de espera, el microcontrolador requiere tanta energía como para la ejecución de los cálculos. Para ahorrar energía, se utilizan modos de ahorro de energía. Cómo y en qué medida se ahorra energía depende del hardware seleccionado.
- e) El sistema de radio debe responder a los cambios e interferencias.
- Durante el funcionamiento pueden producirse diversos acontecimientos. Las unidades de radio se añaden al sistema, se eliminan o se colocan en una ubicación diferente. Por lo tanto, hay que volver a explorar la red a determinados intervalos. Las estaciones base también pueden añadirse o abandonar la red. En este caso también es cierto que las estaciones base se readquieren a intervalos. Dado que la interfaz aérea se utiliza para la transmisión de datos, es de esperar que se produzcan interferencias. Estas interferencias pueden ser causadas, por

ejemplo, por otros dispositivos situados en las proximidades que transmiten datos en la misma gama de frecuencias.

- f) Para el proceso de desarrollo se diseña una aplicación con la que se pueden controlar remotamente (a distancia) las unidades de radio y las estaciones base y registrar la información de los dispositivos.
 - Especialmente en el desarrollo de sistemas que contienen muchos dispositivos, se requiere un gran esfuerzo para transferir el software individualmente a los dispositivos y luego probarlos. Por lo tanto, esta utilidad es indispensable. Los dispositivos pueden recibir el nuevo software en el menor tiempo posible. El reinicio del dispositivo y la posibilidad de detenerlo por completo proporcionan una comodidad adicional. Mediante una función de registro, los dispositivos pueden enviar mensajes para, entre otras cosas, poder seguir el proceso de registro. Este requisito es independiente de la tecnología de radio seleccionada.

2.4. Comparación de las tecnologías de corto alcance.

Ya se conocen los requisitos del sistema. Ahora se comparan las diferentes tecnologías de radio de corto alcance entre sí. La tecnología que cumpla todos los requisitos se utilizará para el proyecto. Dado que sólo se tienen en cuenta para la selección las tecnologías de ahorro de energía, la WLAN mencionada de antemano no es preseleccionada.

2.4.1. Bluetooth.

Dado que en Bluetooth se han añadido principalmente mecanismos de ahorro de energía, este estándar se ha vuelto interesante para las redes de sensores inalámbricas. Este no es el caso de las versiones anteriores. El establecimiento de la conexión tardó hasta unos segundos. Actualmente, la conexión se establece en pocos milisegundos. Después, el usuario puede enviar hasta 27 bytes y luego, según el protocolo, entrar en reposo profundo.

Configurar una red a través de varias unidades de radio es difícil, ya que normalmente Bluetooth sólo está pensado para punto a punto o punto a multipunto en su Piconet. Además, un maestro sólo puede gestionar 7 esclavos. En una situación con más de 7 esclavos, algunos de ellos tienen que pasar al estado pasivo. Esto es bastante engorroso y conlleva un mayor esfuerzo de comunicación.

Es posible el funcionamiento con múltiples estaciones base. Se pueden conectar varias Piconets para formar una Scatternet (red de dispersión). Sin embargo, el reenvío de datos a través de varios nodos Bluetooth debe adaptarse, ya que no se proporciona una red mallada. Para ello, al igual que para el reenvío de datos, es necesaria una adaptación adicional en el diseño o en la implementación.

Bluetooth minimiza las interferencias mediante el uso del espectro ensanchado por saltos de frecuencia (FHSS). Por ejemplo, FHSS utiliza 79 canales dentro de la banda ISM de 2,4 GHz, cada uno de los cuales tiene una anchura de 1 MHz, tal como se muestra en la figura 2.8. Un generador de números pseudoaleatorios (PRBS) produce la secuencia de frecuencias a las que hay que saltar. Si todos los dispositivos utilizan el mismo parámetro de inicio y están sincronizados todo el tiempo, los dispositivos cambian a las frecuencias simultáneamente.

Cada frecuencia sólo está activa durante un determinado periodo de tiempo [...]. Además, también proporciona un mínimo de seguridad, ya que un intruso no sabe a qué frecuencia está conmutada y tampoco conoce el periodo de tiempo durante el que una frecuencia es válida. De este modo se dificulta la escucha de una conexión. Por tanto, una secuencia de información en Bluetooth se "dispersa" en varios canales para evitar colisiones. La figura 2.8 muestra este proceso. Si se produce una colisión, sólo una pequeña parte de la transmisión es defectuosa y se envía de nuevo tras la detección de la colisión.

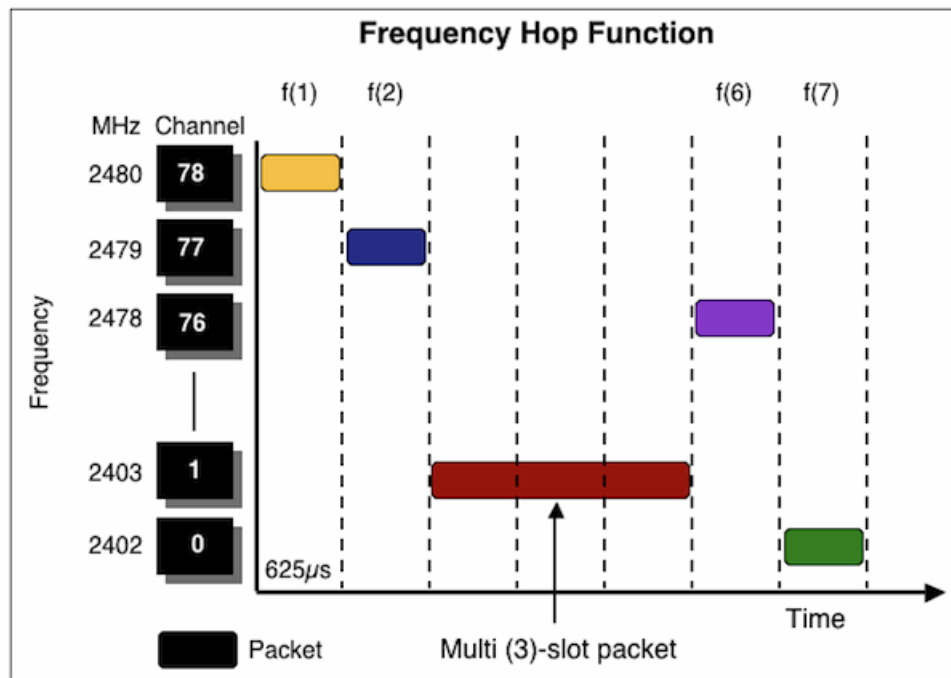


Figura 2. 8: Ejemplo de salto de frecuencia en la que la señal original se reparte entre 79 bandas/canales de 1MHz.
Fuente: (Staab & Armstrong, 2013)

2.4.2. Estándar 802.14.5.

Al igual que el estándar Bluetooth, el diseño de 802.15.4 se ha centrado en el ahorro de energía. Los módulos de radio pueden salir del sueño profundo poco antes de iniciar la transmisión, enviar datos y volver a ponerse en modo de ahorro de energía. Así, dependiendo del diseño de comunicación utilizado, las redes de sensores de muy larga duración son técnicamente viables.

Dado que este estándar está construido directamente sobre la capa MAC, se puede establecer una configuración de conexión por encima de esta capa, por ejemplo, enviar los datos directamente al abonado sin retroalimentación o comunicarse con mensajes de acuse de recibo. El tamaño máximo de una trama es de 133 bytes, de los cuales 127 bytes se asignan a la capa MAC y 6 bytes a la capa física. De los 127 bytes, hasta 25 bytes se utilizan para la asignación de direcciones, las propiedades de la trama y la comprobación de errores.

Es posible ahorrar en el direccionamiento, aquí están disponibles las direcciones MAC con 8 bytes de longitud o las direcciones cortas con 2 bytes. Si se utilizan 2 bytes en el direccionamiento, se dispone de 216 direcciones. Esto es absolutamente suficiente para las tareas industriales, donde el número de usuarios es mucho menor que las direcciones disponibles. Para la comunicación propia en el peor de los casos se dispone de 102 bytes, en el mejor de los casos de 118 bytes. La figura 2.9 muestra la estructura de tramas.

