



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Diseño y evaluación de mecanismos de optimización en redes de sensores inalámbricas industriales

26 de Octubre de 2021

Autor: José Vera Pérez

Director: Dr. Víctor Miguel Sempere Payá

Dr. Javier Lidiano Silvestre Blanes

*A mi pareja Verane, quien me acompaña siempre
en esta y otras travesías.*

A mi familia, gracias por su apoyo incondicional.

A mis directores Víctor y Javier por su dedicación y consejo.

*A mis compañeros de equipo, con quienes he podido
enriquecerme durante mi desarrollo profesional.*

*A mis amigos, por todos esos buenos momentos
que compartimos.*

Resumen

La industria se encuentra inmersa de pleno en la cuarta revolución industrial, y es gracias a la capacidad de digitalización y de procesamiento de grandes cantidades de datos, que se consigue mejorar y optimizar el rendimiento de los sistemas industriales actuales. Son muchos los paradigmas y conceptos que están dando forma a lo que se conoce como Industria 4.0, y uno de ellos ha sido el Internet de las Cosas (IoT: Internet of Things) o más concretamente el Internet Industrial de las Cosas (IIoT: Industrial Internet of Things), como se ha llamado al subconjunto con determinados requisitos orientados al sector industrial.

Las redes de sensores inalámbricos (WSN: Wireless Sensor Networks) son tecnologías habilitadoras para estos sistemas IoT, ya que gracias a su fácil escalabilidad ofrecen gran capacidad de sensorización con un coste energético reducido. En el ámbito industrial, estas redes de sensores deben cumplir con requisitos estrictos de fiabilidad, y su aceptación está siendo lenta debido a que su robustez y facilidad de configuración no han podido rivalizar con las tecnologías clásicas.

Con el desarrollo de esta tesis, se pretende hacer frente a determinados aspectos de mejora de las redes industriales de sensores inalámbricos. Para ello, se diseñan nuevos mecanismos para la sincronización, evaluando metodologías alternativas de enrutamiento y proponiendo modelos analíticos que permitan caracterizar fielmente el proceso de despliegue de estas redes, con el objetivo de cubrir aquellas lagunas que dejan los estándares y protocolos bajo estudio. Los mecanismos propuestos por el estándar IEEE 802.15.4e, en concreto el método de acceso al medio mediante TSCH (Time-Slotted Channel Hopping), presentan las bases sobre las que construir una red WSN fiable y robusta, y mediante los desarrollos propuestos en esta tesis se facilita su implantación en sistemas de Industria 4.0.

Resum

La indústria es troba de ple en la quarta revolució industrial, i és gràcies a la capacitat de digitalització i de processament de grans quantitats de dades, que s'aconsegueix millorar i optimitzar el rendiment dels sistemes industrials actuals. Són moltes els paradigmes i conceptes que estan donant forma al que es coneix com a Indústria 4.0, i una d'elles ha sigut la Internet de les Coses (IoT: Internet of Things) o més concretament la Internet Industrial de les Coses (IIoT: Industrial Internet of Things), com s'ha anomenat al subconjunt amb determinats requisits orientats al sector industrial.

Les xarxes de sensors sense fils (WSN: Wireless Sensor Networks) són tecnologies habilitadores per a sistemes IoT, ja que gràcies a la seua fàcil escalabilitat ofereixen gran capacitat de digitalització amb un cost energètic reduït. En l'àmbit industrial, aquestes xarxes de sensors han de complir amb requisits estrictes, i la seua acceptació està sent lenta a causa de factors que fan que aquests sistemes no substituïsquen a les tecnologies clàssiques.

Amb el desenvolupament d'aquesta tesi, es pretén fer front a determinats aspectes de millora de les xarxes industrials de sensors sense fils. Per a això, es dissenyen nous mecanismes per a la sincronització, avaluant metodologies alternatives d'encaminament i proposant models analítics que permeten caracteritzar fidelment el procés de desplegament d'aquestes xarxes, amb l'objectiu de cobrir aquelles llacunes que deixa l'estàndard. Els mecanismes proposats per l'estàndard IEEE 802.15.4, en concret el mètode d'accés al mitjà TSCH, presenten les bases sobre les quals construir una xarxa WSN fiable i robusta, i mitjançant els desenvolupaments proposats en aquesta tesi es facilita la seua implantació en sistemes d'Indústria 4.0.

Abstract

The industry is fully engaged in the fourth industrial revolution. Due to digital transformation and the processing of large amounts of data, it is possible to improve the value chain and provide a real-time optimization for the current industrial systems. There are many paradigms and concepts that fall under the umbrella of Industry 4.0, and one of them is the Internet of Things (IoT) or more specifically the Industrial Internet of Things (IIoT), as the subset with certain industry-oriented requirements is known.

Wireless Sensor Networks (WSN) are an enabling technology for IoT systems, since its easy scalability offers a great sensorization capacity with a reduced energy cost. In the industrial field, these sensor networks must meet strict reliability requirements, so growth in the industrial market is slow as these systems fail to replace legacy technologies.

This thesis addresses different aspects of improving industrial wireless sensor networks. To that end, new mechanisms for synchronization have been designed, evaluating alternative routing methodologies and proposing analytical models that allow a comprehensive characterization of the deployment process of these networks, aiming of covering those gaps left by the standard. The mechanisms proposed by the IEEE 802.15.4 standard, specifically the medium access control method Time-Slotted Channel Hopping (TSCH), present the bases to deploy a reliable and robust WSN network, and through the developments proposed in the thesis, it is possible smooth the way for its implementation in Industry 4.0 systems

Índice general

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Resum	vii
Abstract	ix
Índice general	xi
Acrónimos	xiii
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes y motivaciones	1
1.2 Objetivos de la tesis	3
1.3 Publicaciones	4
1.3.1 Artículos en revistas científicas	4
1.3.2 Artículos en congresos internacionales	6
1.3.3 Proyectos de investigación	7
1.4 Aportaciones de la tesis	8
1.5 Organización de la memoria	9
2 Estado del arte de redes inalámbricas industriales	11
2.1 Tecnologías de comunicaciones inalámbricas industriales	11
2.1.1 Redes inalámbricas de área personal (WPAN)	12
2.1.2 Redes inalámbricas de área local (WLAN)	15
2.1.3 Redes inalámbricas de área amplia (WWAN)	17
2.2 Tecnologías de comunicaciones seleccionadas	19
2.2.1 Estándar IEEE 802.15.4	21
2.2.2 Protocolo de encaminamiento RPL	32
3 Calidad del enlace en el encaminamiento	37
3.1 Introducción	37
3.2 Calidad del enlace RPL en Wireless Sensor Networks	39
3.3 Métricas de energía para la mejora del tiempo de vida	41
3.3.1 Escenario de pruebas utilizando métricas energéticas	45
3.3.2 Evaluación de resultados utilizando métricas energéticas	47
3.4 Función de calidad multi-parámetro	50
3.4.1 Simulaciones de la función de calidad multi-parámetro	56

3.4.2	Evaluación de resultados de la función de calidad	57
3.5	Conclusiones	60
4	Caracterización del tiempo de sincronización TSCH y conexión RPL	63
4.1	Introducción	63
4.2	Método de sincronización en redes TSCH y conexión RPL	64
4.3	Modelo analítico para sincronización TSCH y conexión RPL	69
4.4	Validación del modelo analítico TSCH-RPL	73
4.5	Caracterización de la latencia en enlaces multisalto	82
4.6	Validación del modelo de latencia multisalto	84
5	Mecanismos de sincronización basadas en redes TSCH	93
5.1	Introducción	93
5.2	Mecanismos de optimización de la sincronización TSCH	94
5.3	Diseño y evaluación del mecanismo de transmisión de balizas dinámico	96
5.3.1	Simulaciones de balizamiento dinámico en TSCH	97
5.3.2	Análisis de resultados del balizamiento dinámico en TSCH	101
5.4	Diseño y evaluación del mecanismo Bell-X para la transmisión de balizas	108
5.4.1	Simulaciones de Bell-X	113
5.4.2	Análisis de resultados de Bell-X	117
5.5	Conclusiones	123
6	Conclusiones y trabajos futuros	125
	Anexo A: Sistema Deploy&Forget para la puesta en marcha de las WSN	129
	Bibliografía	135

Acrónimos

3GPP	3rd Generation Partnership Project
6LoWPAN	IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network
ACK	Acknowledgement
AMCA	Asynchronous Multi-Channel Adaptation
AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
AR	Augmented Reality
ASN	Absolute Slot Number
AVB	Audio Video Bridging
BE	Beacon Enabled
BLE	Bluetooth Low Energy
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CFP	Contention Free Period
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assesment
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSS	Chirp Spread Spectrum
DAG	Directed Acyclic Graph
DAO	Destination Advertisement Object

- DeTAS** Decentralized Traffic Aware Scheduling
- DGRM** Directed Graph Radio Medium
- DIO** DODAG Information Object
- DIS** DODAG Information Solicitation
- DSME** Deterministic and Synchronous Multi-Channel Extension
- DOAJ** Directory of Open Access Journals
- DODAG** Destination Oriented Directed Acyclic Graph
- DTSN** Destination Advertisement Trigger Sequence Number
- EB** Enhanced Beacon
- ETX** Expected Transmission Count
- EWMA** Exponentially Weighted Moving Average
- FFD** Full Function Device
- GPRS** General Packet Radio Service
- GTS** Guaranteed Time Slots
- HART** Highway Addressable Remote
- HMI** Human Machine Interface
- HMS** Hardware Meets Software
- ICMPv6** Internet Control Message Protocol version 6
- IE** Information Element
- IEC** International Electrotechnical Commission
- IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers
- IETF** Internet Engineering Task Force
- IIoT** Industrial Internet of Things
- IdC** Internet de las Cosas
- IoT** Internet of Things
- iPCF** Industrial Point Coordination Function
- iPCF-MC** Industrial Point Coordination Function Management Channel

iPRP Industrial Paralell Redundancy Protocol

ISA International Society of Automation

JCR Journal Citation Reports

LE Low Energy

LLDN Low Latency Deterministic Networks

LLN Low-Power and Lossy Networks

LPM Low Power Mode

LPWAN Low Power Wide Area Networks

LQE Link Quality Estimator

LQI Link Quality Indicator

LQS Link Quality Score

LR-WPAN Low Rate Wireless Personal Area Networks

LTE Long Term Evolution

M2M Machine to Machine

MAC Medium Access Control

MIMO Multiple Input Multiple Output

mMTC massive Machine Type Communications

MOP Mode Of Operation

MPDU MAC Protocol Data Unit

MRHOF Minimum Rank with Hysteresis Objective Function

MU-MIMO Multiple User MIMO

NBE Non-Beacon Enabled

OF Objective Function

OF0 Objective Function Zero

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

OQPSK Offset Quadrature Phase-Shift Keying

P2P Peer to Peer

PCF Point Coordination Function

PDR Packet Delivery Ratio

PHY Physical

PRR Packet Reception Rate

QAM Quadrature Amplitude Modulation

RFC Request for Comments

RFD Reduced-Function Device

RFID Radio Frequency Identification

RPL IPv6 Routing Protocolo for Low-Power and Lossy Networks

RSSI Received Signal Strength Indicator

RTT Round Trip Time

SF Spreading Factor

TASA Traffic Aware Scheduling Algorithm

TSCH Time Slotted Channel Hopping

TSN Time-Sensitive Networking

UDP User Datagram Protocol

URLLC Ultra Reliable Low Latency Communications

UWB Ultra Wide Band

VoIP Voz sobre IP

VR Virtual Reality

WLAN Wireless Local Area Network

WPAN Wireless Personal Area Network

WSN Wireless Sensor Network

WWAN Wireless Wide Area Networks

Índice de figuras

1.1	Ejemplo de arquitectura de comunicaciones de un sistema WSN	3
2.1	Clasificación de tecnologías inalámbricas según su rango de cobertura	12
2.2	Arquitectura de comunicaciones bajo estudio	20
2.3	Principales topologías las redes LR-WPAN	22
2.4	Bandas de frecuencia del estándar IEEE 802.15.4	23
2.5	Superframe IEEE 802.15.4	25
2.6	Descripción de los diferentes tiempos que forman un <i>timeslot</i> en TSCH	30
2.7	Descripción de un <i>slotframe</i> en tiempo y frecuencia en TSCH	31
2.8	Evolución del Trickle Timer para un $I_{min} = 4s$ y $D = 6$	34
2.9	Proceso de formación DODAG RPL	35
3.1	Selección de ruta óptima según la métrica objetivo	38
3.2	Esquema de estimación de consumo mediante Powertrace	43
3.3	Topología de la red bajo estudio	46
3.4	Despliegue real	47
3.5	Comparación del tiempo de vida de las baterías	48
3.6	Perfiles de consumo de potencia obtenidos durante las pruebas	48
3.7	Tendencia de consumo de potencia del último nodo en consumir la batería del primer salto, mostrando desde 2 horas antes de que la primera batería de los nodos se agote, hasta que todos los nodos del primer nivel mueren	49
3.8	Formato del mensaje DIO	53
3.9	Mecanismo de obtención del número de saltos mediante mensajes de control RPL	53
3.10	Función de mapeo RSSI	54
3.11	Función de mapeo ETX	54
3.12	Función de mapeo número de saltos	55
3.13	Simulación de la red de 8 nodos utilizando la función de calidad	57
3.14	Pérdida de paquetes para las 5 configuraciones de O.F simuladas	59
3.15	Caracterización del delay para las 5 configuraciones de O.F. simuladas	60
4.1	Mecanismo de balizamiento y escaneo en TSCH	66
4.2	Mecanismo de intercambio de mensajes de control RPL y reinicio del Trickle Timer	68
4.3	Despliegue para la validación del modelo analítico con $N = 5$	74
4.4	Planificación de diferentes slotframes en Orchestra	75
4.5	Resultado de las simulaciones para TSCH	77
4.6	Resultados de las simulaciones para RPL	79
4.7	Resultados de las pruebas reales para validar el modelo analítico	81

4.8	Comparación entre intercambio de mensajes de control con un salto y multi-salto	82
4.9	Ejemplo de topología de una de las configuraciones bajo estudio	85
4.10	Configuraciones simuladas con un único salto y diferentes nodos interferentes	86
4.11	Configuraciones simuladas con dos saltos y diferentes nodos interferentes	86
4.12	Configuraciones simuladas con tres saltos y diferentes nodos interferentes	86
4.13	Evolución del valor de PDR en función del número de nodos interferentes, calculado de manera empírica	87
4.14	Resultados de las simulaciones para un salto	88
4.15	Respuesta multidimensional del tiempo de recepción del DAO para dos saltos	89
4.16	Resultados de las simulaciones para dos saltos	89
4.17	Respuesta multidimensional de las configuraciones de tres saltos	90
4.18	Detalle de la respuesta multidimensional para tres saltos: (a) Sección para 1 nodo interferente en el primer salto y 1 nodo interferente en el segundo; (b) Sección para 1 nodo interferente en el primer salto y 5 nodos interferentes en el segundo; (c) Sección para 5 nodos interferentes en el primer salto y 10 nodos interferentes en el segundo; (d) Sección para 10 nodos interferentes en el primer salto y 15 nodos interferentes en el segundo	90
4.19	Resultados de las simulaciones para tres saltos	91
5.1	Dirección de propagación de la sincronización en TSCH	97
5.2	Topología física para las simulaciones del mecanismo dinámico de balizas	98
5.3	Probabilidad éxito de sincronización y conexión para las simulaciones con diferente número de canales	102
5.4	Probabilidad de éxito de sincronización y conexión para diferente número de canales de escaneo	103
5.5	Probabilidad de éxito de sincronización y conexión para diferentes valores del periodo de transmisión de balizas	104
5.6	Número de paquetes enviados para diferentes configuraciones del periodo de transmisión de balizas	105
5.7	Tiempo de conexión para diferentes configuraciones del periodo de transmisión de balizas	106
5.8	Potencia consumida para diferentes configuraciones del periodo de transmisión de balizas	107
5.9	Potencia consumida para diferentes configuraciones del periodo de transmisión de balizas tras 100 horas de simulación	107
5.10	Ejemplo de una posible configuración de Bell-X (Interval min: 4s - Doublings: 4 - Valley factor:4 - Step factor: 4 - Peak factor: 8)	109
5.11	Evolución del periodo de transmisión de balizas y reinicio solicitado por las capas superiores	112
5.12	Compensación entre nodos del periodo de transmisión de balizas gracias a Bell-X	113
5.13	Topología física de las simulaciones de Bell-X	114
5.14	Configuraciones de la campana seleccionadas	116
5.15	Configuraciones utilizadas por defecto seleccionadas	118
5.16	Comparación estadística de las diferentes configuraciones simuladas en Bell-X	119
5.17	Número de balizas por segundo para diferentes configuraciones de Bell-X	120
5.18	Comparación de las diferentes configuraciones simuladas en cuanto a balizas por segundo	121
5.19	Tendencia de consumo durante un mes de operación para cada configuración	122
5.20	Factores clave de rendimiento para las diferentes configuraciones simuladas en Bell-X	122
A.1	Primera etapa de despliegue de un nodo	130
A.2	Segunda etapa de despliegue	131
A.3	Tercera etapa de despliegue	131
A.4	Cuarta etapa de despliegue	132
A.5	Propagación de los valores calidad en una red mallada	133

Índice de tablas

2.1	Diferencias capa física Bluetooth 5	13
2.2	Comparación de mecanismos de acceso al medio en IEEE 802.15.4e	29
3.1	Configuración de parámetros de comunicaciones	46
3.2	Configuración de parámetros de comunicaciones	47
3.3	Parámetros de configuración para las pruebas de calidad	56
4.1	Variables del modelo analítico relacionadas con la configuración de TSCH	70
4.2	Variables del modelo analítico TSCH	70
4.3	Variables del modelo analítico RPL	72
4.4	Configuración de las simulaciones	74
4.5	Configuración de la pila de protocolos	75
4.6	Parámetros de simulación para TSCH y RPL	76
4.7	Parámetros de configuración para las pruebas reales	80
4.8	Variables del modelo analítico RPL multisalto	83
4.9	Configuración de parámetros de la pila de protocolos	87
5.1	Parámetros de configuración para las simulaciones del mecanismo dinámico de balizas	98
5.2	Parámetros globales de las simulaciones	99
5.3	Test 1: Variación del número de canales	100
5.4	Test 2: Diferente número de canales para la fase de escaneo	100
5.5	Test 3: Diferentes configuraciones para el periodo de transmisión de EB	100
5.6	Test Extra: Diferentes intervalos de transmisión de mensajes DIS	100
5.7	Potencia consumida por los diferentes tipos de slots en TSCH	101
5.8	Parámetros de configuración para Bell-X	110
5.9	Parámetros de configuración de las simulaciones de Bell-X	114
5.10	Configuración de la pila de protocolos para las simulaciones de Bell-X	115
5.11	Parámetros de configuración para Bell-32 y Bell-65	116
5.12	Probabilidad de éxito de la sincronización/conexión para las simulaciones de Bell-X	119

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes y motivaciones

Durante las últimas décadas, nuestra sociedad ha experimentado grandes cambios gracias a diferentes avances tecnológicos y de nuevas formas de recoger, compartir, interpretar y representar la información. Todos estos avances han repercutido en nuestra calidad de vida: más seguridad, comodidad, comunicación y eficiencia en la interacción con nuestro entorno. Pero aún existe un enorme potencial de avance, que está generando una revolución en la forma de gobernar e interactuar con nuestras ciudades, en la eficiencia y calidad de los procesos de manufactura, o en la precisión y calidad de nuestros servicios de salud.

Las tecnologías como *Cloud* y *Big Data Analytics* son capaces de explotar grandes cantidades de datos y generar valor para multitud de sectores. Sin embargo, estas tecnologías van acompañadas de una enorme necesidad de conectividad con el mundo físico, es decir, con sensores y actuadores que ofrezcan un acceso inteligente y transparente a elementos de nuestro entorno.

Es aquí donde entra en juego el concepto de *Internet of Things* (IoT) [1] [2] [3], que surge para dotar de conectividad a Internet a cualquier tipo de objeto, permitiendo la interacción con el resto de dispositivos que lo rodean de forma directa. Las soluciones inalámbricas permiten dotar a gran cantidad de dispositivos de esta conectividad a internet de una manera sencilla y económica, cubriendo un amplio rango de aplicaciones gracias a diferentes rangos de cobertura: redes de área amplia, conocidas como *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), tanto en sus versiones de infraestructura privada (LoRa, LoRaWAN, IEEE 802.11ah) como pública (SigFox, NB-IoT, LTE MTC, 5G mMTC); o redes de área personal, conocidas como *Low Rate Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN), como los estándares IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.1.

Entre las soluciones LR-WPAN destacan las redes de sensores inalámbricas, que suponen un pilar fundamental para el desarrollo y asentamiento de los sistemas IoT en sectores como la agricultura, salud, gestión de ciudades e industria del futuro. En concreto, las *Wireless Sensor Networks* (WSN) de tipo mallado ofrecen una gran versatilidad, escalabilidad y conectividad, pero suponen todo un reto tecnológico para la comunidad científica. La complejidad que tiene el establecimiento de un gran número de conexiones, la gestión del tráfico y la calidad de servicio, añadido a las limitaciones de procesamiento, memoria y disponibilidad energética [4]

obstaculizan la penetración de estas tecnologías en el mercado. A estos inconvenientes se suman la falta de fiabilidad y robustez de estos enlaces inalámbricos, que serán factores limitantes en escenarios industriales: altas pérdidas de paquetes, interferencias, altas latencias, y la complejidad añadida que supone realizar este tipo de despliegues para personas sin conocimientos técnicos.

En los últimos años han aparecido diversas propuestas y protocolos [5], como el estándar IEEE 802.15.4e [6], que define las especificaciones de la capa física y la de control de acceso al medio, *Medium Access Control* (MAC). Este estándar permite el establecimiento de una conexión inalámbrica de baja tasa de datos entre dispositivos cuyas capacidades, en cuanto procesamiento y nivel de batería, son bastante limitadas. En él, se especifican diferentes mecanismos de acceso al medio, como por ejemplo *Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension* (DSME), para aplicaciones que requieran una alta disponibilidad y eficiencia, o el mecanismo *Low Latency Deterministic Network* (LLDN), muy útil cuando se necesitan topologías en estrella con una baja latencia. Pero sin duda, el mecanismo *Time-Slotted Channel Hopping* (TSCH) [7] destaca sobre el resto, debido a que está enfocado a satisfacer aquellas necesidades emergentes de las aplicaciones industriales utilizando dispositivos de bajo consumo. Esto se debe a que los nodos están sincronizados, permitiendo establecer una planificación de las transmisiones de manera garantizada, y también a su mecanismo de salto en frecuencia, que consigue reducir los efectos negativos debidos a las interferencias entre diferentes tecnologías de comunicaciones.

Aunque en el estándar están propuestos estos mecanismos y funcionalidades, en muchos otros aspectos, no se plantea ningún tipo de configuración ni optimización para que sus métodos sean más eficaces. Es el caso, por ejemplo, de la planificación de los recursos radio, ya que solo se propone una configuración de funcionamiento mínimo, empleando un *slot* temporal compartido. Este aspecto sigue siendo motivo de estudio, existiendo propuestas académicas para algoritmos centralizados (TASA [8]), algoritmos distribuidos (DeTAS [9] o WAVE [10]) y otras más recientes como el método de planificación autónomo de Orchestra [11]. Si bien estos mecanismos permiten construir una planificación que mejore la propuesta en el estándar, no consiguen obtener una solución optimizada, ya que deben cumplir una relación de compromiso entre el tráfico generado y la capacidad de reorganizarse rápidamente.

En el estándar tampoco se propone ningún esquema o configuración para el periodo de transmisión de balizas o *Enhanced Beacons* (EBs), necesarias para llevar a cabo la sincronización entre los nodos. Dependiendo de este periodo de transmisión, los nodos tardarán más o menos en sincronizarse con la red, debido a la complejidad que supone recibir una baliza cuando se están utilizando diferentes canales para transmitirlos. Por este motivo, los procesos de sincronización tienen un gran impacto en las fases de despliegue de una red de sensores. En primer lugar, porque permiten agilizar la puesta en marcha del sistema, debido a que hasta que los nodos no estén sincronizados no pueden establecer comunicación con ningún otro nodo de la red. En segundo lugar, también se consigue un ahorro significativo de energía, ya que se reduce el tiempo que permanecen escaneando hasta unirse a la red.

Otro de los protocolos considerado como estándar de facto en el desarrollo de las redes de sensores inalámbricas, es el protocolo de encaminamiento dinámico conocido como *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks* (RPL) [12], que permite construir una topología lógica libre de bucles utilizando las llamadas funciones objetivo. Para ello, se definen unas reglas con las que construir las diferentes rutas de encaminamiento, permitiendo actualizarlas dinámicamente. Además, para dotar a los dispositivos de la capacidad de acceder a internet, es necesario emplear mecanismos de adaptación como *IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network* (6LoWPAN), que comprimen las tramas IPv6 para que puedan ser transportados en los mensajes de IEEE 802.15.4.

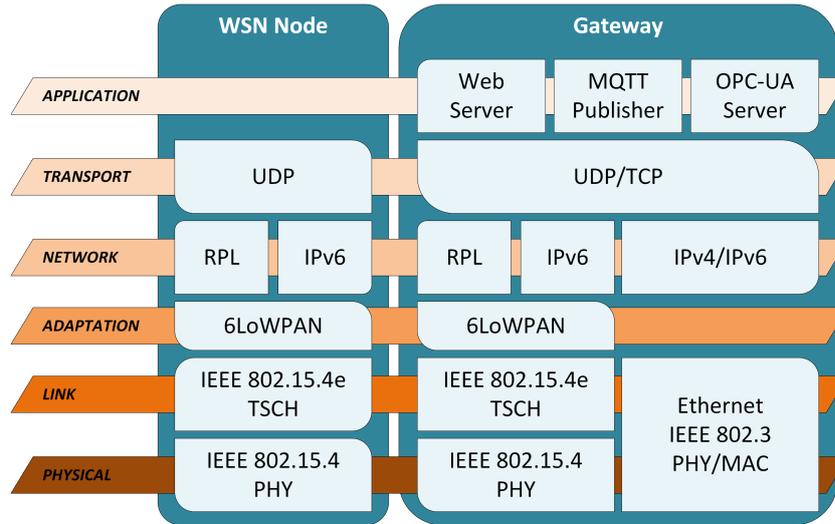


Figura 1.1: Ejemplo de arquitectura de comunicaciones de un sistema WSN

Este conjunto de protocolos permite establecer una arquitectura de comunicaciones sobre la que desplegar una WSN preparada para funcionar en entornos *Industrial Internet of Things* (IIoT), con requisitos de robustez y garantizando el cumplimiento de unos parámetros de calidad de servicio inalcanzables hasta ahora. En la figura 1.1 se puede ver un ejemplo de esta arquitectura de comunicaciones, donde los nodos inalámbricos dotan al sistema de capacidades de sensorización y actuación, mientras que la pasarela de comunicaciones permite interconectar con el resto de redes y sistemas de Industria 4.0. Esta arquitectura permite asentar las bases sobre las que trabajar y desarrollar soluciones completas, ya que sus protocolos presentan grandes posibilidades de mejora y optimización, mediante el desarrollo de nuevos mecanismos para las redes WSN de ámbito industrial.

1.2 Objetivos de la tesis

Los estudios realizados durante la tesis se han centrado en el mecanismo de acceso al medio TSCH, descrito en el estándar IEEE 802.15.4e, y en los mecanismos de encaminamiento del protocolo RPL, ya que se identificaron determinadas limitaciones que son susceptibles de mejora. Tras identificar estas limitaciones e inconvenientes, la tesis plantea una serie de diseños y mecanismos sobre estos protocolos, que permitan mejorar la rendimiento de las WSN en entornos industriales. Además, estos desarrollos también buscan reducir la complejidad de despliegue y gestión de estas redes, consiguiendo un sistema que requiera una mínima configuración y cuyo mantenimiento y reconfiguración se pueda realizar de manera autónoma.

A continuación, se detallan los objetivos principales de la tesis, comenzando por el estudio y selección de tecnologías, hasta la propuesta de diseño y mecanismos que permiten optimizar el funcionamiento de este tipo de redes inalámbricas de bajo consumo.

- Estudio y evaluación de tecnologías de comunicaciones LR-WPAN candidatas, que permitan cumplir con los requisitos de las redes de sensores inalámbricas en ámbito industrial. Se analizarán los mecanismos de acceso MAC más adecuados para industria, los protocolos de encaminamiento diseñados para trabajar con dispositivos de bajos recursos y metodologías o algoritmos de planificación de recursos radio para redes WSN. Será ne-

cesario seleccionar una plataforma de desarrollo y simulación en la que poder definir los experimentos y pruebas.

- Diseñar e implementar un mecanismo que permita gestionar de manera eficiente la utilización de las baterías de los dispositivos de una red WSN, gracias a la optimización de su topología física. Dadas las limitaciones en cuanto a la alimentación de estos dispositivos, gestionar el modo en que utilizan las baterías resulta ser una labor imperativa para conseguir maximizar el tiempo en que estas redes permanecerán en funcionamiento.
- Diseñar e implementar un mecanismo de evaluación de la calidad enfocado en optimizar diferentes aspectos de un enlace. Cada despliegue y aplicación tiene unos requisitos objetivo que debe optimizar para cumplir las especificaciones de diseño. Para llegar a una relación de compromiso entre diferentes aspectos de calidad del enlace, se ha diseñado un mecanismo de evaluación de la calidad multiparámetro, cuyo comportamiento es parametrizable para adaptarse a diferentes ámbitos de aplicación.
- Caracterizar el comportamiento del proceso de conexión, lo que incluye la fase de sincronización en TSCH y la unión a una topología de red RPL, a través de la definición de un modelo analítico. Este planteamiento servirá para validar determinados factores de rendimiento de las WSN, para poder compararlos de manera analítica con los resultados de las simulaciones y despliegues reales.
- Diseñar e implementar nuevos mecanismos que mejoren los tiempos de sincronización y conexión en redes TSCH. En el proceso de sincronización inicial intervienen numerosos factores que afectan a la rapidez en la que un nodo consigue recibir correctamente una baliza. Este proceso se puede alargar debido a que los nuevos nodos no conocen, a priori, ni en qué momento ni en qué canal se va a transmitir una baliza, por lo que van escaneando en diferentes canales hasta recibir una correctamente.

1.3 Publicaciones

A continuación se muestra un listado de las principales publicaciones realizadas en el marco de estudio de la presente tesis, incluyendo tanto artículos de divulgación científica, como participación en proyectos de investigación de financiación nacional y europea.

1.3.1 Artículos en revistas científicas

Clave: Revista indexada JCR		Factor Impacto: 2.809
Título: Deploy&Forget Wireless Sensor Networks for itinerant applications		
Autores: David Todolí-Ferrandis, Javier Silvestre-Blanes, Salvador Santonja-Climent, Víctor Miguel Sempere-Payá, José Vera-Pérez		
Revista: Computer Standards & Interfaces		
Editora: Elsevier		
Volumen: 56	Páginas: 27-40	Año: 2018
DOI: http://doi.org/10.1016/j.csi.2017.09.002		

Clave: Revista indexada en Google Scholar, Scopus y DOAJ		
Título: Path Quality Estimator for 802.15.4e TSCH Fast Deployment Tool		
Autores: José Vera-Pérez, David Todolí-Ferrandis, Salvador Santonja-Climent, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá		
Revista: Telfor Journal		
Volumen: 10	Páginas:	Año: 2018
DOI: https://doi.org/10.5937/telfor1801002V		

Clave: Revista indexada JCR		Factor Impacto: 3.031
Título: A Joining Procedure and Synchronization for TSCH-RPL Wireless Sensor Networks		
Autores: José Vera-Pérez, David Todolí-Ferrandis, Salvador Santonja-Climent, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá		
Revista: Sensors		
Editora: MDPI		
Volumen: 18 (10)	Páginas:	Año: 2018
DOI: https://doi.org/10.3390/s18103556		

Clave: Revista indexada JCR		Factor Impacto: 3.275
Título: Bell-X, An Opportunistic Time Synchronization Mechanism for Scheduled Wireless Sensor Networks		
Autores: José Vera-Pérez, David Todolí-Ferrandis, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá		
Revista: Sensors		
Editora: MDPI		
Volumen: 19 (19)	Páginas:	Año: 2019
DOI: https://doi.org/10.3390/s19194128		

Clave: Revista indexada JCR		Factor Impacto: 3.95
Título: TSCH and RPL Joining Time Model for Industrial Wireless Sensor Networks		
Autores: José Vera-Pérez, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá		
Revista: Sensors		
Editora: MDPI		
Volumen: 21 (11)	Páginas:	Año: 2021
DOI: https://doi.org/10.3390/s21113904		

Clave: Revista indexada JCR		Factor Impacto: 2.679
Título: Multihop latency model for Industrial Wireless Sensor Networks based on interfering nodes		
Autores: José Vera-Pérez, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá		
Revista: Applied Sciences		
Editora: MDPI		
Volumen: 11 (19)	Páginas:	Año: 2021
DOI: https://doi.org/10.3390/app11198790		

1.3.2 Artículos en congresos internacionales

Clave: Congreso internacional		
Título: Path Quality estimator for wireless sensor networks fast deployment tool		
Autores: José Vera-Pérez, David Todolí-Ferrandis, Salvador Santonja-Climent, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá		
Congreso: 25th IEEE Telecommunications Forum (TELFOR 2017)		
Lugar: Belgrado	Páginas: 1-4	Fecha: 22/11/2017
DOI: https://doi.org/10.1109/TELFOR.2017.8249284		

Clave: Congreso internacional		
Título: Safety and Security oriented design for reliable Industrial IoT applications based on WSNs		
Autores: José Vera-Pérez, David Todolí-Ferrandis, Víctor Miguel Sempere-Payá, Rubén Ponce-Tortajada, Gabriel Mujica, Jorge Portilla		
Congreso: 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2019)		
Lugar: Zaragoza	Páginas: 1774-1781	Fecha: 10/09/2019
DOI: https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869204		

Clave: Congreso internacional		
Título: Design of a micro-service based Data Pool for device integration to speed up digitalization		
Autores: Juan Carlos García-Ortiz, David Todolí-Ferrandis, José Vera-Pérez, Salvador Santonja-Climent, Víctor Miguel Sempere-Payá		
Congreso: 27th IEEE Telecommunications Forum (TELFOR 2019)		
Lugar: Belgrado	Páginas: 1-4	Fecha: 27/11/2019
DOI: https://doi.org/10.1109/TELFOR48224.2019.8971346		

1.3.3 *Proyectos de investigación*

Título del proyecto: DigitalTwins2: Gemelos digitales en la transición a la Industria 4.0
Entidad titular: Instituto Tecnológico de Informática
Entidad financiadora: IVACE
Fecha de inicio: 01/01/2018
Fecha de finalización: 31/12/2018

Título del proyecto: SCOTT: Secure COnnected Trustable Things
Entidad titular: Instituto Tecnológico de Informática
Entidad financiadora: European Commision; IVACE
Fecha de inicio: 01/05/2017
Fecha de finalización: 31/10/2020

1.4 Aportaciones de la tesis

Las aportaciones de la tesis se han dividido en dos aspectos bien diferenciados, centrados en diferentes propuestas de mejora del conjunto de protocolos utilizado en las redes WSN seleccionadas.

El primer aspecto se centra en analizar diferentes métricas de calidad del enlace, y como pueden ayudar durante el proceso de creación de las tablas de encaminamiento del protocolo RPL. En este tipo de redes malladas, las rutas se definen basándose en criterios que permiten comparar la calidad de cada enlace posible, por lo que escoger una métrica que optimice el comportamiento de las redes, según el ámbito de aplicación, resulta primordial en escenarios industriales. Esta evaluación de la calidad del enlace también resulta útil para otro tipo de tareas, como la selección de la mejor ubicación para instalar un dispositivo. El uso de la calidad del enlace como soporte para las tareas de despliegue se ha detallado en el Anexo I, donde se describe la solución *Deploy&Forget*, cuyo funcionamiento fue patentado en 2015 (P2015.300.39). El autor de la tesis no ha sido co-autor de esta patente, aunque los estudios y desarrollos han contribuido al desarrollo y mejora de la misma.

El segundo aspecto está centrado en optimizar el tiempo que estas redes necesitan para sincronizarse y formar las tablas de encaminamiento. La fiabilidad que consigue el mecanismo TSCH está basado en mantener una sincronización continua entre todos los dispositivos de la red, además de transmitir la información por diferentes canales para mitigar las interferencias. Este mecanismo, aunque mejora la fiabilidad de la red en estado estacionario, dificulta los procesos de despliegue y sincronización si se compara con otro tipo de mecanismos como el acceso al medio aleatorio. Por este motivo, el proceso de sincronización y puesta en marcha de redes basadas en TSCH sigue siendo motivo de estudio, ya que ni el proceso óptimo de sincronización ni la planificación a seguir quedan reflejados en el estándar.

A continuación, se detallan las principales aportaciones de esta tesis.

- Caracterización del uso de métricas de calidad para encaminamiento en WSN, como parámetros energéticos para extender la vida útil de la red
- Desarrollo de una función de calidad multi-parámetro
- Desarrollo de un modelo analítico del tiempo de sincronización TSCH y de formación de rutas ascendentes y descendentes en RPL
- Caracterización del proceso de puesta en marcha de redes basadas en TSCH-RPL
- Desarrollo de un mecanismo de balizamiento dinámico que agilice los procesos de sincronización en redes TSCH y RPL

1.5 Organización de la memoria

La memoria de la tesis ha sido estructurada teniendo en cuenta los diferentes desarrollos realizados con el objetivo de optimizar y mejorar diferentes aspectos de funcionamiento de las WSN en entornos industriales. A continuación, se detallan los contenidos de los diferentes capítulos que componen esta memoria.