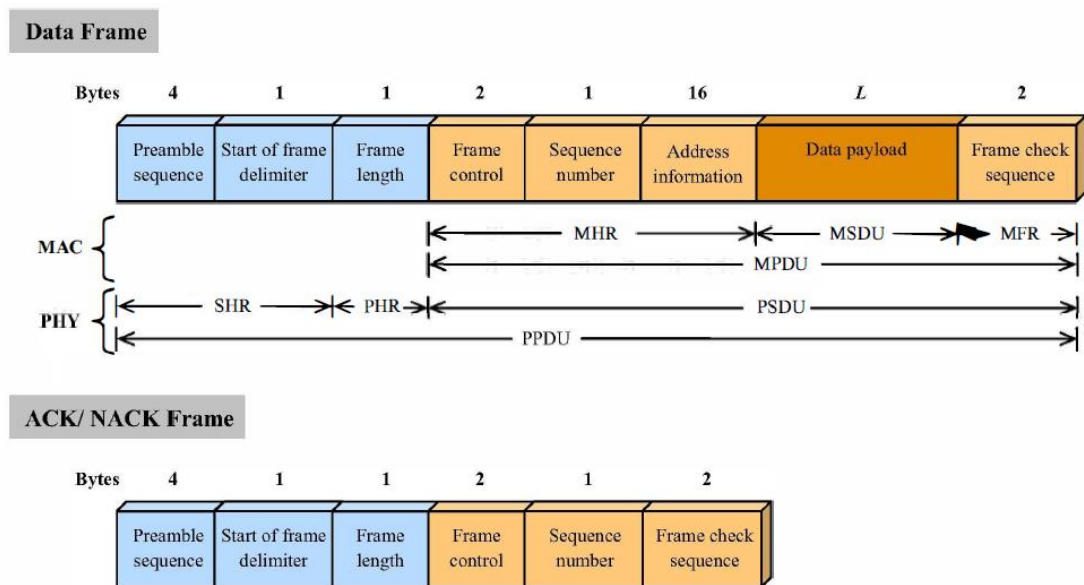


Figura 2. 9: Formatos de trama en el estándar 802.15.4.

Fuente: (Biswas & Chandra, 2014)

Al igual que la configuración de conexión, la topología no forma parte de la especificación y puede seleccionarse libremente según la aplicación. Por lo tanto, son posibles varios escenarios. Las unidades de radio pueden registrarse en una estación base o los usuarios pueden explorar la red de forma independiente. Esto permite seleccionar el propio camino para la mejor trayectoria posible.

Las estaciones base múltiples son técnicamente viables porque no hay ninguna restricción en la clase de dispositivo dentro de una red. Como ya se ha descrito en la sección 2.1, hay dispositivos con una gama completa de funciones y dispositivos con restricciones funcionales. Sin embargo, éstas

sirven más bien para reducir los costes y mantener la sencillez de los dispositivos terminales.

Las interferencias durante la comunicación no se evitan con tecnologías especiales. La banda de frecuencias se divide en canales en los que es posible la transmisión en paralelo. Si se producen colisiones, las capas superiores deben asegurar otro intento de transmisión o clasificar el dispositivo como inalcanzable (porque el dispositivo está demasiado lejos, por ejemplo).

2.4.3. Zigbee.

Zigbee se basa en 802.15.4 y, por tanto, tiene todas las ventajas y desventajas que ofrece este estándar. Todas las funciones comienzan en la capa 3, 802.15.4 es responsable de las capas inferiores. Después de que una unidad de radio se haya registrado en el nodo coordinador de la red o en un router, se pueden transmitir los datos del usuario.

Se prevé la transmisión directa con los nodos vecino o la transmisión dentro de una franja horaria asignada. Sin embargo, la transmisión con franjas horarias sólo es posible en redes con balizas (beacons). Beacon-Enabled significa el uso de "balizas" para la señalización. Si una unidad de radio (RFD, Reduced Function Device) recibe una baliza de este tipo, la unidad de radio puede pasar a un modo de ahorro de energía hasta que se alcance su periodo de tiempo asignado para la transmisión.

Es posible un gran potencial de ahorro de energía, especialmente cuando se transmite en franjas horarias. Además de la comunicación para organizar los tiempos de transmisión y la transmisión de datos del usuario, el dispositivo terminal está en reposo profundo. Así, es posible un largo tiempo de funcionamiento. Los dispositivos de las redes ZigBee ofrecen servicios en los llamados puntos finales (Endpoints).

Un dispositivo puede tener hasta 240 puntos finales. El punto final cero tiene una tarea especial. Incluye la gestión de dispositivos, las funciones de seguridad, la gestión para la asignación de routers y la gestión de descubrimientos. Los datos del usuario se generan y procesan en la capa superior "subcapa de soporte de aplicaciones". Para ello, se ha añadido una cabecera extra a la trama de datos que contiene información adicional como el número de punto final del origen y el del destino. Esto limita un poco el tamaño máximo de los datos del usuario.

La selección de la ruta tiene lugar sobre la base de un procedimiento de enrutamiento. Para ello se utiliza el protocolo de enrutamiento vectorial a distancia bajo demanda Ad-hoc (Ad-hoc On-Demand Distance Vector, AODV). En este caso, las rutas se generan sólo cuando se va a enviar un mensaje a un destino cuya ruta exacta aún no se conoce. "Si se va a enviar un mensaje de un nodo a otro, primero se comprueba si el nodo de destino está en las inmediaciones, es decir, si hay una entrada en la lista de nodos vecinos (tabla de vecinos).

Si no es así, se intenta con el enrutamiento mallado, se comprueba si hay una entrada sobre el nodo de destino en la tabla de reenvío (tabla de enrutamiento). Si tampoco es el caso, se utiliza el enrutamiento a lo largo de la estructura de árbol como solución de emergencia. En consecuencia, no se pueden elegir rutas propias, sino que se utiliza el procedimiento de enrutamiento AODV. El procedimiento toma la ruta con el menor número de pasos intermedios entre los nodos inicial y final.

ZigBee soporta como estructura de red la topología de árbol, así como una red mallada. En la topología de árbol, el enrutamiento es estrictamente a lo largo de la jerarquía del árbol, un procedimiento de enrutamiento no tendría que ser utilizado aquí. En la red mallada se utiliza el método de enrutamiento AODV explicado anteriormente. Una de las principales desventajas de ZigBee es la limitación a una estación base o coordinador. Sin embargo, otro FFD puede servir como coordinador sustituto si el coordinador falla.

Para evitar las interferencias, al principio de la fase de establecimiento de la red se escuchan primero todos los canales en busca de otros usuarios de radio. Finalmente, la decisión se toma en el canal con menos interferencias. No se pretende un cambio de canal posterior.

Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados

3.1. Visión general de redes de sensores inalámbricos.

Muchas aplicaciones de redes de sensores inalámbricos requieren baterías como fuente de energía para los sensores. Sin embargo, el pequeño tamaño del dispositivo generalmente prohíbe el uso de baterías grandes y de larga duración. Además, el despliegue de redes de sensores temporales y el inconveniente de la recolección de sensores a menudo limitan el reemplazo frecuente de la batería. Por lo tanto, el diseño de algoritmos y protocolos de ahorro de energía se ha convertido en un tema clave en las redes de sensores inalámbricos.

En la literatura existen varios estudios de mejora energética, generalmente si una batería se considera que tiene un buen almacenamiento de energía, puede descargar energía con su potencia de salida habitual y puede detenerse y reiniciarse en cualquier momento para devolver un solo tipo de voltaje. Sin embargo, la mayoría de los dispositivos que funcionan con baterías aprovechan la importancia de las reacciones químicas en línea para amplificarlos. Los ingenieros químicos saben que estas reacciones químicas dependen de varios factores ambientales y parámetros operativos (por ejemplo, tiempo de salida, salida de corriente, memoria de datos de salida previa).

En particular, existe un fenómeno sutil denominado efecto de recuperación de la batería, que se refiere al proceso por el cual las sustancias químicas activas de una batería se reponen si se dejan en reposo durante un periodo de tiempo suficiente y, por lo tanto, la energía entregable de una batería puede, hasta cierto punto, recargarse. Por ello, la motivación para explotar el efecto de recuperación de la batería como un enfoque viable de optimización energética para las redes de sensores.

Incluso en la primera época de las WSN, ya se había informado del efecto de recuperación de la batería. Como se ha comentado en el capítulo 2, en el modelo de trabajo tradicional de las WSN, el ciclo de trabajo es bastante

bajo, por ejemplo, menos del 1%. Sin embargo, a medida que los requisitos de la aplicación cambian en las aplicaciones de redes de sensores avanzadas, la carga de tráfico ofrecida podría ser mucho más pesada y el patrón de trabajo mucho más complejo, por ejemplo, las ráfagas de datos en los sistemas de monitorización de vibraciones y ECG.

Por lo tanto, se tiene que examinar el efecto de la recuperación de la batería y diseñar un algoritmo que se beneficie de la ganancia de recuperación de la batería en las aplicaciones de sensores con alta carga de tráfico.

3.2. Demostración experimental del efecto de recuperación de la batería en plataformas WSN

En esta sección, se presentan los resultados experimentales obtenidos de la red de sensores implementada para mostrar la importancia del efecto de recuperación de la batería. Se estudia principalmente la eficacia del efecto de recuperación de la batería en los nodos sensores. En los experimentos, se utiliza una tarjeta de interfaz de conversión analógica-digital (ADC) y el software LabVIEW para medir y registrar los perfiles de descarga de un par de sensores comunicados.

Por ejemplo, para esta parte cada sensor se alimenta con baterías LIPO de 500 mAh. Cuando el voltaje de alimentación de la batería es inferior a un determinado umbral (denominado voltaje de parada), el dispositivo ya no puede funcionar, lo que se considera como completamente descargado. Se establecen diferentes tasas de ciclo de trabajo en los sensores poniendo el transceptor de radio en los modos activo y de reposo periódicamente y midiendo el tiempo de batería inducido. La tasa de ciclo de trabajo se define como la fracción del período de tiempo activo.

El resultado presentado en la figura 3.1 se ha obtenido a partir de un experimento realizado con el software LabVIEW. Los dispositivos se han configurado con un periodo activo fijo de 10 s, mientras que la duración del periodo de reposo se ha ajustado entre 0 y 14 s. La ganancia normalizada se

ha obtenido multiplicando el tiempo de vida del sistema medido por la tasa del ciclo de trabajo, y luego comparado con el funcionamiento continuo de la radio (es decir, siempre encendida).

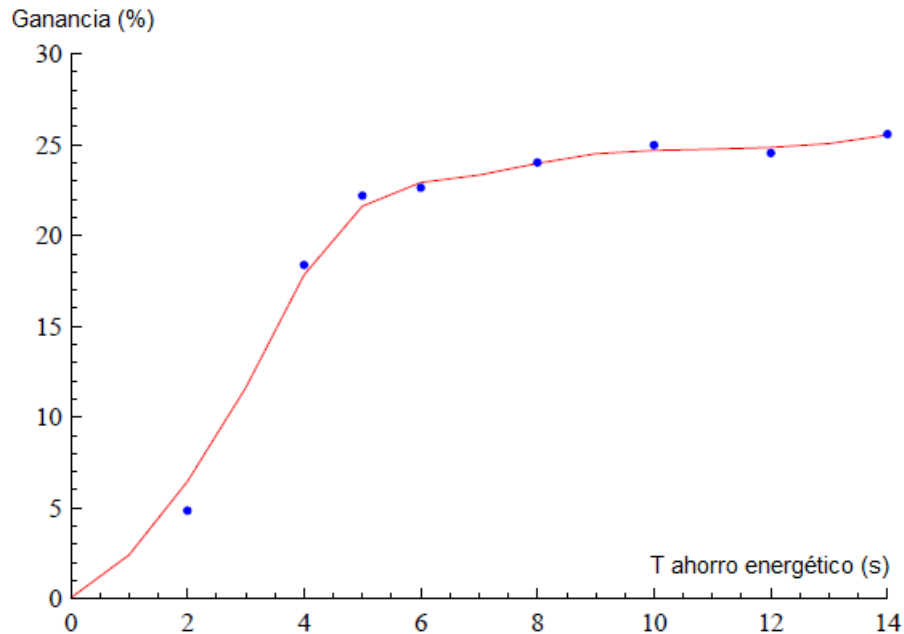


Figura 3. 1: Obtención de la vida útil normalizada con un tiempo activo constante.
Elaborado por: Autor.

Junto con el tiempo de inactividad prolongado, la energía suministrada aumenta rápidamente hasta que el tiempo de inactividad es igual a 5 s. A partir de ese momento, aunque la ganancia de vida útil sigue aumentando, la tendencia es mucho más lenta. La ganancia de vida útil con un tiempo de inactividad de 5 s es de alrededor del 22,3%, mientras que la ganancia de vida útil con un tiempo de inactividad de 14 s es sólo del 25%.

Del mismo modo, se muestra el rendimiento con un tiempo de reposo constante (5 s) y un tiempo activo variable entre 3 y 19 s, tal como se muestra en la figura 3.2. La ganancia de vida útil disminuye rápidamente con el aumento del tiempo activo, y la tendencia se ralentiza a partir de los 6 s de tiempo activo. Los experimentos han dado lugar a una serie de observaciones relevantes:

- 1) Hay claros indicios del efecto de recuperación de la batería. Con el mismo periodo de tiempo activo, un periodo de inactividad más largo induce un mayor tiempo de funcionamiento normalizado de la batería y, por tanto, una mayor energía suministrada por la misma.
- 2) El efecto del periodo de inactividad no es lineal. Parece que los periodos de inactividad superiores a un determinado umbral contribuyen mucho menos a la recuperación de la batería, lo que se denomina umbral de saturación.
- 3) El efecto del periodo de tiempo activo tampoco es lineal. Los periodos de tiempo activos muy pequeños parecen provocar una gran ganancia en la duración normalizada de la batería, hasta un 45%.
- 4) Aunque el sensor esté en modo inactivo en el transceptor de radio, sigue habiendo un consumo de energía debido al temporizador y a otras actividades de procesamiento. En las pruebas se determina un consumo de 6,1 μA en modo de inactividad. La recuperación de la batería puede tener lugar con un bajo consumo, y el impacto del consumo de fondo no es sustancial para la recuperación de la misma.

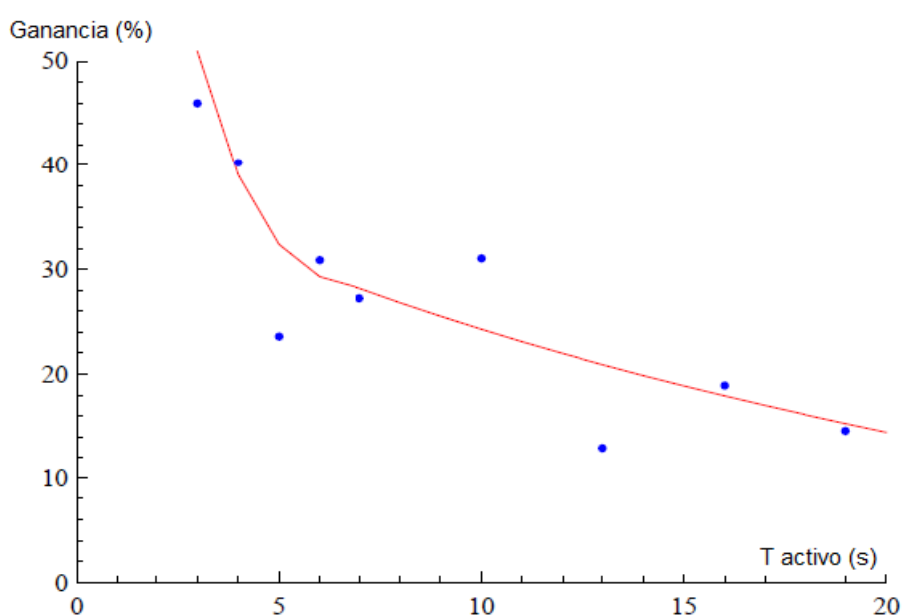


Figura 3. 2: La ganancia de vida normalizada con tiempo de inactividad constante.
Elaborado por: Autor.