- En el Capítulo 2 se realiza un análisis de diferentes tecnologías de comunicaciones inalámbricas según su rango de cobertura. En este resumen se muestran las principales características de cada una, valorando sus posibles aplicaciones en escenarios industriales. Tras este resumen, se profundiza en el estándar IEEE 802.15.4e y su mecanismo de acceso TSCH, así como el protocolo de encaminamiento RPL. Estos han sido los protocolos seleccionados para la implementación de una WSN robusta, y en los que estarán basados los diferentes desarrollos de esta tesis.
- El Capítulo 3 se centra en el estudio de diferentes métricas de calidad del enlace, evaluando el impacto que tienen a la hora de decidir la mejor ruta en una red WSN. Estas métricas permiten construir diferentes tablas de encaminamiento que optimicen el funcionamiento de las redes en un determinado ámbito de aplicación, favoreciendo rutas que maximicen el tiempo de vida de la red, una latencia menor o un enlace más fiable. Tras este análisis, se define un mecanismo de medida de calidad del enlace, basado en diferentes parámetros característicos del enlace, obteniendo una función objetivo parametrizable que optimice la selección de rutas en una red WSN.
- En el Capítulo 4 se detallan los procesos de sincronización de TSCH y de conexión al árbol RPL, destacando los problemas que conlleva utilizar la configuración de parámetros estática como la que propone el estándar. Además, para caracterizar este proceso de sincronización TSCH y conexión RPL, se define un modelo analítico para determinar el tiempo total de despliegue en base a diferentes parámetros de configuración, de tal forma que se pueda escoger una configuración óptima según el caso de uso.
- El Capítulo 5 se centra en evaluar el comportamiento de una red WSN a la hora de sincronizarse mediante TSCH y construir el árbol RPL, identificando que parámetros contribuyen a optimizar este proceso. A partir de estos resultados, se propone un mecanismo dinámico que modifica el periodo de transmisión de las balizas TSCH, consiguiendo agilizar el proceso de sincronización durante la fase de despliegue. Finalmente, se propone un mecanismo al que se ha denominado Bell-X, que consigue optimizar este proceso no solo durante la fase de despliegue, sino también durante el estado estacionario de la red.
- En el Capítulo 6 se detallan unas conclusiones finales a todo el proceso de investigación llevado a cabo durante la tesis. Además, se muestran algunas líneas de posibles trabajos futuros y tecnologías que marcarán un nuevo hito en las comunicaciones en industria.

Estado del arte de redes inalámbricas industriales

2.1 Tecnologías de comunicaciones inalámbricas industriales

En el ámbito industrial, las comunicaciones son un elemento fundamental a la hora de interconectar equipos o redes, así como poder sensorizar diferentes elementos que forman parte de un proceso industrial. Sin embargo, en la cuarta revolución industrial, la conectividad entre sistemas o dispositivos alcanza nuevos requisitos, planteando escenarios en los que exista comunicación entre todas las cosas, dispositivos, personas, etc.

En los últimos años, las redes de comunicaciones que están desplegadas en la industria han ido evolucionando desde los protocolos basados en buses de campo hasta las tecnologías basadas en Industrial Ethernet. Según HMS Networks [13], se estima que los protocolos basados en Industrial Ethernet van a suponer un aumento del 8% respecto al último año, llegando a representar un 65% del mercado industrial en 2021. Por otro lado, los protocolos basados en buses de campo están cada vez menos presentes, pasando de un 71% en 2014 a una estimación del 28% en 2021. Sin embargo, las tecnologías inalámbricas son las que mayor crecimiento están teniendo en los últimos años, con un incremento del 24% en el último año, llegando a representar un 7% del mercado. Se espera que este crecimiento aun sea mayor con la llegada de las redes 5G, cuyo uso en industria está despertando gran interés.

En la nueva era de la digitalización, las comunicaciones inalámbricas abarcan un amplio abanico de posibilidades debido a la gran variedad de tecnologías existentes, desde soluciones de bajo consumo pensadas para los equipos que requieran de mayor movilidad hasta los despliegues celulares pensados en interconectar todo tipo de dispositivos, de cara a las nuevas interacciones que plantean las redes 5G. Toda esta variedad en cuanto a soluciones de comunicación ha abierto camino a diferentes conceptos de hiperconectividad, en el que cualquier equipo o dispositivo puede estar conectado a la red, el llamado *Internet of Things* (IoT).

En la figura 2.1 se muestra una clasificación de tecnologías de comunicación inalámbricas según su rango de cobertura, desde comunicaciones de proximidad hasta enlaces de varias decenas de kilómetros.

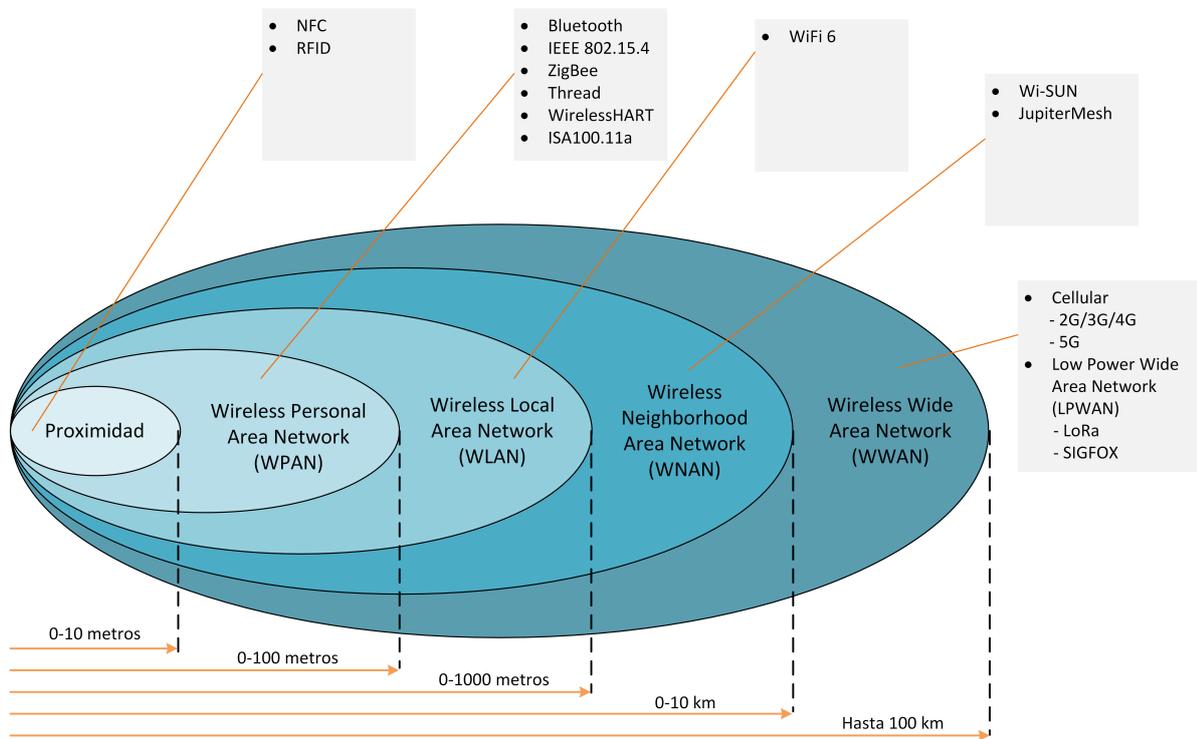


Figura 2.1: Clasificación de tecnologías inalámbricas según su rango de cobertura

A continuación, se muestra un breve estado del arte en el que se describen diferentes tecnologías de comunicaciones inalámbricas, clasificadas según su rango de cobertura. Este resumen está centrado en las posibles aplicaciones industriales que tiene cada tecnología, mostrando las prestaciones más características de cada una de ellas. De este estudio se han obviado aquellas tecnologías de comunicaciones de proximidad, ya que, en la mayoría de casos, no están pensadas para el intercambio constante de información.

2.1.1 Redes inalámbricas de área personal (WPAN)

Todas estas tecnologías son las que se encuentran dentro de la norma 802.15 del *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Normalmente los dispositivos que utilicen estas tecnologías de área personal tendrán un alcance de decenas de metros, aunque con algunas de las tecnologías es posible crear redes malladas que puedan interconectar dispositivos que estén más alejados.

Bluetooth

Una de las tecnologías de comunicaciones de área personal más usadas es la tecnología Bluetooth. Debido a su versatilidad y bajo coste, está ampliamente integrada por multitud de dispositivos como ordenadores, *smartphones* o *wereables*.

Las especificaciones técnicas de esta tecnología vienen definidas en el estándar IEEE 802.15.1, donde se detallan sus requisitos a nivel de acceso al medio y capa física. Si bien su objetivo original era la interconexión de equipos y periféricos, el protocolo ha ido evolucionando y ampliando su ámbito de aplicación, proponiendo la especificación de Bluetooth Low Energy (BLE) para establecer una comunicación entre dispositivos con restricciones de consumo energético.

Con la revisión del protocolo BLE integrada en la versión 5.0, esta tecnología ha despertado gran interés no solo en el ámbito de tecnología de consumo, sino que también resulta relevante su implementación en escenarios industriales en los que premia el bajo consumo energético y la fiabilidad de las comunicaciones [14] [15].

Esta nueva versión propone algunas mejoras como la ampliación del tamaño máximo de payload, así como optimizar los mecanismos de capa física. Para implementar estas optimizaciones, además de mantener la compatibilidad con versiones anteriores, se han propuesto tres modos de funcionamiento. A continuación, se muestran las diferentes capas físicas definidas en Bluetooth 5.0:

- **LE 1M:** Se trata de la capa física utilizada en Bluetooth 4.0, utilizada como modo estándar para asegurar la compatibilidad con versiones anteriores.
- **LE 2M:** Esta capa física permite operar a 2 Msamp/s, lo que permite incrementar la tasa de transferencia de datos respecto a la versión anterior de la tecnología.
- **LE Coded:** Este modo de funcionamiento de la capa física permite que el rango de cobertura sea hasta cuatro veces mayor si se compara con la versión de Bluetooth 4.0. Su funcionamiento se basa en añadir más símbolos por bit transmitido, lo que permite aplicar técnicas de corrección de errores al recibir el mensaje. Este modo permite configurar el número de símbolos por bit ($S = 2$ o $S = 8$). Cuanto más símbolos mayor capacidad de corrección y alcance,

En la tabla 2.1 se recogen las principales características de Bluetooth 5.

Tabla 2.1: Diferencias capa física Bluetooth 5

	LE 1M	LE Coded $S = 2$	LE Coded $S = 8$	LE 2M
Tasa de símbolos	1 Msamp/s	1 Msamp/s	1 Msamp/s	2 Msamp/s
Tasa de datos	1 Mbit/s	500 Kbit/s	125 Kbit/s	2 Mbit/s
Detección de errores	CRC	CRC	CRC	CRC
Corrección de errores	No	FEC	FEC	No
Multiplicador de rango	1	2	4	0.8

El protocolo BLE está en constante revisión, incluyendo diferentes características y mejoras como el control de potencia, o la capacidad de obtener el ángulo de recepción, *Angle of Arrival* (AoA), o de emisión, *Angle of Departure* (AoD). Esta última característica permite implementar sistemas de posicionamiento y localización a partir de las versiones BLE 5.1 y 5.2 [16].

Bluetooth también ha añadido mejoras para permitir las comunicaciones mediante redes mallas. A diferencia de otros protocolos mallas, Bluetooth Mesh utiliza un mecanismo de inundación para su envío de mensajes, lo que permite, aunque de manera poco eficiente, conseguir una alta fiabilidad y una buena opción para transmisiones urgentes de datos.

IEEE 802.15.4: ZigBee, Thread, WirelessHART, ISA100.11a

Bajo el estándar IEEE 802.15.4 se pueden encontrar diferentes tecnologías de comunicaciones que definen el comportamiento de los niveles superiores de la pila de protocolos, ya que el estándar IEEE 802.15.4 únicamente se centra en el nivel físico y el nivel de acceso al medio. Entre estas tecnologías se pueden encontrar el protocolo ZigBee [17] o Thread [18], cuyo ámbito de aplicación se centra más en escenarios de *Smart Home*, o también WirelessHart [19] o ISA100.11a [20], que se centran más en aplicaciones de rango industrial gracias a su alta fiabilidad

En su origen, el protocolo ZigBee era un sistema ideal para ser utilizado en redes domóticas y fue desarrollado para poder cubrir la demanda del mercado de un sistema de bajo coste, que permitiera construir redes inalámbricas para transmitir pequeños paquetes de información, empleando para ello un bajo consumo y una comunicación segura y fiable.

La especificación ha ido mejorando con posteriores revisiones, como ZigBee PRO que mejoraba el rendimiento de esta tecnología en entornos más críticos, pensando así en aplicaciones industriales. Esto se debe a que la primera versión de ZigBee utilizaba una única frecuencia para establecer la comunicación en toda la red, siendo así susceptible a interferencias. Por este motivo se implementaron algunas características que permitían aportar mayor flexibilidad a la hora de seleccionar la frecuencia de comunicación, permitiendo cambiar si el canal no dispone de la suficiente calidad para mantener una comunicación fiable. Además, en los últimos años se han añadido nuevas funcionalidades como que se permita que los dispositivos ZigBee pueda ser utilizados en redes IPv6, o también que se puedan utilizar protocolos de encaminamiento como RPL.

Thread es un protocolo de encaminamiento para dispositivos IoT de baja potencia que permite conectar con redes IPv6. Está basado en la versión de 2006 del estándar IEEE 802.15.4, al igual que ocurre con otras tecnologías como ZigBee. Las principales características que hacen destacar a Thread sobre otras tecnologías como ZigBee, Z-Wave y Bluetooth LE es que está diseñado para ser sencillo de instalar, iniciar y funcionar de manera desatendida. Además, utiliza técnicas de espectro ensanchado para mejorar su inmunidad frente a interferencias. Según se puede ver en las especificaciones de Thread, ninguno de los equipos que forman una red puede representar un punto único de avería, pudiendo reemplazar dicho dispositivo sin tener un impacto directo en las comunicaciones de la red. Los nodos inalámbricos almacenan varias rutas alternativas, de tal forma que si un nodo retransmisor supone un punto de fallo, la red pueda utilizar estas rutas redundantes para seguir transmitiendo información.

Más enfocado en el ámbito industrial se encuentra WirelessHART, que es una extensión del protocolo *Highway Addressable Remote Transducer* (HART) que lo habilita para establecer comunicaciones inalámbricas. Este estándar fue el primero en implantarse como tecnología para formar redes de sensores inalámbricos (WSN) en entornos industriales, obteniendo además un

reconocimiento internacional por parte del *International Electrotechnical Commission* (IEC). Mediante este protocolo de comunicaciones es posible construir redes inalámbricas ad hoc, donde los nodos establecen una red mallada, permitiendo conectar dispositivos que no tienen porque encontrarse dentro de la misma área de cobertura. Su diseño está basado en unos requisitos que permitan operar a la red de sensores en entornos industriales, consiguiendo que las redes sea auto-gestionen ante cambios topológicos, fácilmente escalables, fiables en entornos con interferencias y compatibles con toda la tecnología HART ya existente.

En el ámbito industrial también se encuentra el protocolo ISA 100.11a, que fue desarrollado por la *International Society of Automation* (ISA) y posteriormente estandarizado por la IEC (IEC 62734). En ISA100.11a se define la pila de protocolos completa, así como la administración del sistema y las funciones de seguridad que pueden ser implementadas para desplegar redes inalámbricas de baja potencia y baja tasa de transferencia de datos. Al igual que WirelessHART, basa el nivel físico en el estándar IEEE 802.15.4, pero determina que las capacidades del acceso al medio no cumple con los requisitos necesarios para trabajar en escenarios industriales. Por este motivo, el estándar implementa sus propias funciones y mecanismos para mejorar la fiabilidad y robustez de la tecnología en escenarios industriales.

Las especificaciones de WirelessHART, junto a ISA100.11a, fueron las que identificaron que el estándar IEEE 802.15.4 no tenía unas características aceptables para aportar la fiabilidad y la robustez que se requieren en aplicaciones industriales. Por este motivo, ambas optaron por definir sus propios mecanismos, utilizando parte del nivel de acceso al medio de IEEE 802.15.4. Las implementaciones de estos estándares industriales fueron los que motivaron el lanzamiento de la enmienda IEEE 802.15.4e, que recoge ideas básicas que aportan estas tecnologías para que pasen a formar parte de la definición de los mecanismos de acceso al medio.

2.1.2 Redes inalámbricas de área local (WLAN)

Las redes inalámbricas de área local o *Wireless Local Area Networks* (WLAN), son redes que pueden llegar a tener un alcance de varios cientos de metros, por lo que su uso suele centrarse en entornos domésticos y de oficina. Este tipo de redes suelen utilizar bandas de frecuencia sin licencia, como la de 2.4GHz. Originalmente estaban pensadas para alcanzar grandes tasas de transferencia de datos, aunque recientemente han salido versiones de baja potencia que permiten enviar información con tasas de transferencia más reducidas.

WiFi

Las tecnologías que se recogen en el grupo de estándares bajo la denominación de IEEE 802.11 están destinadas a comunicaciones inalámbricas de área local. Aunque Wi-Fi es una marca comercial bajo el amparo de la Wi-Fi Alliance, su diseño está basado en las especificaciones del estándar IEEE 802.11, y ha ido evolucionando a lo largo de los años desarrollando diferentes versiones de la tecnología. Las primeras versiones, aunque ya obsoletas, pretendían ofrecer conexiones inalámbricas en entornos de oficina y domésticos, pero debido al incremento del número de dispositivos y de una necesidad de mayores velocidades, el estándar ha ido evolucionando hacía algo más complejo.

En las versiones 802.11b y 802.11a se podían alcanzar velocidades 11 Mbps y 54 Mbps respectivamente, la primera trabajando en la banda de 2.4 GHz y la segunda para la banda de 5 GHz. Aunque estas dos versiones fueron lanzadas de manera casi simultánea, no eran compatibles entre sí hasta versiones posteriores. Con la versión que trabaja en la banda de 2.4 GHz se puede

llegar a tener un alcance estimado de unos 50 metros en interiores, mientras que la versión que trabaja a 5 GHz su alcance se ve reducido hasta los 10-20 metros aproximadamente.

La versión 802.11n fue diseñada para mejorar las prestaciones de las anteriores versiones, incrementando las técnicas de modulación y por tanto los anchos de banda soportados, e introduciendo una nueva tecnología de antenas llamada *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). En esta versión es posible establecer comunicaciones tanto en la banda de 2.4 GHz como en la de 5 GHz, consiguiendo velocidades teóricas de hasta 600 Mbps, además de mejorar el alcance de las versiones anteriores del estándar.

Con la siguiente generación de Wifi, 802.11ac, incluía la tecnología inalámbrica de doble banda, soportando conexiones simultáneas en la banda de 2.4 GHz y en la de 5 GHz. Esta versión permite alcanzar velocidades de 1300 Mbps en la banda de 5 GHz añadidos a los 450 Mbps que se pueden conseguir en la banda de 2.4 GHz.

La última generación del estándar, IEEE 802.11ax, permite incrementar la capacidad, la cobertura y el rendimiento en escenarios con alta densidad de dispositivos, además de mejorar su eficiencia energética. Estas características amplían el ámbito de aplicación de estas redes, empleándose en sistemas como *Smart Home* y dispositivos IoT. Entre las mejoras que añade esta versión respecto a las anteriores se pueden destacar las siguientes:

- Añade técnicas de modulación OFDMA.
- Añade esquemas de modulación de hasta 1024-QAM.
- Añade MU-MIMO bidireccional.
- Mayor rango de duración de símbolo para mejorar la eficiencia.

Sin embargo, el uso de este tipo de redes en escenarios industriales tiene unos requisitos más estrictos que para su uso en escenarios domésticos. Las principales diferencias entre el uso de WiFi en escenarios domésticos e industriales son:

- El tamaño de los datos transmitidos es menor. La información que se transmite en industria es mucho más reducida, ya que no está centrada en mover grandes volúmenes como vídeo.
- La fiabilidad de las comunicaciones ha de ser mayor en escenarios industriales. El intercambio de datos entre diferentes equipos debe ser preciso y fiable, ya que de ello dependen muchos de los procesos industriales que se desarrollan en planta.

Para conseguir estas características más orientadas a industria, se han propuesto diferentes mecanismos de acceso al medio, que hacen que el intercambio de información en redes WLAN sea más determinista y fiable. Mediante el mecanismo de acceso al medio *Point Coordination Function* (PCF), un punto de acceso WiFi puede actuar como coordinador de las comunicaciones dentro de la red, permitiendo establecer una comunicación libre de contienda gracias a la sincronización de los clientes. Además, se han propuesto modificaciones sobre el mecanismo PCF, para hacer que las comunicaciones inalámbricas sean más fiables y eficientes.

- *Industrial Point Coordination Function* (iPCF). Mediante esta característica se reorganizan las comunicaciones de manera cíclica, reservando espacio de manera organizada para todos los clientes de la red. Esto permite reducir también los tiempos de transmisión, lo que facilita el *roaming* entre dos puntos de acceso para realizar el cambio más rápidamente.

- Industrial Point Coordination Function Management Channel (iPCF-MC). Este método está especialmente planteado para comunicaciones con clientes móviles. Los clientes están continuamente escaneando el medio para detectar si hay puntos de acceso alternativos a los que poder conectarse. Esto se consigue utilizando dos enlaces inalámbricos de manera simultánea, uno para mantener una transmisión de señalización cíclica y otra para datos.
- Industrial Parallel Redundancy Protocol (iPRP). Para conseguir comunicaciones inalámbricas más fiables, se hace uso de enlaces inalámbricos redundantes mediante esta funcionalidad.

En la actualidad, las aplicaciones que requieren de enlaces de comunicaciones inalámbricos demandan cada vez más soluciones que permitan garantizar unos altos niveles de fiabilidad, además de tener unos niveles de latencia acotados y suficientemente bajos como para garantizar una respuesta rápida. Aplicaciones como la realidad aumentada o virtual (AR/VR) son solo algunos ejemplos de aplicación que requieren de estas garantías de rendimiento para este tipo de redes.

Enfocados en mejorar todos estos aspectos técnicos, se definen una serie de estándares recogidos bajo el termino de *Time-Sensitive Networking* (TSN), desarrollados por el grupo de trabajo IEEE 802.1 TSN. Este conjunto de estándares se encargan de desarrollar tecnologías centradas en garantizar que redes de área local tengan una distribución de tiempos precisa, con una entrega de datos con latencia limitada y unas pérdidas debidas a la congestión nulas. Este conjunto de estándares se ha aplicado en redes basadas en *ethernet*, aunque ya se han definido especificaciones para utilizar este tipo de tecnologías sobre comunicaciones inalámbricas como WiFi o 5G [21]. Los miembros de la AVNU Alliance han sido los encargados de definir las especificaciones que tiene que tener esta tecnología, tanto en redes WiFi como en redes 5G, así como determinados casos de uso y una hoja de ruta para su proceso de estandarización.

Algunos de los estándares en los que se basa TSN permiten que las redes basadas en Ethernet cumplan con diferentes requisitos industriales, como una alta fiabilidad y una latencia reducida.

- IEEE Std 802.1AS-2020: *Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications*.
- IEEE Std 802.1AX-2020: *Link Aggregation*.
- IEEE Std 802.1CB-2017: *Frame Replication and Elimination for Reliability*.

2.1.3 Redes inalámbricas de área amplia (WWAN)

En este grupo de tecnologías de comunicaciones inalámbricas se encuentran todas aquellas que tienen un largo alcance, que supera las decenas de kilómetros. Entre estas tecnologías se pueden encontrar las comunicaciones celulares y algunas más recientes orientadas al mundo del IoT.

Redes celulares

Las redes de comunicaciones celulares están ampliamente extendidas en la actualidad, tanto para tecnología de consumo como para aplicaciones industriales que requieran de una amplia conectividad utilizando la gran infraestructura ya desplegada por esta tecnología. A partir del despliegue de GPRS, las redes de comunicaciones celulares han sido capaces no solo de emplearse para establecer llamadas telefónicas, sino que también han servido para intercambiar diferentes servicios de datos. Actualmente es este último el que ha acabado predominando, ya que incluso las llamadas pueden ser encapsuladas en servicios como VoIP.

Pero no ha sido hasta el despliegue de las redes móviles de cuarta generación, conocidas como *Long Term Evolution* (LTE), que las velocidades de transferencia han llegado a superar 1 Gbps, lo que ha revolucionado las comunicaciones móviles mediante la proliferación de numerosos servicios y aplicaciones como los servicios de mensajería instantánea o las redes sociales.

Actualmente estas tecnologías están evolucionando hacia las redes de quinta generación, o 5G, y prometen mejorar considerablemente todos los aspectos de conectividad que tienen las actuales infraestructuras, permitiendo conseguir altas velocidades de transferencia y la posibilidad de conectar cualquier tipo de dispositivo a la infraestructura.

Las comunicaciones industriales mediante tecnologías 5G van a permitir interconectar cualquier tipo de dispositivo gracias a su gran versatilidad, beneficiándose de las altas velocidades de transferencia, la fiabilidad y las bajas latencias que aportan estas tecnologías [22] [23]. Es por esto que se ha creado una alianza global de empresas enfocados en impulsar la tecnología 5G en escenarios industriales, la *5G Alliance for Connected Industries and Automation*. Las redes 5G plantean un nuevo paradigma para la Industria 4.0, ya que en las últimas releases del 3GPP se plantea el uso de redes 5G para uso privado, empleando bandas de frecuencias reservadas y una infraestructura propia. En base a estas especificaciones, se han propuestos algunos casos de uso que son estratégicos en escenarios industriales, el denominado *Massive and Critical Machine Type Communications* (mMTC), enfocado en conectar una gran cantidad de dispositivos con unas garantías de fiabilidad, y también las *Ultra Reliable Low Latency Communications* (URLLC), centradas en conseguir enlaces con muy baja latencia para intercambio de información en tiempo real.

LoRaWAN

La tecnología LoRa fue diseñada para satisfacer el incremento de la demanda de tecnologías de comunicaciones con un bajo consumo y largo alcance, centrándose principalmente en los niveles físicos y de acceso al medio de la pila de protocolos. Su alcance va desde unas decenas de metros hasta varios kilómetros, por lo que según la figura 2.1 sería una red entre WMAN y WWAN. Para conseguir estos alcances sin necesitar grandes potencias de transmisión utilizan una tecnología de modulación, llamada *Chirp Spread Spectrum* (CSS), que ha sido desarrollada por Semtech y que permite recuperar señales que se encuentren por debajo del nivel de ruido. Esta característica hace que sea una tecnología de comunicaciones inalámbrica muy robusta, por lo que despierta gran interés en aplicaciones industriales [24] [25].

LoRa permite utilizar diferentes frecuencias en la banda sub-GHz, que le permiten establecer enlaces a grandes distancias. En Europa están definidas las bandas ISM de 868 MHz, 433 MHz y 169 MHz. LoRaWAN es el protocolo de red que utiliza la tecnología LoRa, lo que permite gestionar los dispositivos LoRaWAN que se conectan en estrella, a través del uso de un servidor de red y un servidor de aplicación. LoRaWAN define tres tipos de dispositivos según el tipo de comunicación que realiza con el servidor:

- Nodos de clase A: Permite la comunicación bidireccional entre el dispositivo y el servidor, utilizando unas ventanas fijas para recibir la respuesta del servidor.
- Nodos de clase B: Es una extensión de la clase A, que añade la posibilidad de recibir información de manera planificada, utilizando para ello una serie de balizas.
- Nodos de clase C: Es una extensión de la clase A, que permite extender las ventanas de recepción, lo que hace que sea especialmente útil para aplicaciones que requieran baja latencia, a costa de un mayor consumo.

Mediante el uso de esta tecnología de comunicaciones es posible llegar a tener enlaces que alcanza hasta los 10 km, dependiendo del ancho de banda utilizado y del factor de ensanchamiento de los símbolos, o *Spreading Factor*. Este gran alcance, junto a la alta fiabilidad que consigue mediante su modulación, recuperando señales por debajo del nivel de ruido, permiten que esta tecnología sea idónea para aplicaciones de telemetría en aplicaciones industriales que no requieran de una alta tasa de transferencia de datos.

2.2 Tecnologías de comunicaciones seleccionadas

En la sección anterior se han visto algunas de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas más características según su rango de cobertura. Estas tienen diferentes especificaciones y características, que hacen que sean más relevantes dependiendo del ámbito de aplicación al que esté orientado el sistema. Escenarios como las *Smart Cities* requieren principalmente de un gran alcance, paquetes pequeños y una larga duración de las baterías, lo que motiva a utilizar una baja tasa de envío. En el caso de monitorizar un proceso industrial, los enlaces entre dispositivos no requieren de un gran alcance, pero su fiabilidad y disponibilidad se vuelven más relevantes.

La implantación de nuevos sistemas de Industria 4.0 comienza por un gran proceso de digitalización de los procesos involucrados en planta, con el fin de dotar de mayor información a tecnologías como *Big Data Analytics*. Este proceso de digitalización se consigue a través del despliegue de tecnologías como las WSN, ya que permiten enriquecer la información que se obtiene de un proceso mediante el despliegue de una gran cantidad de dispositivos que tengan un bajo consumo energético. Dado que se trata de un escenario industrial, no solo basta con monitorizar una gran cantidad de sensores, sino que la información debe de obtenerse de manera fiable y con garantías de calidad de servicio.

Las redes del tipo LR-WPAN, y en concreto las de tipo mallado, cuentan con características que las hacen especialmente relevantes en sectores de tipo industrial, ya que gracias a su topología permite establecer enlaces entre un nodo y el coordinador o pasarela a una distancia suficiente como para cubrir cualquier tipo de escenario industrial. Además, gracias a que dos nodos pueden intercambiar información sin necesidad de tener visión directa entre ellos, es posible desplegar redes que cubran cualquier tipo de escenario con objetos interferentes, ya que es posible añadir nodos retransmisores que permitan sobrepasar obstáculos.

En cuanto a los requisitos más relacionados con aplicaciones industriales como los procesos de fabricación o las tareas de monitorización, la norma IEC 62264 define unos requisitos básicos que deben de cumplir este tipo de redes:

- Monitorización de procesos basados en flujos de datos: latencia 100 ms, probabilidad de pérdidas por debajo del 10%-6% y número de dispositivos por debajo de 30.

- Control de supervisión: latencia 10 s, probabilidad de pérdida por debajo del 10%-6% y número de dispositivos por debajo de 100.
- Monitorización de trabajos en fábrica: latencia 100 ms, probabilidad de pérdidas por debajo del 10%-7% y número de dispositivos por debajo de 10.

Tecnologías como Bluetooth tienen su propia versión mallada, conocida como Bluetooth Mesh. Sin embargo, una de las tecnologías cuyo desarrollo ha estado orientado al sector industrial ha sido el estándar IEEE 802.15.4. Protocolos como WirelessHART o ISA100.11a, basados en las capas física y MAC de IEEE 802.15.4, están ampliamente extendidos en industria. El uso del mecanismo TSCH, permite que toda la red esté sincronizada y siga una misma planificación, y gracias al uso del mecanismo de salto en frecuencia, se consigue una alta fiabilidad y una protección ante interferencias, que son especialmente relevantes en un escenario industrial. El método TSCH es uno de los mecanismos estudiados en este trabajo, por lo que se explica en detalle su funcionamiento más adelante.

Esta tecnología ha sido seleccionada para llevar a cabo la labor de investigación, ya que además de cumplir con los requisitos de robustez, permite obtener tasas de transferencia y latencias que cubren un amplio rango de aplicaciones que se pueden encontrar en el ámbito industrial. A través de su planificación de recursos radio, y de una limitación en el máximo número de saltos en la red, es posible acotar estos parámetros de funcionamiento, pudiendo llegar a configurar una planificación libre de interferencias entre los nodos que forman la red WSN.

Además del estándar IEEE 802.15.4, que cubre los niveles de capa física y de acceso al medio, se han utilizado otros protocolos para completar la arquitectura de comunicaciones de una WSN. En la figura 2.2 se puede ver la arquitectura de comunicaciones completa. De estos protocolos, uno de los que más relevancia tiene es el protocolo de encaminamiento RPL, ya que será el que coordine la formación de las topologías de la red WSN y sobre el que se han desarrollado diferentes mecanismos de mejora. También se han utilizado otros protocolos como 6LoWPAN, que sirve como capa de adaptación entre las tramas IEEE 802.15.4 e IPv6. Su funcionamiento principal permite comprimir las tramas IPv6, eliminando algunos de los campos que no son de utilidad en redes LR-WPAN, permitiendo que este tipo de redes sean interoperables con cualquier otro sistema basado en IP.

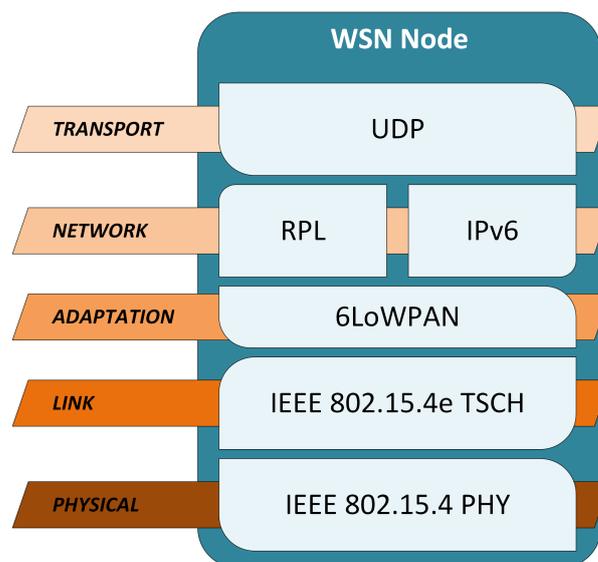


Figura 2.2: Arquitectura de comunicaciones bajo estudio

En las siguientes secciones se va a profundizar en los principales protocolos bajo estudio: el estándar IEEE 802.15.4, junto al mecanismo de acceso al medio TSCH y el protocolo de enrutamiento RPL. Estos protocolos serán la base de los desarrollos y estudios que aparecen posteriormente en este trabajo.

2.2.1 Estándar IEEE 802.15.4

El objetivo del grupo de trabajo IEEE P802.15 era definir un estándar que permitiera establecer comunicaciones de bajo coste utilizando dispositivos de bajo consumo. El estándar inicial, IEEE Std 802.15.4-2003, definía únicamente dos opciones de capa física (PHYs), operando en diferentes bandas de frecuencia empleando un control de acceso al medio simple y efectivo. En el año 2006 se realizó la primera revisión del estándar, añadiendo dos opciones más a la capa física. Esta revisión del estándar es compatible con las versiones anteriores, pero añade un nuevo formato de trama, así como diferentes métodos de acceso al medio y mejoras generales. A continuación, se listan algunas de estas mejoras:

- Soporte para una base de tiempos compartida con un mecanismo de marcado temporal de los datos.
- Soporte para planificación de balizas o *beacons*.
- Sincronización a través de mensajes *broadcast* en redes de área personal (PAN) en el modo de *beacons* habilitado.
- Mejoras a nivel de seguridad en capa MAC.

En 2011, el estándar se volvió a revisar para añadir las tres correcciones que se realizaron después de la revisión de 2006, añadiendo cuatro opciones más a la capa física y algunas capacidades a nivel de MAC. La revisión actual del estándar es la aprobada en el año 2015, IEEE Std 802.15.4-2015 [8], que recoge todas las correcciones realizadas desde el año 2011, incluyendo la enmienda IEEE 802.15.4e-2012 donde se incluyen diferentes modos de operación como TSCH.

El objetivo de este estándar, tal como está definido en el documento, es definir las especificaciones de la capa física (PHY) y las subcapas de control de acceso al medio (MAC) para establecer una conexión inalámbrica de baja tasa de datos entre dispositivos fijos y móviles con requisitos de consumo de batería muy limitados. Además, el estándar proporciona diferentes modos de operación. La capa física está definida para dispositivos que operan en varias bandas de frecuencia que no requieren licencia, en una variedad de regiones geográficas.

El estándar está orientado al establecimiento de comunicación en redes de área personal de baja tasa de datos (LR-WPAN). Este tipo de redes de comunicaciones de bajo coste computacional y bajo consumo energético, permiten diseñar aplicaciones, mediante enlaces inalámbricos, con una gran cantidad de dispositivos que envíen información a una tasa de datos moderada. En este tipo de redes pueden participar principalmente dos tipos de dispositivos:

- *Full-Function Device* (FFD): Implementan todas las características que puedan tener estos dispositivos, permitiendo así que ejerzan el papel de coordinador de la red y siendo capaces de actuar como nodos intermedios para retransmitir la información de sus vecinos hacia su destino.
- *Reduced-Function Device* (RFD): tienen limitadas sus funciones, permitiendo así optimizar su ciclo de trabajo con un número de tareas reducidas, lo que permite alargar la vida

de sus baterías. Su objetivo es dotar a la red de capacidades sensoras y/o actuadoras, enviando y recibiendo información desde el coordinador y otros nodos de la red. Esto le permite eliminar la complejidad que requiere procesar los datos, ya que solo actúan como generadores de información.

Dependiendo de los requisitos que tenga la aplicación que se vaya a implantar, una red que utilice IEEE 802.15.4 puede operar bajo dos topologías: la topología en estrella o la topología peer-to-peer (P2P), en la que la comunicación se lleva a cabo entre un par de nodos dentro de su rango de cobertura. Ambas topologías se muestran en la figura 2.3.

En la topología en estrella la comunicación se establece entre cada uno de los diferentes dispositivos y un único controlador central, que será el coordinador de la red. Todos los dispositivos que forman parte de la red tienen una dirección única por la que pueden ser identificados, estableciendo una comunicación entre un origen y un destino.

En la topología peer-to-peer también debe haber un coordinador de la red de área personal, que al igual que en la topología en estrella se encargará de coordinar a todos los dispositivos que forman parte de la red. La diferencia de esta topología está en que los dispositivos se pueden comunicar con cualquier otro nodo que esté dentro de su rango de cobertura, sin necesidad de que sea el coordinador. De esta forma se podrían establecer comunicaciones que requieran de más de un salto para llegar hasta el destino, permitiendo así crear topologías de red más complejas como la topología mallada o topologías jerarquizadas. Esto permite que las redes puedan cubrir mayores distancias, ya que los dispositivos no necesitan tener el destino dentro de su rango de cobertura. Este tipo de topologías resultan de gran interés en diferentes aplicaciones como la actuación y monitorización de entornos industriales, la implementación de redes de sensores inalámbricas, redes destinadas a la agricultura o monitorización estructural para edificios y puentes.

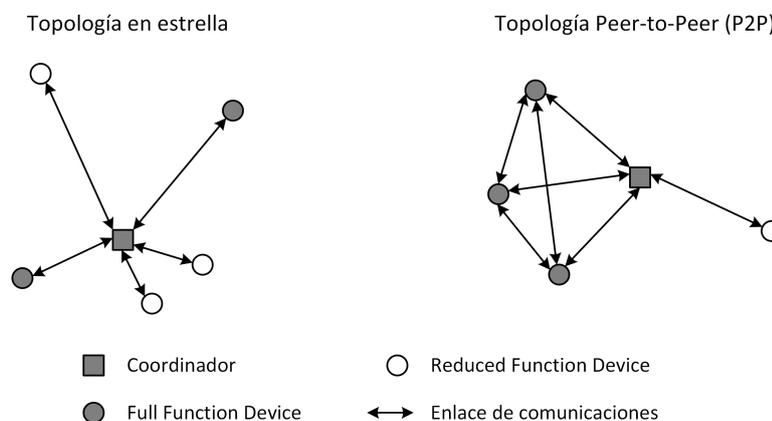


Figura 2.3: Principales topologías las redes LR-WPAN

En el caso de la topología en estrella únicamente puede haber un coordinador que se encargará de gestionar la red PAN con un identificador único, y que trabajará de manera independiente a otras redes en estrella. En el caso de la topología peer-to-peer puede haber más de un dispositivo coordinador que proporcione una sincronización a otros dispositivos, pero solo uno de ellos será el coordinador de la red PAN. Este tipo de topologías tiene como ventaja que permite cubrir mayor área de cobertura, pero tiene el inconveniente de que se incrementa la latencia de los mensajes, ya que en ocasiones tienen que ser reenviados.