Hay que tener en cuenta que la duración real de la batería es mucho mayor que la duración normalizada de la misma (que se multiplica por la tasa del ciclo de trabajo). Por lo tanto, los programas de ciclo de trabajo no solo prolongan la vida útil de la red al poner el nodo en modo inactivo, sino que también aumenta la energía disponible al permitir la recuperación de la batería.

Aunque la medición de ganancias debidas a la recuperación de la batería puede diferir en otros entornos (por ejemplo, diferentes temperaturas, diferentes tipos de batería), las ideas reveladas en la parte experimental seguirán siendo útiles para el modelado y la optimización de la recuperación de la batería en las redes de sensores. En general, bajo un perfil de descarga con ciclos de trabajo, una batería es capaz de recuperar la carga durante los periodos de inactividad, lo que aumenta efectivamente la energía entregable de la batería.

3.3. Compensación entre vida útil y latencia en redes de sensores a gran escala.

Debido a los efectos descritos anteriormente, se procedió a diseñar protocolos de red para aprovechar la recuperación de la batería tomando como parámetro el umbral de saturación estimado. En las redes de sensores de varios saltos, los ciclos de trabajo siempre se emplean para regular el transceptor, es decir, en el modo de inactividad la radio está apagada, mientras que en el modo activo la radio está encendida para todas las operaciones. Esto puede reducir el consumo de energía innecesario y aprovechar la recuperación de la batería.

Como resultado, es posible diseñar un algoritmo que pueda maximizar el efecto de recuperación de la batería ajustando el patrón del ciclo de trabajo. En esta sección, se presenta el análisis del algoritmo propuesto y se evalúa su desempeño en escenarios de múltiples saltos a gran escala.

3.3.1. Aplicación del modelo simplificado de la batería.

Los experimentos realizados corroboran la presencia del efecto de recuperación de la batería y el umbral de saturación. Resulta útil emplear un modelo sencillo para captar cualitativamente estas características esenciales, lo que permite un análisis posterior y una simulación a mayor escala sobre diversos patrones de consumo de la batería. Por lo tanto, combinando el modelo de batería y el análisis de los resultados experimentales, se ha presentado un modelo de batería simplificado.

3.3.2. Diseño de la recuperación de la batería en las WSN a gran escala

En una red de sensores multisalto, para estudiar el rendimiento de la red se utiliza la simulación implementada en OMNeT++, tal como se muestra en la figura 3.3. Se implementa el sencillo modelo de batería discreta en la sección anterior para cada sensor. Así, se supone que las tasas de llegada de datos de todos los sensores siguen una distribución de Poisson independiente. La transmisión seguirá el protocolo de transmisión difuso adaptativo, excepto que se asume que el canal inalámbrico en esta simulación es ideal, sin ningún ruido ambiental.

Sin el diseño de la recuperación de la batería, en la ranura de tiempo de activación sincronizada, el par de transmisión intentará enviar todos los paquetes en la cola del buffer a través de un proceso hand-shake (estrechamiento de manos). Para ampliar este esquema teniendo en cuenta el efecto de recuperación de la batería, se propone un sencillo esquema de inactividad forzada. Este esquema es una acción de dos carpetas que se aplica tanto en la operación de transmisión como en la de recepción.

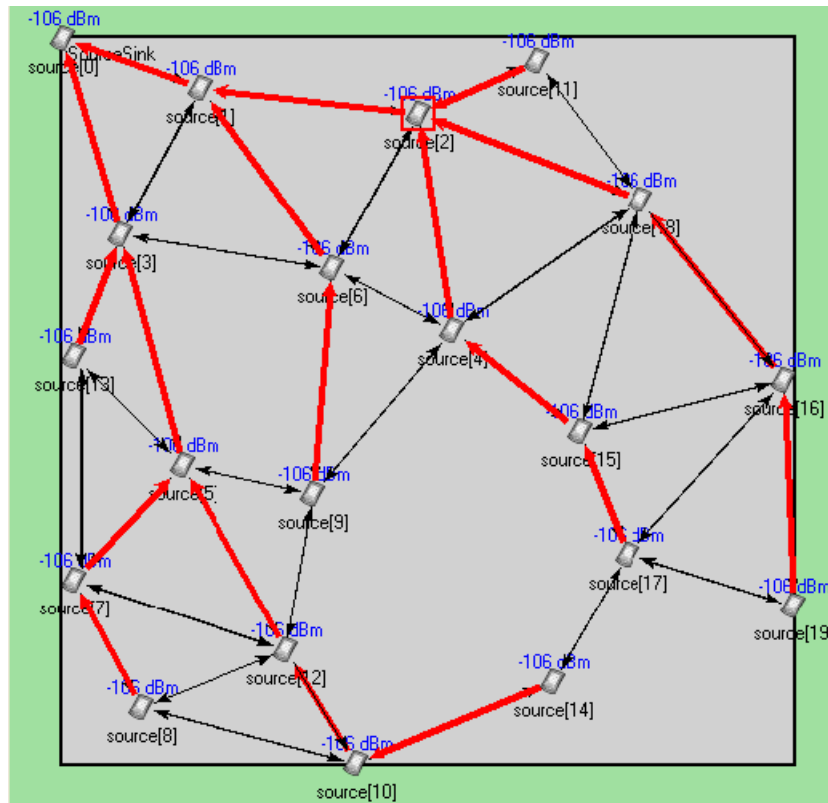


Figura 3. 3: Espectro de la señal RF para una frecuencia de trabajo de 5 GHz.
Elaborado por: Autor.

El primer paso es sencillo: suponiendo que el receptor determina a partir del enlace de detección después de la optimización de la tasa de transmisión y que la operación actual podría estar activa durante más ranuras de ocupación máxima ($B_{\text{máx}}$), entonces el paquete ACK (acuse de recibido) se enviará de vuelta para notificar al transmisor que envíe sólo paquetes máximos ($N_{\text{máx}}$) en este bloque. En el segundo paso, el dispositivo, ya sea como transmisor o como receptor, comprobará el intervalo de tiempo activo al final de la transmisión de cada bloque. El tiempo activo puede ser proporcionado por un bloque grande o por varios bloques pequeños en diferentes funciones.

Si un dispositivo ha estado activo durante más ranuras $B_{\text{máx}}$ consecutivas antes de la ranura actual, entonces tiene que pasar al estado de inactividad para las próximas ranuras. Esto permite una recuperación de la batería suficiente para mejorar la energía entregable de una batería. Después de las ranuras S , el dispositivo reanudará la programación activa normal.

Inevitablemente, este esquema disminuirá el rendimiento de entrega y aumentará la latencia, al tiempo que aumentará la vida útil de la red aprovechando el efecto de recuperación de la batería. Sin embargo, si se elige con cuidado los periodos de inactividad dentro del umbral de saturación, se puede maximizar la recuperación de la batería sin agravar la latencia de la entrega de datos.

Los parámetros se ajustarán en la simulación para investigar el impacto del diseño en el rendimiento de la red, por ejemplo, el rendimiento, la latencia y la eficiencia energética. Mediante la simulación, se compara la vida útil de la red de los esquemas conscientes de la batería con el funcionamiento normal, que tiene el mejor rendimiento y latencia.

3.3.3. Discusión de los resultados obtenidos.

En primer lugar, se demostrará el rendimiento del algoritmo propuesto con detección inteligente de batería en un único par de transmisiones. La carga de tráfico ofrecida en la red se ha incrementado de forma constante desde 2 pps (paquetes/s) hasta 26 pps. La red se ha configurado en tres modos: sin modo inteligente de la batería, modo inteligente de la batería con ranuras $B_{\text{máx}}=5$, y modo inteligente de la batería con ranuras $B_{\text{máx}}=3$. Como se muestra en la figura 3.4, el algoritmo con detección de batería propuesto es suficiente para ofrecer una carga de tráfico similar a la del sistema sin detección en todas las situaciones. A continuación, se analiza la eficiencia energética y el rendimiento de la latencia.

Los tiempos de vida o actividad de la red con diferentes configuraciones se han ilustrado en la figura 3.5, mientras que la de potencia recuperada de la batería se muestra en la figura 3.6. Con una baja carga de tráfico ofrecida, los tres sistemas pueden maximizar automáticamente el efecto de recuperación de la batería, lo que puede demostrarse por el hecho de que el rendimiento es casi el mismo con 2 y 4 pps. A medida que aumenta la carga de tráfico ofrecida, las duraciones de los sistemas muestran tendencias diferentes. La

vida útil del sistema sin un diseño que tenga en cuenta la recuperación de la batería disminuye rápidamente.

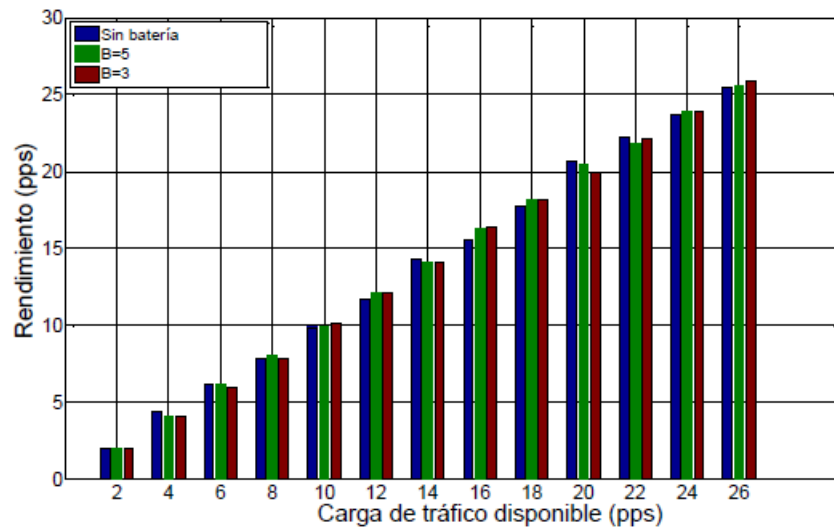


Figura 3. 4: Rendimiento del paquete de transmisión individual.
Elaborado por: Autor.

Sin el algoritmo inteligente de recuperación de la batería, la energía recuperada sólo contribuye cuando no hay paquetes en espera de ser enviados. La probabilidad de esta situación tenderá a cero con el aumento de la carga de tráfico ofrecida. Sin embargo, si el sistema está configurado para que sea un sistema inteligente de recuperación de la batería, el sistema será forzado a entrar en reposo cuando haya estado trabajando durante al menos $B_{\text{máx}}$ ranuras de tiempo. Por lo tanto, incluso con cargas de tráfico elevadas, el sistema puede seguir beneficiándose del efecto de recuperación de la batería. Está claro que la energía recuperada tenderá a un límite constante en lugar de cero.

También se puede observar que el rendimiento dependerá de la configuración de $B_{\text{máx}}$, es decir, un $B_{\text{máx}}$ más corto proporcionará una mayor eficiencia energética. Por ejemplo, cuando la carga de tráfico ofrecida es de 26 pps, el sistema con $B_{\text{máx}} = 3$ recuperó 556 unidades de energía y aumentó la vida útil del sistema en 214 segundos (un 82% de ganancia, en comparación con el sistema sin recuperación de batería inteligente). Con la misma carga

de tráfico, el sistema con $B_{\text{máx}} = 5$ sólo es capaz de recuperar 164 unidades de energía, lo que se traduce en una ampliación del 40% de la vida útil.

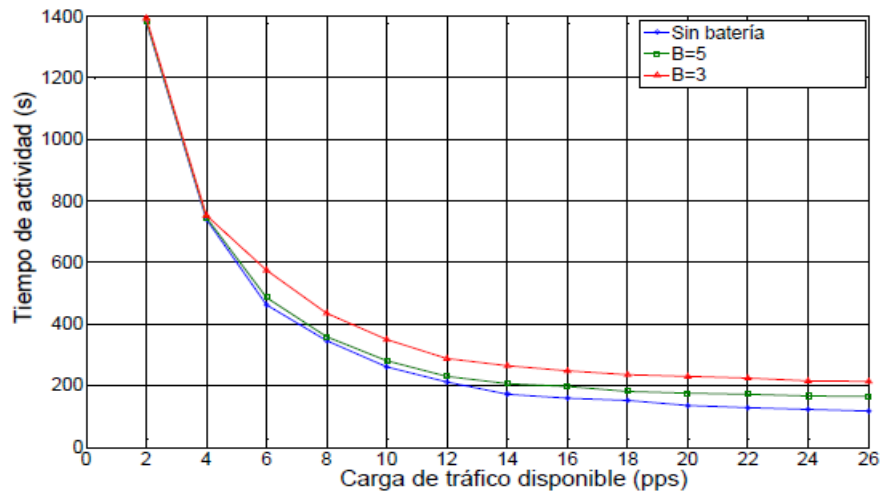


Figura 3. 5: Tiempo de actividad o de vida del sistema.
Elaborado por: Autor.

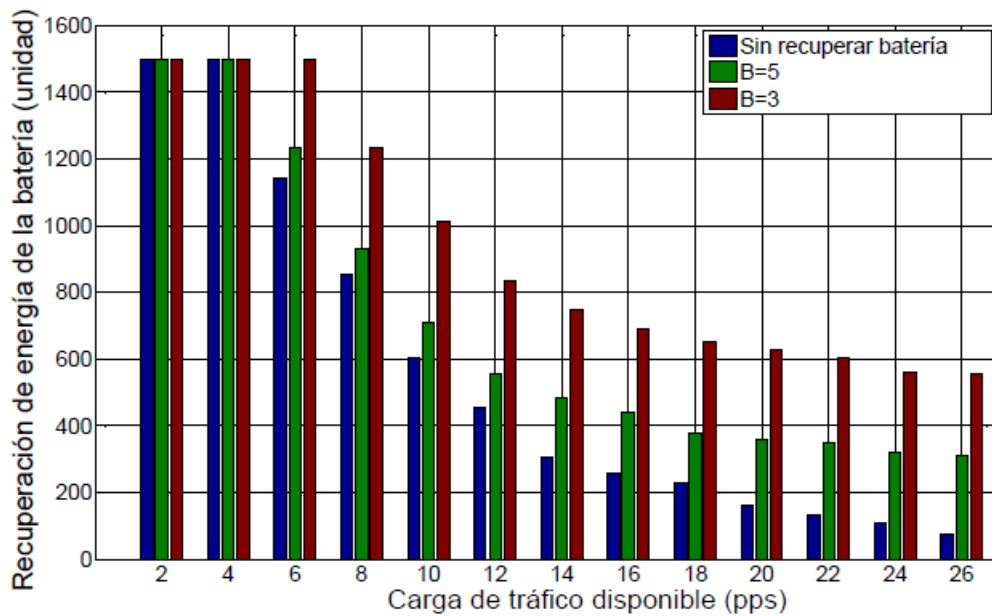


Figura 3. 6: Rendimiento energético del algoritmo de recuperación de la batería.
Elaborado por: Autor.

Sin embargo, es muy importante tener en cuenta que un tiempo $B_{\text{máx}}$ más corto no sólo contribuye a aumentar la energía entregable, sino también a incrementar la latencia de entrega de los paquetes, tal como se muestra en la figura 3.7. La latencia de entrega de paquetes aquí se ha normalizado a un valor comparado con el sistema sin diseño de recuperación de la batería.