Capa física

Las características de la capa física tienen que ver con la activación y desactivación del transceptor radio, la detección de energía, los indicadores de calidad del enlace o Link Quality Indicator (LQI), la selección de canal, la verificación de que el canal esté desocupado mediante el CCA (Clear Channel Assessment) que se utilizará en el algoritmo CSMA-CA, así como la transmisión y la recepción de paquetes a través del medio físico.

La capa física del estándar IEEE 802.15.4 soporta diferentes bandas de frecuencias, así como diferentes tipos de modulaciones, siendo las más utilizadas las que se muestran a continuación:

- Banda de 2450 MHz repartida en 16 canales de 5 MHz, utilizando una modulación del tipo O-QPSK.
- Banda de 915 MHz repartida en 10 canales de 2 MHz, utilizando una modulación de tipo BPSK.
- Banda de 868 MHz con un único canal de 2 MHz, utilizando una modulación de tipo BPSK.

Entre las bandas de frecuencia mencionadas, existen un total de veintisiete canales, numerados desde $k=0$ hasta $k=26$. Se distribuyen de tal forma que la banda de 868 MHz tenga un solo canal, diez canales para la banda de 915 MHz y los dieciséis para la banda más alta de 2.4 GHz. Sus frecuencias centrales se obtienen mediante la Ecuación 2.1:

$$F_c = \left\{ \begin{array}{l} 868 \text{ en MHz, para } k = 0 \\ 906 + 2(k - 1) \text{ en MHz, para } k = 1, 2, \dots, 10 \\ 2405 + 5(k - 11) \text{ en MHz, para } k = 11, 12, \dots, 26 \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

En la figura 2.4 se pueden observar una representación de los veintisiete canales mencionados.

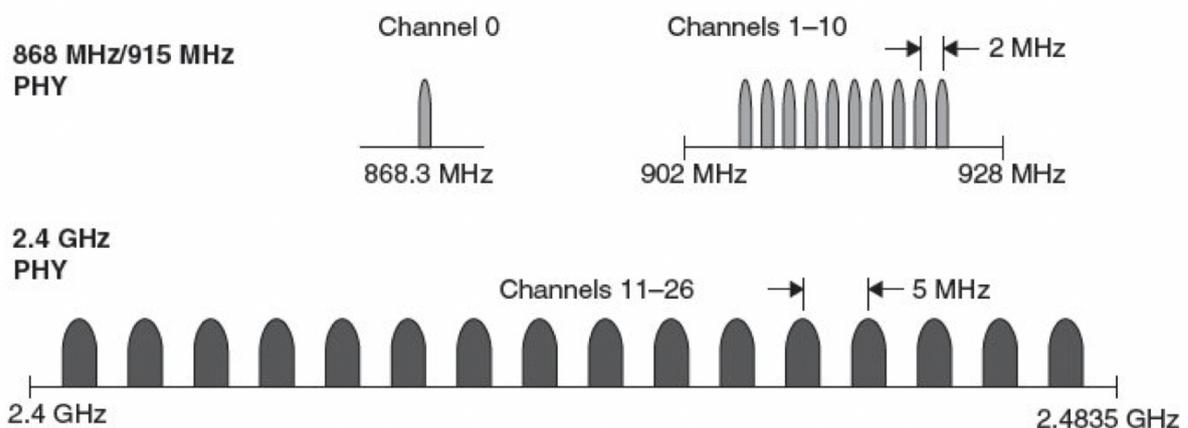


Figura 2.4: Bandas de frecuencia del estándar IEEE 802.15.4

Aunque estos son los canales más utilizados, el estándar contempla otras bandas de frecuencias pensadas para ser utilizadas conforme a las normativas de algunos países asiáticos o simplemente

para otro tipo de aplicaciones. Algunas de estas bandas son las de 433 MHz, 780 MHz, 2380 MHz o *Ultra Wide Band* (UWB) que pueden ser utilizadas junto con otros tipos de modulaciones y técnicas de espectro ensanchado para diferentes tipos de aplicaciones.

Capa MAC

Esta subcapa es la que permite controlar el acceso al canal radio mediante diferentes tipos de mecanismos, además de proporcionar dos servicios: el servicio de datos MAC y la administración de servicios MAC. El servicio de datos MAC es el que permite la transmisión y recepción de *MAC protocol data units* (MPDUs) a través del servicio de datos de la capa física.

Entre las características que permite esta capa se encuentran las siguientes:

- Administración de las beacons.
- Acceso al canal radio.
- Administración de slots temporales garantizados (GTS).
- Validación de tramas.
- Retransmisión de mensajes de verificación.
- Asociación y disociación.
- Proporciona diferentes herramientas necesarias para implementar mecanismos de seguridad a nivel MAC.

En la versión del estándar anterior a la enmienda de 2012, estaban definidos dos métodos diferentes de acceso al canal, estos modos estaban caracterizados por si utilizaban o no las *beacons* a la hora de estructurar la *supertrama*, de ahí sus nombres *beacon enabled* (BE) y *non-beacon enabled* (NBE). En el modo BE la *supertrama* está delimitada por *beacons* en sus extremos, cuyo formato viene definido por el coordinador de la red, que tendrá que informar al resto de nodos para que sepan cuando deben transmitir. Opcionalmente, la *supertrama* puede estar dividida en una parte activa y otra inactiva, tal y como muestra la figura 2.5. Esta porción de inactividad permite implementar un mecanismo de administración de potencia basado en el ciclo de trabajo de los dispositivos, ya que durante este periodo de inactividad los dispositivos pueden entrar en un modo de baja potencia para ahorrar energía. La transmisión de la *beacon* comienza al principio del primer *slot* de cada *supertrama* y se utiliza para la sincronización de los dispositivos enlazados; identificar la red mediante el PAN-ID; y describir la estructura de las *supertramas*.

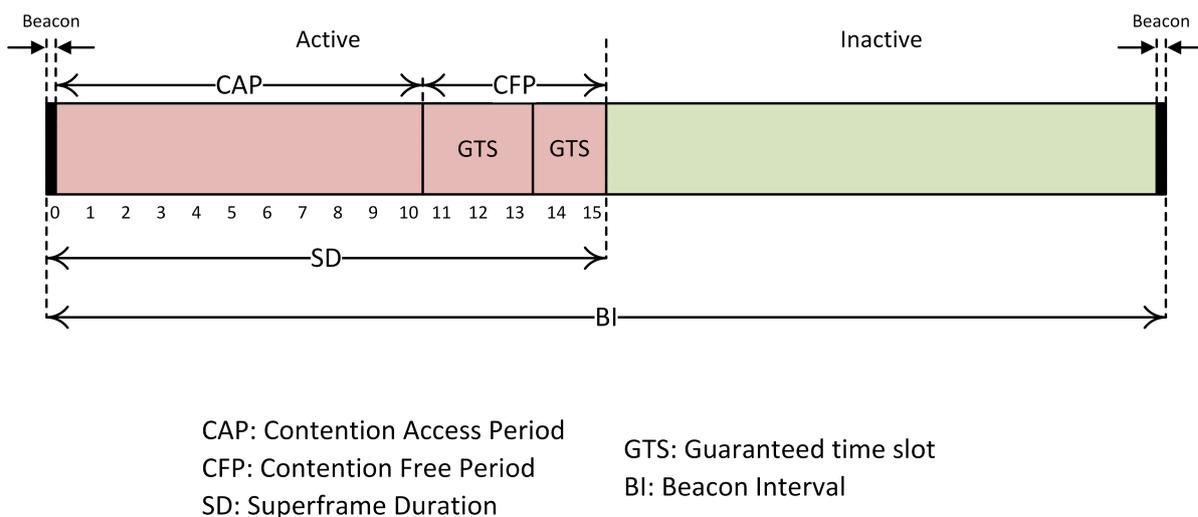


Figura 2.5: Superframe IEEE 802.15.4

Dentro de la zona activa de la *supertrama* los dispositivos pueden establecer una comunicación entre ellos durante el periodo de acceso mediante contienda, denominado *Contention Access Period* (CAP). Durante este periodo los dispositivos compiten entre ellos utilizando el mecanismo CSMA-CA, aunque también se contempla poder utilizar otras opciones como ALOHA. Para aquellas aplicaciones que requieran una baja latencia, o requisitos de ancho de banda específicos, el coordinador de la red puede dedicar una porción de este periodo activo a periodos libre de contienda, denominado *Contention-Free Period* (CFP). Este periodo se divide en *slots* temporales garantizados (GTSs) que aparecen siempre al final de la zona activa, y cuya asignación viene determinada por el coordinador. Las longitudes de estos periodos CAP y CFP se puede ajustar dependiendo de los requisitos que tenga la aplicación en cuestión.

Para el modo NBE, en el que no se utilizan las *beacons* para delimitar las zonas de transmisión, el método de acceso al medio se realiza de manera aleatoria mediante el algoritmo CSMA-CA, al igual que en el periodo CAP de la *supertrama* del modo BE. Este mecanismo de acceso aleatorio comienza por comprobar si el canal está ocupado utilizando el método CCA de la capa física, y en el caso de que el canal esté ocupado esperará un tiempo aleatorio hasta volver a intentar la transmisión.

En el caso de que se produzcan colisiones o pérdidas de mensajes, el estándar permite retransmitir un mensaje hasta tres veces. Esto significa que, para paquetes que requieren de ACK de comprobación, si no se recibe ninguno después de un total de cuatro intentos, la transmisión se considera fallida. Los paquetes que no requieran ACK de comprobación, entre los que se incluyen las *beacons*, no se retransmitirán en ningún caso.

Limitaciones de IEEE 802.15.4

El funcionamiento del protocolo de capa MAC 802.15.4 ha sido ampliamente investigado, tanto en su modo BE como el NBE, en una gran variedad de artículos, algunos de los cuales vienen recogidos en el *survey* [9]. De estos estudios se han podido identificar algunas de las limitaciones que el estándar presentaba antes de su actualización en 2012, permitiendo optimizar algunos de estos modos de funcionamiento. Algunas de estas limitaciones eran las siguientes:

- *Delay* no acotado. En los diferentes métodos de acceso al canal de la capa MAC, al utilizar el algoritmo CSMA-CA, provocaba que fuese difícil estimar un máximo valor del delay hasta que la información alcanzase su destino.
- Fiabilidad limitada en la comunicación. La capa MAC de 802.15.4 utilizando el modo BE proporcionaba un valor muy bajo de tasa de entrega, incluso cuando el número de nodos no era muy alto. Esto se debe principalmente a la ineficiencia del algoritmo CSMA-CA ranurado utilizado para el acceso al canal. Lo mismo ocurre en el caso del modo NBE, en el que un gran número de nodos puede empezar a transmitir simultáneamente.
- No existe protección frente a interferencias/desvanecimientos. Las interferencias y los desvanecimientos multi camino son fenómenos muy comunes en las redes inalámbricas. El estándar de 802.15.4, al utilizar un único canal y no implementar mecanismos de salto en frecuencia, no permite mitigar dichos efectos negativos. Por esto, la red es propensa a la inestabilidad e incluso a perder la conexión de sus nodos.
- Consumo de nodos retransmisores. En las redes P2P multisalto intervienen nodos intermedios que reenvían la información entre el origen y destino, por lo que deben tener recursos disponibles para este reenvío. Utilizar estos métodos de acceso al medio requiere de precisos mecanismos de sincronización y planificación de envío de *beacons* que no vienen especificados por el estándar. Para superar estas limitaciones, muchas de las aplicaciones mantienen los dispositivos retransmisores activos todo el tiempo, causando así un gran consumo de energía.
- Por estas razones, las primeras versiones del estándar IEEE 802.15.4 no resultaba muy útil en escenarios donde la fiabilidad y la robustez sean requisitos estrictos, como puede ser el caso de las aplicaciones en escenarios industriales.

Enmienda IEEE 802.15.4e

La última actualización del estándar IEEE 802.15.4 es la enmienda IEEE 802.15.4e que se creó con el objetivo de rediseñar la capa MAC del estándar para solventar algunas de sus limitaciones. El objetivo era definir un protocolo a nivel de MAC que permitiera crear redes multi-salto de baja potencia que fuese capaz de cumplir con las necesidades emergentes de las aplicaciones industriales. El resultado final fue el documento *IEEE 802.15.4e MAC Enhancement Standard*, aprobado en el año 2012, que recogía muchas ideas de los estándares industriales como WirelessHART o ISA 100.11a: acceso mediante *slotframe*, celdas compartidas y dedicadas, establecimiento de comunicaciones multi-canal y la implementación de mecanismos de salto frecuencial.

La modificación de IEEE 802.15.4e introduce algunas mejoras en el funcionamiento general del estándar, que se pueden resumir en los siguientes puntos.

- Mecanismo *Low Energy* (LE). Este método está pensado para aquellas aplicaciones en las que se priorice la eficiencia energética a costa de empeorar la latencia. De esta forma se permite que los nodos funcionen con un ciclo de trabajo muy bajo, alrededor del 1%, mientras que para los niveles superiores el nodo permanece como que siempre está activo.
- *Information Elements* (IE). Es un mecanismo añadido para el intercambio de información mediante la capa MAC. Estos IE no son más que un conjunto de cabeceras que permiten encapsular distintos tipos de información para transmitirla en los paquetes a nivel de MAC.
- *Enhanced Beacons* (EB). Son una extensión de las *beacons* tradicionales del estándar 802.15.4 que proporcionan mayor flexibilidad manteniendo la compatibilidad con el resto. Esto permite crear tramas para aplicaciones específicas en las que las *beacons* transporten información contenida en los IEs.

En cuanto a los modos de acceso al medio, se incluyen los siguientes cinco métodos que mejoran el acceso al medio.

- El modo DSME [26]: se ha diseñado para aplicaciones cuyos requisitos sean alta disponibilidad, eficiencia, escalabilidad y robustez soportando tanto aplicaciones industriales como comerciales. Este mecanismo de acceso al medio utiliza lo que se denomina multisupertrama, una estructura de las tramas definidas en el estándar IEEE 802.15.4e. Esta multisupertrama consiste en un conjunto de 16 supertramas definidas en la base del estándar, y vienen delimitadas por el envío de balizas al inicio de cada una para coordinar la transmisión de los dispositivos. Cada una de estas 16 supertramas pueden dedicarse para un acceso aleatorio, denominado periodo de acceso bajo contienda, o mediante *slots* dedicados a cada dispositivo, denominado periodo libre de contienda. Además, DSME soporta múltiples canales, lo que le permite mejorar su fiabilidad en escenarios marcados por interferencias.
- El modo LLDN [27]: desarrollado para aplicaciones que requieren muy poca latencia, como robots, grúas, etc. Para cumplir con estos requisitos de bajas latencias, su mecanismo de acceso únicamente permite formar topologías en estrella, limitando además el número máximo de dispositivos que se pueden conectar a un mismo coordinador. También utiliza un único canal, lo que lo hace más vulnerable a interferencias que otros mecanismos de acceso del estándar. La estructura de la supertrama comienza con un *slot* reservado para la transmisión de balizas, seguido de un conjunto de *slot* para transmitir información hacia el coordinador (*uplink*) y otros *slots* para tráfico bidireccional. Las redes LLDN pasan por 3 fases: Descubrimiento, Configuración y Online. Durante las dos primeras fases los nodos se establece la red o se resincronizan aquellos nodos que llevan un tiempo en bajo consumo, además de proporcionar la configuración necesaria para que el resto de dispositivos pasen al estado Online, en el que los nodos ya pueden enviar información al coordinador.
- El modo TSCH: enfocado principalmente para entornos industriales donde el consumo de energía tiene que ser reducido y la diversidad y robustez frente a interferencias tiene que ser alta. Dado que la tesis está centrada en este mecanismo, su funcionamiento se explica con más detalle en la siguiente sección.
- El modo *Radio Frequency Identification Blink* (RFID Blink): diseñado para la comunicación que permita identificar diferentes dispositivos de manera inalámbrica. Se usa para aplicaciones de identificación de objetos o personas, localización o seguimiento de los mismos.

- El modo *Asynchronous Multi-Channel Adaptation* (AMCA): es usado en redes de gran tamaño y dispersión geográfica tales como las redes para *Smart Utility*, redes de monitorización de infraestructuras y redes de control de proceso.

Los últimos dos modos se describen brevemente por el estándar y su presencia en artículos de investigación es bastante reducida, dejando los modos TSCH, DSME y LLDN como los más interesantes y característicos de este estándar. Se han realizado numerosos estudios en los que se comparan estos tres mecanismos de acceso al medio presentes en el estándar IEEE 802.15.4e [28] [29], demostrando que cada uno de ellos se centra en mejorar determinados aspectos del acceso al medio, lo que los hacen indicados para diferentes tipos de aplicaciones. En la siguiente tabla se recogen las principales características de estos tres modos.

Tabla 2.2: Comparación de mecanismos de acceso al medio en IEEE 802.15.4e

	TSCH	DSME	LLDN
Beacons	Si (Enhanced Beacons)	Si (Enhanced Beacons)	Si
Organización temporal	Slotframe periódico: - Número arbitrario de slots temporales. - Los slots pueden ser dedicados o compartidos.	Multisuperframe periódico: - Estructura bien definida. - Utiliza los periodos de CAPs y CFPs de la trama.	Superframe periódico: - Se definen 3 estados de transmisión. Administración, uplink, slots bidireccionales. - Está pensado para slots temporales cortos (<1ms).
Acceso al canal	- División temporal en slots (para los slots dedicados) - TSCH CSMA-CA (para los slots compartidos)	- Acceso basado en contienda durante el periodo de CAPs - División temporal en slots durante el periodo de CFPs.	División temporal en slots (para los slots dedicados) - LLDN CSMA-CA (para los slots compartidos)
Topologías	Estrella, árbol, malla	Estrella, árbol, malla	Estrella
Mecanismo multicanal	Channel hopping	- Channel hopping - Channel adaptation	No tiene mecanismos
Mecanismo de planificación de slots temporales	No se especifica	Asignación de slots garantizados (GTS) de manera distribuida	Centralizada
Sincronización de la red	Basada en la transmisión/recepción de parejas trama/ACK	Recepción de las Enhanced Beacons	Recepción de las beacons

Time Slotted Channel Hopping

Tras la publicación de la enmienda al estándar IEEE 802.15.4 en 2012, los diferentes métodos de acceso al medio presentados anteriormente han cubierto algunas de las necesidades demandadas en determinados ámbitos de aplicación. TSCH fue diseñado para cubrir las necesidades que la industria demandaba en sus aplicaciones de automatización de procesos y monitorización. Su definición está centrada en conseguir redes WSN con una alta fiabilidad, aplicando para ello un envío de datos determinista, que se apoya en la técnica de *Channel Hopping* para mitigar las interferencias que se puedan producir en un canal determinado.

El método TSCH cambia totalmente el planteamiento inicial del estándar, lo que hace que el método TSCH se diferencie del resto de mecanismos propuestos en la enmienda de 2012. Para ello, se sustituye el concepto de supertrama por una repetición de *slots* temporales que se repiten periódicamente. A este conjunto de *slots* que se repiten en el tiempo se le denomina *slotframe*.

Los *slots* temporales se utilizan como franja de tiempo en la que realizar un intercambio de mensajes entre dos dispositivos, por lo que su duración debe de ser suficiente como para enviar un mensaje y recibir el mensaje de confirmación de que se ha recibido. La duración del *slot* más utilizada es de 10ms, aunque es posible configurar *slots* más largos si la aplicación lo requiere. La figura 2.6 muestra un *slotframe* y como están estructurados los diferentes tiempos dentro de un *slot*.

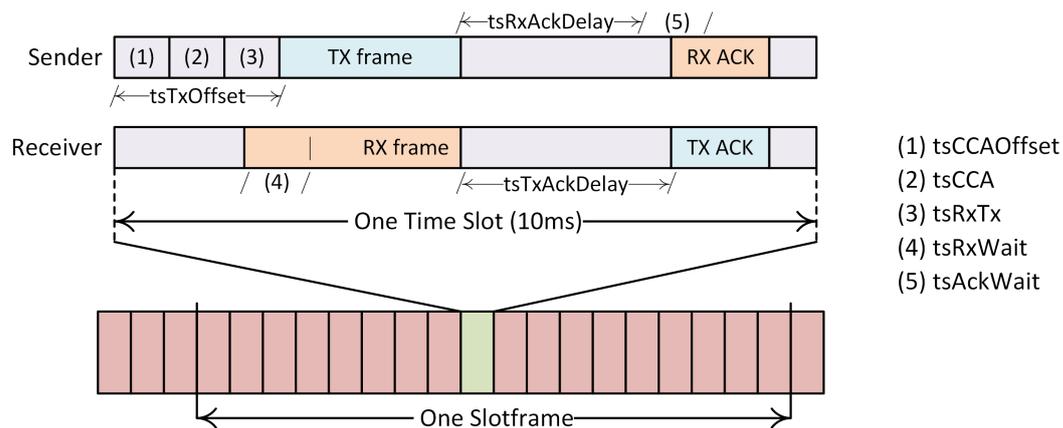


Figura 2.6: Descripción de los diferentes tiempos que forman un *timeslot* en TSCH

El acceso a los *slots* puede estar garantizado, lo que significa que ese recurso solo puede utilizarse por una pareja de nodos para intercambiar información, evitando así posibles colisiones. Sin embargo, también existe la posibilidad de que el recurso sea compartido, por lo que el acceso al *slot* se realiza de manera aleatoria mediante el protocolo CSMA-CA.

Para que dos nodos puedan intercambiar información en un mismo *slot*, ambos deben de estar sincronizados. Por este motivo toda la red TSCH sigue una sincronización estricta, ya que cualquier posible deriva haría que los *slots* estén desalineados y no se pueda llevar a cabo el intercambio de información. Para llevar a cabo esta sincronización, todos los nodos de la red comparten un mismo origen temporal, denominado *Absolute Slot Number* (ASN), que representa el número total de *slot* que han pasado desde que se inició la red.

El método TSCH también hace uso de una técnica de salto en frecuencia o *Channel Hopping* (CH), que permite mitigar las interferencias que se puedan producir en un determinado canal.

Esto se consigue gracias a que la transmisión en un determinado *slot* se realiza en un canal diferente en cada *slotframe*. De esta manera se consigue compensar las pérdidas producidas en un determinado canal, ya que en promedio se hace uso de todos los canales configurados en un patrón de salto en frecuencia. En el caso de la banda de 2.4GHz, es posible utilizar un subconjunto de los 16 canales en total.

Estos dos recursos, los *slots* y los canales por los que transmitir información, forman lo que se conoce como celda, un recurso radio que ambos dispositivos deben conocer para poder intercambiar mensajes en un instante de tiempo. El subconjunto de *slots* que forma un *slotframe* se repetirá de manera periódica, de tal forma que el tamaño del *slotframe* determina el periodo con el que se repite un determinado *slot*. Este tamaño de *slotframe* debe de ser un número primo de *slots*, lo que permite que en cada *slotframe* un mismo *slot* utilice un canal diferente.

En la figura 2.7 se muestra un ejemplo de una planificación de *slots* y canales. Los recursos se representa en una matriz, donde los *slots* se sitúan en el eje de abscisas y los canales en el eje de ordenadas. En este ejemplo se utiliza un *slotframe* de tamaño tres, por lo que los tres *slots* planificados se repiten periódicamente.

El parámetro *Channel Offset* permite utilizar un canal diferente en el mismo *slot* temporal por otro par de nodos, por lo que su valor podrá ser igual o inferior al número total de canales utilizados. En este ejemplo se utiliza un total de cuatro canales. Para determinar la frecuencia del canal utilizado en cada uno de los *slots* se utiliza la siguiente ecuación:

$$f = F(ASN + ch_{offset}) \bmod C \tag{2.2}$$

Donde f representa el canal físico de transmisión; el parámetro ASN es el valor absoluto de *slots* que han pasado desde que se inició la red; el parámetro ch_{offset} permite utilizar diferentes canales en el mismo slot; y C se corresponde con el número total de canales utilizados. Finalmente, la función $F...$ representa un *array* con el patrón de salto en frecuencia definido, de tal forma que el índice obtenido tras el cálculo del módulo devuelve el canal utilizado en un determinado valor de ASN .

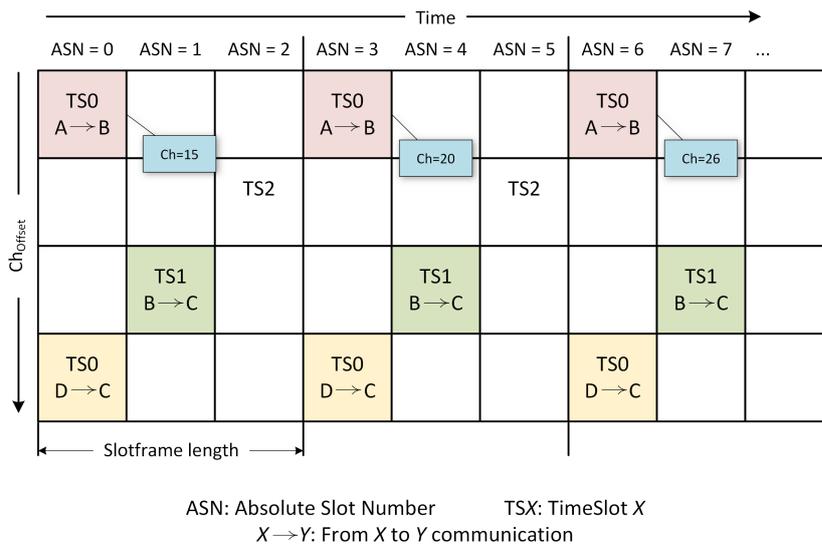


Figura 2.7: Descripción de un *slotframe* en tiempo y frecuencia en TSCH

El acceso a estos recursos se realiza de manera planificada, de ahí el carácter determinista del método TSCH. Esta planificación de los *slots* y recursos radio no viene definida en el estándar, por lo que hay numerosas propuestas de mecanismos de planificación para TSCH. Algunos de estos mecanismos de planificación son centralizados, como el algoritmo *Traffic Aware Scheduling Algorithm* (TASA) [8]; otros basan su funcionamiento en una planificación distribuida, como *Decentralized Traffic Aware Scheduling* (DeTAS) [9] o Wave [10]; y otros utilizan un mecanismo de planificación autónomo como Orchestra [11].

Gracias a estas características y mecanismos, el método de acceso al medio TSCH consigue construir redes WSN multi-salto con una alta fiabilidad y un comportamiento determinista. Debido al uso del *slotframe* sincronizado, puede mantener un ciclo de trabajo muy bajo, ya que puede ahorrar energía en aquellos *slots* en los que no tenga planificado el intercambio de información. Todo esto hace que las redes TSCH sean especialmente útiles en escenarios industriales, donde las aplicaciones requieren ciertos niveles de calidad de servicio, y los escenarios se caracterizan por tener altos niveles de interferencias producidos por otros sistemas u obstáculos.

Las implementaciones realizadas en las diferentes investigaciones y desarrollos, utilizan el mecanismo TSCH para construir la pila de protocolos. El objetivo principal desarrollado en los diferentes capítulos de esta tesis, buscan optimizar y mejorar determinados aspectos de este protocolo, centrados principalmente en la fase de sincronización de estas redes.

2.2.2 Protocolo de encaminamiento RPL

Las *Low-Power and Lossy Networks* (LLNs) son un tipo de redes en las que tanto los dispositivos enrutadores como aquellos que están interconectados a través de la red están limitados: en potencia de procesamiento, memoria y energía (suministrada normalmente con baterías). Sus enlaces están caracterizados por tener unas altas tasas de pérdidas, baja velocidad e inestabilidad del canal radio. Este tipo de redes permiten formar diferentes estructuras y soportan diferentes tipos de tráfico como punto-a-punto (conexiones entre dispositivos dentro de la LLN), punto-a-multipunto (tráfico desde un punto central hacia un conjunto de nodos destino) y multipunto-a-punto (tráfico desde los dispositivos de la LLN hacia un nodo central).

RPL [30] es un protocolo de encaminamiento dinámico especialmente diseñado para las WSN. Fue desarrollado por el grupo IETF ROLL como mecanismo de encaminamiento dinámico del tipo vector distancia, para conseguir cumplir con los requisitos que el propio grupo de trabajo ha definido en los documentos [31] [32] [33].

Este tipo de topologías vienen representadas por lo que se conoce como *Directed Acyclic Graph* (DAG), un grafo en el que todos los enlaces están organizados de tal forma que no se produzcan bucles cerrados al definir las rutas entre los nodos. Además, el protocolo permite que haya más de un nodo raíz en la topología. De esta forma, RPL organiza la topología como un grafo DAG, que puede dividirse en uno o más *Destination-Oriented DAG* (DODAG), uno por cada nodo raíz.

RPL proporciona las rutas ascendentes desde cada uno de los nodos de la red hasta la raíz, formando un DODAG optimizado de acuerdo a una Función Objetivo (OF). Las funciones objetivo definen la manera en que los nodos deben seleccionar y optimizar las rutas dentro de una instancia RPL o conjunto de DODAGs. En estas definiciones se encuentran como los nodos transforman una o varias métricas en un determinado rango, que es la distancia aproximada hasta la raíz. Algunas de estas métricas vienen definidas en [34] y permiten a un nodo seleccionar cuál de sus vecinos es más apropiado para ser su padre.

La construcción del DODAG sigue el siguiente procedimiento:

- Uno o varios nodos de la red serán los encargados de actuar raíz del DODAG, y proporcionarán la configuración al resto de nodos que la compartan.
- Los nodos raíz comienzan a advertir de su presencia difundiendo mensajes *DODAG Information Object* (DIO) a todos los nodos RPL, con información relevante como la pertenencia a un determinado DODAG, coste de encaminamiento que estará relacionado con el rango o distancia hasta la raíz, así como otras métricas relevantes para la formación del DODAG.
- Los nodos que aún no se han unido a la topología esperan los mensajes DIO, utilizando su información para unirse a un nuevo DODAG o también para mantener y actualizar la información de un DODAG ya existente. El proceso de selección de padre se realiza de acuerdo a las normas especificadas en la Función Objetivo y al rango de sus vecinos.
- Si un nodo no recibe un mensaje DIO en un tiempo pre-configurado, este mandará un mensaje de control *DODAG Information Solicitation* (DIS) multicast para solicitar dicha información.
- Los nodos que estén recibiendo los mensajes DIO mantienen una lista de vecinos que pueden ser padres potenciales, escogiendo a aquellos que tengan un rango inferior al suyo, ya que estarán más cerca la raíz y teniendo en cuenta también las métricas definidas por la Función Objetivo.
- A medida que los nodos van recibiendo mensajes DIO de sus vecinos, van construyendo diferentes entradas en una tabla de encaminamiento para cada dirección especificada en los mensajes DIO. Una vez escogido cuál de estos vecinos será su padre, el nodo calcula el valor de su rango para después volver a propagar el mensaje DIO para que los nodos que haya por debajo puedan realizar el mismo proceso.

La transmisión de los mensajes DIO se realiza utilizando un *Trickle Timer*, que permite reducir el tráfico de control que circula por la red cuando esta permanece estable y sin cambios. Cuando se recibe un DIO de un emisor con un rango menor y que no pueda causar cambios a su conjunto de posibles padres, se puede considerar este evento como consistente respecto al *Trickle Timer*.

Por el contrario, los siguientes eventos se consideran como una inconsistencia en la topología, por lo que causarían que el *Trickle Timer* se reinicie:

- Cuando un nodo detecta una inconsistencia en la topología al reenviar un mensaje de control RPL, como por ejemplo un cambio de ruta que aún no se ha propagado, un bucle, o una ruta inaccesible.
- Cuando un nodo recibe un mensaje DIS *multicast* sin la opción de información solicitada, a menos que el mensaje DIS tenga habilitado el *flag* que restringe esta característica. Estos mensajes DIS se envían por aquellos nodos que aún no han recibido un mensaje DIO, con el objetivo de forzar su envío en el resto de vecinos.
- Cuando un nodo recibe un mensaje DIS *multicast* con la opción de información solicitada y el nodo encuentra todas las opciones en el campo de opciones de información solicitada, a menos que el mensaje DIS tenga habilitado el *flag* que restringe esta característica.
- Cuando un nodo se une a una nueva versión del DODAG.

En este listado se han mostrado los casos más representativos que conllevan el reinicio del *Trickle Timer*, aunque en la especificación del protocolo se detallan algunos casos más excepcionales que se considerarían como una inconsistencia en la topología del DODAG RPL.

Este temporizador consiste en duplicar el valor actual del periodo de transmisión cada vez que vence el temporizador fijado previamente. Este temporizador iniciaría su periodo con un valor mínimo pre-configurado, y se iría duplicando hasta alcanzar el valor máximo. Los parámetros utilizados para configurar este *Trickle Timer* son los siguientes:

- I_{min} : valor mínimo que puede tomar el periodo del *Trickle Timer*.
- D : número de veces que se puede duplicar el periodo de *Trickle Timer*. Si se duplica D veces el valor de I_{min} , se obtiene el valor máximo que puede tomar el periodo de *Trickle Timer*.
- k : se trata de la constante de redundancia. Cuando k toma un valor de 0, el valor debe ser tratado como una constante de redundancia igual a infinito, lo que indicaría que el *Trickle Timer* nunca suprimirá los mensajes de control recibidos que provoquen un reinicio del temporizador.

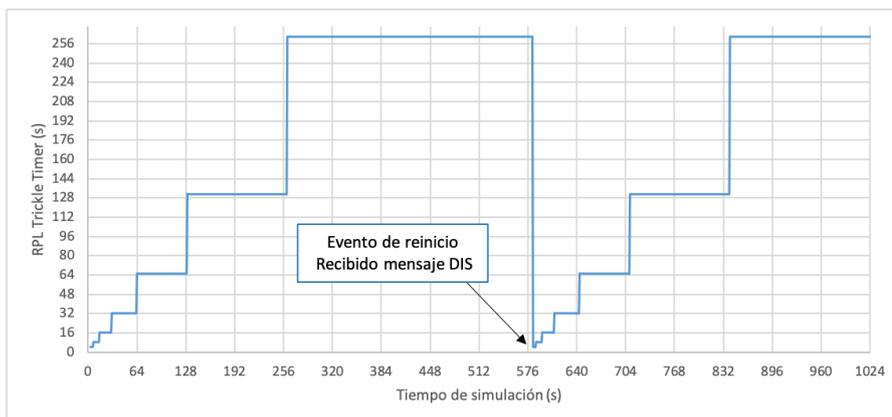


Figura 2.8: Evolución del Trickle Timer para un $I_{min} = 4s$ y $D = 6$

Por otro lado, la formación de rutas descendentes se lleva a cabo utilizando unos mensajes llamados *Destination Advertisement Object* (DAO). El protocolo RPL soporta dos tipos de tráfico descendente: *Storing* y *Non-Storing*. Cualquier instancia de RPL puede utilizar tráfico con el *Storing mode* o bien con el *Non-Storing mode*. En el *Non-Storing mode* los paquetes se transmiten hasta llegar hasta nodo raíz antes de que este lo vuelva a retransmitir hacia su destino. En el caso del *Storing mode*, el paquete puede ir directamente hasta su destino si se encuentra en una ruta descendente del propio nodo o de alguno de sus ancestros antes de alcanzar al nodo raíz.

Este procedimiento se puede ver representado en la figura 2.9:

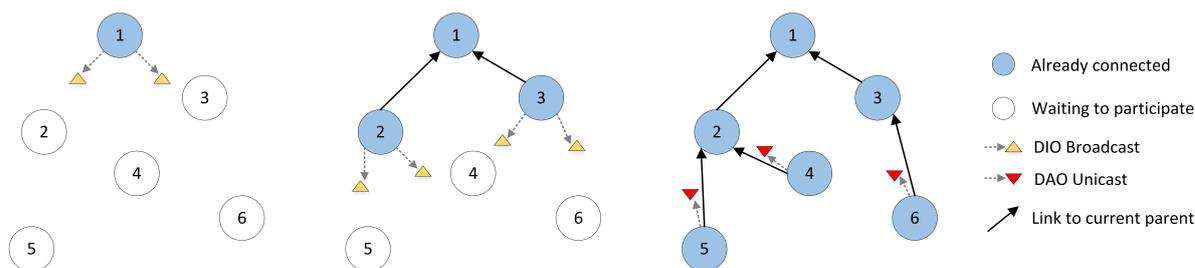


Figura 2.9: Proceso de formación DODAG RPL

En el Capítulo 4 se describirán en más detalle los procesos de formación tanto de rutas ascendentes como descendentes, modelando analíticamente estos procesos para poder analizar su comportamiento durante la puesta en marcha de las redes WSN.

La mayoría de mensajes de Control en RPL suelen tener el alcance de un enlace. La única excepción son los mensajes DAO / DAO-ACK que se intercambian en el *Non-Storing mode*, que utilizan una dirección *unicast* a través de múltiples saltos, por lo que deben utilizar direcciones globales o local únicas, tanto para la dirección de origen, como la de destino. Para el resto de mensajes de control RPL, la dirección de origen es una dirección de enlace local y la dirección de destino es una dirección *multicast* dirigida a todos los nodos RPL o la dirección de enlace local *unicast* del destino. La dirección que representa a todos los nodos RPL viene definida en el protocolo ICMPv6 y tiene un valor de $ff02::1a$.

Los DAG Metric Container son una de las opciones interesantes que pueden incluirse en los mensajes de control DIO o DAO, y que se utilizará en capítulos posteriores para propagar diferentes métricas de calidad. Esta opción puede ser utilizada como contenedor para transmitir cualquier tipo de métrica a lo largo del DODAG. Estos campos pueden contener una métrica que represente un número discreto de nodos, las características referentes a la calidad de los enlaces, ya sea de manera individual o de forma agregada a lo largo de todo el camino hasta la raíz. Esta mecánica es útil para transmitir cualquier tipo de métrica que nos interese implementar para poder ser utilizada por la Función Objetivo para el cálculo del rango y la selección de padres.

Los DAG Metric Container pueden aparecer más de una vez en el mismo mensaje de control RPL, pudiendo utilizarse para transmitir varias métricas para poder utilizar una combinación de varias de ellas. En la especificación [34] se recogen algunas de las métricas planteadas por el grupo IETF para realizar el cálculo del rango y seleccionar entre los diferentes caminos a través de las funciones objetivo de RPL. Además, se describe en mayor profundidad la utilización de los *Metric Container* y de los diferentes tipos de métricas con los que se puede utilizar.