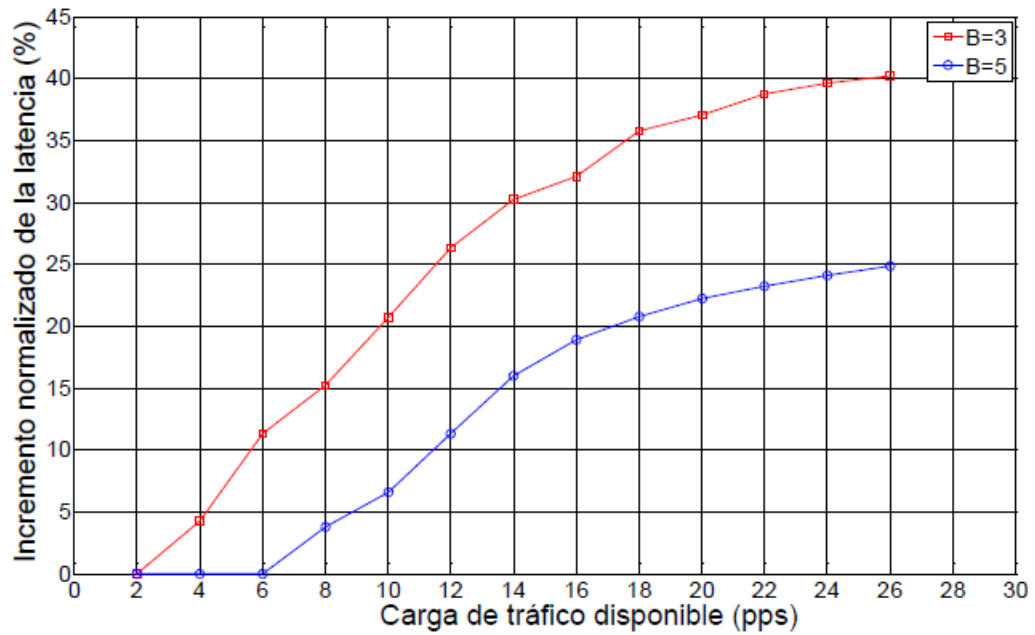


Figura 3. 7: Rendimiento de la latencia del algoritmo de recuperación de la batería.
Elaborado por: Autor.

Asimismo, cuando la carga de tráfico ofrecida es baja, las latencias del sistema son casi iguales a las del sistema tradicional. A partir de ese momento, las latencias de entrega de paquetes aumentan con diferentes velocidades y límites, y un $B_{\text{máx}}$ más corto conlleva una latencia más alta. Este fenómeno es fácil de entender: cuanto más frecuentemente se obligue al sistema a entrar inactivo, más tiempo tendrá que esperar el paquete. Sin embargo, este aumento de la latencia muestra una característica exponencial, convergiendo a un valor constante.

En conclusión, el algoritmo inteligente de la recuperación de batería con $B_{\text{máx}} = 3$ intercambia un 40% de aumento de latencia (véase la figura 3.7) con un 82% de ganancia de vida útil, mientras que el modo $B_{\text{máx}} = 5$ intercambia un 26% de latencia (véase la figura 3.7) con un 40% de ganancia de vida útil.

Ahora se ampliará la red a una topología multisalto y se demostrará el rendimiento de la red en este escenario. Hay que tener en cuenta que todas las conexiones de la figura 3.3 de la topología son sólo indicaciones de la ruta prefijada; las transmisiones reales de paquetes seguirán el modo de

propagación que considera los efectos de pérdida de trayectoria y desvanecimiento lento.

Para crear un entorno de simulación más realista, se ha implementado la interferencia acumulativa en esta simulación. Por ejemplo, aunque la señal transmitida por el dispositivo 1 no puede ser demodulada por el dispositivo 16 en la cola de la topología, la señal sigue teniendo efecto en el dispositivo 16. Evidentemente, la acumulación de este tipo de interferencias provocará un aumento de la relación señal a ruido (SNR) en los dispositivos.

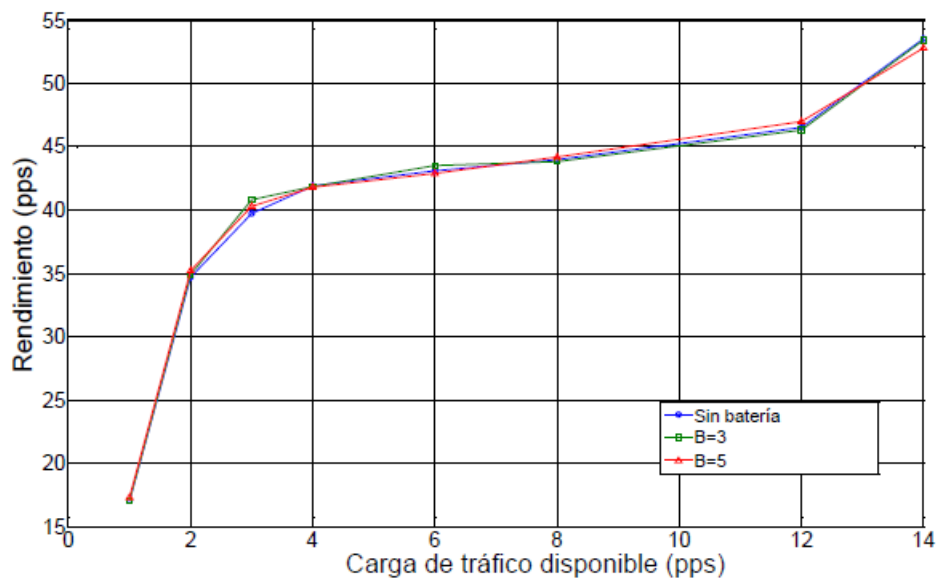


Figura 3. 8: Rendimiento del escenario con múltiples saltos.
Elaborado por: Autor.

Como se muestra en la figura 3.8, el sistema sigue siendo capaz de ofrecer un rendimiento casi idéntico con y sin el diseño de recuperación de batería en los escenarios multisalto. En otras palabras, el esquema de reposo forzado no tiene un efecto significativo en el rendimiento entregable, que se cree que está limitado por la congestión y la ruta prefijada. Más allá de esto, cabe destacar que el rendimiento entregado con éxito es de unos 17 pps cuando la carga de tráfico ofrecida es de 1 pps por nodo (es decir, se generarán 20 paquetes en toda la red por segundo). Por lo tanto, el sistema ya está próximo a saturarse en ciertas rutas incluso con una carga de tráfico tan baja como 1 pps.

La figura 3.9 muestra el rendimiento del tiempo de vida útil del sistema. Como ya se ha dicho, el sistema está casi saturado incluso con una carga de tráfico de 1 pps, el rendimiento de la vida útil sólo muestra un cambio moderado. Para el sistema normal sin algoritmo de recuperación de batería, cuando la carga de tráfico ofrecida aumentó de 1 pps a 14 pps, la vida útil disminuyó de 200 s a unos 178 s. Del mismo modo, los resultados de la simulación con $B_{\text{máx}} = 3$ y $B_{\text{máx}} = 5$ disminuyen de 300 s a 278 s y de 236 s a 218 s, respectivamente.

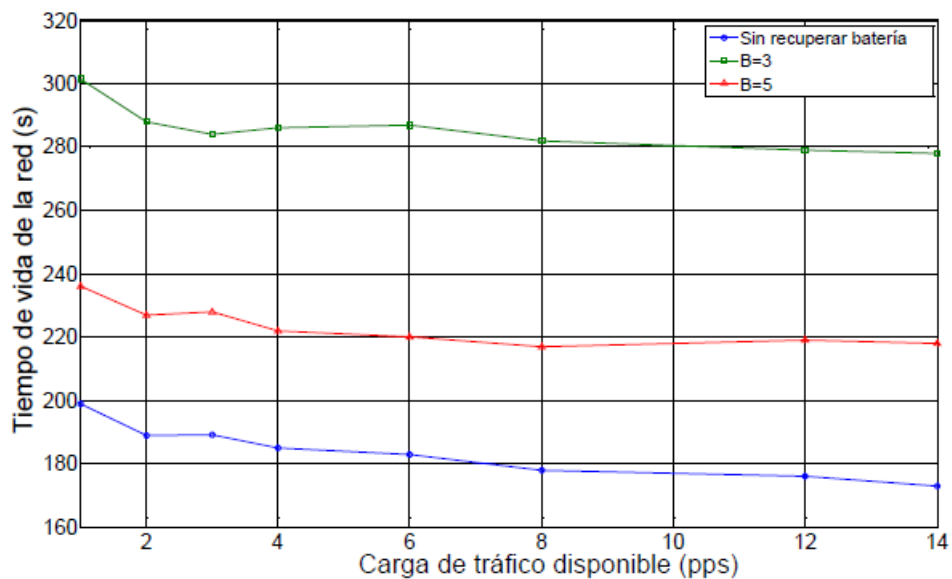


Figura 3. 9: Rendimiento del tiempo de vida de un escenario con múltiples saltos.
Elaborado por: Autor.