Calidad del enlace en el encaminamiento

3.1 Introducción

Los sistemas IIoT despiertan gran interés en la industria debido a la necesidad de captar información relacionada con los procesos productivos de manera robusta y fiable. Otros factores como la seguridad y la garantía en la información son pilares clave para garantizar que los procesos productivos se gestionan correctamente. Las tecnologías inalámbricas malladas presentan una complejidad asociada con sus procesos de despliegue y creación de rutas, ya que al tratarse de un medio compartido que puede verse afectado por multitud de factores externos, la calidad de los enlaces puede cambiar durante todo el tiempo de vida de la red.

En este capítulo se van a abordar diferentes aspectos de mejora relacionados con el mecanismo de encaminamiento utilizado en las redes de sensores inalámbricas. El objetivo de este mecanismo en redes malladas es el de construir las tablas que establecen las rutas para interconectar todos los nodos de la red, tanto en sentido ascendente hasta el coordinador como descendente hasta los nodos hoja. Estos mecanismos basan sus decisiones para escoger las rutas en distintos criterios y métricas, permitiendo seleccionar la ruta óptima según la configuración escogida.

Los análisis realizados en esta sección se centran en el protocolo de encaminamiento RPL, un protocolo ampliamente utilizado en redes de sensores gracias a su baja complejidad y que requiere de poca carga computacional. Estas características hacen que sea un protocolo idóneo para este tipo de redes con pocos recursos.

El objetivo que se persigue es el de optimizar las reglas que permiten a RPL tomar las decisiones sobre que ruta escoger. Según la especificación original, el protocolo basa su funcionamiento en una métrica denominada *Expected Transmission Count* (ETX), que representa la probabilidad de pérdidas que tiene ese enlace en cuestión. En los siguientes apartados de este capítulo se han analizado diferentes tipos de métricas utilizadas en RPL, y como la comunidad científica ha realizado aportaciones que permiten mejorar el funcionamiento utilizado por defecto. Como aportaciones desarrolladas en este ámbito, se han propuesto dos mecanismos de calidad del

enlace, que sirven como métrica para la toma de decisiones del protocolo RPL. Estos dos mecanismos planteados permitirán optimizar la creación de rutas en la WSN.

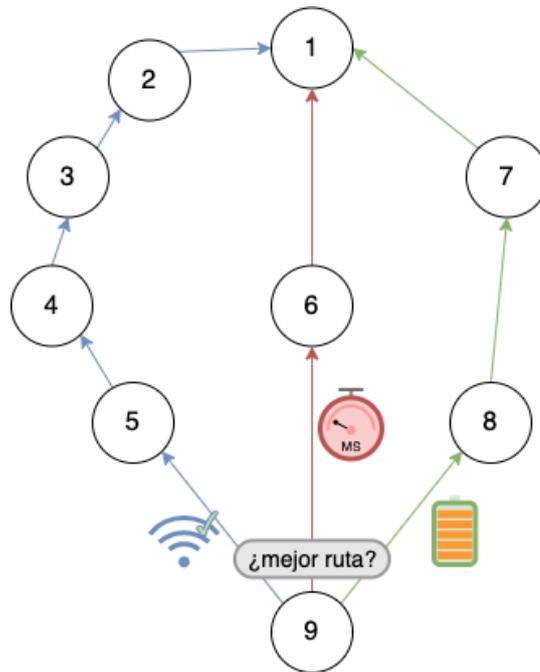


Figura 3.1: Selección de ruta óptima según la métrica objetivo

El primero de los mecanismos propuestos, utiliza una métrica basada en la energía remanente para evaluar el tiempo restante de la batería de los nodos que forman un enlace RPL. Esta métrica pretende extender el tiempo de vida útil de toda la red, dando capacidad a los nodos para que gestionen sus rutas si un enlace está consumiendo demasiada energía. El segundo mecanismo propuesto plantea un método de evaluación de la calidad del enlace utilizando una métrica multi-parámetro, permitiendo escoger enlaces que cumplan con ciertos criterios de calidad basados en múltiples métricas. Estas métricas pueden ser parametrizables, y en este estudio se han utilizado algunas como el nivel de señal recibido, la probabilidad de pérdidas, o el número total de vecinos dentro del área de cobertura.

Estos mecanismos, además de mejorar los procesos de formación del árbol RPL, han servido para complementar un sistema de soporte al despliegue patentado por el grupo de investigación. Este sistema, al que se ha denominado Deploy&Forget y cuyo funcionamiento se detalla en el Anexo I, permite dar soporte en la fase de despliegue, facilitando información sobre la calidad del enlace de los nodos durante la instalación de los dispositivos. Esto permite seleccionar la ubicación óptima de manera ágil y sencilla, ya que el propio nodo informa si su calidad no es adecuada a la hora de instalarlo. De esta manera, los resultados obtenidos al evaluar la calidad del enlace, no solo se utilizan para la selección de rutas, sino que se traduce en un valor cuantitativo fácilmente ponderable.

3.2 Calidad del enlace RPL en Wireless Sensor Networks

En la subsección 2.2.2 se muestran las principales características del protocolo de encaminamiento RPL y como utiliza un mecanismo basado en métricas de calidad para escoger el mejor camino hasta el nodo raíz. De esta forma, los nodos pueden escoger las rutas más eficientes en base a una métrica objetivo, como puede ser el porcentaje de pérdidas del enlace, la latencia punto a punto, el nivel de batería o la ocupación de la cola de mensajes. El protocolo RPL ha sido evaluado por la comunidad científica en numerosas ocasiones, realizando análisis de rendimiento para observar sus capacidades [35] [36].

La selección de una métrica óptima, que mejore la eficiencia en la selección de rutas, ha sido motivo de estudio en los últimos años, dada su versatilidad para escoger unos criterios que puedan ajustarse a diferentes ámbitos de aplicación. Debido a esta variedad de alternativas, algunas soluciones pueden conseguir el efecto contrario al esperado. Por ejemplo, si el objetivo de la red es minimizar la latencia, utilizar una métrica que no priorice las rutas más cortas no conseguirá cumplir con el funcionamiento esperado, aunque sus enlaces sean mejores en otros aspectos.

El grupo de investigación responsable del desarrollo de RPL ha propuesto también dos funciones objetivo basadas en dos métricas diferenciadas, por un lado estaría la *Objective Function Zero* (OF0) [37] y por otro la *Minimum Rank with Hysteresis Objective Function* (MRHOF) [38]. La función objetivo OF0 se utiliza como base para permitir que un nodo pueda unirse a la topología sin utilizar una métrica de calidad en concreto. De esta manera, el objetivo de esta función es el de garantizar la conectividad del nodo a través de la ruta más corta hasta el nodo *root* de la red de sensores. Por el contrario, la función MRHOF utiliza la métrica *Expected Transmission Count* (ETX) para el cálculo del valor de calidad utilizado para escoger la ruta con menos pérdidas. Esta métrica de ETX representa el porcentaje de pérdida de paquetes del enlace, de tal forma que las rutas seleccionadas estén formadas por enlaces con una baja probabilidad de pérdidas. Esta selección de rutas permite mejorar la fiabilidad de las comunicaciones entre los nodos de la red de sensores.

Se han realizado diferentes estudios [39] [40] que analizan y comparan el funcionamiento de estas dos funciones objetivo. En ellos se compara su rendimiento considerando diferentes parámetros, como el tiempo de convergencia de la red, el consumo energético de los diferentes nodos, el parámetro ETX, el número de saltos hasta el *root*, el PDR (Packet Delivery Ratio) y la latencia. Estos estudios concluyen que la función objetivo MRHOF tienen un mejor rendimiento que la función OF0 en términos de calidad de red, pero en determinados aspectos la función OF0 puede obtener mejores resultados. La función MRHOF es más eficaz cuando se necesitan unas garantías de entrega y una alta fiabilidad, mientras que la función OF0 es más útil en aplicaciones donde premia una rápida formación de la red y un bajo consumo energético.

Aparte de estas dos funciones objetivo, la comunidad científica ha propuesto otras soluciones que utilizan diferentes métricas que mejoran los resultados de las soluciones propuestas inicialmente por el grupo de investigación a cargo del desarrollo de RPL. Kamgueu et al [41] realizan un análisis comparando la métrica ETX con una solución basada en la energía restante de un nodo, utilizando el modelo [42] para estimar su tiempo de vida. Este modelo no puede llegar a implementarse en nodos reales, dada su complejidad, pero permite comprobar que se puede extender el tiempo de vida útil de la red gestionando eficientemente los enlaces de los nodos que están cerca de agotar su batería. Kim et al [43] enfocan su propuesta en una métrica distinta, en este caso el tamaño de la cola de mensajes de los nodos. En su análisis abordan la problemática de gestionar el balanceo de carga y los problemas de congestión, utilizando el

protocolo RPL para construir una topología en base a la información de la cola de paquetes de cada uno de los nodos que forman la red.

En [44] también se centran en optimizar la distribución de carga en una red WSN, ya que determinan que es uno de los principales factores que disminuyen el rendimiento de la red. Para ello proponen la función objetivo llamada Traffic Aware Objective Function (TAOF), que modifica el algoritmo de selección de padre y añade nuevas métricas a los mensajes DIO, consiguiendo mejorar el rendimiento de la red tanto en términos de PDR como en estabilidad de la red. En el artículo [45] Gonizzi et al proponen una métrica que permita minimizar la latencia de los mensajes que se dirigen hacia el *root*, aunque su análisis compara el rendimiento con la métrica ETX, cuyo propósito no es optimizar la latencia de la red, por lo que su propuesta muestra resultados significativos aunque su comparación con la métrica ETX no sea la más acertada.

El grupo IETF propone una serie de métricas que pueden utilizarse en las funciones objetivo de RPL, recopilándolas en la RFC [34] y en [46]. Estas métricas pueden depender de características físicas del enlace, como los parámetros *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), *Link Quality Indicator* (LQI) y *Signal to Noise Ratio* (SNR). Sin embargo, existen otras métricas calculadas a nivel de protocolo, como el *Packet Reception Rate* (PRR) y el parámetro ETX ya mencionado.

Karkazis et al [47] basan su estudio en combinar diferentes tipos de métricas para obtener un valor que cuantifique el enlace entre dos nodos. Baccour et al [48] proponen un mecanismo al que denominan F-LQE, un mecanismo que permite estimar la calidad del enlace basándose en cuatro métricas diferentes: la entrega de mensajes, tráfico de bajada, estabilidad y calidad del canal de frecuencia. A partir de estas métricas se obtiene un valor de calidad del canal a partir de una serie de reglas basadas en lógica difusa. Los resultados demuestran que se obtiene un mejor rendimiento que el resto de soluciones existentes con las que se compara. Rekik et al [49] exponen que utilizar la métrica ETX como parámetro para la selección de rutas no es lo suficientemente preciso, por lo que proponen una métrica alternativa basada en estimaciones holísticas de la calidad del enlace, utilizando para ello la combinación de varias métricas. Gaddour et al [50] proponen una nueva función objetivo para RPL, denominada OF-FL, que permite combinar un conjunto de métricas para ser capaces de decidir la mejor ruta en base a unos parámetros configurados del mecanismo.

En el artículo [51] también determinan la importancia de usar varias métricas para obtener una red optimizada de manera homogénea, definiendo una nueva métrica a la que denominan *Composite Efficient Routing* (CER), que tiene en cuenta la calidad del enlace, el tamaño de colas, el tiempo de vida del nodo, el delay y los posibles cuellos de botella de la red. Sus resultados demuestran que dicha función objetivo mejora considerablemente las pérdidas y en consumo energético, comparado con las funciones tradicionales utilizadas en RPL. En [52] definen una nueva función objetivo basada en ETX, que en combinación con otras métricas de manera aditiva, persigue mejorar el balance de consumo energético y minimizar el delay promedio de la red, demostrando que mejora no solo el rendimiento de funciones como OF0 y MRHOF, si no también otras basadas en lógica difusa.

Tal y como reflejan los trabajos anteriores, la comunidad científica ha propuesto diferentes soluciones que permiten mejorar la creación de rutas en RPL. Sin embargo, ninguna solución se adapta a todo tipo de situaciones, ya que dependiendo del ámbito de aplicación, una métrica aportará mejores resultados que otra.

3.3 Métricas de energía para la mejora del tiempo de vida

Las WSN se caracterizan por su capacidad de adaptación y su optimización del uso de las baterías. Es por ello que muchas de las aplicaciones que usan esta tecnología tienen criterios estrictos en cuanto al consumo de energía: una baja tasa de transferencia, modos de bajo consumo, transmisión de datos planificada o incluso técnicas de *harvesting* que permitan extender el tiempo de vida útil de una red.

El sistema de soporte al despliegue de una WSN, detallada en el Anexo I, también permite garantizar un funcionamiento desatendido de la red, intentando maximizar el tiempo de vida útil de la misma. Para conseguir este funcionamiento desatendido es necesario hacer uso de protocolos y mecanismos que permitan a la red adaptarse ante posibles cambios en la topología o en el entorno físico donde está instalado. En este sentido, el protocolo RPL dispone de mecanismos que le permiten auto-repararse y organizarse de manera autónoma en caso de que la calidad no sea óptima, desaparezca algún enlace o se produzcan bucles, creando nuevas rutas para garantizar el intercambio de información.

Por otro lado, para maximizar el tiempo de vida útil de la red, es necesario hacer un uso eficiente del consumo de las baterías. Utilizando una métrica como ETX para la creación de rutas, no se consigue obtener una topología eficiente energéticamente, ya que se pueden dar situaciones en las que una gran cantidad de nodos sigan la misma ruta. Esta situación provocaría que la batería del nodo retransmisor se consuma rápidamente. Este tipo de redes WSN se caracterizan por tener bajos requisitos de computación, y gracias a mecanismos como TSCH se pueden obtener configuraciones con un nivel bajo de *duty cycle*, lo que se traduce en un bajo consumo energético. Sin embargo, gracias a la formación de topologías que busquen optimizar este consumo de manera global, es posible mejorar el tiempo de vida útil de toda la red. Uno de los procesos que mayor consumo genera es la transmisión de mensajes, por lo que, si un nodo agota su batería debido a que necesita reenviar información de otros nodos, todos los que encaminen a través de él dejarán de tener acceso a la red si no disponen de rutas alternativas.

El mecanismo propuesto en esta sección busca mejorar los procesos de creación de rutas a través de una métrica de calidad del enlace basada en la energía restante de las baterías. Para ello, los nodos intercambian información con el resto de la red sobre el estado de su propia batería, y de la batería restante de todos los nodos del camino hasta el coordinador. Con estas dos métricas energéticas, se consigue optimizar el consumo energético de toda la red como si se tratara de un único dispositivo, garantizando que todos los nodos que forman la red van a estar disponibles durante el mayor tiempo posible.

Esta función objetivo energética implementada para RPL, calcula su métrica de energía acumulada de manera iterativa, partiendo desde el nodo coordinador. En el instante en el que un nuevo nodo quiere conectarse a la red, enviará un mensaje solicitando información sobre la topología, donde estará incluido el valor de la métrica acumulada. Este valor acumulado se calcula partiendo desde el coordinador, y los nodos en cada salto agregarán su nivel de batería

a la métrica acumulada recibida por su padre, obteniendo así una variable acumulada a lo largo de todo el camino.

Algoritmo 1: Cálculo de la métrica de energía acumulada

```

input : parentLinkEnergy, ownBatteryEnergy
output: linkEnergy

/* Cálculo de la energía acumulada del enlace */;
if nodeIsRoot() then
  | linkEnergy = 128/ownBatteryEnergy
else
  | linkEnergy = parentLinkEnergy + 128/ownBatteryEnergy

/* Una vez calculada la métrica, se envía en los mensajes de control de RPL */;

```

El algoritmo 1 detalla el proceso para calcular la métrica energética acumulada en el camino. Para evaluar esta métrica el nodo sigue el siguiente procedimiento:

- Identifica el nivel de energía restante, que permite determinar el parámetro *ownBatteryEnergy*. Cada nodo conocerá su propio nivel de batería, incluido el root. De tal forma que pueda usarse para calcular la energía acumulada del enlace a lo largo de todo el camino.
- A partir de los mensajes de control de RPL que se reciban, un nodo puede extraer de los mensajes DIO la métrica acumulada de su padre, que representa el parámetro *parentLinkEnergy*. Dado que la variable *ownBatteryEnergy* tiene un valor porcentual, que irá decreciendo conforme se agota la batería, es necesario realizar una conversión para que la métrica acumulada sea creciente, ya que se irá acumulando en cada enlace. A partir de estos dos parámetros un nodo puede calcular su propia métrica acumulada *linkEnergy*.
- Este parámetro se utiliza en la función objetivo de RPL para la toma de decisiones a la hora de cambiar de padre. Además, se incluye dicha información en los mensajes de control DIO, de tal forma que los nodos vecinos puedan utilizar dicha información para el mantenimiento de las rutas.

Para poder obtener el valor de energía restante de cada uno de los nodos se ha utilizado la herramienta Powertrace, que se encuentra implementada en el sistema operativo Contiki [53]. Powertrace permite llevar un seguimiento del estado de la potencia para poder realizar una estimación de la energía consumida por el sistema. Se utiliza una estructura de datos llamada *energy capsules*, asignando diferentes consumos de energía a cada proceso, como la transmisión o la recepción de un paquete. De esta forma se puede dividir la energía consumida por el sistema en actividades individuales, permitiendo conocer que proceso es el que más afecta al consumo de energía.

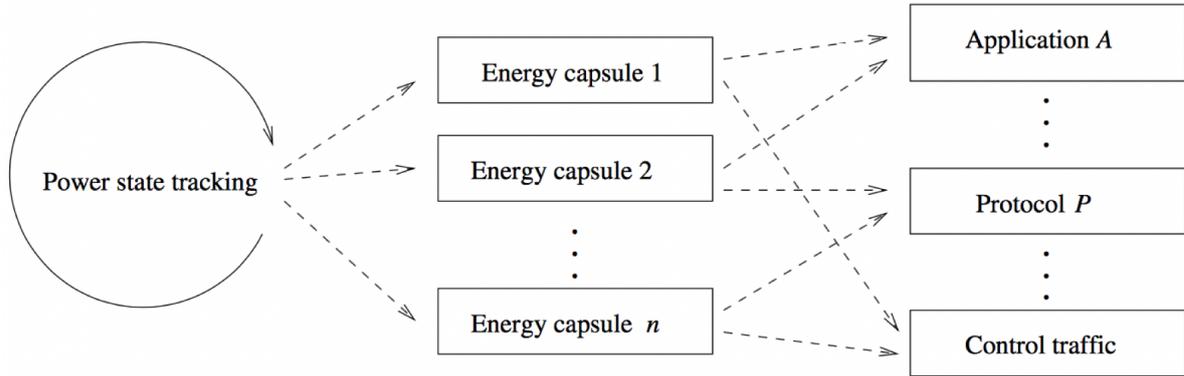


Figura 3.2: Esquema de estimación de consumo mediante Powertrace

Esta herramienta está implementada en Contiki por lo que es posible integrarla con la función objetivo de RPL, permitiendo realizar las estimaciones de energía necesarias. La función de estimación de energía establece un contador que registra la cantidad de ciclos de reloj que requiere una determinada tarea. A continuación se muestran los diferentes elementos que generan un consumo en el dispositivo.

- Transceptor radio en modo transmisión.
- Transceptor radio en modo recepción.
- Consumo básico de la CPU.
- Consumo del sistema en modo bajo consumo *Low Power Mode* (LPM).
- Consumo de periféricos como LEDS, sensores, puertos de entrada y salida.

La energía calculada viene determinada por la siguiente ecuación.

$$\text{ownBatteryEnergy} = \frac{\text{energy}_{est-i} \cdot \text{current}_i \cdot \text{voltage}}{\text{RTIMER}_{second} \cdot \text{Runtime}} \quad (3.1)$$

Donde i puede tomar los valores de $(TX, RX, CPU, LPM, \dots)$ y RTIMER_{second} tiene un valor aproximado de $32768 \text{ ticks/segundo}$. Conociendo el tiempo total que permanece activo, la corriente consumida y el voltaje que se suministra para cada actividad, se puede estimar el valor de energía total consumida y por lo tanto la energía restante del dispositivo.

Esta implementación tiene en cuenta la transformación de la magnitud de tiempo en segundos a partir de la cantidad de ciclos de reloj del procesador. El resultado de la anterior proporciona un valor en mW por segundo, indicando lo rápido que el nodo está consumiendo su batería.

La intención de implementar este modo de operación para escoger las rutas de encaminamiento, es la de obtener una métrica que, además de representar la cantidad restante de las baterías en términos de mWh, también permita identificar lo rápido que se está descargando. Esta funcionalidad permite que, en un momento dado, un nodo con un bajo nivel de batería pero una velocidad de consumo lenta, pueda funcionar durante más tiempo que un nodo con mayor nivel de batería pero cuya velocidad de consumo sea mucho más rápida.

Hasta este punto se ha detallado el proceso para el cálculo de la métrica acumulada, pero la función objetivo de RPL también debe permitir seleccionar las diferentes rutas en base a esas métricas. El algoritmo 2 representa el proceso de selección de un nuevo padre, comparando la métrica del padre actual con la del nuevo vecino. Cabe destacar, que a diferencia del nivel de batería, la métrica acumulada es una variable acumulativa, por lo que cuanto mayor sea el valor de la métrica, peor será el enlace.

Algoritmo 2: Selección de padre en base a la métrica acumulada

```

input : parentLinkEnergy1, parentLinkEnergy2, energySwitchThreshold
output: bestParent

/* Se comparan las calidades del padre actual bestParent con las del nuevo vecino */;
minDiff = energySwitchThreshold
if bestParent == p1 then
    if parentLinkEnergy2 > parentLinkEnergy1 + minDiff then
        | bestParent = p2
    else
        | bestParent = p1
if bestParent == p2 then
    if parentLinkEnergy1 > parentLinkEnergy2 + minDiff then
        | bestParent = p1
    else
        | bestParent = p2

```

Para que un nodo no utilice un camino cuyos nodos tengan poca batería, la función objetivo implementa una característica que permite limitar el nivel máximo de la métrica acumulada, permitiendo liberar enlaces para que sus nodos no agoten la poca batería restante. Este proceso queda detallado en el algoritmo 3.

Algoritmo 3: Cribado de enlaces con un bajo nivel de batería

```

/* Si la energía es menor que BAT_LIMIT, se configura un coste máximo al enlace */;
if ownBatteryEnergy <= BAT_LIMIT then
    | linkEnergy = MAX_PATH_COST
else
    | linkEnergy = parentLinkEnergy + 128/ownBatteryEnergy

```

Los nodos están continuamente evaluando la calidad con el resto de vecinos de la red, cada vez que reciben un mensaje DIO multicast, se comprueba si la calidad de dicho vecino es mejor que la del enlace actual. Los motivos por los que un nodo puede decidir cambiar de padre son los siguientes:

- El nodo detecta alguna inconsistencia en las rutas que tiene almacenadas. Por ejemplo, pierde la conexión con su padre, o que un nuevo nodo que se haya unido a la red presente mejores enlaces que el padre actual.
- El temporizador que determina si ha habido cambios en la red expira, lo que forzaría a que se enviara de nuevo tráfico de control para actualizar las rutas.

El código implementado en la función objetivo de RPL incluye un mecanismo de histéresis. Este mecanismo garantiza que la diferencia entre las métricas del padre actual y el nuevo candidato sea lo suficientemente alta antes de realizar un cambio de ruta, permitiendo mantener una

cierta estabilidad de la red. Esto aparece representado en el algoritmo 2 con el nombre de *energySwitchThreshold*, y su valor puede ser configurado para controlar con que frecuencia se realizan cambios en las rutas si la calidad de los enlaces disponibles son similares.

3.3.1 Escenario de pruebas utilizando métricas energéticas

Los experimentos realizados para observar el comportamiento del mecanismo implementado, se han llevado a cabo en un escenario real en abierto, pero restringiendo el área de despliegue para poder forzar una topología mallada. Esto permite analizar el ahorro de energía a diferentes distancias del nodo coordinador. Los dispositivos utilizados han sido los RE-Mote de Zolertia y su interfaz radio CC2538. Estos dispositivos se han programado utilizando el sistema Contiki, cuya aplicación principal realiza un envío periódico de mensajes con información relevante para comparar las diferentes soluciones, además de generar un consumo de energía derivado de la transmisión periódica de los mismos.

El objetivo de las pruebas es comparar la función objetivo de energía propuesta, con la opción utilizada por defecto en RPL, la función *The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function* (MRHOF), descrita en [38]. MRHOF utiliza como métrica de calidad el parámetro ETX ya mencionado. Esta función permite seleccionar el camino con una mayor fiabilidad, minimizando así la pérdida de paquetes. Siendo N_X el número de paquetes recibidos por un nodo X , la métrica ETX entre dos nodos i y j se calcula de la siguiente forma:

$$ETX_{ij} = \frac{N_i}{N_j} \quad (3.2)$$

La función MRHOF permite utilizar como métrica el cuadrado del valor ETX, lo que favorecerá que se escojan buenos enlaces sobre los caminos más cortos, tal y como se recomienda en su RFC 6719 [38]. Durante los experimentos, se han comparado las dos funciones objetivo, de tal forma que se pueda conocer el comportamiento de cada una de manera individual. Gracias a la sencillez de RPL para integrar nuevas funciones objetivo, es posible configurar cada una de ellas de manera ágil, pudiendo seleccionar una u otra dependiendo del interés de la aplicación que se vaya a desplegar.

En la figura 3.3 se puede ver la estructura de la red desplegada, donde se ha utilizado una red mallada de 10 nodos (9 nodos más el coordinador de la WSN). La topología física se ha escogido de tal forma que se forzase una topología lógica que presentará comunicaciones multi-salto, por lo que algunos nodos no se podrán conectar directamente con el *root*. Los nodos del primer nivel únicamente tienen visible al *root*, los del segundo nivel conectarán con los del primer nivel y los del tercer nivel únicamente tendrán en su área de cobertura a los del segundo nivel. Para esto se realizaron diferentes pruebas de cobertura para validar el alcance de los nodos, utilizando diferentes valores de potencia de transmisión.

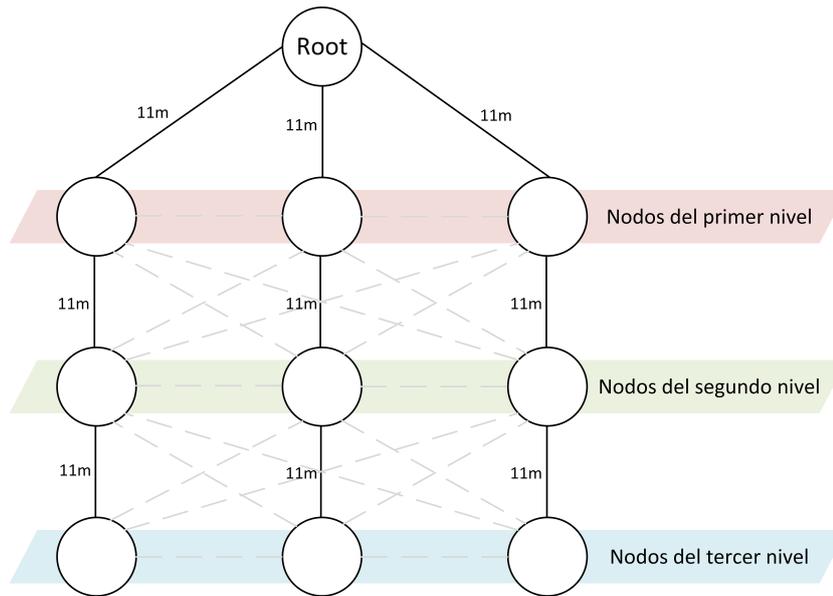


Figura 3.3: Topología de la red bajo estudio

Con esta configuración de despliegue, los nodos del primer nivel estarán forzados a retransmitir los mensajes de los nodos que están a más de un salto del root. Dada esta topología, si los tres nodos del primer nivel agotan su batería, la red completa dejará de funcionar aunque el resto de nodos aún tengan batería. La comparación entre las diferentes métricas se realizará a partir de los diferentes parámetros de consumo que se pueden extraer de la herramienta Powertrace.

El resto de configuración relativa al consumo hardware y de la pila de protocolos se pueden ver en la tabla 3.1 y tabla 3.2, donde se han escogido los parámetros que presentaban un mejor rendimiento de la red, minimizando así la pérdida de paquetes y los problemas de sincronización.

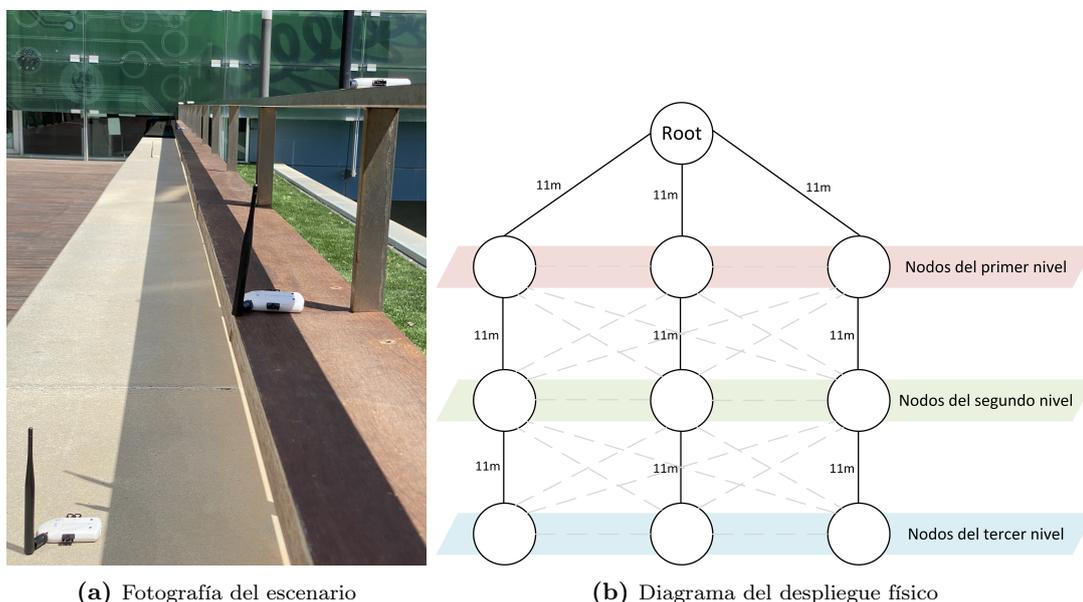
Tabla 3.1: Configuración de parámetros de comunicaciones

Parámetro	Valor
Tamaño slotframe TSCH	11 slots
Número de canales	4
Slots activos	4 slots
Canales utilizados	11, 20, 25, 26
Periodo generación de datos	5 segundos
Potencia de transmisión	0 dBm
Threshold ETX	1,25
Threshold Energía	Consumo un 1% más rápido

Tabla 3.2: Configuración de parámetros de comunicaciones

Elemento hardware	Consumo
Radio RX	20 mA
Radio TX	20 mA
CPU en LPM	7 mA
CPU	1,3 mA

En la figura 3.4 se puede ver una imagen del despliegue realizado para llevar a cabo las pruebas, colocando los distintos niveles con una separación de 11 metros.

**Figura 3.4:** Despliegue real

3.3.2 Evaluación de resultados utilizando métricas energéticas

En este apartado se analizarán los resultados de las pruebas llevadas a cabo para comparar las funciones objetivo de ETX y de Energía. La figura 3.5 muestra los resultados en términos de tiempo de vida de las baterías para los nodos de cada nivel. Se puede observar como la función objetivo de energía consigue un mayor tiempo de vida que para el caso de ETX. Durante los diferentes experimentos realizados, se ha conseguido que los nodos del primer nivel estén operativos durante un 15% más de tiempo, y hasta un 22% para los nodos que formaban parte del grupo más alejado del coordinador.

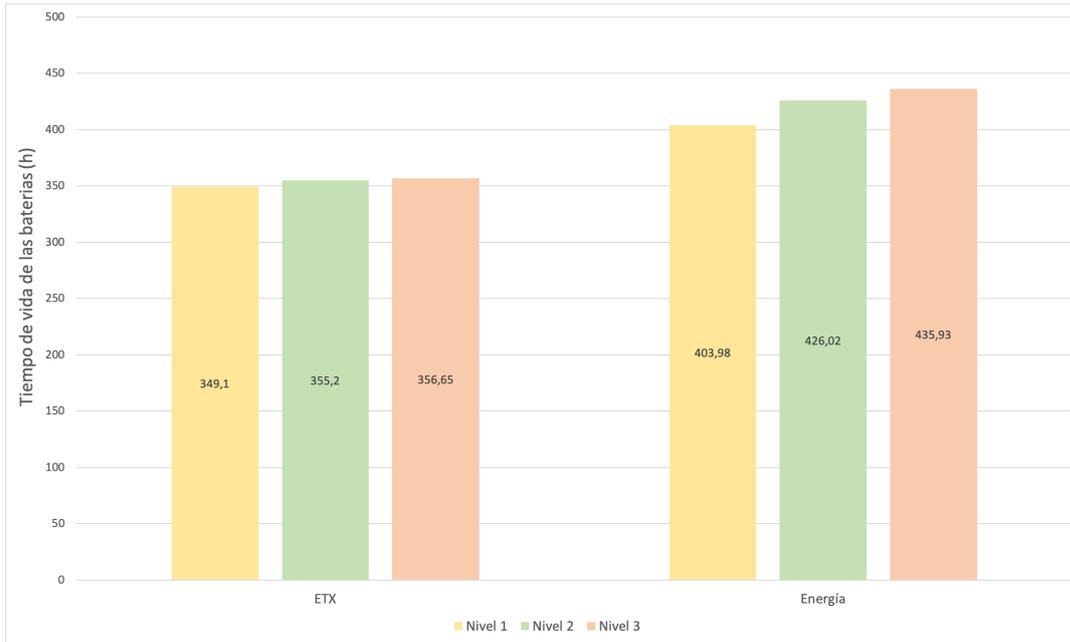


Figura 3.5: Comparación del tiempo de vida de las baterías

En la figura 3.6 se puede ver en detalle qué elementos hardware generan un mayor consumo de energía, representando cada elemento en función del nivel de los nodos en la topología. De esta gráfica se puede deducir que, aunque la función objetivo de energía muestra un mayor consumo debido al transceptor radio en transmisión, el consumo generado por la radio en recepción se reduce, además de tener una contribución mucho mayor que en transmisión debido a que la radio permanece activa durante más tiempo.

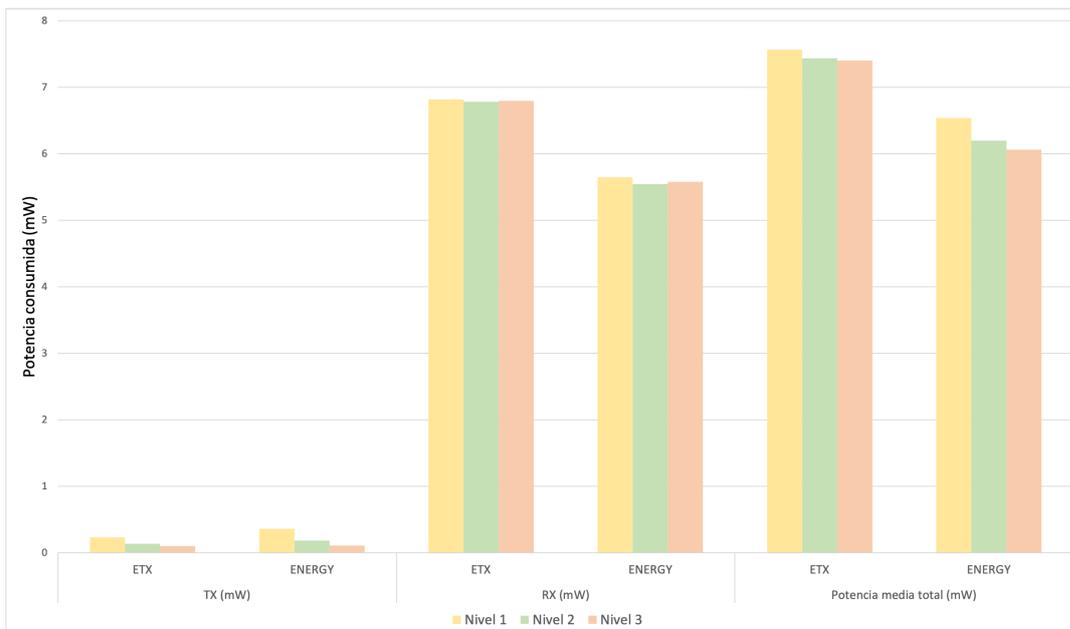


Figura 3.6: Perfiles de consumo de potencia obtenidos durante las pruebas

En la figura 3.7 se representa la tendencia del consumo de energía del último nodo del primer nivel en agotar su batería. Los tres escalones representan los instantes en que los nodos del primer nivel han ido desconectándose, lo que hace incrementar el consumo de ese mismo nodo. Esta gráfica muestra la comparación entre la función objetivo ETX y la función de energía propuesta, demostrando que ETX tiene un menor tiempo de vida útil de la red. Mediante esta O.F de energía se consigue que el tráfico esté balanceado entre los nodos para intentar que las baterías se descarguen mas lentamente, mientras que con ETX los nodos mantienen su tráfico continuo hasta que las baterías se agotan.