Los resultados registrados se han procesado posteriormente para generar la ganancia de vida útil para diferentes $B_{\text{máx}}$, que se han proporcionado en la figura 3.10. Claramente, el algoritmo de recuperación de la batería aumenta la vida útil del sistema de forma significativa. Debido al problema de la congestión, la carga de tráfico efectiva no aumentará rápidamente con el aumento de la tasa de generación de paquetes. Por lo tanto, a diferencia del par de transmisión simple, el sistema no mostrará un aumento constante en la ganancia de vida útil, sino que la ganancia de vida útil aumentó del 51% al 60% para $B_{\text{máx}} = 3$ y del 18% al 26% para $B_{\text{máx}} = 5$.

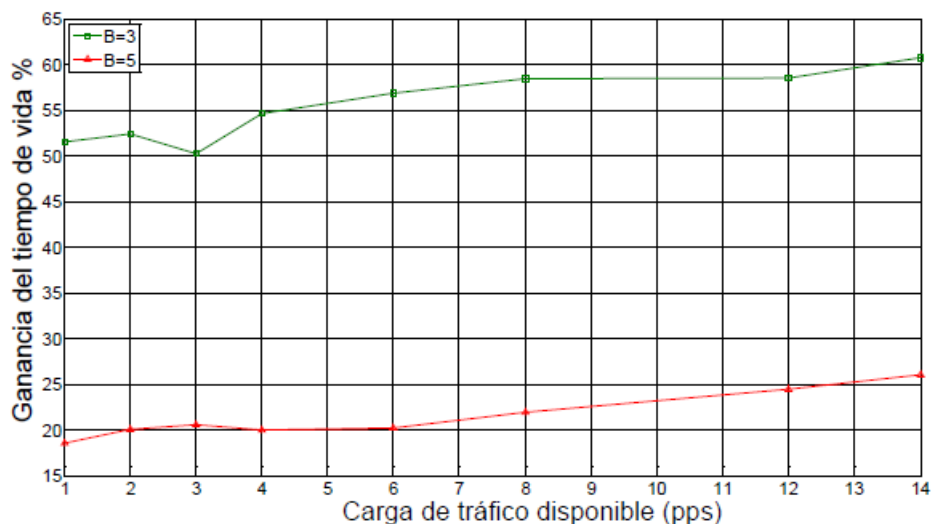


Figura 3. 10: Ganancia de tiempo de vida normalizada del escenario con múltiples saltos.

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.11 se ilustran las latencias normalizadas de los paquetes por salto, calculadas a partir de la latencia de los paquetes de extremo a extremo y promediadas por el número de saltos realizados. Al igual que en el escenario de un solo par de transmisión, el escenario de saltos múltiples también se beneficia de la compensación entre la vida útil de la red y la latencia de los paquetes. Cuando $B_{\text{máx}} = 3$, el sistema intercambia un aumento del 30.9% en la latencia de los paquetes con un aumento del 60.6% en la vida útil. Cuando $B_{\text{máx}} = 5$, el sistema intercambia un 18.8% de aumento de la latencia de los paquetes con un 26% de aumento de la vida útil.

Ahora nos motiva examinar cómo cambia este beneficio con diferentes configuraciones de $B_{\text{máx}}$, que se han demostrado en la figura 3.11. En esta simulación, la carga de tráfico ofrecida se ha fijado en 1 pps para cada dispositivo, y luego se ha ajustado la ranura de tiempo de forzado inactivo $B_{\text{máx}}$ de 1 a 6. La vida útil y la latencia se han registrado y comparado con el rendimiento del sistema estándar sin algoritmo de recuperación de la batería. La comparación de estos resultados se muestra en la figura 3.12.

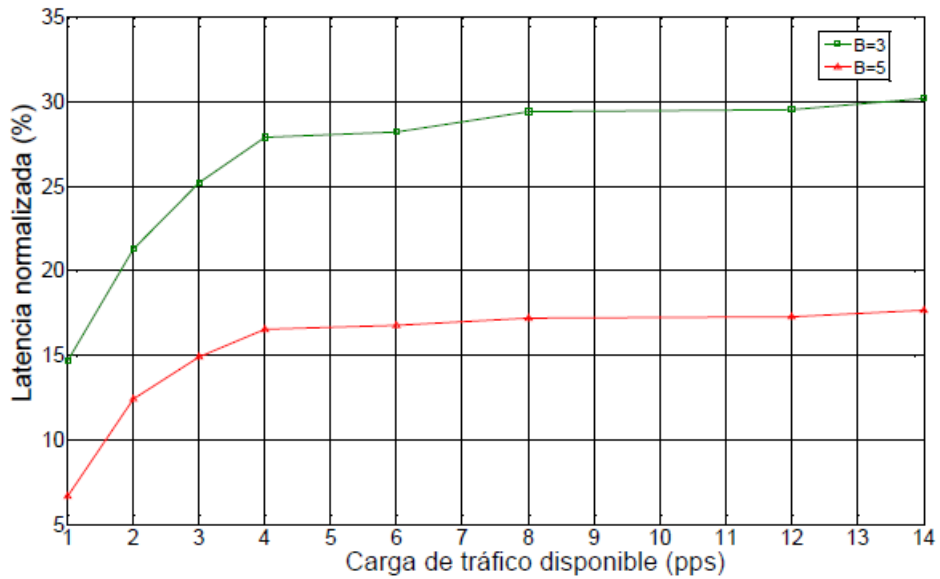


Figura 3. 11: Rendimiento del tiempo de vida de un escenario con múltiples saltos.
Elaborado por: Autor.

Ahora interesa examinar cómo cambia este beneficio con diferentes configuraciones de $B_{\text{máx}}$, que se muestran en la figura 3.12. En esta simulación, la carga de tráfico ofrecida se ha fijado en 1 pps para cada dispositivo, y luego se ajusta la ranura de tiempo de forzado inactivo $B_{\text{máx}}$ de 1 a 6. La vida útil y la latencia se ha registrado y comparado con el rendimiento del sistema estándar sin el algoritmo de recuperación de la batería.

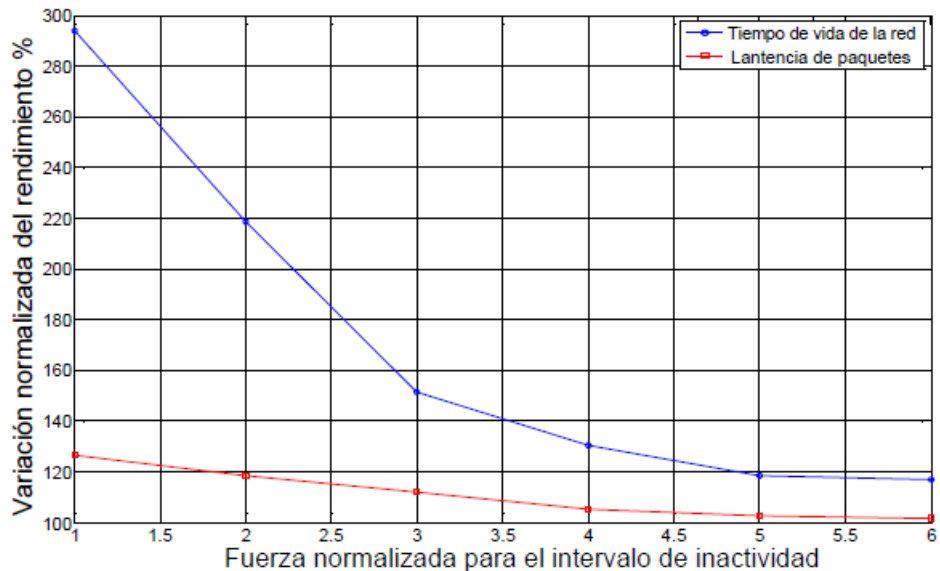


Figura 3. 12: Cambio del rendimiento con la variación de $B_{\text{máx}}$.
Elaborado por: Autor.