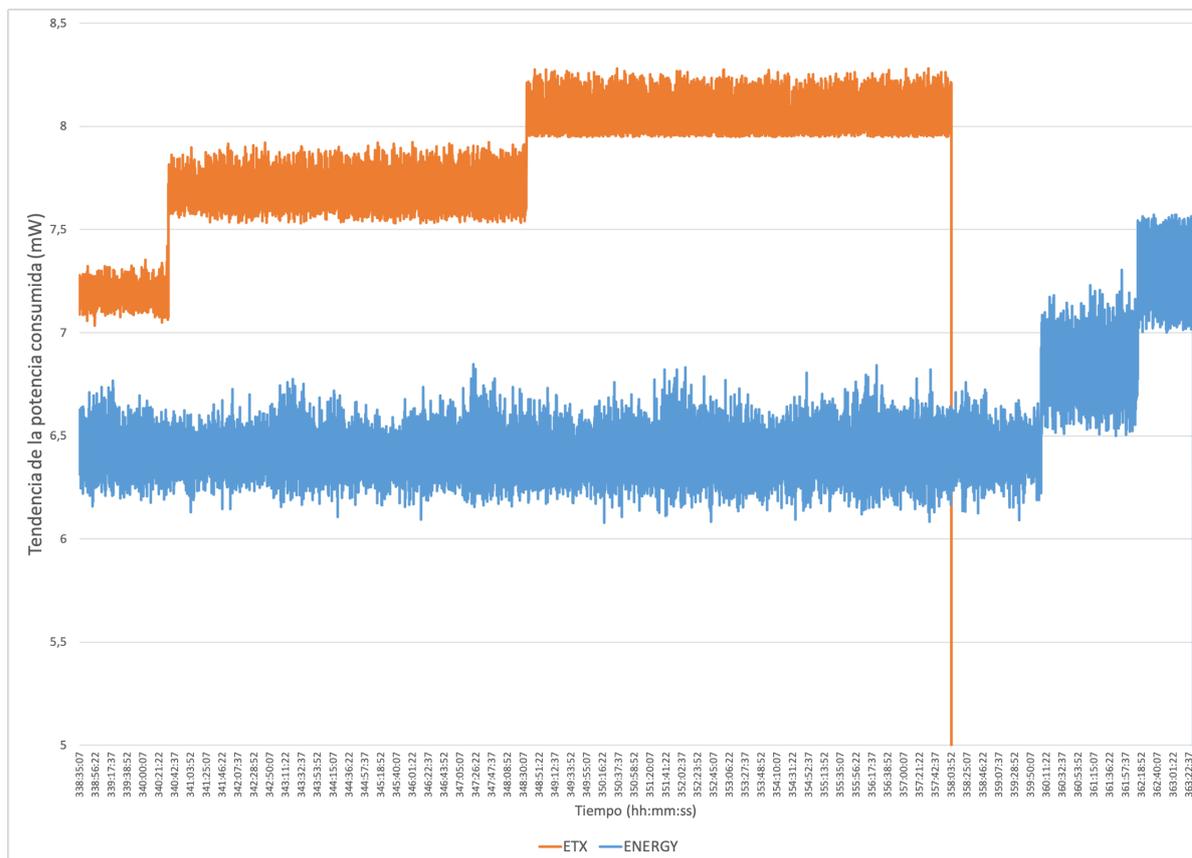


Figura 3.7: Tendencia de consumo de potencia del último nodo en consumir la batería del primer salto, mostrando desde 2 horas antes de que la primera batería de los nodos se agote, hasta que todos los nodos del primer nivel mueren

Si se analiza en detalle el comportamiento de este último nodo en agotar su batería, se puede ver como el tiempo que duran estos escalones en ETX son mas largos que en la función de energía. Esto se debe a que la diferencia entre los niveles de batería de los nodos del primer nivel es muy diferente, lo que indica que la mayor parte de los nodos intentan enviar la información por un mismo camino hasta agotar del todo la batería. Además, en el caso de ETX, los nodos comienzan a agotar sus baterías mucho antes, lo que provoca que el resto de nodos tengan que soportar la carga de tráfico del nodo que ha dejado la red. Por otro lado, la función de energía permite que estos nodos agoten sus baterías mucho más tarde (alrededor de 61 horas de diferencia entre el instante en que los primeros nodos dejan la red), consiguiendo balancear la potencia consumida entre los vecinos de la red.

El balanceo de las baterías de los nodos tiene además otro beneficio, y es que al mantener un mayor número de vecinos disponibles durante un mayor tiempo se incrementa la flexibilidad de la red, ya que se tienen más caminos disponibles por los que encaminar los datos.

3.4 Función de calidad multi-parámetro

Hasta ahora, mediante la función objetivo de energía, propuesta en la sección anterior, se ha demostrado que es posible mejorar el rendimiento de la red WSN en lo referente al tiempo de vida útil de la red. Sin embargo, tal y como se menciona al inicio del capítulo, una métrica concreta permite optimizar la red para una aplicación determinada. En un escenario industrial, aunque es importante conseguir un funcionamiento autónomo y desatendido durante el mayor tiempo posible, es más importante garantizar la integridad y fiabilidad de las comunicaciones. Al tener diferentes métricas que se centran en determinados aspectos de la calidad de un enlace, la idea de proponer un mecanismo que tenga en cuenta varios de estos parámetros despierta especial interés para conseguir una optimización que cumpla una relación de compromiso.

El objetivo del mecanismo propuesto, es el de diseñar e implementar una función de calidad que permita seleccionar las rutas óptimas de una red WSN, en base a diferentes métricas de calidad. Esto permite construir una topología RPL que cumpla con unas garantías de fiabilidad y robustez, pero que además tenga en cuenta otros parámetros que puedan complementar esta decisión por parte del protocolo.

Esta función de calidad está construida a partir de la combinación de tres métricas que caracterizan la calidad del enlace: el nivel de señal de los paquetes recibidos representado mediante el parámetro RSSI; el parámetro ETX que representa el número de transmisiones necesarias para que un paquete se transmita correctamente, lo que se traduciría a la cantidad de pérdidas que se producen al transmitir información por un enlace; por último el número de saltos que hay desde un nodo hasta el coordinador de la red, que se puede interpretar como un parámetro aproximado de la latencia que hay entre un nodo y el *root*.

Utilizar el número de saltos en lugar de la latencia entre dos nodos se debe a que se ha querido evitar un intercambio adicional de mensajes entre los nodos, ya que para calcular la latencia sería necesario que tanto el origen como el destino compartan una misma base de tiempo. Gracias a que el intercambio de mensajes está planificado en el *slotframe* TSCH, en situaciones en las que no es necesario realizar reenvíos, el número de saltos será proporcional a la latencia. La justificación de esta aproximación se basa en la utilización de un mecanismo de acceso al medio determinista como es TSCH, con una tasa de generación de paquetes que es mucho más alta que la duración de un *slotframe* de capa MAC. Cada mensaje será enviado en un *slot* diferente, por lo que habrá varias oportunidades de reenvío en cada *slotframe* antes de que se vuelva a generar un nuevo mensaje. De esta manera, se asume que la latencia *end-to-end* es proporcional a la duración de un *slotframe* por cada salto hasta llegar al coordinador, ya que el siguiente nodo tendrá que retransmitir el mensaje en el siguiente *slotframe* disponible.

Aunque se han seleccionado estas tres métricas, la función multi-parámetro esta diseñada para poder combinar métricas adicionales, como puede ser la energía restante de las baterías, o el estado del *buffer* para controlar la congestión de un nodo. Una vez definidas las variables que serán utilizadas para estimar la calidad, los pasos para llevar a cabo el cálculo de la función de calidad serán los siguientes:

- Determinar el valor de las métricas que intervendrán en dicha función, almacenando los valores correspondientes de manera organizada y actualizando su valor siempre que sea posible.
- Crear una estructura de datos donde tener almacenadas cada una de las métricas para cada uno de los vecinos dentro del rango de cobertura, y en función del canal de comunicaciones siempre que sea posible.

- Una vez los datos estén disponibles, se utilizarán unas funciones de mapeo para normalizar los niveles de cada uno de los parámetros. Los resultados de estas funciones de mapeo serán las que formen el valor de calidad del enlace, dando un peso diferente a cada una de las métricas que podrá modificarse en función de los requisitos de la aplicación.
- Definir unos umbrales que serán los que determinen qué camino se debe escoger, en función de las diferencias que presenten los diferentes caminos disponibles.

Para implementar este mecanismo se ha utilizado el sistema Contiki, ya que permite configurar una red de sensores basada en TSCH y RPL, además de facilitar la integración de nuevas funciones objetivo para RPL. Contiki dispone de una serie de funciones que permiten al sistema evaluar diferentes tipos de estadísticas sobre los enlaces de un nodo, entre estos está el parámetro ETX, por lo que la función objetivo MRHOF ya está implementada en el sistema. Una de estas funciones permite obtener el número de transmisiones realizadas para enviar un paquete, así como una variable de estado que indica si esta transmisión se ha realizado con éxito. Por lo tanto, si se conoce el número de transmisiones necesarias para que la transmisión se realice con éxito, se puede estimar el ETX para cada uno de los vecinos con los que se intercambie información.

Es importante resaltar que, debido a que es necesario conocer si el paquete se ha recibido con éxito, no todos los mensajes se podrán utilizar para estimar el valor de ETX, como es el caso de las *Beacons*, ya que no requieren de ACK de reconocimiento. Por lo tanto, los únicos mensajes que contribuirán al cálculo de esta métrica serán aquellos mensajes de datos cuya transmisión sea *unicast*, de la misma forma que los mensajes de control de RPL transmitidos en *unicast*, ya que también utilizan los ACK.

Los dispositivos tendrán una estructura donde almacenarán los valores de ETX para cada uno de los vecinos, incluyendo su padre con el que intercambia directamente información. Los valores de este parámetro se irán actualizando cada vez que se reciba un paquete. Esto provoca que la métrica se actualiza más frecuentemente para los nodos con los que se intercambia información activamente, teniendo que enviar mensajes de control para mantener actualizados el resto de enlaces. Esto puede generar que los cambios de padre sean algo lentos debido a que el ETX del padre actual va cambiando con más frecuencia que los posibles candidatos.

Estas funciones que permiten obtener el parámetro ETX también realizan un filtrado de las muestras de tipo *Exponential Weighted Moving Average* (EWMA) como el que se muestra en la ecuación 3.3. De esta forma se consideran valores medidos en instantes anteriores, etx_{t-1} , para mejorar la estabilidad de la red, ya que si en un momento puntual el ETX se disparara de manera transitoria, se forzarían cambios de padre de forma continua, pudiendo provocar que se llegaran a perder mensajes. En Contiki este filtrado se realiza con un factor $\alpha = 0,15$ lo que daría un peso del 85% a los valores medidos en instantes anteriores. En la ecuación 3.3 el parámetro etx_t representará el valor ETX instantáneo, mientras que ETX es el resultado tras aplicar el filtrado teniendo en cuenta los valores en instantes anteriores, etx_{t-1} . Estas funciones tienen además implementadas un mecanismo de temporización que permite identificar cuando un valor no es lo suficientemente reciente, expirando un temporizador que iniciaría un proceso para actualizar dicho valor. De esta manera se controla que los datos sean recientes, pudiendo modificar los pesos del filtrado EWMA con un factor de $\alpha = 0,3$ para que los parámetros cambien más rápidamente hasta su valor estable.

$$ETX = \alpha \cdot etx_t + (1 - \alpha) \cdot etx_{t-1} \quad (3.3)$$

En cuanto a la obtención del parámetro RSSI, ha sido necesario desarrollar una serie de funciones que permitan evaluar dicho parámetro para cada canal en el que se intercambie información, y para cada uno de los vecinos dentro del rango de cobertura de un nodo. Las funciones se han desarrollado a nivel de acceso al medio, lo que permite obtener información de cada paquete recibido. Entre esta información se encuentran las direcciones de origen y destino, el canal de frecuencia utilizado para la transmisión de cada paquete, el nivel de señal o RSSI con el que se ha recibido el mensaje y otros valores como la calidad (LQI). Gracias a esta información, se utiliza la dirección de origen para crear una matriz donde almacenar los valores de RSSI recibidos en cada uno de los canales para todos los vecinos dentro del área de cobertura.

A diferencia de otras soluciones, el método desarrollado permite evaluar el nivel de señal que presenta cada uno de los canales de manera independiente. Esto posibilita detectar si alguno de los canales está perjudicando el intercambio de mensajes debido a interferencias localizadas, permitiendo tomar medidas como crear una lista negra con los canales en los que no se desea transmitir datos.

$$RSSI^{(C,N)} = \alpha \cdot rssi_t^{(C,N)} + (1 - \alpha) \cdot rssi_{t-1}^{(C,N)} \quad (3.4)$$

La ecuación 3.4 muestra como obtener el valor de RSSI de un vecino en un determinado canal, siguiendo el filtrado tipo EWMA utilizado para ETX. Así se obtiene una estructura de valores de RSSI de todos los canales de un determinado vecino. Estos valores posteriormente son promediados, tal y como se muestra en la ecuación 3.5, cuyos resultados se utilizan en la función de calidad.

$$\begin{aligned} RSSI^{NodeA} &= \frac{\sum_{C=1}^n RSSI^{(C,NodeA)}}{n} \\ RSSI^{NodeB} &= \frac{\sum_{C=1}^n RSSI^{(C,NodeB)}}{n} \\ RSSI^{NodeC} &= \frac{\sum_{C=1}^n RSSI^{(C,NodeC)}}{n} \\ &\dots \end{aligned} \quad (3.5)$$

El motivo por el que no se obtienen los valores de ETX para cada canal, de la misma forma que el RSSI, se debe a la propia definición de este parámetro y del método de acceso al medio utilizado. Este parámetro se obtiene contando el número de retransmisiones necesarias de un paquete, por lo que, si se quisiera obtener un valor de ETX para un determinado canal, las retransmisiones realizadas por la pérdida del mensaje o una colisión se realizarán en el siguiente slotframe, por lo que inevitablemente se utilizará un canal diferente. Por lo tanto, al utilizar TSCH como método de acceso al medio, en cada transmisión el dispositivo utilizará un canal diferente para retransmitir los paquetes que no se hayan entregado con éxito.

Finalmente, solo queda obtener el número de saltos que hay desde un nodo hasta llegar al coordinador. Para poder evaluar este parámetro es necesario realizar un intercambio de mensajes para determinar por cuantos nodos se retransmite hasta llegar a su destino. Un nodo solo conoce los vecinos dentro de su área de cobertura, incluido su padre, pero no los nodos que hay por encima hasta llegar al coordinador. Sin embargo, el objetivo inicial era evitar transmitir todo tipo de tráfico adicional, por lo que se han utilizado los mensajes de control de RPL como contenedores para transmitir dicha variable. Estos mensajes cuentan con un campo destinado a la transmisión de este tipo de variables, por lo que es posible utilizarlo para transmitir un contador que se va incrementando con cada retransmisión. Además, gracias a que se usan

estos mensajes de control RPL, cada vez que se produzca un cambio en la topología, y por consiguiente en el número de saltos, esta información estará actualizada.

Los mensajes de control DIO son los encargados de transmitir información sobre el rango, que indica la distancia que hay hasta el coordinador teniendo en cuenta las métricas utilizadas. Este rango no se puede utilizar para contar el número de saltos, debido a que el incremento en cada salto dependerá del valor de la métrica relacionada con el enlace. Como este incremento es variable, no es posible conocer si un valor del rango se corresponde a uno o varios saltos.

RPLInstanceID				Version Number		Rank	
G	0	MOP	Prf	DTSN		Flags	Reversed
DODAGID							
Option Type = 0x02		Option Length		Metric Data			

Figura 3.8: Formato del mensaje DIO

Para poder transmitir una variable que se vaya incrementando un valor fijo, se ha utilizado el campo opcional *Metric Container* de los mensajes DIO, cuyo identificador es *0x02* tal y como se ve en la figura 3.8, que permite almacenar una métrica que se envía junto a otra información relativa al enlace, como es el rango. Para ello, cada vez que un nodo reciba un mensaje DIO extraerá el valor del campo *Metric Data*, lo incrementará y el resultado acumulado se envía en un nuevo *Metric Container* del mensaje DIO. En este caso, al ser un valor que representa un estado absoluto, no se necesita realizar un filtrado como el que se utiliza para las otras dos métricas, ya que este valor tiene que indicar exactamente el número de saltos que tiene un nodo. En la figura 3.9 se puede ver una representación del mecanismo utilizado para obtener el número de saltos, viendo cómo esta variable se va incrementando con cada salto que se aleja del nodo coordinador.

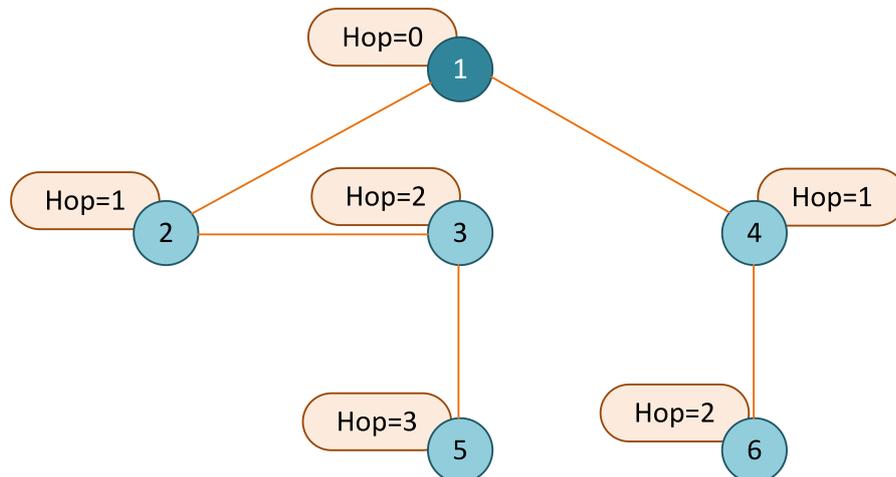


Figura 3.9: Mecanismo de obtención del número de saltos mediante mensajes de control RPL

Una vez se han obtenido los valores proporcionados por las tres métricas que se utilizarán para estimar el valor de calidad, es necesario normalizar estos valores para que todas las métricas se muevan dentro de un mismo rango de valores. En la implementación de la función objetivo MRHOF que realiza Contiki se utiliza un valor máximo de métrica permitido de 1024, que en

ETX se correspondería con un valor de 8, ya que está multiplicado por un factor de 128. Sin embargo, no se recomienda utilizar enlaces que tengan un ETX superior a 4 ya que significaría que el 75% de los mensajes no se transmiten correctamente.

Se han escogido unos límites entre 128 y 512 para implementar las funciones de mapeo que se muestran en la figura 3.10 para la métrica RSSI, figura 3.11 para la métrica ETX y figura 3.12 para la métrica de número de saltos. En el caso de ETX, los valores se encuentran en un rango entre 1 y 4, por lo que la función de mapeo únicamente deberá multiplicar por el factor de 128. Para el caso del RSSI los límites se han configurado en -62 dBm y -82 dBm para el peor caso y el número de saltos se ha limitado a un máximo de 8 saltos.

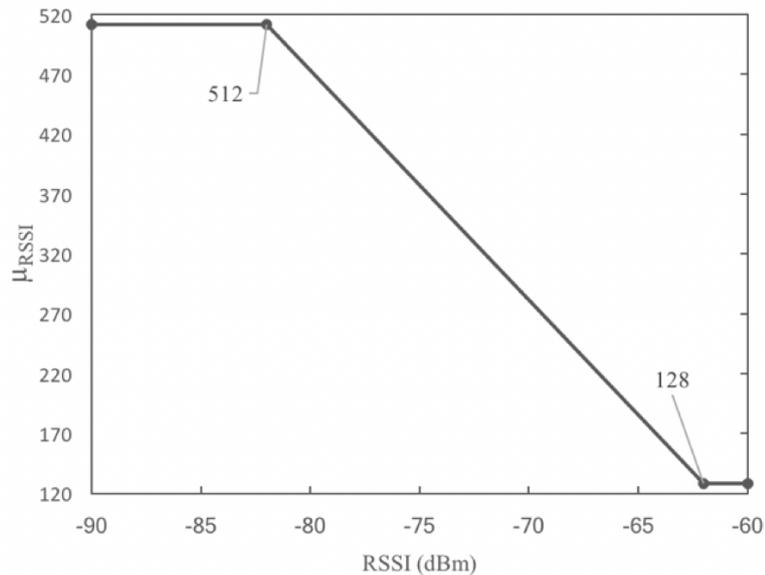


Figura 3.10: Función de mapeo RSSI

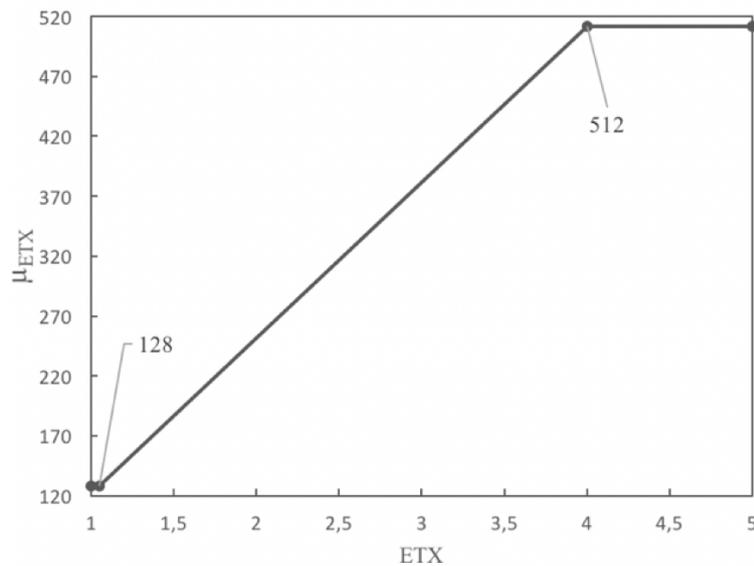


Figura 3.11: Función de mapeo ETX

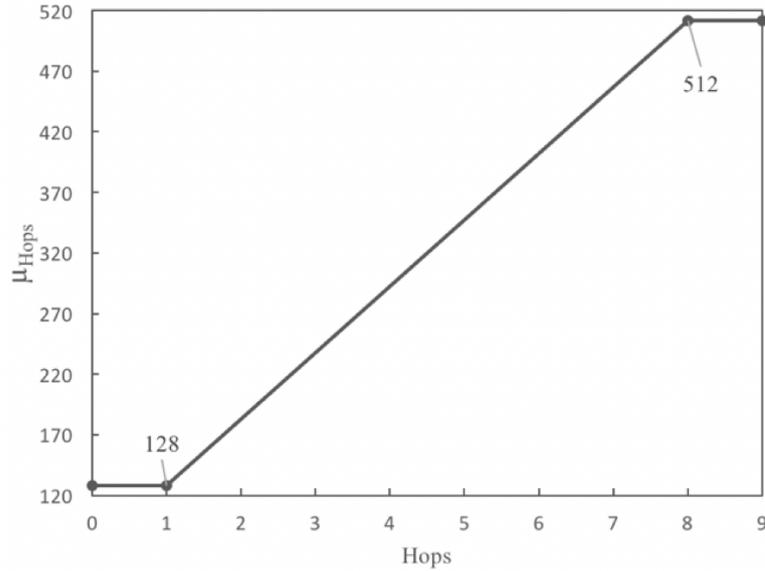


Figura 3.12: Función de mapeo número de saltos

Una vez se han normalizado las distintas métricas empleando las funciones descritas, es posible estimar la función de calidad dando unos pesos a cada una de estas métricas, que determinarán su influencia en el resultado final del valor de calidad.

En la siguiente función se puede ver la ecuación utilizada para obtener el valor de calidad Link Quality Score (LQS). Las variables α_i representan los pesos de cada métrica y las variables μ_i son los valores obtenidos de las funciones de mapeo. Los pesos de cada métrica se pueden configurar fácilmente para obtener distintas variaciones del valor de la función, lo que permite dar prioridad a enlaces con menores pérdidas o mejor latencia, en función de la aplicación en la que se vaya a utilizar.

$$LQS = \alpha_{RSSI} \cdot \mu_{RSSI} + \alpha_{ETX} \cdot \mu_{ETX} + \alpha_{HOPS} \cdot \mu_{HOPS} \quad (3.6)$$

Finalmente, es necesario implementar un mecanismo de histéresis que mejore la estabilidad de la red. Sin este mecanismo de histéresis los nodos cambiarían de padre en cuanto la calidad de otro vecino sea un poco superior. Si dos vecinos tienen resultados similares, el nodo podría estar continuamente cambiando de padre, lo que perjudicaría el intercambio de información debido a estas oscilaciones. El mecanismo de histéresis permite dar un margen entre la calidad de dos enlaces a la hora de cambiar de padre para evitar estos cambios continuos.

Una vez definida e implementada la función de calidad como parte de una función objetivo de RPL, se han llevado a cabo una serie de simulaciones para evaluar su funcionamiento y poder compararlo con otras soluciones como la función MRHOF. Dado que se trata de una función parametrizable, se han utilizado diferentes valores de los pesos de cada métrica para evaluar distintos comportamientos de la función de calidad. A continuación, se detallan las simulaciones que se han realizado y los resultados que se han obtenido de las mismas.

3.4.1 Simulaciones de la función de calidad multi-parámetro

Las simulaciones realizadas para evaluar la función de calidad se han llevado a cabo utilizando el simulador Cooja, que viene integrado en el sistema Contiki. Los resultados de estas simulaciones servirán para comparar el comportamiento de la función objetivo que utiliza por defecto Contiki, cuya métrica es ETX, con diferentes variaciones de la función de calidad propuesta.

Ya que las simulaciones pretenden determinar el comportamiento frente a cambios en la calidad del enlace, es importante poder controlar estos valores durante el desarrollo de las pruebas. Para ello es necesario poder modificar los valores del porcentaje de pérdida de paquetes o el nivel de RSSI. Cooja integra una herramienta que permite modificar estas métricas, llamada *Directed Graph Radio Medium* (DGRM) y cuenta con un plugin que permite configurar cada uno de los enlaces (DGRM Link Configurator). Este proceso permite cambiar los parámetros de ratio de recepción de paquetes, nivel RSSI del enlace, nivel de calidad LQI o *delay*. Para estas simulaciones únicamente interesa modificar el ratio de recepción de paquetes y el nivel de señal o RSSI.

Sin embargo, este configurador no permite automatizar el cambio de estos valores, por lo que ha sido necesario desarrollar un *script* que permita controlar la configuración de estos parámetros durante el desarrollo de las pruebas. Cooja implementa un editor de *scripts* que permite controlar la mayoría de variables de simulación, como el tiempo de simulación, la posición de los nodos o cambiar parámetros de otros *plugin* como el *DGRM Link Configurator*. Este último modo permite configurar la calidad de los diferentes enlaces que se están simulando.

El *script* ha sido desarrollado en JavaScript y básicamente implementa un bucle infinito que cada 10 milisegundos (el tiempo de duración de un *slot* temporal de TSCH) cambiará los valores del ratio de recepción y de RSSI dentro de un cierto rango predefinido. Es importante que este *script* se ejecute de igual forma que lo haría el *slotframe* que tenga configurado TSCH, para que los valores vayan cambiando de forma sincronizada con en el *script*. La configuración de los parámetros de simulación se muestra en la tabla 3.3 . Los valores de RSSI cambiarán de forma aleatoria desde -58 dBm hasta -84 dBm, configurando los enlaces más largos con valores más bajos de RSSI. Para el caso del ratio de recepción los valores variarán desde el 73% de los paquetes hasta el 85%, pretendiendo simular enlaces con pérdidas que afecten al parámetro ETX.

Tabla 3.3: Parámetros de configuración para las pruebas de calidad

Parámetro	Valor
Tamaño slotframe TSCH	7 slots
Número de canales	4
Slots activos	3 slots
Canales utilizados	11, 20, 25, 26
Periodo generación de datos	6 segundos

Manteniendo fijos estos parámetros de simulación, se han llevado a cabo 5 variantes de la misma, que se corresponden con cada una de las funciones objetivo bajo estudio. Una de estas simulaciones es la que utiliza Contiki por defecto, en la que se utilizará simplemente la

métrica de ETX, tal y como se utilizó para las pruebas de energía. Esto permitirá comparar los resultados con una de las funciones objetivo más utilizadas como es MRHOF.

Las simulaciones restantes utilizarán como métrica el valor que proporciona la función de calidad propuesta, dando a cada una de las simulaciones un valor a los diferentes pesos que determinan la función de calidad. En 3 de estas simulaciones se configurarán los pesos de tal forma que se utilice una única métrica de las tres disponibles, dando un peso nulo al resto. Con estas configuraciones se realiza una simulación donde la función de calidad solo utilice el parámetro ETX, otra en la que solo utilice el RSSI y una última en la que solo se emplee el número de saltos como métrica. La simulación restante implementará un valor de calidad dando un peso similar a cada métrica. Estas 5 simulaciones tendrán una duración total de 20 horas cada una, llegando a transmitir algo más de 400.000 paquetes UDP entre todas las simulaciones.

En cuanto a la topología se ha utilizado una red mallada de 8 nodos (7 nodos más el coordinador de la WSN). Se ha escogido una topología física que permitiera que solo tres de los dispositivos pudieran comunicarse directamente con el *root*, forzando así una comunicación multi-salto de al menos 2 saltos en algunos casos. Además, se ha colocado un último nodo en un tercer nivel que necesitará como mínimo de 3 saltos para llegar a su destino, lo que servirá para comparar el retardo que se produce en las diferentes configuraciones. En la figura 3.13 se puede ver una captura de una de las simulaciones en tiempo de ejecución. También se muestran los mensajes recibidos, que incluyen información para calcular las estadísticas necesarias para comparar las distintas funciones objetivo.

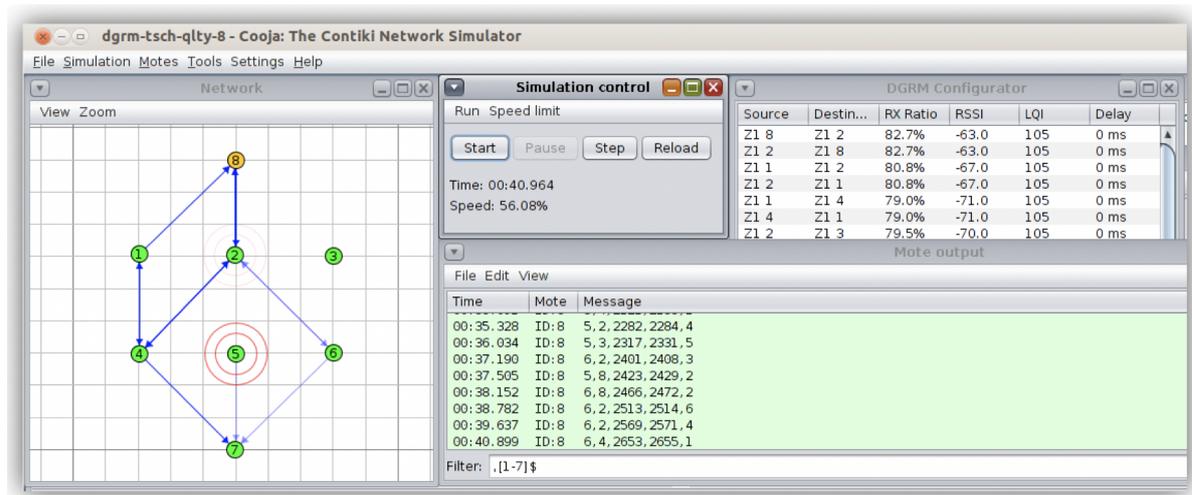


Figura 3.13: Simulación de la red de 8 nodos utilizando la función de calidad

3.4.2 Evaluación de resultados de la función de calidad

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones llevadas a cabo en Cooja. Se van a comparar las 5 configuraciones de funciones objetivo que se han realizado:

- MRHOF: utiliza la métrica tradicional de ETX que viene implementada en Contiki.
- LQS ($\alpha_{RSSI} = 1$): esta configuración implementa la función de calidad desarrollada dando un peso total a la métrica de RSSI, dejando el resto a cero.

- LQS ($\alpha_{ETX} = 1$): esta configuración implementa la función de calidad desarrollada dando un peso total a la métrica de ETX, dejando el resto a cero.
- LQS ($\alpha_{HOPS} = 1$): esta configuración implementa la función de calidad desarrollada dando un peso total a la métrica del número de saltos, dejando el resto a cero.
- LQS ($\alpha_i = 1/3$): esta configuración implementa la función de calidad desarrollada dando el mismo peso a las tres métricas.

En la figura 3.14 están representadas el porcentaje de pérdidas de paquetes que se ha producido durante las simulaciones para cada una de las configuraciones. Estos valores se han podido obtener gracias a que cada mensaje iba identificado mediante un número de secuencia, lo que permite conocer si se ha perdido alguno durante todo el tiempo de simulación.

Como se puede apreciar, las configuraciones que presentan un mayor porcentaje de pérdidas son aquellas en las que se utilizan el número de saltos o el nivel de RSSI como métricas para la función de calidad. Esto se debe a que ninguno de estos parámetros tiene en cuenta las pérdidas que se producen en el canal utilizado, intentando escoger aquel canal que minimice dicha métrica sin tener en cuenta si este enlace de comunicaciones provoca más pérdidas que otros.

Los resultados obtenidos para el número de saltos se pueden comparar con la utilización de la *Objective Function Zero*, en la que se utiliza la distancia hasta el *root* como una métrica para construir la topología RPL. La utilización de esta métrica se desaconseja por el IETF desde la aparición de la MRHOF, alegando que por sí sola no representaba las bondades del enlace de la comunicación.

En el caso del RSSI tiene sentido que tenga menores pérdidas que si se utiliza el número de saltos, ya que este parámetro guarda cierta relación con el parámetro ETX, sin llegar a tener una equivalencia proporcional, pero si siendo relevante ya que la distancia que separa los nodos afectará a que se transmita correctamente o no el mensaje.

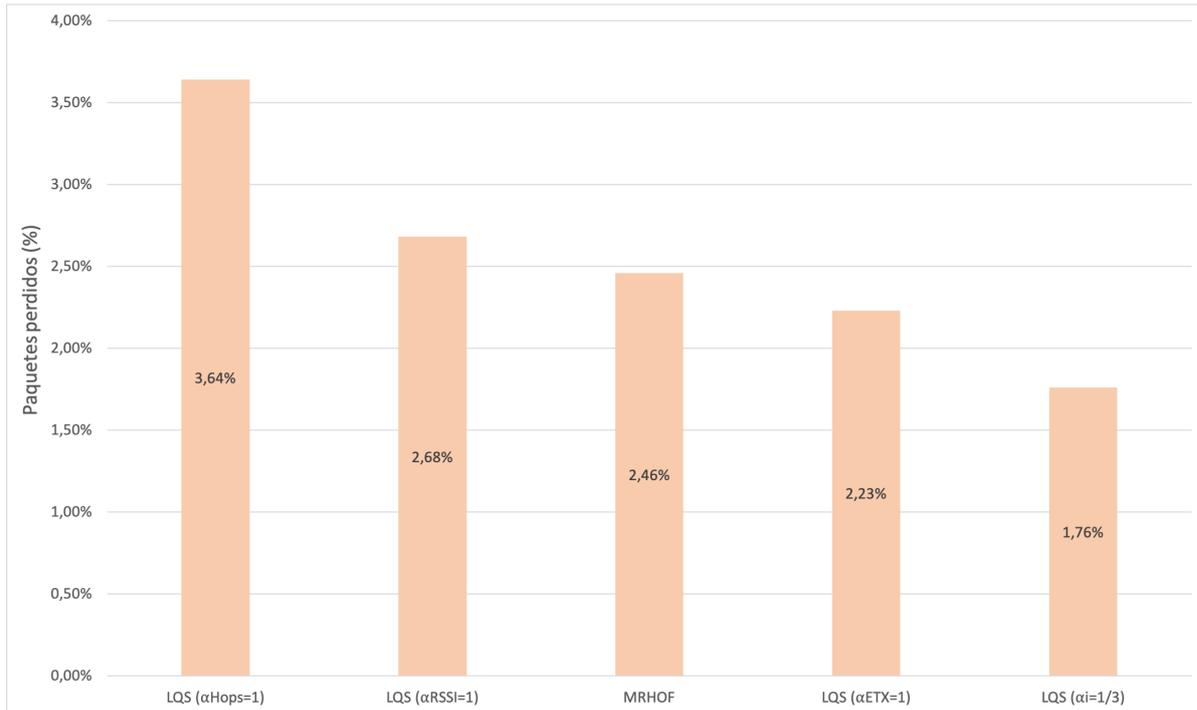


Figura 3.14: Pérdida de paquetes para las 5 configuraciones de O.F simuladas

Si se comparan los resultados obtenidos para la función objetivo MRHOF junto a los obtenidos por la implementación de la función de calidad utilizando únicamente ETX como métrica, se puede ver que sus porcentajes de pérdida de paquetes son muy similares. La única diferencia entre la MRHOF y la función de calidad ($\alpha_{ETX} = 1$) está en el valor del límite máximo de métrica permitido por el enlace. En el caso de MRHOF este valor está configurado como 1024, mientras que se utiliza un valor de 512 en el caso de la función de calidad, que vendrá determinado por el límite de las funciones de mapeo. Estos valores representan un $ETX = 4$, para 512 en el caso de $LQS(\alpha_{ETX} = 1$ y de $ETX = 8$, para 1024 en la función objetivo MRHOF, aunque no se recomienda utilizar enlaces cuyo valor de ETX sea superior a 4.

Esto se entiende ya que, un $ETX = 1$ representa un enlace en el que todos los paquetes se reciben correctamente, un $ETX = 2$ supondrían unas pérdidas del 50% de los paquetes, obteniendo unas pérdidas del 75% de los paquetes en el caso de tener un enlace con $ETX = 4$. Sin embargo, en la implementación de Contiki se utiliza un límite máximo para ETX, lo que explicaría que el porcentaje de pérdidas sea algo mayor utilizando MRHOF frente a la función de calidad, ya que se permite utilizar enlaces con peores características.

La configuración que presenta mejores resultados en cuanto al porcentaje de pérdidas es aquella en la que se utiliza la función de calidad como combinación de las tres métricas con una contribución idéntica para cada una. Este porcentaje de pérdidas es de por sí ya muy bajo en las diferentes configuraciones debido a la configuración de TSCH que se ha escogido, que debido a su funcionamiento determinista consigue paliar muchas de estas pérdidas producidas por interferencias o desvanecimientos. Aun así, se consiguen mejoras cercanas al 1% dentro de este pequeño intervalo de mejora, si se compara con las otras configuraciones.

Además de evaluar el porcentaje de pérdidas, se ha medido también la latencia de los mensajes desde el nodo más alejado físicamente del coordinador (nodo 7 de la figura 3.13). Los resultados muestran que, de media, la configuración que utiliza una combinación de las tres

métricas consigue un valor de latencia aproximadamente 3 milisegundos menor a la siguiente configuración con una latencia más baja (MRHOF). Si se analizan los resultados de la configuración que utiliza el número de saltos, los valores obtenidos no se corresponden con lo esperado. Aunque lo esperado inicialmente era obtener una menor latencia, los enlaces pueden tener peor comportamiento, provocando que sea necesario retransmitir más paquetes y, por lo tanto, el retardo finalmente sea mayor. La conclusión es que esta métrica no se aproxima lo suficiente a lo que pretendía representar, por lo que se podría cambiar por una mejor aproximación que caracterice el *end-to-end delay*.

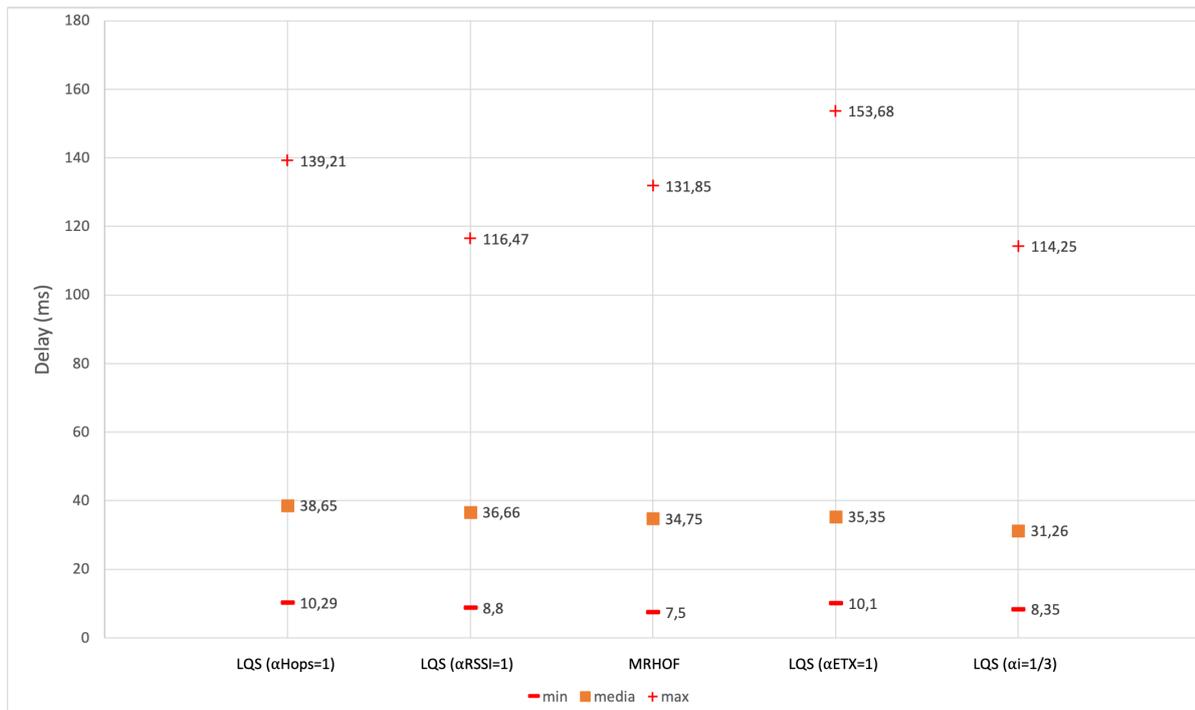


Figura 3.15: Caracterización del delay para las 5 configuraciones de O.F. simuladas

Se puede decir que, mediante la utilización de la función de calidad que se ha implementado, se han conseguido mejoras significativas en cuanto a porcentaje de pérdida de paquetes, manteniendo un valor medio de latencia inferior al del resto de configuraciones. La evaluación de diferentes aspectos del enlace permite tener un mayor conocimiento del medio por el que se van a transmitir los mensajes, pudiendo seleccionar la mejor alternativa de encaminamiento en base a las métricas utilizadas.

3.5 Conclusiones

En esta sección se han abordado diferentes análisis y estudios centrados en la obtención de un parámetro de calidad que no solo ayude a mejorar los procesos de toma de decisiones de las rutas de encaminamiento, sino que sirva como mecanismo para facilitar las labores de despliegue. Este sistema hace uso del análisis de calidad del enlace de todos los nodos de la red para proporcionar al usuario un sistema que permita guiarlo durante las labores de despliegue de una red de sensores, haciéndolo más sencillo y evitando el uso de herramientas externas.

Para este valor de calidad se han estudiado dos propuestas diferentes. La primera de ellas consiste en utilizar la información del nivel restante de las baterías de los dispositivos como estimador de calidad a la hora de seleccionar las rutas de encaminamiento. El objetivo es extender el tiempo de vida útil de toda la red, favoreciendo aquellos enlaces que tienen un nivel de batería mayor, y ajustando las rutas conforme este nivel de batería va evolucionando durante el tiempo de vida de toda la red. Tras analizar los resultados, se ha demostrado que utilizar este tipo de métricas energéticas permite extender considerablemente el tiempo de vida útil de la red, permitiendo que las redes de sensores puedan funcionar más tiempo de manera desatendida, aspecto muy importante en aplicaciones temporales o itinerantes.

En el segundo caso se propone una nueva métrica de calidad para la selección de rutas en RPL. En este caso se realiza una métrica combinada de diferentes parámetros de calidad del enlace, como son el parámetro ETX, el valor de RSSI de los diferentes canales que intervienen en TSCH, y el número de saltos hasta el nodo raíz. Estos tres parámetros caracterizan determinados aspectos de un mismo enlace, por lo que se favorece escoger rutas que optimicen estos tres parámetros de manera conjunta.

Caracterización del tiempo de sincronización TSCH y conexión RPL

4.1 Introducción

Este capítulo está centrado en analizar el comportamiento de las redes de sensores durante la etapa de puesta en marcha de la red, teniendo como objetivo caracterizar el tiempo que tardan en sincronizarse una red basada en TSCH y RPL. La selección de estas dos tecnologías se ha convertido en una de las soluciones de facto en el despliegue de redes de sensores inalámbricos, tal y como se ha demostrado en el Capítulo 2. Las características deterministas del estándar IEEE 802.15.4e, utilizando el mecanismo TSCH, junto a las capacidades de encaminamiento dinámico para redes con bajos recursos que se obtienen con RPL, permiten el despliegue de WSN robustas y fiables.

Sin embargo, el despliegue y sincronización de estas redes sigue presentando algunas dificultades, debidas principalmente al comportamiento del mecanismo TSCH durante la fase de sincronización de los dispositivos. Los nodos que ya pertenecen a la red son los encargados de transmitir una serie de mensajes de señalización, que permiten que los nuevos nodos obtengan la información necesaria para sincronizarse. Debido al uso de diferentes frecuencias y a la baja tasa de transmisión de estos mensajes, un nodo que no conoce, a priori, en que canal debe esperar este mensaje, puede tardar un tiempo considerable en obtener esta información. Este problema no solo dificulta el proceso de despliegue o la incorporación de nuevos nodos a la red de sensores, debido a tiempos excesivos para lograr la sincronización, sino que también conlleva un consumo excesivo de energía. Esto se debe a que los nuevos nodos que están escaneando los diferentes canales en busca de una baliza, necesitan tener el interfaz radio activo un 100% del tiempo hasta recibir este mensaje de señalización.

En este capítulo se va a analizar este proceso de sincronización TSCH y posterior conexión al árbol RPL, proponiendo un modelo analítico que permita caracterizar el tiempo que lleva la formación de este tipo de redes. Este análisis permite conocer en profundidad los mecanismos que intervienen en este proceso, con el objetivo de poder mejorarlos proponiendo diferentes

mecanismos que se verán en el Capítulo 5. En la siguiente sección se detallan el método de sincronización realizado en TSCH y el proceso de intercambio de mensajes de control de RPL.

4.2 Método de sincronización en redes TSCH y conexión RPL

El método de acceso al medio TSCH presenta numerosas ventajas gracias a su funcionamiento determinista y a su mecanismo de salto en frecuencia. Para conseguir este determinismo, las redes TSCH necesitan mantener una sincronización temporal precisa, y gracias a la planificación que comparte toda la red, los equipos pueden llegar a transmitir información sin probabilidad de colisión con otros mensajes.

Los recursos que deben gestionarse a través de esta planificación son los *timeslots*, una serie de *slots* en los que se divide el espacio temporal, dando tiempo suficiente para transmitir un mensaje del tamaño máximo definido en el estándar, y recibir un reconocimiento confirmando que el mensaje se ha recibido correctamente. La duración más utilizada para este *slot* es de 10ms, de ahí que sea necesario mantener una sincronización precisa, ya que si estos *slots* están desalineados no se podrá intercambiar información entre dos nodos.

Para mantener esta sincronización durante toda la vida útil de la red, todos los nodos envían periódicamente mensajes de balizamiento, llamados *Enhanced Beacons* (EB). Estos mensajes de difusión contienen la información necesaria para que un nuevo nodo pueda sincronizarse con la red, además de otro tipo de información como la planificación base utilizada.

El parámetro enviado en los EB para llevar a cabo la sincronización se conoce como *Absolute Slot Number* (ASN), y representa el valor absoluto de los *slots* que han pasado desde que se inició la red. De esta manera, todos los nodos que estén sincronizados con la red TSCH comparten un mismo origen de tiempos, obtenido gracias al parámetro ASN. Para mantener esta sincronización en el tiempo, cada vez que un nodo recibe un nuevo mensaje EB, compara su valor de ASN con el que ha recibido, compensando las posibles desviaciones que se puedan producir.

Por el contrario, un nodo que aún no está sincronizado, debe de realizar un escaneo en los diferentes canales utilizados en TSCH hasta recibir un EB con el que conseguir sincronizarse. Los nodos ya sincronizados enviarán periódicamente mensajes EB en los diferentes canales configurados, siguiendo la planificación establecida en su configuración.

Tras obtener la sincronización, los nodos siguen sin ser capaces de transmitir información más allá de su rango de cobertura, ya que no tienen información sobre la red ni las rutas que deben seguir para alcanzar su destino. Por este motivo, una vez sincronizados, los dispositivos inician un intercambio de mensajes de control RPL (mensajes ICMPv6 DIO, DAO y DIS) para unirse a la topología lógica de la red formada por el protocolo RPL.

Por lo tanto, el proceso completo de despliegue se puede dividir en dos fases. En la primera fase, los nodos comienzan el proceso de escaneo en busca de balizas para poder sincronizarse con la red TSCH. Una vez sincronizados, en la segunda fase, los nodos aún necesitan unirse a la red RPL. Los nodos que acaban de sincronizarse comienzan a enviar mensajes DIS para solicitar la información de encaminamiento y del árbol RPL. Los nodos ya conectados estarán enviando mensajes DIO con la información necesaria para que los nuevos nodos se conecten a la red. A continuación, se muestra en detalle como se llevan a cabo ambos procesos.

Según el funcionamiento definido en el estándar de IEEE 802.15.4e, los mensajes EB se transmiten con un periodo fijado en la configuración de los dispositivos. Debido al mecanismo de salto en frecuencia, y a que el tamaño de los *slotframes* tiene un valor primo, cada vez que se envíe un mensaje EB se utilizará un canal diferente, siguiendo un patrón de salto en frecuencia definido en la configuración del dispositivo. Para calcular la frecuencia utilizada en cada canal, a partir del valor de ASN, se utiliza la ecuación 2.2 descrita en el Capítulo 2.

Por otro lado, los nodos que esperan sincronizarse comienzan el proceso de escaneo. Dado que los mensajes EB se transmiten por diferentes frecuencias siguiendo un patrón de salto determinado, el proceso de escaneo también se realiza en diferentes frecuencias, pero cambiando la frecuencia de escaneo de manera aleatoria.

En la configuración de los dispositivos intervienen una serie de parámetros que afectan a este proceso de sincronización, como el número total de canales utilizados, el número de canales en los que se escanea, el tiempo de escaneo de cada canal o el patrón de salto en frecuencia. Tal y como se describe en el Capítulo 2, en la banda de 2.4GHz se pueden utilizar un máximo de 16 canales, que pueden ser diferentes de los canales que se escanean. La configuración de estos parámetros no viene detallada en el estándar, por lo que una mala configuración puede conllevar que el tiempo de sincronización sea muy alto o incluso que nunca lleguen a sincronizarse, o que por el contrario, un periodo bajo pueda afectar significativamente al consumo energético.

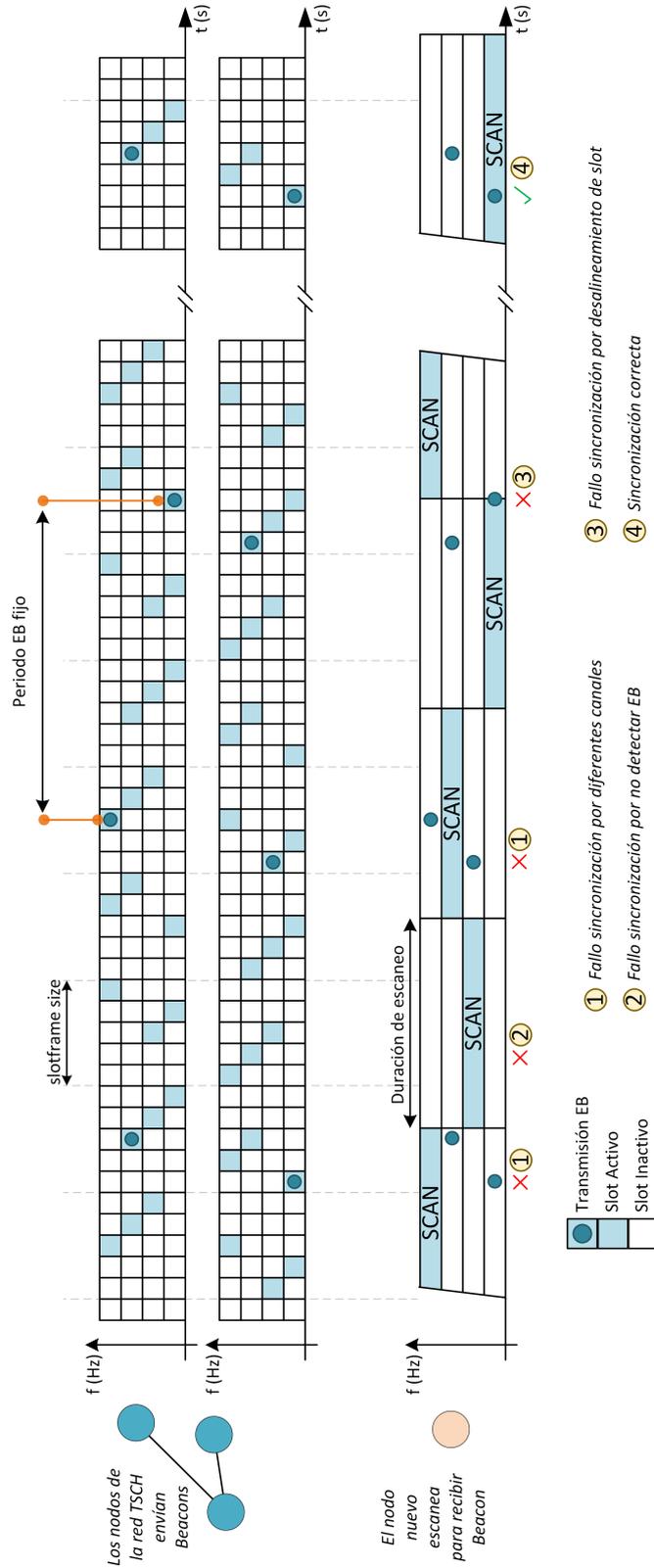


Figura 4.1: Mecanismo de balizamiento y escaneo en TSCH

En la figura 4.1 se representan los *slotframes* de dos nodos ya sincronizados, y un nodo durante su fase de escaneo. En ambos procesos se utilizan un total de cuatro canales, tanto para el funcionamiento normal como para la fase de escaneo, aunque durante el escaneo se podría utilizar un subconjunto menor de canales. Como se puede ver, la duración del escaneo es mucho mayor que el tiempo en que se transmite un mensaje por los nodos ya conectados. En el diagrama se muestran también diferentes casos por los que la sincronización puede fallar. Estos intentos fallidos de sincronización se pueden deber a que durante el tiempo que el nodo está escuchando un canal no hay ningún mensaje transmitiéndose, o bien porque el mensaje se transmite en una frecuencia diferente a la que el nodo está escuchando. También es interesante destacar que durante el proceso de escaneo, el nodo mantiene la radio siempre activa en diferentes canales hasta que reciba la baliza, mientras que los nodos ya sincronizados pueden apagar su radio en los slots inactivos para reducir el consumo energético.

Dependiendo de la configuración de parámetros como el tiempo entre balizas (T_{eb}), el tiempo de escaneo (T_{scan}), y el número de canales utilizados en fase estacionaria (C) o durante el escaneo (C_S), el proceso de sincronización puede ser más o menos largo. Esto influye tanto en el número de mensajes de sincronización enviados como en el tiempo que permanece la radio activa, con el consumo energético que eso conlleva.

Una vez los nuevos dispositivos se han sincronizado en TSCH, los nodos seguirán el mismo patrón de *slots* activos e inactivos dentro del *slotframe*, reduciendo así su ciclo de trabajo respecto a la fase de escaneo. Sin embargo, los nodos aun no conocen la topología de la red, por lo que es necesario que reciban un mensaje DIO de RPL. Los nodos que están intentando unirse a la topología comenzarán un proceso de envío de mensajes DIS para solicitar la información necesaria para unirse a la topología RPL. Estos mensajes se van a transmitir con un periodo fijo (T_{dis}) que vendrá configurado por defecto en los equipos.

Por otro lado, los nodos ya conectados a la red estarán enviando mensajes DIO utilizando para ello el mecanismo de *Trickle Timer*, que modifica el periodo con el que se envían estos mensajes. El mecanismo de *Trickle Timer* permite ir incrementando el tiempo entre mensajes DIO, de tal forma que si la red permanece estable se envíen mensajes DIO con mucha menos frecuencia. La única forma de reiniciar el temporizador del *Trickle Timer* es cuando se produce algún cambio en la topología, como un cambio de padre, o bien al recibir un mensaje DIS de otro dispositivo.

En la figura 4.2 se representa el mecanismo de intercambio de mensajes RPL después de que un nodo nuevo se haya sincronizado. Se puede ver como el nodo que ya forma parte de la red va modificando el periodo con el que transmiten los mensajes DIO, y como al recibir un mensaje DIS por parte del nodo nuevo el temporizador utilizado por el *Trickle Timer* se reinicia. De esta manera se está forzando a que se envíen mensajes DIO más frecuentemente para favorecer la actualización del árbol RPL. La conexión a la topología RPL solo ocurre cuando los nuevos nodos reciben algún mensaje DIO con la información sobre la topología.

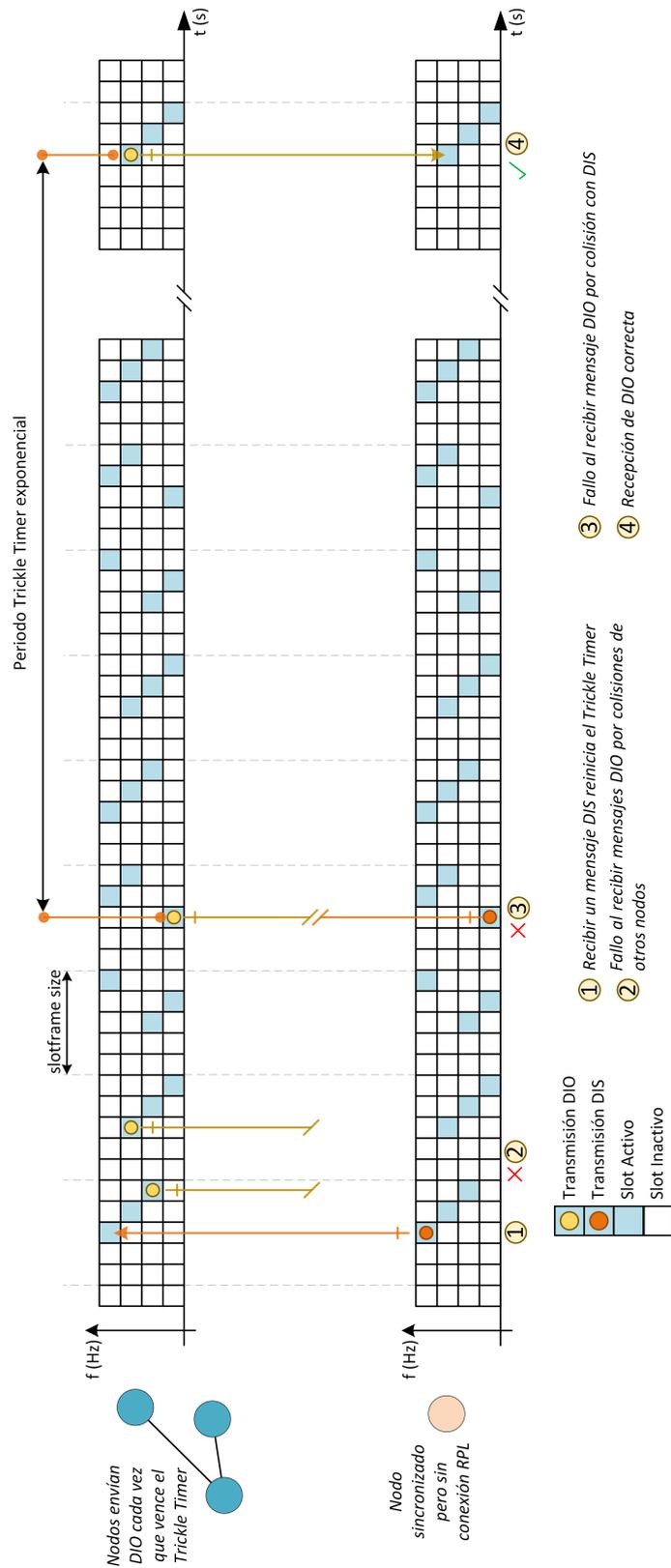


Figura 4.2: Mecanismo de intercambio de mensajes de control RPL y reinicio del Trickle Timer

Para intentar agilizar la fase de sincronización TSCH, en la implementación de Contiki se opta por modificar el periodo de transmisión de balizas de manera dinámica. Para conseguir esto, el periodo de transmisión de balizas en TSCH se basa en el *Trickle Timer* de RPL, de tal forma que cada vez que se produce un cambio en el periodo del *Trickle Timer*, el periodo de transmisión de EB (T_{eb}) también se modifica. Esta modificación evita que se transmitan los mensajes de sincronización con un periodo fijo, lo que permite que se envíen menos mensajes de sincronización cuando la red ya ha sido desplegada y ha pasado un tiempo desde que se realizó la sincronización.

De esta forma se consigue reducir considerablemente la congestión de la red, además de reducir el consumo general de los dispositivos, ya que se envían menos mensajes de control. Sin embargo, los parámetros de TSCH se están modificando basándose en las necesidades de RPL, ya que solo se modificará el periodo de transmisión de mensajes EB cuando la topología cambie o se reciba un mensaje DIS. Este funcionamiento provoca que los tiempos de conexión sean mucho mayores ya que los mensajes DIO no necesitan transmitirse con tanta frecuencia como las balizas en TSCH.

Por lo tanto, es necesario que los nodos sincronizados reciban un mensaje DIS para reiniciar el *Trickle Timer*, y de esta forma también el periodo de transmisión de balizas. Sin embargo, los dispositivos que aún no están sincronizados e inician el proceso de escaneo, no son capaces de enviar mensajes DIS hasta que no estén sincronizados, por lo que no hay forma de que un nodo con intenciones de unirse pueda reiniciar el periodo de transmisión de balizas. Este funcionamiento reduce considerablemente las oportunidades de que un nodo nuevo reciba una baliza para poder sincronizarse.

En las siguientes secciones del capítulo se va a definir un modelo analítico que permita caracterizar el tiempo que lleva realizar el proceso completo de conexión. Esto incluye tanto la fase de sincronización para TSCH, como el intercambio de mensajes de control RPL para construir la topología y formar las tablas de encaminamiento.

4.3 Modelo analítico para sincronización TSCH y conexión RPL

Para poder obtener estimar un valor aproximado del tiempo que lleva a un nuevo nodo conectarse completamente a la red, incluyendo tanto el proceso de sincronización en TSCH como el proceso de conexión al árbol RPL, se ha propuesto un modelo analítico que pueda caracterizar este comportamiento. El modelo está compuesto por dos partes, una que permite estimar el tiempo total en obtener la sincronización TSCH, y otra que modela el comportamiento del intercambio de mensajes RPL.

A continuación, se muestran los principales parámetros de configuración que intervienen en el proceso de sincronización TSCH.

- **EB transmission period (T_{eb}).** Tiempo de transmisión entre balizas TSCH. Su valor no coincide con el tamaño del *slotframe*, por lo que este mensaje se enviará en el siguiente slot activo una vez se genere la baliza.
- **Tamaño del *slotframe* (SF_{tsch}).** Es el número total de slots para el slotframe TSCH.
- **Number of channels (C).** Esta variable representa el subconjunto de canales utilizados durante la operación normal de la red. Existen un total de 16 canales para la banda de 2.4

GHz, pero es posible escoger un subconjunto de ellos para limitar el número de canales que se utilizan durante el funcionamiento normal de la red. El valor de esta variable afectará al tiempo de sincronización ya que cuantos más canales haya configurados más tiempo tardará en recibir una baliza correctamente.

- **Number of neighbors (N).** Determina el número de vecinos que hay dentro del área de cobertura del nodo que se quiere unir. Dentro de este área de cobertura, el nodo nuevo podrá recibir mensajes EB desde N nodos.
- **Scanning period (T_{scan}).** Este periodo determina el tiempo que se escanea cada uno de los canales de manera individual. Los nodos que se quieren unir a la red escuchan durante T_{scan} el mismo canal, configurando un nuevo canal de manera aleatoria hasta que se reciba una baliza correctamente.
- **Packet Delivery Rate (PDR).** Este parámetro representa la probabilidad de éxito de recibir un mensaje correctamente. Los mensajes de señalización se pueden perder debido a una colisión con otros mensajes y también debido a las interferencias en el canal de transmisión.

La tabla 4.1 y la tabla 4.2 muestran los principales parámetros utilizados para desarrollar el modelo analítico, incluyendo los parámetros que se acaban de comentar.

Tabla 4.1: Variables del modelo analítico relacionadas con la configuración de TSCH

Símbolo	Descripción
T_{eb}	Representa el periodo de transmisión de balizas.
SF_{tsch}	Representa el tamaño del <i>slotframe</i> dedicado al plano de tráfico de TSCH, y se cuenta como el número total de <i>timeslots</i> que se repiten periódicamente.
C	Representa el número total de canales de comunicación utilizados.
N	Representa el número de vecinos enviando balizas dentro del área de cobertura del nodo que se quiere unir a la red.
T_{scan}	Periodo de escaneo. En TSCH, el canal se va cambiando de manera aleatoria cada T_{scan} segundos.

Tabla 4.2: Variables del modelo analítico TSCH

\overline{SF}	Representa el valor medio del número de <i>slotframes</i> necesarios para recibir un mensaje EB correctamente.
T_{sync}	Representa el valor medio del tiempo necesario para que un nuevo nodo se sincronice con la red TSCH, teniendo en cuenta el número de vecinos y el periodo de transmisión de balizas.
PDR	El parámetro de ratio de mensajes recibidos representa el éxito de las comunicaciones.

Además de los parámetros mencionados en las tablas anteriores, el modelo tiene en cuenta la probabilidad de éxito de las comunicaciones, representado con el parámetro PDR , que indica la tasa de paquetes entregados.

Para comenzar a definir el modelo que permita estimar el tiempo de sincronización de un nuevo nodo, es necesario realizar una serie de consideraciones iniciales, que permiten definir el comportamiento de las ecuaciones en un entorno más controlado. Para empezar, partimos de una planificación inicial donde hay configurado un *slotframe* de tamaño SF_{tsch} . Cada nodo, entre los N vecinos que ya forman parte de la red, tienen asignado un *slot* garantizado para el envío de balizas, empleando para ello el planificador autónomo Orchestra. Este *slot* se asigna en base al identificador único del nodo, por lo que el tamaño máximo de nodos que se pueden unir a la red utilizando un *slot* garantizado es igual a SF_{tsch} . De esta manera se asegura que no van a existir colisiones entre mensajes de balizamiento.

Asumiendo que el tiempo de escaneo T_{scan} es lo suficientemente alto como para que los canales no cambien hasta recibir una baliza correctamente ($T_{scan} \gg T_{eb}$), se calcula el número medio de *slotframes* necesarios para recibir una baliza. Si un nodo está escuchando un canal fijo el 100% del tiempo, al menos será necesario enviar C balizas si se utilizan canales diferentes en cada *slotframe*. Para permitir que se utilice un canal diferente en cada slot de diferente *slotframe*, es necesario configurar un valor de SF_{tsch} con un valor primo.

Este valor medio del número de *slotframe* para recibir una baliza correctamente (\overline{SF}) se puede modelar como una variable aleatoria discreta entre 1 y C . Esto significa que en el mejor de los casos la baliza se va a enviar en el primer *slotframe* disponible. En el peor caso serán necesarios C *slotframes* para recibir una baliza en cualquiera de C los canales configurados. Todos los casos intermedios pueden ocurrir con la misma probabilidad. Si también se tienen en cuenta las pérdidas debidas al canal de comunicaciones, el número medio de *slotframes* necesarios para recibir una baliza vendrá representado por la siguiente ecuación:

$$\overline{SF} = \frac{C + 1}{2} \cdot \frac{1}{PDR} \quad (4.1)$$

Asumiendo que las balizas se envían con un periodo de transmisión fijo igual a T_{eb} , este factor se multiplicará por el número medio de *slotframes*. Además, se debe tener en cuenta que los N vecinos están enviando balizas dentro del área de cobertura del nodo que se quiere unir, por lo que el número medio del valor del periodo de transmisión de balizas se puede entender como T_{eb}/N , ya que se envían N balizas en el mismo *slotframe*. El valor medio del tiempo necesario para que un nodo se sincronice, cuando se envían balizas con un periodo de transmisión fijo de T_{eb} se puede representar por la siguiente ecuación.

$$T_{sync} = \frac{T_{eb}}{N} \cdot \overline{SF} \quad (4.2)$$

A continuación, se modela el tiempo que tarda el nuevo nodo que acaba de sincronizarse en obtener la información referente a la topología RPL. Este nuevo nodo únicamente necesita conocer las rutas de encaminamiento para estar totalmente conectado a la red WSN. Para ello, los nuevos nodos deben recibir un mensaje DIO de uno de los nodos que ya pertenecen a la red, para después enviar un mensaje DAO hacia el *root* para formar las rutas descendentes.

La tabla 4.3 muestra los diferentes parámetros que influyen en el proceso de unión a la topología RPL. Estos parámetros se han tenido en cuenta a la hora de definir el modelo analítico, el cual permite caracterizar el tiempo que le lleva al nuevo nodo obtener dicha configuración.

Tabla 4.3: Variables del modelo analítico RPL

Símbolo	Descripción
P_{dio}	Probabilidad de que un nodo transmita un mensaje DIO.
$T_{trickle}$	Representa el periodo de transmisión de los mensajes de control DIO.
SF_{rpl}	Representa el tamaño del <i>slotframe</i> dedicado al plano de tráfico RPL, contado como el conjunto de <i>timeslots</i> que se repiten periódicamente.
N	Representa el número de vecinos enviando mensajes de control RPL dentro del área de cobertura del nodo que se quiere unir a la red.
t_{pdr}	Representa el tiempo requerido para enviar un mensaje DIO basándose en la probabilidad del parámetro PDR .
T_{dio}	Representa el tiempo necesario para recibir un mensaje DIO después de que un nodo se haya sincronizado con la red TSCH.
PDR	El parámetro de ratio de mensajes recibidos representa el éxito de las comunicaciones.

Después de la fase de sincronización, los nodos que ya pertenecen al árbol RPL están enviando mensajes DIO basándose en el valor actual del *Trickle Timer*. A partir de esto, se puede asumir que la probabilidad de que un nodo transmita un mensaje DIO es la siguiente.

$$P_{dio} = \frac{SF_{rpl}}{T_{trickle}} \quad (4.3)$$

Esta probabilidad viene determinada por el tamaño del *slotframe*, SF_{rpl} , el cual solo tiene un único slot compartido, y también del valor actual del *Trickle Timer*, $T_{trickle}$, cuyo valor será diferente dependiendo del estado en el que se encuentre el *Trickle Timer*. Para calcular la probabilidad de que no se produzca una colisión, se puede hacer uso de la siguiente expresión:

$$P_{dio}(1 - P_{dio})^{N-1} \quad (4.4)$$

donde $N - 1$ es el número de nodos que no están enviando mensajes DIO. Ya que se puede recibir por todos los nodos, esta probabilidad vendrá multiplicada por N .

$$N \cdot P_{dio}(1 - P_{dio})^{N-1} \quad (4.5)$$

Si se tiene en cuenta la probabilidad de éxito de la transmisión (PDR) es posible determinar el número de mensajes, o número de *slotframes* para recibir correctamente el mensaje DIO. Teniendo en cuenta la probabilidad determinada por la variable PDR , el mensaje DIO se recibirá en el peor caso en un tiempo determinado por la variable SF_{rpl} , y en el mejor caso, se recibirá en el siguiente *timeslot*. Si se toma el valor promedio, se obtiene un tiempo igual a $SF_{rpl}/2$. Con una probabilidad $(1 - PDR)$, el mensaje DIO no se transmitirá en el primer *slotframe*, pero sí en los siguientes, teniendo en cuenta un máximo de cuatro reintentos para cada mensaje.

$$t_{pdr} = \sum_{i=0}^4 (SF_{rpl} \cdot i + \frac{SF_{rpl}}{2} \cdot PDR) \cdot (1 - PDR)^i \quad (4.6)$$

El tiempo de transmisión de un DIO correctamente enviado vendrá determinado por la siguiente ecuación, donde $T_{trickle}/2N$ es el tiempo medio que tarda en generarse un mensaje DIO teniendo en cuenta los N nodos vecinos, al que se le añade el tiempo que requiere recibir ese mensaje, en base a la probabilidad PDR y a las posibles colisiones con otros mensajes DIO.

$$T_{dio} = \frac{T_{trickle}}{2 \cdot N} + \frac{t_{pdr}}{N \cdot (1 - P_{dio})^{N-1}} \quad (4.7)$$

4.4 Validación del modelo analítico TSCH-RPL

Para llevar a cabo la validación del modelo analítico propuesto, tanto para la parte de TSCH como la de RPL, se han llevado a cabo diferentes simulaciones. En estas simulaciones se han modificado los parámetros del número de vecinos totales dentro del área de cobertura y también el periodo de transmisión de los mensajes de señalización (balizas en el caso de TSCH y mensajes DIO en el caso del protocolo RPL).

Las configuraciones de la pila de protocolos, así como las diferentes variaciones de las configuraciones simuladas, se han basado en el sistema operativo Contiki. En este sistema es posible configurar la pila completa de comunicaciones, basada en el estándar IEEE 802.15.4e, incluyendo diferentes mecanismos de acceso al medio como TSCH, y con protocolos como RPL para encaminamiento y 6LoWPAN como capa de adaptación IPv6. También incluye diferentes aplicaciones útiles como el mecanismo de planificación autónomo Orchestra, el cual también se ha utilizado durante estas simulaciones.

El entorno de desarrollo de Contiki incluye un simulador llamado Cooja, que permite simular el comportamiento real de una red de sensores basada en la pila de comunicaciones de Contiki. En la siguiente tabla se muestran los principales parámetros físicos de configuración, que serán comunes en todas las simulaciones realizadas para la validación del modelo. Tal y como se indica en esta tabla, cada una de las configuraciones se ha repetido un total de 30 veces para tener suficiente masa estadística para poder probar la validez del modelo analítico.

Tabla 4.4: Configuración de las simulaciones

Parámetros	Valores
Número de vecinos para un nuevo nodo	[1;2;5;7;10;15]
Semillas para cada simulación	30
Tiempo hasta red estacionaria	15-20 minutos

Tal y como se puede ver en la figura 4.3, los nodos que forman parte del conjunto de dispositivos ya sincronizados se encuentran posicionados en línea, siempre dentro del área de cobertura del nuevo nodo que se quiere unir, en este ejemplo el nodo 6. Este tipo de despliegue se ha escogido debido a que la topología física de la red no tiene un impacto significativo en los resultados, ya que lo único que importa es que todos estos nodos se encuentren dentro del área de cobertura enviando mensajes de señalización, tanto de TSCH como de RPL.

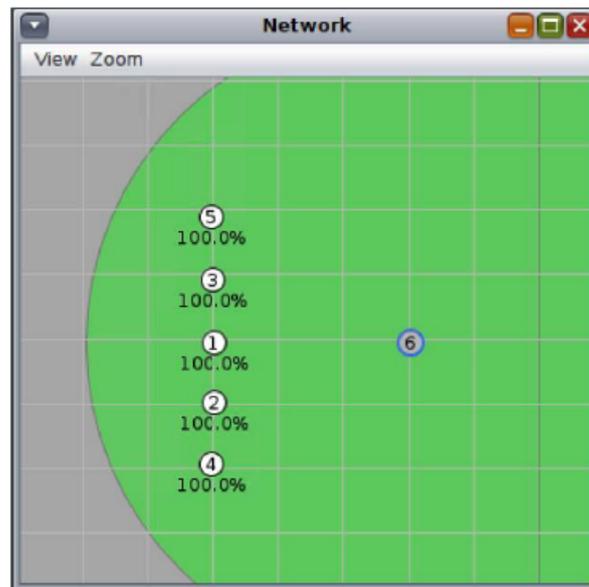


Figura 4.3: Despliegue para la validación del modelo analítico con $N = 5$

El procedimiento seguido en cada simulación comienza por desplegar una red con un cierto número de nodos, dependiendo de cada configuración. Una vez todos los nodos están conectados, se espera un tiempo para que la red se estabilice y no se produzcan cambios en la topología. Este tiempo estará entre 15 y 20 minutos desde el inicio de la simulación. Una vez pasado este tiempo, se añade un nuevo nodo a la topología, que será el nodo bajo estudio.

Tabla 4.5: Configuración de la pila de protocolos

Parámetros	Valores
Tiempo de escaneo TSCH	256 s
Duración del timeslot	10 ms
Tamaño de slotframe para EBs	101 slots
Tamaño de slotframe para RPL	101 slots
Número de canales TSCH	4 canales
Número de canales de escaneo	4 canales
RPL Trickle Timer Interval Min	4 s
RPL Trickle Timer Interval Doublings	Desde 1 a 4
RPL Trickle Timer constante de redundancia	10
Intervalo de DIS	60 s

Los dos eventos que determinan la evolución de la simulación son: el instante en el que el nuevo nodo se sincroniza con la red al recibir una baliza TSCH; y el instante en el que el nuevo nodo recibe un mensaje DIO para obtener la información sobre la topología RPL. En la tabla 4.5 se muestra la configuración base de la pila de protocolos utilizada durante las simulaciones. En el caso de la planificación, se ha escogido el mecanismo Orchestra, ya que permite separar las planificaciones en diferentes planos de tráfico, dando prioridad a aquellos mensajes con mayor orden de prioridad. Además, para prevenir que estas planificaciones se solapen, se ha escogido un tamaño de *slotframe* igual a 101 *slots* en ambos casos. Este tamaño permite que los *timeslots* se repitan aproximadamente cada segundo, lo que da suficiente margen para la transmisión de mensajes de señalización cada 4 segundos.

La figura 4.4 muestra la planificación de Orchestra escogida. En el caso del plano de control RPL, la planificación escogida se basa en *minimal 6TiSCH*, en el que solo se configura un único *slot* compartido por todos los nodos de la red, de tal forma que el acceso a este recurso se resuelva mediante contienda.