La comparación de estos resultados se muestra en la figura 3.12. Esta información proporciona las siguientes pistas. En primer lugar, es posible que

no exista una optimización genérica, sino que ésta vendrá determinada por los requisitos del sistema. La ganancia de vida es escalable con la latencia de entrega, es decir, una mayor ganancia de vida viene acompañada de una mayor latencia. En segundo lugar, si se define la relación entre la vida útil y la latencia como la relación de ganancia, entonces la relación de ganancia aumenta con la disminución de la fuerza al tiempo de espera, es decir, $B_{\text{máx}} = 1$ tiene la mejor relación de ganancia en los escenarios probados. Sin embargo, esta configuración también implica la mayor latencia de entrega de paquetes.

Por último, la implementación del algoritmo inteligente de recuperación de la batería debe considerar la latencia máxima tolerable de entrega de paquetes según los requisitos de calidad de servicio (Quality of Service, QoS) de la capa de aplicación. A partir de ahí, el sistema puede calcular los ciclos de trabajo optimizados para lograr la mejor relación de ganancia sin superar el requisito de QoS.

Conclusiones

Los sistemas WSN suelen basarse en el ciclo de trabajo (es decir, el patrón de actividad e inactividad) para prolongar la vida útil de la red. En las aplicaciones tradicionales, debido a la baja carga de tráfico, los sistemas suelen configurarse con periodos de reposo muy largos, en los que los sistemas logran un excelente rendimiento energético. A esta eficiencia energética contribuyen dos factores: en primer lugar, el sistema sólo consume energía durante breves periodos activos durante todo el tiempo de vida; y, en segundo lugar, en el largo periodo de reposo, el efecto de recuperación de la batería se ha utilizado completamente de forma automática. Sin embargo, esto también ha hecho que no se tengan en cuenta los efectos de recuperación de la batería.

En las aplicaciones de WSN con alta carga de tráfico, el sistema suele estar configurado para entregar un gran número de paquetes con requisitos específicos de calidad de servicio y largos periodos de actividad, al tiempo que se espera una alta eficiencia energética. Por ello, se ha motivado a considerar si es posible dividir el largo período activo en varios ciclos de trabajo pequeños para aprovechar el efecto de recuperación de la batería.

Mediante una serie de experimentos, se demuestra inicialmente la existencia del efecto de recuperación de la batería. Además, se ha comprobado que una programación adecuada de los ciclos de trabajo puede aumentar la energía entregable de una batería sin aumentar significativamente la latencia de la entrega de datos. Esto es especialmente útil para los sistemas de redes de sensores con limitaciones de energía y latencia en aplicaciones WSN con alta carga de tráfico. Los resultados de la simulación para un escenario de red multsalto muestran que, si se establece cuidadosamente el ciclo de trabajo, se puede aprovechar el efecto de recuperación de la batería y garantizar una latencia de entrega de paquetes aceptable, incluso con grandes cargas de tráfico.

Recomendaciones

A continuación, se presentan dos trabajos a futuro relacionados con las redes de sensores inalámbricos.

1. Implementar un prototipo integrado con todas las características propuestas y demostrar su rendimiento en escenarios de red utilizando transceptor inalámbrico basado en ASIC.
2. Implementar redes de sensores inalámbricos basados en la plataforma de redes definidas por software (SDR)

Bibliografia

- Abo-Zahhad, M., Farrag, M., Ali, A., & Amin, O. (2015). An energy consumption model for wireless sensor networks. *5th International Conference on Energy Aware Computing Systems & Applications*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICEAC.2015.7352200>
- Adu-Manu, K. S., Adam, N., Tapparello, C., Ayatollahi, H., & Heinzelman, W. (2018). Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks (EH-WSNs): A Review. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 14(2), 1–50. <https://doi.org/10.1145/3183338>
- Ali, A., Rashid, R. A., Arriffian, S. H. F., & Fisal, N. (2007). Optimal forwarding probability for real-time routing in wireless sensor network. *2007 IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications*, 419–424. <https://doi.org/10.1109/ICTMICC.2007.4448673>
- Alvarado Medellin, P., Aguilar Escarcia, S. P., Ramírez Aguilrera, A. M., & Ortiz Gómez, R. (2019). Dynamic system for monitoring and control wireless sensor networks operating under ZigBee communication protocol. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(1), 1–9. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.003>
- Ariffin, S. H. S., Hasnan, S. N. M., Balfaqih, M., Haseeb, S., & Mazlan, M. H. (2012). Latency evaluation of authentication protocols in centralized 802.11 architecture. *IET International Conference on Wireless Communications and Applications (ICWCA 2012)*, 104–104. <https://doi.org/10.1049/cp.2012.2113>
- Biswas, S., & Chandra, A. (2014). DF versus AF: Energy consumption comparison for IEEE 802.15.4 networks. *2014 Sixth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/COMSNETS.2014.6734904>

- Cao, X., Chen, J., & Sun, Y. (2009). An interface designed for networked monitoring and control in wireless sensor networks. *Computer Standards & Interfaces*, 31(3), 579–585. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2008.03.026>
- Egas, C., & Gil-Castiñeira, F. (2020). Revisión de requisitos, protocolos y desafíos en LWSN. *MASKAY*, 11(1), 13. <https://doi.org/10.24133/maskay.v11i1.1728>
- Haas, C., Wilke, J., & Stöhr, V. (2012). Realistic Simulation of Energy Consumption in Wireless Sensor Networks. En G. P. Picco & W. Heinzelman (Eds.), *Wireless Sensor Networks* (Vol. 7158, pp. 82–97). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28169-3_6
- Jung, S., Chae, Y., Shin, J., Baek, U., & Kim, S. (2013). Design of Context-Aware based Information Prevention for Digital Signage. *Undefined*. [/paper/Design-of-Context-Aware-based-Information-for-Jung-Chae/6773a2b95e5e05f5739298747df7c9b2eca1282a](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28169-3_6)
- Normie, L. (2015). Wireless Sensor Networks for Aging-in-Place: Theory and Practice. En J. van Hoof, G. Demiris, & E. J. M. Wouters (Eds.), *Handbook of Smart Homes, Health Care and Well-Being* (pp. 1–18). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01904-8_45-1
- Rueda, J. S., & Talavera Portocarrero, J. M. (2017). Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora. *Revista Colombiana de Computación*, 18(2), 58–74. <https://doi.org/10.29375/25392115.3218>
- Srbinovska, M., & Gavrovski, C. (2021). *Localization estimation system using measurement of RSSI based on ZigBee standard*.

Staab, W., & Armstrong, S. (2013). Bluetooth. *Wayne's World*.
<https://hearinghealthmatters.org/waynesworld/2013/bluetooth-101-part-iv/>

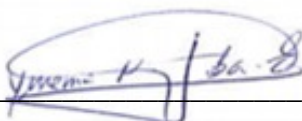
DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Tobar Espinoza, Yurema Nathalie** con C.C: # 091956930-1 autor del trabajo de titulación: Implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en redes de sensores inalámbricos, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, 12 de julio del 2021

f. 

Nombre: **Tobar Espinoza, Yurema Nathalie**

C.C: 091956930-1

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en redes de sensores inalámbricos		
AUTOR(ES)	Tobar Espinoza, Yurema Nathalie		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Quezada Calle, Edgar Raul; M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio / M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	Guayaquil, 12 de julio del 2021	No. DE PÁGINAS:	58
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Inalámbricas, Teoría de la Comunicación		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Inalámbrico, Protocolos, Inactividad, Eficiencia, Nodos, Topología.		
RESUMEN/ABSTRACT: El presente proyecto de maestría consiste en la implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en redes de sensores inalámbricos (WSN). Las WSN están formadas por un gran número de nodos sensores de comunicación inalámbrica distribuidos espacialmente y desplegados para realizar diversas tareas de detección en un entorno sin interferencias. Estas WSN se alimentan de la limitada fuente de alimentación instalada en el nodo sensor. El consumo de energía del nodo sensor desempeña un papel importante a la hora de determinar la vida útil de la WSN, ya que la energía no puede sustituirse porque es inaccesible. El consumo de energía y la eficiencia energética de las WSN son cuestiones importantes para su funcionamiento. Finalmente, se utiliza el software OMNeT++ para la implementación de la red (especialmente la ubicación del nodo receptor) y el control de la topología de las WSN tienen un impacto significativo en la eficiencia energética de las WSN.			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593 99 673 5875	E-mail: yurespinoza_93@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Manuel Romero Paz		
	Teléfono: 0994606932		
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			