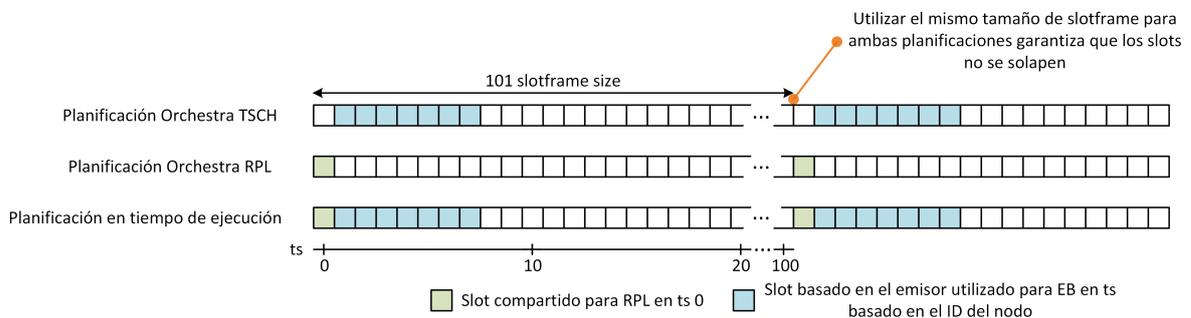
**Figura 4.4:** Planificación de diferentes slotframes en Orchestra

Tabla 4.6: Parámetros de simulación para TSCH y RPL

Periodo de EB para las simulaciones TSCH	4 s	8 s	16 s	32 s	-	-
Número de nodos	1	2	5	7	10	15
Periodo de DIO para las simulaciones RPL	4 s	8 s	16 s	32 s	-	-

Para poder validar correctamente cada una de las contribuciones del modelo, se han realizado dos tipos de simulaciones diferentes para las ecuaciones de TSCH y RPL. La primera permite caracterizar la evolución del proceso de sincronización en TSCH, mientras que la otra se centra en caracterizar el tiempo de conexión del nuevo nodo a la topología RPL. De esta manera se consigue aislar el comportamiento de cada uno de los protocolos, de tal forma que los cambios en la configuración de uno de ellos influyan lo menos posible en el comportamiento del otro protocolo.

Para las simulaciones relacionadas con la sincronización de TSCH, se han modificado los parámetros de número de vecinos dentro del área de cobertura y también el periodo de transmisión de las EB, de tal forma que se observe el comportamiento del tiempo de sincronización para diferentes tipos de configuraciones. En el caso del protocolo RPL en las simulaciones de TSCH, su configuración se ha dejado por defecto, por lo que el tiempo de transmisión de los mensajes DIO vendrá marcado por el mecanismo de *Trickle Timer*.

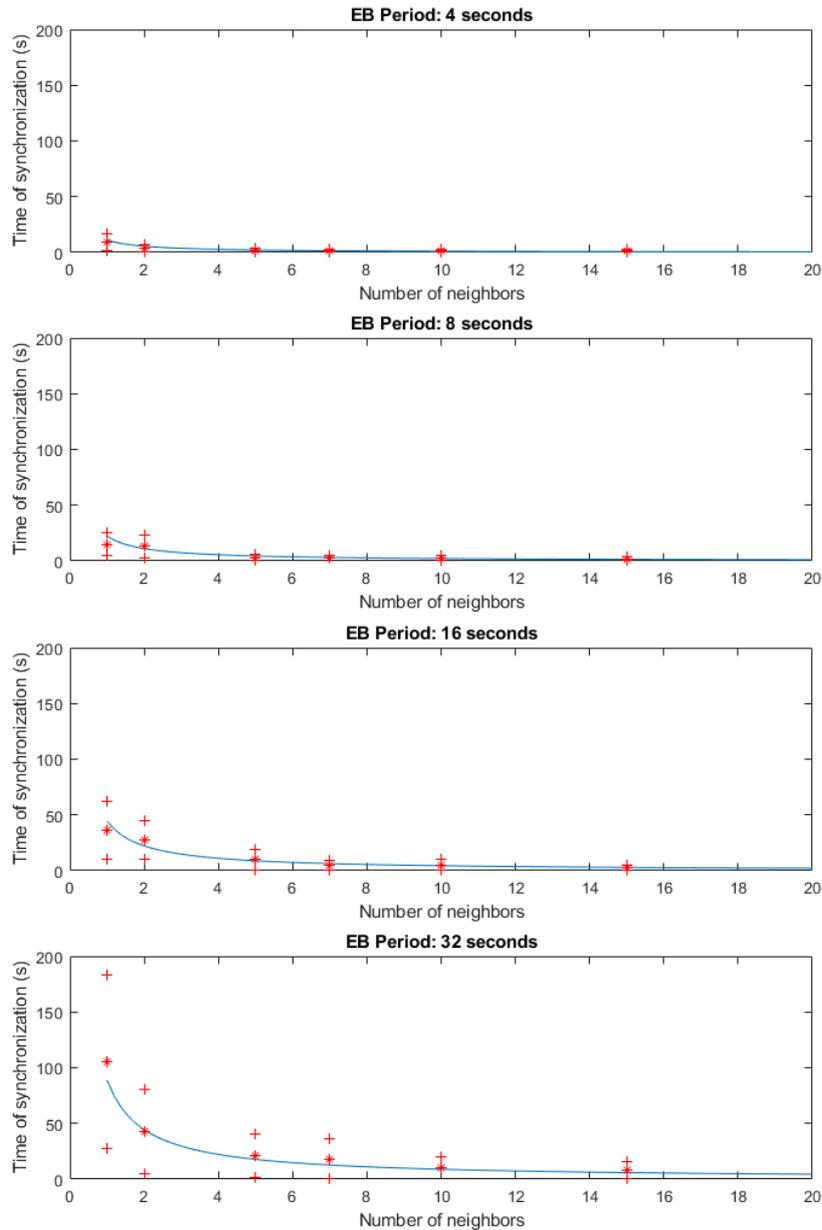


Figura 4.5: Resultado de las simulaciones para TSCH

Las simulaciones consisten en mantener una red inicial ya formada, cuyo tamaño dependerá de la simulación en cuestión, y una vez la red inicial ya está estable se añade un nuevo nodo a la simulación, que será el nodo bajo estudio. La simulación termina en el momento en el que este nuevo nodo recibe un mensaje EB correctamente para poder sincronizarse con el resto de nodos de la red. En la tabla 4.6 se muestra un resumen de todas las variaciones de parámetros que se han realizado en las diferentes simulaciones. En el caso del escenario para TSCH, la combinación de sus parámetros de configuración da un total de 24 variaciones que se han simulado, realizando 30 iteraciones para cada una de ellas.

En la figura 4.5 se muestran los resultados obtenidos para las simulaciones centradas en el mecanismo de sincronización de TSCH. La ecuación obtenida del modelo analítico propuesto se muestra como una curva, sobre la que se superponen los resultados de las diferentes iteraciones de cada una de las simulaciones, mostrando sus valores medios y desviaciones típicas. Tal y como se puede apreciar en la gráfica, los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas tienen una tendencia similar a la que se propone en el modelo analítico. A partir de estos resultados se ve como la dispersión de los valores de desviación estándar son mayores en aquellos casos en los que el periodo de recepción de balizas está más disperso en el tiempo.

Esto se produce en dos situaciones diferenciadas, la primera en aquellos casos en los que hay pocos nodos transmitiendo balizas. El segundo caso se produce cuando el periodo de transmisión de las balizas es mayor. El caso más extremo sería la simulación que tiene un único vecino dentro del área de cobertura, y que además tiene un periodo de transmisión de 32 segundos.

En el caso de las simulaciones para el escenario centrado en el protocolo RPL, se han modificado tanto el número de vecinos dentro del área de cobertura, como el tiempo de transmisión entre mensajes DIO. Para conseguir esto se ha utilizado un periodo de transmisión fijo para los mensajes *multicast* DIO, en lugar de utilizar el mecanismo de *Trickle Timer*. De esta manera, todos los nodos utilizan un periodo de transmisión de DIO homogéneo en cada una de las simulaciones realizadas.

Se ha llevado a cabo esta simplificación debido a que el mecanismo de *Trickle Timer* no está sincronizado entre los nodos, por lo que cada vecino puede estar utilizando un periodo diferente en el momento en el que el nuevo nodo reciba el mensaje en cuestión. De esta manera, se consigue mantener un valor fijo del *Trickle Timer* en cada una de las simulaciones para todos los nodos que intervengan, lo que permite analizar en más detalle cada una de las fases por las que pasa el periodo del *Trickle Timer*.

Para el periodo de transmisión de EB, se ha utilizado un valor fijo de 4 segundos, para favorecer una rápida sincronización de los nodos. En la tabla 4.6 se muestra un resumen de todas las variaciones de parámetros que se han realizado para las diferentes simulaciones de RPL. La combinación de estos parámetros nos da un total de 24 variaciones en la configuración de RPL, que se han repetido un total de 30 veces para cada una de ellas.

En la figura 4.6 se muestran los resultados de estas simulaciones centradas en el escenario de RPL. Tanto el modelo como los resultados obtenidos de las simulaciones se han representado utilizando seis gráficos diferentes, dependiendo del número de vecinos dentro del área de cobertura. Tal y como se aprecia en los diferentes gráficos, el tiempo que tarda el nuevo nodo en unirse a la topología RPL tras recibir el mensaje DIO se comporta de manera lineal a medida que aumenta el periodo de transmisión de los mensajes DIO, mostrando una mayor dispersión de los resultados conforme aumenta este periodo, de la misma forma que ocurría con las simulaciones para TSCH. Es importante señalar que utilizar un periodo de transmisión fijo para transmitir los mensajes de control de RPL no es el comportamiento normal del protocolo. Sin embargo, en una situación estable, sin que otros eventos reinicien el valor del *Trickle Timer*, el periodo de los mensajes DIO alcanzaría su valor máximo, comportándose como un periodo de transmisión fijo.

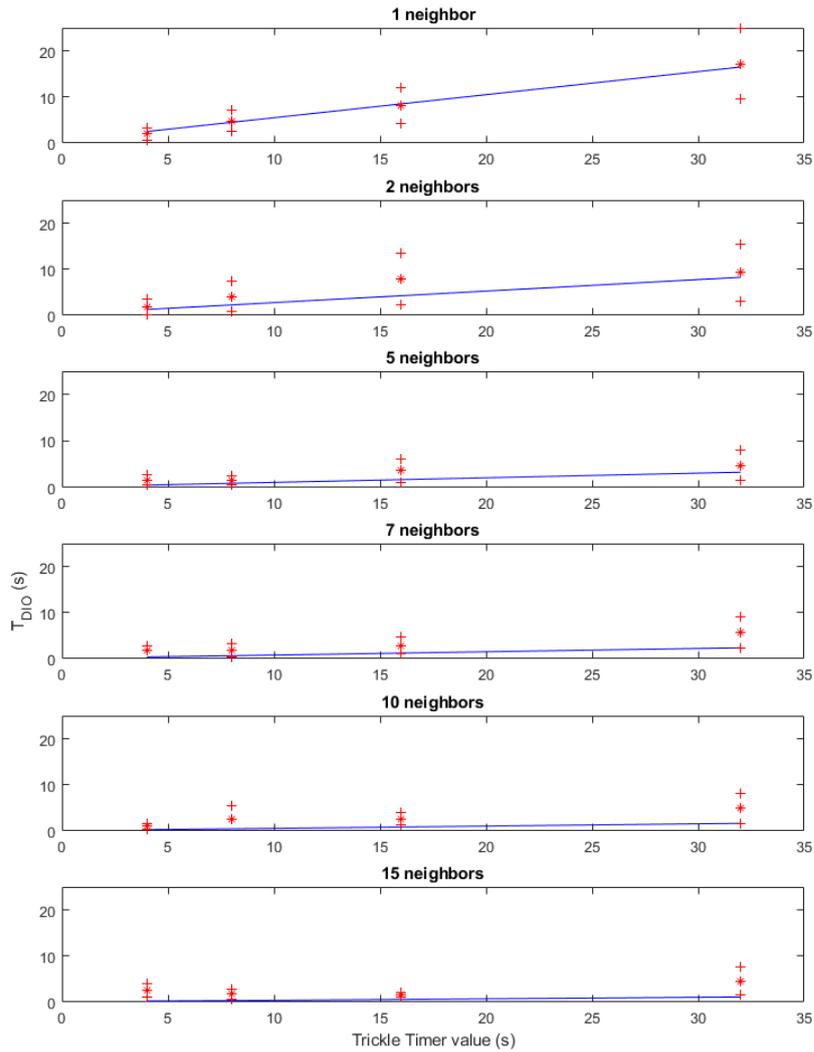


Figura 4.6: Resultados de las simulaciones para RPL

Aunque se haya realizado este análisis de manera individual para cada uno de los periodos por los que pasa el *Trickle Timer*, los resultados de las simulaciones si que permiten demostrar el impacto que tiene un cierto periodo de transmisión a la hora de recibir un mensaje, lo que puede ser extrapolable a diferentes escenarios gracias al modelo analítico propuesto. El comportamiento de este envío de mensajes tiene una relación de compromiso entre la congestión que puede producir el tráfico de control de RPL y la velocidad con la que un nodo se queda completamente desplegado y con las tablas de encaminamiento completas, por lo que es interesante controlar este tiempo máximo a la hora de desplegar nuevos dispositivos.

Otro aspecto que es importante destacar, es el impacto que tiene el tiempo para realizar la conexión a RPL si se compara con el tiempo que requiere obtener la sincronización TSCH. Observando la escala de la figura 4.5 y comparándola con la de la figura 4.6, queda claro que el impacto que tiene RPL es mucho menor que el tiempo que requiere obtener la sincronización

TSCH, principalmente debido a que en este proceso de sincronización es más complejo recibir los EB ya que inicialmente no se conocen los canales por lo que se va a transmitir.

Tabla 4.7: Parámetros de configuración para las pruebas reales

Periodo de EB	Periodo de DIO	Número de nodos
4 s	4 s	2
16 s	16 s	2
4 s	4 s	7
16 s	16 s	7

Finalmente, para validar el modelo analítico propuesto, se han realizado una serie de pruebas con equipos reales, de tal forma que se pueda comprobar si mediante el modelo analítico es posible estimar el tiempo que requiere que un nodo nuevo se conecte completamente a una red de sensores ya desplegada. Estos test tienen el mismo objetivo que las simulaciones, por lo que se han modificado los mismos parámetros que en los casos anteriores. Sin embargo, dada la duración de las pruebas reales, en comparación con las simulaciones, se ha realizado un número menor tanto de configuraciones como de iteraciones para cada una de ellas. En la tabla 4.7 se muestran los parámetros de configuración utilizados durante estas pruebas reales. Tal y como se ve en la tabla, se han realizado cuatro configuraciones diferentes, utilizando diferentes valores para el periodo de transmisión de EB y DIO y diferente número de dispositivos.

Para llevar a cabo estas pruebas se han utilizado los dispositivos RE-Mote del fabricante Zolertia, en el que se ha cargado la misma pila de protocolos basada en Contiki. Estos equipos utilizan el transceptor radio CC2538, que es compatible tanto con el estándar IEEE 802.15.4e como con el mecanismo de acceso al medio TSCH, a diferencia de sus versiones anteriores que no tenían esta compatibilidad.

El proceso seguido para estas pruebas reales sigue el mismo patrón que en las simulaciones. Se ha desplegado inicialmente una red con el número de dispositivos requerido en cada simulación. Esa red está formada por un dispositivo raíz, cuya referencia temporal seguirá el resto de la red, y que también comenzará a difundir los mensajes de control de RPL necesarios para unirse a la topología. Una vez esta primera fase ha terminado, y los nodos que forman la red inicial están estables, se conecta el nodo bajo estudio, recogiendo información sobre los diferentes instantes de tiempo relevantes: el tiempo en el que se inicia el nodo; el instante en el que obtiene la sincronización tras recibir un mensaje EB; y el instante en el que obtiene la información para unirse al árbol RPL tras recibir el mensaje DIO. Este proceso se ha repetido un total de 15 veces para cada una de las configuraciones presentadas en la tabla 4.7.

La figura 4.7 muestra los resultados obtenidos durante las pruebas reales con los dispositivos RE-Mote. En este caso se representa el tiempo total que ha llevado realizar el despliegue completo, lo que incluye el tiempo necesario para obtener la sincronización y el tiempo necesario para recibir un mensaje DIO correctamente. Tal y como se ha mencionado anteriormente, la contribución del tiempo para obtener la sincronización TSCH es mayor, por lo que los resultados de las pruebas reales se asemejan más a la curva del modelo TSCH, desplazada en el eje Y debido a la contribución del tiempo necesario para recibir un mensaje DIO.

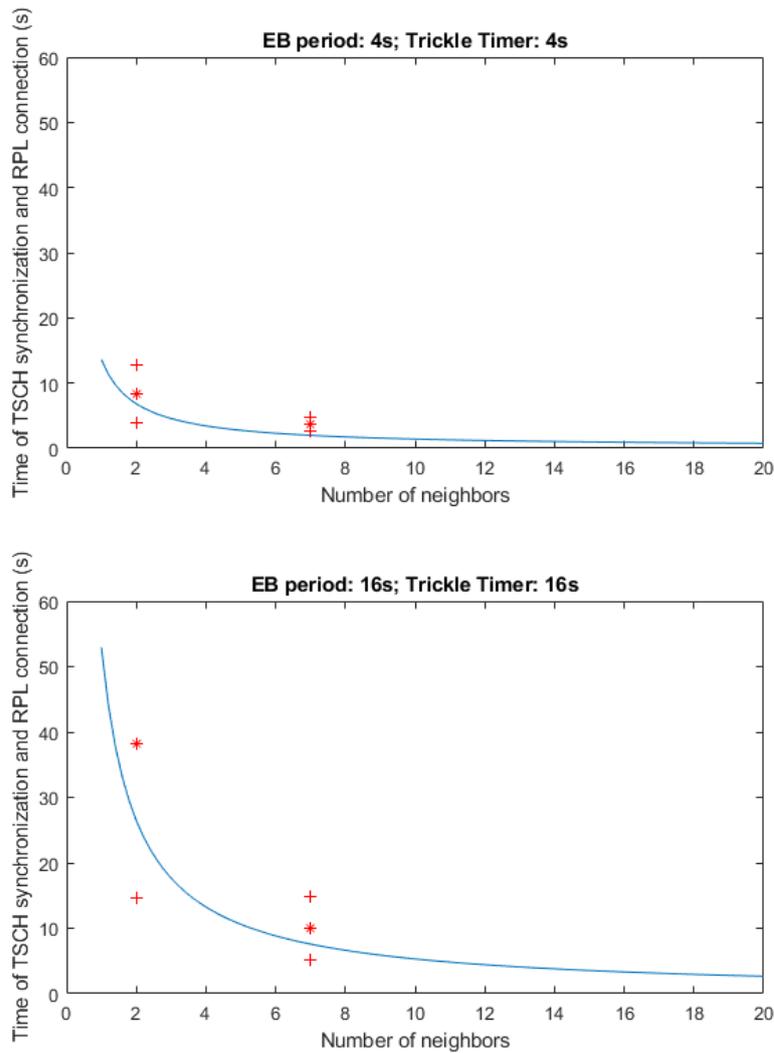


Figura 4.7: Resultados de las pruebas reales para validar el modelo analítico

Los resultados obtenidos de las pruebas reales demuestran que el tiempo total para desplegar un nodo se ajusta a la curva representada por el modelo analítico TSCH+RPL, lo que da una buena estimación sobre el tiempo requerido para realizar este tipo de despliegues en diferentes situaciones o configuraciones de la pila de protocolos. Tal y como ocurría en las simulaciones, la dispersión de la desviación estándar es mayor en aquellos casos en los que el tráfico de señalización es menor, siendo el caso más acusado el que utiliza un periodo de 16 segundos, tanto para TSCH como para RPL, y un número de nodos igual a dos.

De esta manera, queda demostrado, gracias a la validación mediante simulaciones y pruebas reales, que el modelo analítico propuesto permite obtener una estimación acertada sobre el tiempo requerido para desplegar un nodo en una red ya establecida con diferentes configuraciones. Tanto este análisis como el modelo analítico propuesto servirán para comprender mejor los análisis posteriores de la tesis, en los que se proponen diferentes mecanismos de sincronización que optimicen el tiempo que requiere desplegar un nodo y el consumo generado durante este proceso.

4.5 Caracterización de la latencia en enlaces multisalto

Otro aspecto relevante en el proceso de formación del árbol RPL, es la construcción de las rutas descendentes, para poder enviar tráfico desde el nodo raíz hasta los nodos hoja que se acaban de unir a la red. Mediante el intercambio de mensajes DIO, modelado en la sección anterior, el nuevo nodo obtiene la información necesaria para poder transmitir información al resto de vecinos de la red. Sin embargo, el resto de nodos no tienen conocimiento de que un nuevo nodo se ha unido a la red, ya que el envío de mensajes DIO se realiza en multicast. Esta construcción de rutas descendentes se realiza mediante el intercambio de mensajes DAO, y a diferencia de los mensajes DIO, su envío es unicast y se envía a través de todos los nodos de la ruta hasta el nodo raíz.

La figura 4.8 muestra la comparación entre un intercambio de mensajes multi-salto, como el que realiza el mensaje DAO, y un intercambio de mensajes multicast, que solo alcanza los nodos dentro del área de cobertura. Esto implica que tanto el envío de EB como el de DIO, serán transmisiones con un alcance de un único salto a los nodos que estén dentro del área de cobertura, mientras que el mensaje DAO debe de enviarse por todo el camino hasta llegar al coordinador, por lo que en redes malladas multisalto deberá de reenviarse por varios repetidores hasta alcanzar su destino.

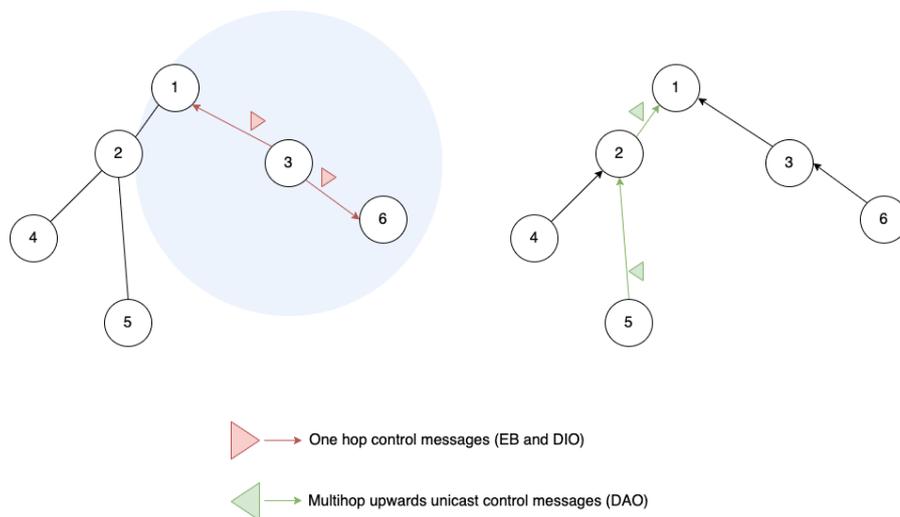


Figura 4.8: Comparación entre intercambio de mensajes de control con un salto y multi-salto

En una planificación como minimal 6TiSCH, solo se utiliza un único recurso compartido para todos los nodos. En la planificación por defecto de Orchestra se define una planificación dedicada al tráfico de control RPL, en la que también se planifica un solo slot compartido. En ambos casos, si por ese slot compartido se transmiten tanto los mensajes en multicast, como los mensajes unicast, el envío de mensajes DAO puede interferir con otro tipo de mensajes de control como el DIO, cuyo envío se realiza de manera periódica siguiendo el Trickle Timer. Estas colisiones pueden llegar a retrasar el proceso de formación de las rutas descendentes, o bloqueando el proceso si no se utilizan mensajes DAO-ACK para verificar si no ha llegado correctamente y es necesario reenviarlo.

A continuación, se modela el tiempo que tarda el nuevo nodo en formar las rutas descendentes mediante el envío del mensaje DAO. Este mensaje se origina en el nodo que acaba de unirse a la topología RPL tras recibir un mensaje DIO, y debe transmitirse hasta el coordinador de

la topología RPL a través de la ruta por defecto. De esta forma, todos los nodos del camino añaden esa ruta hasta el nuevo nodo.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes parámetros que influyen en el proceso de envío del mensaje DAO. Estos parámetros se han tenido en cuenta a la hora de definir el modelo analítico, el cual permite caracterizar el tiempo que le lleva a dicho nodo enviar este mensaje hasta el coordinador.

Tabla 4.8: Variables del modelo analítico RPL multisalto

Símbolo	Descripción
P_{dio}	Probabilidad de que un nodo transmita un mensaje DIO.
$T_{trickle}$	Representa el periodo de transmisión de los mensajes de control DIO.
SF_{rpl}	Representa el tamaño del <i>slotframe</i> dedicado al plano de tráfico RPL, contado como el conjunto de <i>timeslots</i> que se repiten periódicamente.
N	Representa el número de vecinos enviando mensajes de control RPL dentro del área de cobertura del nodo que se quiere unir a la red.
$t_{pdr}^{dao}(k)$	Representa el tiempo requerido para enviar un mensaje DAO en un único salto, basándose en la probabilidad del parámetro PDR .
$N_I(H)$	Vector de nodos interferentes en función del número de saltos hasta el nodo raíz
H	Número de saltos hasta el nodo raíz
PDR	El parámetro de ratio de mensajes recibidos representa el éxito de las comunicaciones.

Teniendo en cuenta la probabilidad de éxito de la transmisión mediante el parámetro PDR , es posible determinar el tiempo que lleva enviar un mensaje DAO en situaciones ideales en un enlace de un único salto. En el mejor de los casos, este mensaje se transmitirá en el siguiente slotframe disponible, cuyo tiempo viene determinado por la variable SF_{rpl} . Dado que el momento en el que se genera el mensaje DAO puede ocurrir en cualquier punto del slotframe, este tiempo se distribuye aleatoriamente entre 0 y SF_{rpl} , por lo que en promedio el tiempo que lleva transmitir este mensaje en un enlace de un único salto será de $SF_{rpl}/2$, con una probabilidad determinada por el parámetro PDR . En el caso de que se pierda este mensaje, se enviará en el siguiente slotframe, con una probabilidad $(1 - PDR)$, hasta cuatro veces que es posible reenviar dicho mensaje. El parámetro t_{pdr}^{dao} , tendrá un comportamiento distinto en el primer salto respecto al resto, ya que el DAO se puede generar en cualquier instante dentro del slotframe, mientras que las retransmisiones se llevarán a cabo siempre en el siguiente slotframe. Este comportamiento se caracteriza mediante el parámetro k , que tendrá un valor de 1 en el primer salto y de 0 para el resto de casos.

$$t_{pdr}^{dao}(k) = \sum_{i=0}^3 (SF_{rpl} \cdot i + \frac{SF_{rpl}}{2^k} \cdot PDR) \cdot (1 - PDR)^i \quad (4.8)$$

Este parámetro indica únicamente el tiempo en enviarlo por un enlace de un único salto, por lo que para llegar hasta el coordinador RPL será necesario multiplicarlo por el número de saltos hasta el coordinador. Sin embargo, debido a la configuración del slotframe de Orchestra dedicado al tráfico de control RPL, los mensajes DAO se envían por un único slot compartido, por lo que pueden colisionar con otro tipo de mensajes como el DIO, que se estará enviando por todos los nodos dentro del área de cobertura siguiendo el patrón marcado por el Trickle Timer. De esta forma, en cada salto el nodo que tiene que reenviar el mensaje tendrá una serie de nodos interferentes dentro de su área de cobertura, que no tienen porque coincidir con los interferentes de otro salto. Para modelar este comportamiento se ha definido un vector de nodos interferentes, donde el tamaño del vector indica el número de saltos, y los valores de cada posición indican los nodos interferentes en cada salto. En la siguiente ecuación se muestra un vector de tamaño tres, lo que indica el número de nodos interferentes en un enlace de tres saltos hasta el coordinador.

$$N_I(H) = [n_{h1}, n_{h2}, n_{h3}] \quad (4.9)$$

Para tener en cuenta las posibles colisiones con los mensajes DIO se ha definido el parámetro P_{dio} , que indica la probabilidad de que se esté transmitiendo un mensaje DIO en un slotframe determinado. Este parámetro se calcula en función del periodo de Trickle Timer con el que se estén transmitiendo los mensajes de control y el tamaño del slotframe dedicado al tráfico RPL.

$$P_{dio}(1 - P_{dio})^{N-1} \quad (4.10)$$

Finalmente, para calcular el tiempo que tarda en enviarse el DAO se tiene en cuenta el tiempo para transmitir el DAO en función del PDR, t_{pdr}^{dao} . También se tienen en cuenta las posibles interferencias con los mensajes DIO en cada uno de los saltos. Para ello el sumatorio va recorriendo el vector de valores de nodos interferentes definido anteriormente.

$$T_{dao} = \frac{t_{pdr}^{dao}(1)}{(1 - P_{dio}^{N_I(0)})} + \sum_{i=1}^{H-1} \frac{t_{pdr}^{dao}(0)}{(1 - P_{dio}^{N_I(i)})} \quad (4.11)$$

4.6 Validación del modelo de latencia multisalto

Para llevar a cabo la validación del modelo analítico, se han realizado simulaciones con diferentes configuraciones de despliegue de una red WSN. Como hay una gran variedad de configuraciones posibles, dado que los nodos interferentes de cada salto pueden variar, se han limitado los experimentos a un número máximo de tres saltos ($H = 3$), mientras que el número máximo de nodos interferentes en un determinado salto alcanza como máximo quince nodos. Estas configuraciones dan la suficiente información para poder validar la exactitud del modelo, cubriendo un amplio abanico de aplicaciones para escenarios industriales, donde el número de dispositivos suele estar entre 10 y 30 nodos. La configuración de la pila de protocolos, así como las diferentes variaciones de cada una de las configuraciones simuladas, se han llevado a cabo utilizando el sistema operativo Contiki NG, ya que incluye el simulador Cooja con el que poder desplegar redes basadas en TSCH y RPL.

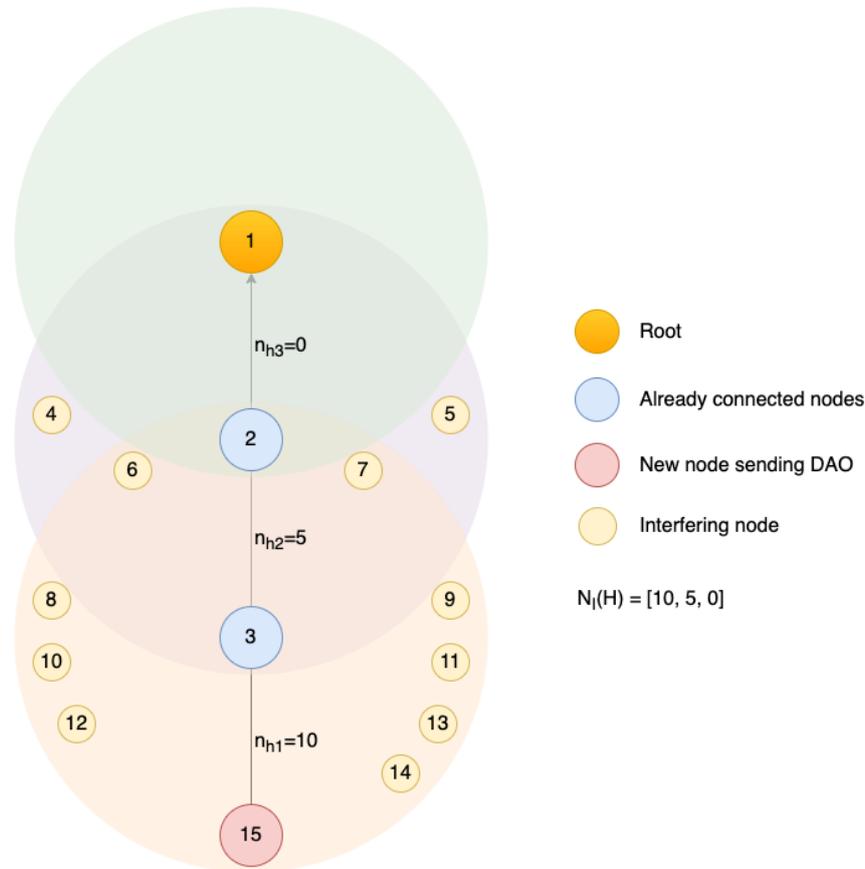


Figura 4.9: Ejemplo de topología de una de las configuraciones bajo estudio

La figura 4.9 muestra una de las topologías bajo estudio, donde el nuevo nodo desplegado tiene el ID 15, y está situado a tres saltos del nodo coordinador (nodo 1), por lo que debe retransmitir sus mensajes a través del nodo 3 y el nodo 2. La comunicación entre el nodo 15 y el nodo 3 tiene diez nodos interferentes, incluyendo el nodo 2 y los nodos 6 al 14. Para la comunicación entre el nodo 3 y el nodo 2 habría cinco nodos interferentes, incluyendo el nodo 1 y los nodos del 4 al 7. El último salto, al no tener ningún otro nodo dentro del área de cobertura, no tiene ningún nodo interferente. Para poder validar el comportamiento de este tipo de redes multisalto con una repetitividad suficiente, se han limitado la selección de rutas para que siempre se forme el mismo tipo de red multisalto, pero variando el número de nodos interferentes en cada etapa hasta el coordinador. Se han realizado simulaciones para 11 configuraciones diferentes, cuya topología se muestra en la figura 4.10 para las que el nuevo nodo está a un salto del coordinador, la figura 4.11 en las que se sitúa a dos saltos, y la figura 4.12 para aquellas configuraciones en las que el nuevo nodo se despliega a tres saltos hasta el coordinador. Cada una de estas simulaciones se ha repetido 10 veces, utilizando diferentes semillas para cada una de las simulaciones.

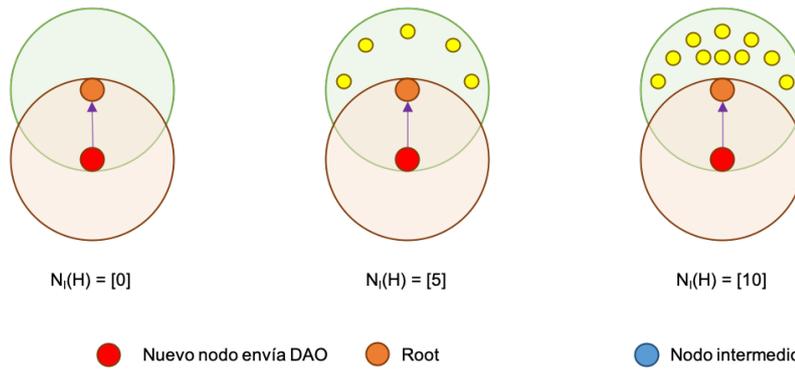


Figura 4.10: Configuraciones simuladas con un único salto y diferentes nodos interferentes

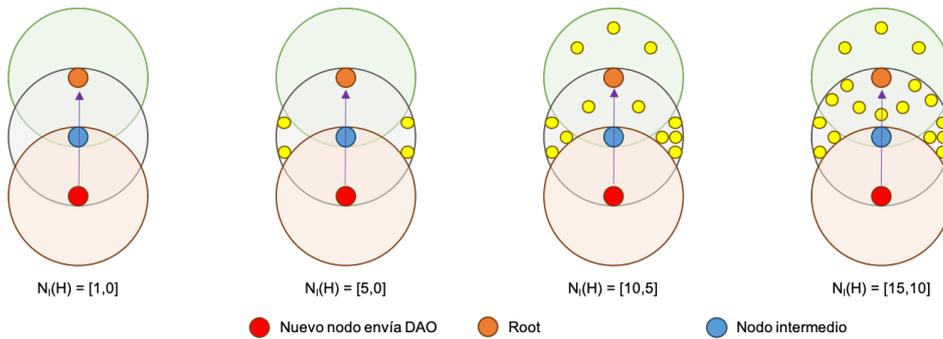


Figura 4.11: Configuraciones simuladas con dos saltos y diferentes nodos interferentes

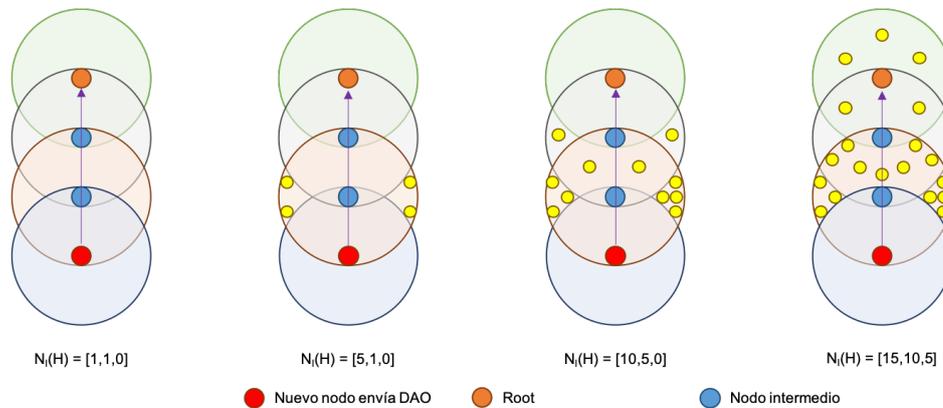


Figura 4.12: Configuraciones simuladas con tres saltos y diferentes nodos interferentes

El procedimiento seguido en cada una de las simulaciones comienza por desplegar una red inicial, en base a las configuraciones presentadas anteriormente. El objetivo es desplegar una red que se establezca antes de conectar el nuevo nodo a la red. Una vez la red inicial ya está desplegada, tanto la sincronización TSCH como la topología RPL, se añade un nuevo nodo en la ubicación planificada en cada una de las configuraciones. La simulación termina en el momento en el que se recibe el mensaje DAO por parte del coordinador.

En la tabla 4.9 se muestra la configuración básica de algunos parámetros de la arquitectura de comunicaciones seleccionada. Para la planificación, se ha utilizado el planificador autónomo Orchestra, que permite configurar slotframes dedicados a diferentes planos de tráfico. Dado

que queremos evaluar el comportamiento de la formación de las rutas descendentes únicamente, RPL utilizará una única planificación para transmitir todos sus mensajes de control, ya sean multicast o unicast. Para mantener un nivel de interferencias que sea constante en todas las simulaciones, se ha generado un tráfico constante de mensajes DIO multicast, en lugar de utilizar el periodo fijado por el Trickle Timer. Esto permitirá que los resultados sea lo mas homogéneos posible, y que solo afecten el número de nodos interferentes y el número de saltos hasta el coordinador.

Tabla 4.9: Configuración de parámetros de la pila de protocolos

Parámetro	Valor
Duración del timeslot TSCH	10 ms
Periodo de transmisión de EB	4 s
Periodo de transmisión de DIO	16 s
Tamaño del slotframe Orchestra para EBs	397
Tamaño del slotframe Orchestra para RPL	31
Número de canales TSCH	4
Número de canales de escaneo	4

Para la validación del modelo analítico es necesario conocer el comportamiento del PDR del medio de transmisión. Este PDR no estará asociado a todas las transmisiones de un nodo, si no que se ha evaluado el comportamiento del PDR únicamente en la planificación de Orchestra dedicada a RPL, que está basada en minimal 6TiSCH. De esta forma, el comportamiento del PDR estará asociado a las transmisiones de mensajes RPL en un único recurso por slotframe.

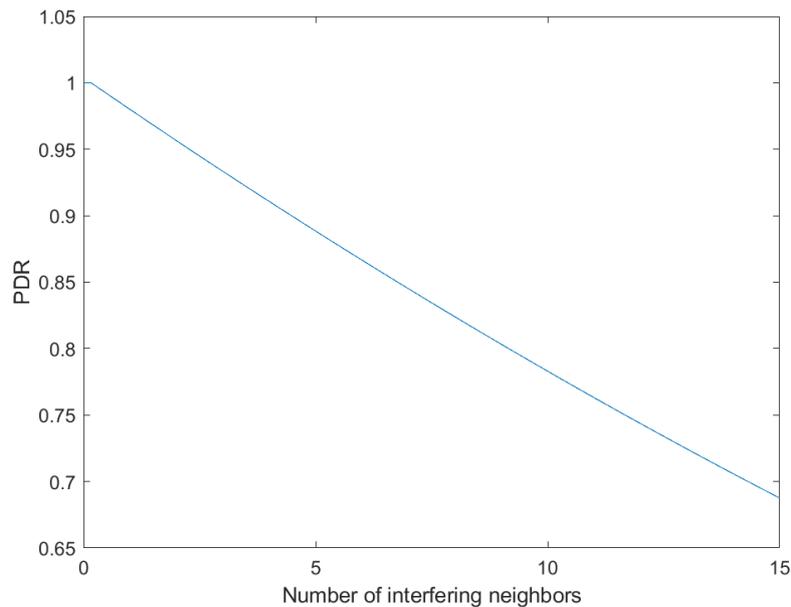


Figura 4.13: Evolución del valor de PDR en función del número de nodos interferentes, calculado de manera empírica

A continuación, se muestran los diferentes resultados obtenidos de las simulaciones que se acaban de describir. Los resultados principales muestran la evolución del tiempo de recepción del mensaje DAO en función del número de nodos interferentes. Para representar este tiempo en función de los nodos interferentes de varios saltos, se han representado gráficas multi dimensionales, de tal forma que representando los cortes más relevantes se pueda ver el comportamiento de dicha configuración.

La figura 4.14 muestra los resultados obtenidos para las simulaciones con un único salto. La curva representa la ecuación obtenida del modelo analítico, mientras que los asteriscos muestran el valor promedio obtenido de las simulaciones, y la desviación típica se representa con un signo de suma. Tal y como se observa en la figura, los resultados obtenidos de las simulaciones tienen un comportamiento muy cercano a la curva definida por el modelo. Un aspecto interesante que se puede extraer de esta figura, es el comportamiento de la desviación típica. Dado que los mensajes se envían únicamente en los slots dedicados a RPL, solo hay oportunidad de enviar un mensaje cada 310 ms, lo que determina que la latencia se incremente en múltiplos de dicho valor cada vez que ocurre una interferencia.

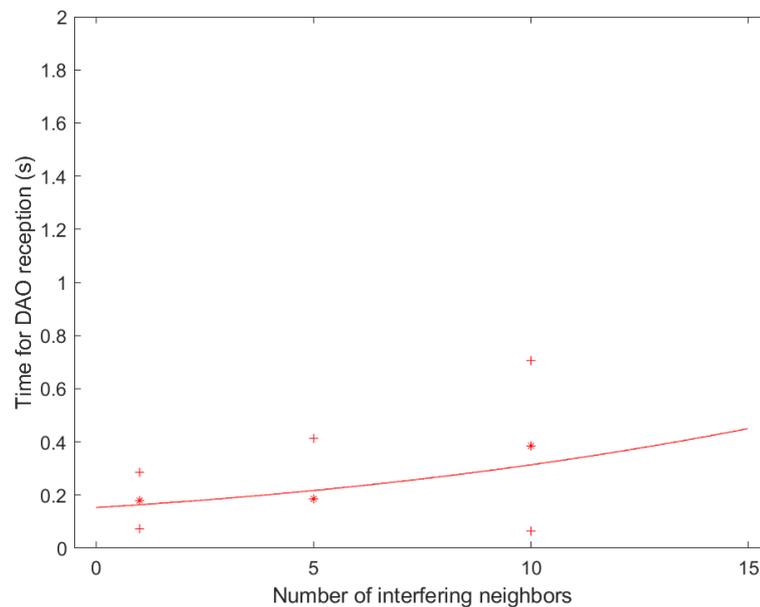


Figura 4.14: Resultados de las simulaciones para un salto

La figura 4.15 muestra la respuesta bi-dimensional para las configuraciones con dos saltos. Para facilitar la representación y comparación de los resultados de estas configuraciones, se han escogido aquellos cortes de la superficie correspondientes a los nodos interferentes del primer nivel, representando estas curvas en la figura 4.16.

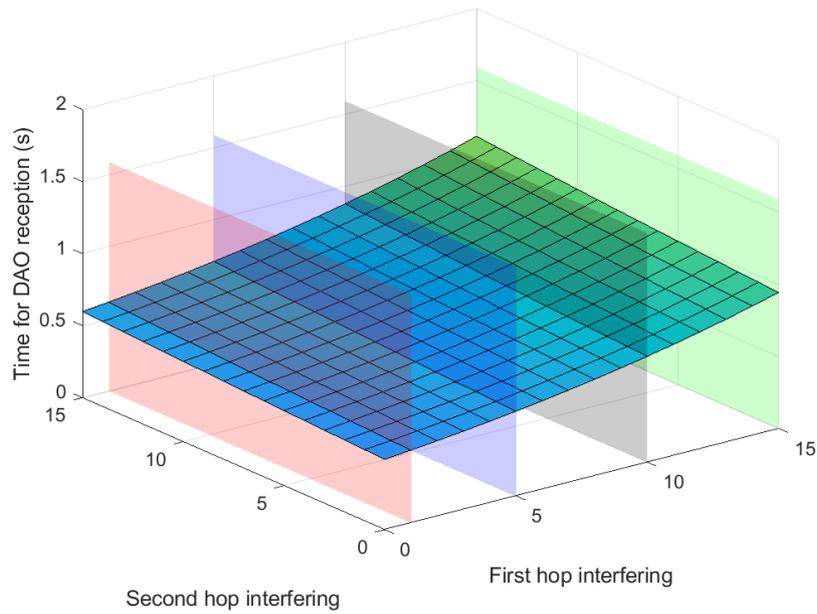


Figura 4.15: Respuesta multidimensional del tiempo de recepción del DAO para dos saltos

Cada uno de los colores representa una de las secciones marcadas en la figura 4.15. Las curvas representan la respuesta del modelo analítico propuesto, mientras que el asterisco y el signo de suma representan el promedio y la desviación típica obtenidas de las simulaciones. Al igual que las simulaciones con un único salto, el modelo analítico se ajusta correctamente, aumentando la desviación típica con forme aumentan las interferencias en cada uno de los saltos.

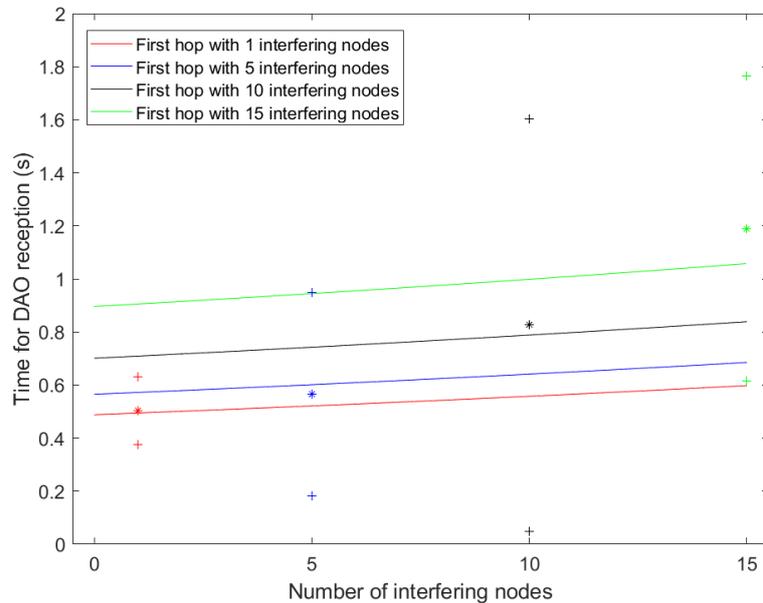


Figura 4.16: Resultados de las simulaciones para dos saltos

Para las simulaciones con tres saltos, la representación vendría caracterizada por un volumen, ya que los tres ejes representan los nodos interferentes en cada uno de los saltos. Sin embargo, en

la figura 4.17 se han representado únicamente las cuatro superficies de interés de acuerdo a las configuraciones simuladas. La figura 4.18 muestra por separado estas 4 superficies, señalando las secciones de interés que se van a analizar, y que se corresponden con las configuraciones simuladas.

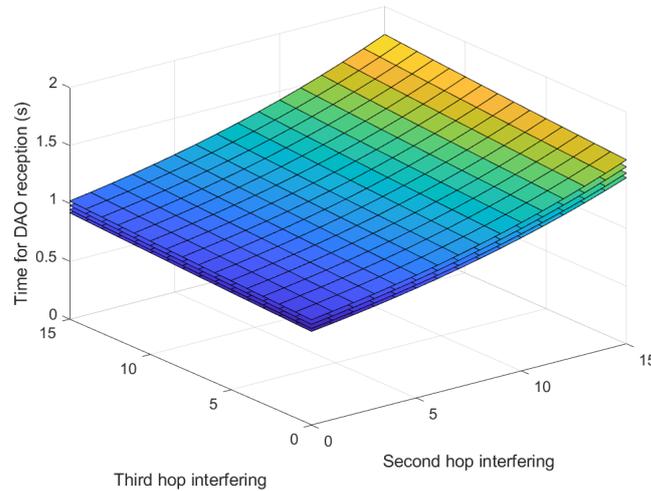


Figura 4.17: Respuesta multidimensional de las configuraciones de tres saltos

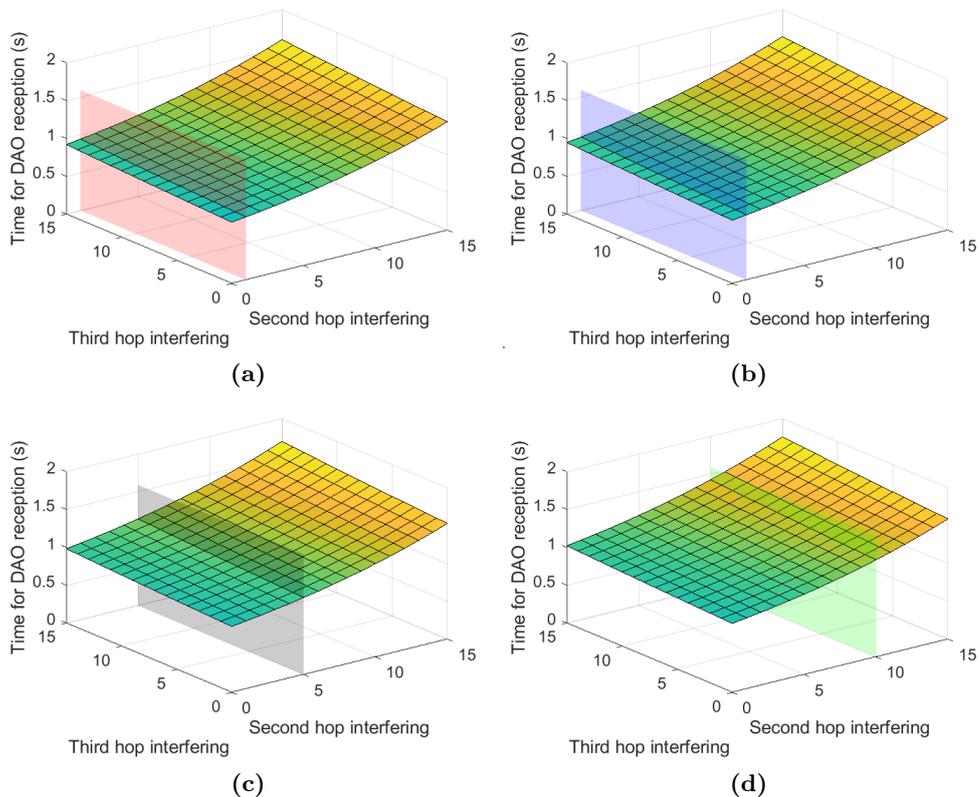


Figura 4.18: Detalle de la respuesta multidimensional para tres saltos: (a) Sección para 1 nodo interferente en el primer salto y 1 nodo interferente en el segundo; (b) Sección para 1 nodo interferente en el primer salto y 5 nodos interferentes en el segundo; (c) Sección para 5 nodos interferentes en el primer salto y 10 nodos interferentes en el segundo; (d) Sección para 10 nodos interferentes en el primer salto y 15 nodos interferentes en el segundo

Al igual que en los casos anteriores, la figura 4.19 muestra únicamente las curvas de cada una de las configuraciones de interés, con el objetivo de mostrar de manera sencilla la comparación de los resultados con el modelo analítico.

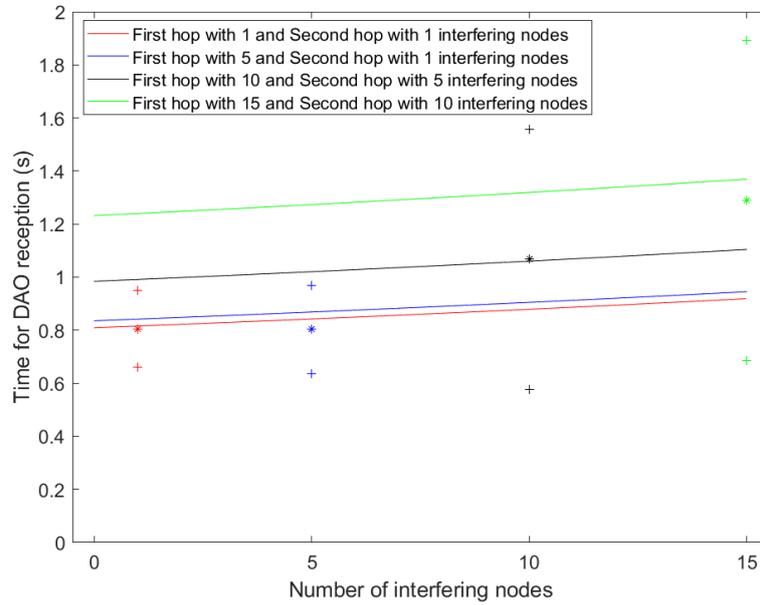


Figura 4.19: Resultados de las simulaciones para tres saltos

A partir de los resultados obtenidos de las simulaciones, se ha comprobado que el modelo analítico sigue el mismo comportamiento que las redes simuladas, cuyas variaciones se han centrado en determinar que impacto tienen los mensajes interferentes en RPL en los diferentes saltos de un enlace entre nodo y coordinador. Estas interferencias producidas en el plano de tráfico de RPL afectan considerablemente al tiempo de conexión y eficiencia en el intercambio de mensajes, por lo que si no se adoptan medidas como el envío de DAO-ACK o asignación de mas recursos a RPL, la construcción de rutas descendentes puede no completarse correctamente.

Mecanismos de sincronización basadas en redes TSCH

5.1 Introducción

Tras haber realizado el planteamiento de un modelo analítico que permita caracterizar el tiempo de sincronización TSCH y el de conexión a la topología RPL, en este capítulo se van a abordar diferentes aspectos relacionados con la optimización del proceso de sincronización de las redes basadas en TSCH.

El mecanismo de acceso al medio TSCH, introducido en el estándar IEEE 802.15.4e, permite mejorar la robustez y fiabilidad de los enlaces, lo que lo hace idóneo para su implantación en escenarios industriales. Esto se debe principalmente a su comportamiento determinista, basado en enlaces planificados en slots temporales, y a su técnica de salto en frecuencia, que permite mitigar las interferencias producidas en las frecuencias que intervienen en el establecimiento de la comunicación.

Sin embargo, tal y como se detalla en el Capítulo 4, el proceso previo a la sincronización presenta varios problemas, debido principalmente a que es necesario que los nuevos nodos obtengan la información necesaria para sincronizarse sin poder prever cuando se va a transmitir este mensaje. Esto se hace aún más complicado en TSCH, ya que debido al uso de las diferentes frecuencias, los nodos que quieren unirse deben de buscar este mensaje de sincronización en los diferentes canales en los que se está transmitiendo. Para poder optimizar este proceso de sincronización, en los siguientes apartados se van a analizar los diferentes parámetros de configuración que influyen en este proceso de sincronización y puesta en marcha de la red. Además se propondrán diferentes alternativas que permiten optimizar este proceso de despliegue de los nodos, tanto agilizando las fases de sincronización y conexión RPL, como reduciendo significativamente el consumo energético que se produce en dichas fases.

5.2 Mecanismos de optimización de la sincronización TSCH

El estándar IEEE 802.15.4 ha conseguido posicionarse como uno de los referentes en cuanto a protocolos de comunicaciones para las redes de sensores inalámbricos, tanto es así que han surgido diferentes protocolos que basan su arquitectura de comunicaciones en este estándar. A partir de la enmienda de IEEE 802.15.4e del año 2012, en la que se propusieron nuevos mecanismos de acceso al medio como TSCH, la sincronización de este tipo de redes se ha vuelto motivo de interés en la comunidad científica.

Pasar de un acceso al medio basado en el acceso aleatorio a un medio en el que todos los nodos están sincronizados temporalmente, no solo permite hacer un uso más eficiente de los recursos, sino que mejora ampliamente la fiabilidad de las comunicaciones. Sin embargo, para conseguir esta sincronización, los dispositivos requieren de una fase previa de intercambio de mensajes para poder sincronizar sus relojes. En esta fase previa, el medio sigue siendo aleatorio para los nodos que aún no se han sincronizado, lo que complica aún más la sincronización, ya que al usar diferentes frecuencias la probabilidad de obtener esta referencia temporal se reduce. Este proceso resulta más sencillo en los sistemas en los que el acceso al medio se realiza de manera aleatoria y con un solo canal, ya que los dispositivos deben permanecer más tiempo activos para detectar posibles mensajes.

Es por estas dificultades, y por el hecho de que en el estándar no se detallan unas directrices para la obtención de la sincronización, que los procesos de sincronización en redes TSCH han despertado gran interés, con el fin de conseguir una sincronización más rápida y eficiente. Diversos trabajos se han centrado en mejorar los procesos que permiten ajustar la deriva del reloj de los diferentes nodos sincronizados, como [54], cuyo trabajo propone una técnica que permite medir y modelar el comportamiento de estas derivas del reloj entre dos nodos vecinos, lo que permite reducir esta deriva efectiva significativamente. Además de mejorar el cálculo de esta deriva, también permite que los nodos sepan exactamente cuando deben volver a resincronizarse, en lugar de hacerlo de manera periódica sin saber realmente si es necesario o no.

Si la propuesta anterior permitía mejorar la deriva del reloj entre dos vecinos, en las redes malladas es igual de importante mantener una sincronización estable en un enlace multisalto. En [55] se presenta una técnica de sincronización adaptativa que analiza y predice estas derivas que se producen en el reloj de sus vecinos, permitiendo coordinar el instante en el que los nodos deben de resincronizarse. En [56] y [57] los autores consiguen tener sincronizaciones al nivel de microsegundos gracias a una estimación más precisa de la deriva del reloj, y realizando una compensación de tiempo en cada uno de los nodos de la red. Estas y otras mejoras respecto a lo propuesto en el estándar se implementan en TSCH del sistema Contiki. Duquenooy et al. [58] realizan un estudio en el que resumen los principales retos y dificultades que se presentan al utilizar TSCH en Contiki, entre los que destacan que es posible obtener una sincronización muy precisa a través del mismo.

Diferentes grupos de trabajo han propuesto mejoras sobre los diferentes protocolos para la implantación de redes de sensores inalámbricos. El Internet Engineering Task Force (IETF) presentó un documento [59] donde detallaba algunos de los principales problemas que se encontraban en el mecanismo TSCH, entre los que se encuentra la formación y el mantenimiento de la red. Además, el grupo 6TiSCH también ha presentado diferentes propuestas de mejora para el desarrollo de redes IPv6 sobre TSCH, como un modo de operación mínimo [60], en el que se especifican configuraciones recomendadas sobre diferentes protocolos relacionados con TSCH, como por ejemplo, el protocolo de encaminamiento RPL. Sin embargo, ninguno de estos estudios se centra en analizar el proceso de unión inicial de un nodo en redes basadas en

TSCH y RPL, lo que incluye una primera fase de sincronización, y la creación de las tablas de encaminamiento de RPL.

Algunos trabajos si que se centran en analizar diferentes alternativas del proceso de sincronización en redes TSCH, como Vogli et al. [61] [62], que analizan diferentes propuestas que permiten mejorar la rapidez con la que los nodos se unen a la red, empleando para su análisis un modelo analítico de los diferentes mecanismos. Duy et al. [63] [64] realizan un nuevo análisis centrado en los largos tiempos que pueden darse durante las fases de sincronización, proponiendo una planificación de los recursos radio de TSCH centrada en favorecer el intercambio de las balizas necesarias para la sincronización. Mediante este esquema, los autores destacan que consigue mejorar la eficiencia del proceso de unión en redes TSCH, además de permitir que los dispositivos puedan determinar dinámicamente el número de mensajes necesarios para llevar a cabo esta sincronización.

Khoufi et al. [65] [66] evalúan también el tiempo que lleva la formación de una red TSCH, utilizando para ello el simulador NS3. A partir de su análisis inicial, los autores determinan que es necesario proponer un nuevo algoritmo para el envío de balizas TSCH, lo que mejora la rapidez con la que se obtiene la sincronización y la eficiencia en el intercambio de mensajes. Kim et al. [67] también propone un nuevo esquema para la unión a la red TSCH, basado en estimaciones de calidad del canal, consiguiendo así una sincronización mas eficiente en aquellos escenarios con interferencias más pronunciadas con los escenarios industriales. Karalis et al. [68] [69] propone una planificación destinada a balizas TSCH no centralizada, de tal forma que se garantice que estos mensajes no van a tener colisión con las balizas del resto de nodos de la red, además de tener en cuenta la posibilidad de que haya nodos móviles en la red. Si embargo, en su segundo trabajo cambian su planteamiento para proponer una nueva técnica que permita cambiar el periodo de transmisión de balizas sin necesidad de reservar más recursos para la transmisión de estos mensajes, consiguiendo enviar multiples balizas a través de diferentes canales en un único timeslot.

Los trabajos que se han descrito anteriormente basan sus soluciones en proponer diferentes esquemas para la transmisión de balizas TSCH, con el objetivo de mejorar los tiempos de sincronización. Esto lo consiguen asignando más recursos a la planificación de slots dedicados exclusivamente al envío de balizas TSCH. Sin embargo, esto asume que a mayor número de nodos transmitiendo balizas, más rápido se van a conectar los nuevos nodos, y aunque es cierto, no siempre se puede contar con tener una gran red ya desplegada.

Otros trabajos se centran en cambiar el periodo de transmisión de balizas, en lugar de aumentar la capacidad para transmitir estos mensajes de señalización. De Guglielmo et al. [70] proponen un nuevo algoritmo para la transmisión de balizas TSCH, que se basa en la transmisión aleatoria de estos mensajes, en lugar de utilizar un periodo de transmisión periódico como se venía utilizando en el estado del arte. Analizando los resultados obtenidos de este algoritmo, se puede llegar a la conclusión de que el tiempo para que un nuevo nodo obtenga la sincronización está principalmente influenciado por el número de canales utilizado para la transmisión de balizas. Wang et al. [71] evalúan el impacto que tienen diferentes parámetros de configuración en el proceso de sincronización en TSCH, demostrando que la transmisión de balizas y sus posibles colisiones tienen un impacto negativo en la formación de grandes redes. En sus simulaciones se realizan variaciones en las que se altera la densidad de nodos que forman la red, además de modificar el periodo de transmisión de balizas TSCH. Los autores llegan a la conclusión de que utilizar un periodo de transmisión de balizas dinámico permite mejorar los tiempos de sincronización en redes más densas.

Vallati et al. [72] es uno de los trabajos que no solo se centra en analizar el proceso de sincronización en TSCH, sino que incluye toda la pila de protocolos para la formación completa

de la red, incluyendo el protocolo de encaminamiento de RPL. Con este planteamiento, no solo tienen en cuenta la primera fase de sincronización, sino que analiza el tiempo completo hasta que la red queda completamente formada tras formar las tablas de encaminamiento de cada uno de los nodos que forman parte de la red. En este trabajo se realiza una comparación entre la configuración mínima propuesta por 6TiSCH y un mecanismo dinámico de gestión de recursos radio. Tras sus análisis se observa que este algoritmo que proponen puede mejorar los procesos de formación de la red a través de la transmisión de balizas TSCH y mensajes de control RPL. En [73] se propone un algoritmo que permite modificar el periodo de transmisión de balizas de manera dinámica, permitiendo ajustar este periodo en base al número de nodos que hay disponibles en la red, favoreciendo así las conexiones más rápidas en diferentes situaciones o fases del despliegue de una red de sensores inalámbricos.

En los siguientes apartados se va a analizar este problema relacionado con la fase de sincronización en redes TSCH, con el fin de proponer una alternativa que permita mejorar los tiempos de sincronización en redes basadas en TSCH y RPL. Para ello se van a analizar los diferentes parámetros de configuración que más influencia tienen en estos procesos iniciales de despliegue. Una vez conocida su influencia, se ha propuesto un mecanismo que permite mejorar los procesos de sincronización y conexión de redes de sensores inalámbricos.

5.3 Diseño y evaluación del mecanismo de transmisión de balizas dinámico

El objetivo en esta sección es el de profundizar en el funcionamiento del proceso de sincronización de TSCH. Tras analizar el comportamiento obtenido en el modelo analítico, se ha podido ver que el número de nodos vecinos y el periodo de transmisión de balizas influyen considerablemente en este proceso. Sin embargo, TSCH cuenta con otros parámetros de configuración que también influyen en el tiempo de sincronización, por lo que existe un interés en conocer como pueden mejorar el proceso de sincronización. Conocer la implicación de estos parámetros en el proceso de sincronización va a servir para proponer una solución que permita mejorar este proceso.

El proceso de sincronización en una red mallada se puede asimilar a la propagación de mensajes por inundación, hasta que los nodos que hay por encima en la jerarquía física no obtengan la sincronización, esta no se va a propagar a los niveles inferiores. En la figura 5.1 se puede ver una red de 16 nodos en la que el nodo 1 está iniciando el proceso de sincronización propagando los mensajes por los distintos niveles de la topología física. De esta forma, el nodo 16 tendrá que esperar a que los nodos de los niveles superiores obtengan la sincronización antes que él.

El mecanismo propuesto consiste en una configuración dinámica de los parámetros de TSCH, ya que las necesidades durante la fase de despliegue son diferentes a las que tiene la red en estado estacionario. Su desarrollo se ha conseguido de manera iterativa, evaluando las diferentes contribuciones que mejoran el proceso de sincronización y conexión en las redes TSCH+RPL. Así, se ha conseguido obtener unos valores de configuración óptimos para utilizar durante la fase de balizamiento de TSCH. En las pruebas de validación se describirá con mayor detalle los parámetros utilizados para cada configuración.

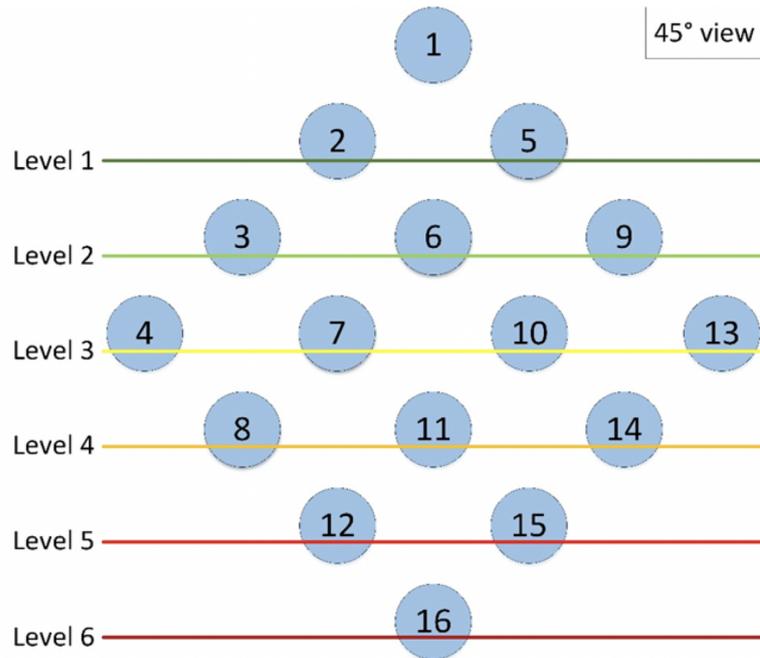


Figura 5.1: Dirección de propagación de la sincronización en TSCH

5.3.1 Simulaciones de balizamiento dinámico en TSCH

Durante el desarrollo de la nueva técnica de balizamiento se han evaluado diferentes configuraciones y variaciones de parámetros para comprobar el impacto que tiene cada uno en el proceso de formación de la red. Las simulaciones han consistido en la formación de una red de 16 nodos, donde el nodo 1 actúa como coordinador y el resto están esperando para conectarse a la red, tal y como se muestra en la figura 5.1.

Los resultados obtenidos se compararán con la configuración definida por el estándar, donde el periodo de transmisión de balizas es fijo, y la configuración propuesta en Contiki, donde el periodo de transmisión de balizas se modifica utilizando el Trickle Timer de RPL, cuyo funcionamiento se describe en subsección 2.2.2.

Las diferentes simulaciones se han llevado a cabo utilizando el simulador Cooja que viene incluido en el sistema Contiki. Los 16 nodos estarán distribuidos en una red mallada, cuyo área de cobertura solo le permite conectarse con los nodos que tenga adyacentes, tal y como se puede ver en la figura 5.2, donde el nodo 1 es el responsable de iniciar el proceso de sincronización y propagar tanto los mensajes EB como los mensajes de control utilizados en RPL. Los parámetros utilizados para el despliegue físico de los nodos se muestran en la tabla 5.1.

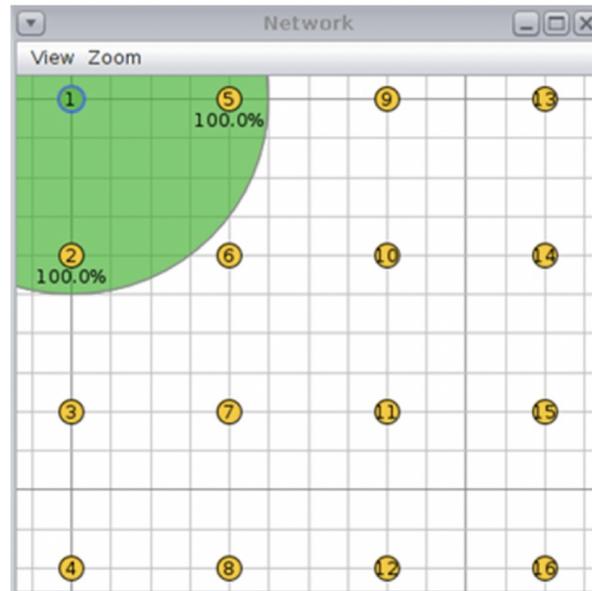


Figura 5.2: Topología física para las simulaciones del mecanismo dinámico de balizas

Tabla 5.1: Parámetros de configuración para las simulaciones del mecanismo dinámico de balizas

Parámetros físicos	
Número mínimo de vecinos	2
Número máximo de vecinos	4
Mínimo número de saltos para el nodo 16	6
Distancia entre vecinos	40 m
Tiempo máximo de simulación	15 min

La separación entre los diferentes nodos ha sido escogida pensando en la creación de una topología multi-salto, de tal forma que se fuerce a los nodos que tengan que encaminar la información por varios dispositivos antes de llegar al coordinador, y además mostrar el comportamiento de los nodos al sincronizarse si no se encuentran dentro del área de cobertura del nodo coordinador.

La duración de las simulaciones se ha limitado a 15 minutos, considerando que este tiempo es suficiente para probar la agilidad del proceso de sincronización, además de un requisito de lo que se espera de un sistema de despliegue rápido. Este límite se basa en la asunción de que los nodos no necesitan más de 2 minutos para que los nodos del siguiente nivel se conecten, requiriendo así un total de 12 minutos para que los 6 niveles definidos en la topología se puedan conectar correctamente.

Los resultados obtenidos para las diferentes configuraciones se van a comparar en términos de probabilidad de éxito de sincronización/conexión, la cantidad de tráfico que se genera, estimaciones de cantidad de energía consumida por los diferentes nodos y sobre todo en la velocidad con la que la red se llega a sincronizar.

A partir de estos parámetros iniciales, se han probado diferentes combinaciones de parámetros que influyen tanto en el proceso de sincronización como en el de conexión, con el objetivo de obtener una configuración óptima que mejore el proceso de sincronización y conexión, además del tiempo que esto requiere. En la tabla 5.2 se muestra la configuración de los parámetros comunes en todos los test realizados.

Tabla 5.2: Parámetros globales de las simulaciones

Parámetro	Valor
Duración del escaneo (T_{scan})	1 s
Duración del slot temporal (T_{slot})	10 ms
Planificación orchestra para EBs	Slotframe de 397 con dos slots habilitados (TX y RX)
Planificación orchestra para RPL	Slotfram de 31 con solo un slot habilitado (Compartido)
Intervalo mínimo de Trickle Timer ($Trickle_{min}$)	12
Intervalo de doblaje para Trickle Timer ($Trickle_D$)	8
Constante de redundancia para Trickle Timer ($Trickle_R$)	10
Periodo de transmisión de DIS (T_{dis})	60 s

En la tabla 5.3 y hasta la tabla 5.6 se muestran las configuraciones utilizadas en cada una de los test realizados.

Dada la influencia que tiene el periodo de transmisión de balizas, la solución inicial propuesta para mejorar la sincronización en TSCH, consiste en modificar este periodo de manera variable con el tiempo. De esta forma, al iniciarse el despliegue se transmiten balizas con mayor frecuencia y, conforme la red se va formando, los equipos comienzan a reducir el número de mensajes EB que transmiten. Este comportamiento permite agilizar el proceso para que los nodos cercanos se conecten y vayan propagando la sincronización hacia los nodos situados a varios saltos del dispositivo que la origina.

Tal y como se menciona en el Capítulo 4, en Contiki se opta por combinar el comportamiento del Trickle Timer de RPL con el periodo de transmisión de balizas. Sin embargo, esta aproximación no está optimizada, ya que el periodo de Trickle Timer evoluciona demasiado rápido, por lo que no atiende a las necesidades del mecanismo TSCH.

Esta modificación propuesta, permite aislar el funcionamiento de transmisión de balizas, de la configuración utilizada para RPL, de tal forma que los dos temporizadores se puedan modificar de manera aislada para atender las necesidades de cada protocolo. Esta nueva configuración se basa en las mejores características de los mecanismos mencionados con anterioridad, consiguiendo agilizar el proceso de sincronización y conexión por parte de los nodos que estén dentro del área de cobertura de un nodo ya conectado, y por ende, agilizando la conexión de todos los

dispositivos de la red. Como se observa en la tabla 5.5, se va a comparar este desarrollo con la implementación basada en el Trickle Timer y con un periodo de transmisión fijo.

Tabla 5.3: Test 1: Variación del número de canales

Parámetro	Valor
Número de canales (C)	1,2,4,16 canales
Número de canales de escaneo (C_S)	Los mismos que C

Tabla 5.4: Test 2: Diferente número de canales para la fase de escaneo

Parámetro	Valor
Número de canales (C)	4 canales
Número de canales de escaneo (C_S)	1,2,4 canales

Tabla 5.5: Test 3: Diferentes configuraciones para el periodo de transmisión de EB

Parámetro	Valor
Periodo fijo de transmisión de EB (T_{eb})	4,16 s
Transmisión de EB basado en Trickle Timer	Trickle Timer RPL
Mecanismo propuesto de periodo variable de EB	Fijo a 4 s durante los dos primeros minutos y después un periodo de 16 s.

Tabla 5.6: Test Extra: Diferentes intervalos de transmisión de mensajes DIS

Parámetro	Valor
Intervalo de DIS (T_{dis})	5,15,30,45,60 s

Para el análisis del consumo energético, se han tenido en cuenta los parámetros recogidos en la tabla 5.7, que se corresponden con los valores de consumo del transceptor radio CC2420, que se utiliza en los modelos de los nodos Zolertia Z1 escogidos para llevar a cabo las diferentes simulaciones.

Tabla 5.7: Potencia consumida por los diferentes tipos de slots en TSCH

Tipo	Tiempo TX (ms)	Consumo TX (mA)	Tiempo RX (ms)	Consumo RX (mA)	Potencia (mAs)
TX Broadcast	4.256	17.4		19.7	0.0740544
TX Unicast	4.256	17.4	2.4 (ack)	19.7	0.1213344
RX Broadcast		17.4	5.452	19.7	0.1074044
RX Unicast	2.4 (ack)	17.4	5.452	19.7	0.1491644
Slot RX sin recibir		17.4	2.2	19.7	0.04334
Fase de escaneo		17.4	10	19.7	0.197

5.3.2 Análisis de resultados del balizamiento dinámico en TSCH

A continuación, se muestran diferentes figuras que explican los resultados obtenidos para cada una de las pruebas y experimentos que se han definido en apartados anteriores. En los gráficos se muestra la probabilidad de realizar la sincronización o la conexión con éxito para cada uno de los nodos que forman la red. Así es posible verificar que configuración consigue mejorar los procesos de unión a la red.

Además, se muestra el número de mensajes transmitidos, tanto las balizas como los mensajes de control utilizados en RPL. Con estos resultados se puede realizar una estimación del consumo energético de cada nodo. Por último, se mostrarán los resultados que incluyen el tiempo máximo para que se conecten los nodos que forman parte de la topología.

En la figura 5.3 se muestra la comparación de cuatro configuraciones diferentes donde se ha ido modificando el número de canales que utilizan para establecer la comunicación entre los nodos de la red (correspondiente a la tabla 5.3). Estas gráficas muestran una representación de la topología física de los nodos y su probabilidad de éxito de sincronización y de conexión durante los 15 minutos que ha tomado realizar los experimentos. En estas configuraciones se ha utilizado el mecanismo que modifica el periodo de transmisión de balizas basándose en el Trickle Timer de RPL.

Se puede ver claramente como al incrementar el número de canales de comunicación se reduce la probabilidad de que un nodo esté transmitiendo un mensaje EB en el mismo canal que otro que esté escaneando. Con este comportamiento se observa cómo, utilizando un total de 16 canales, más del 60% de los nodos no se han podido conectar pasados los 15 minutos de simulación.

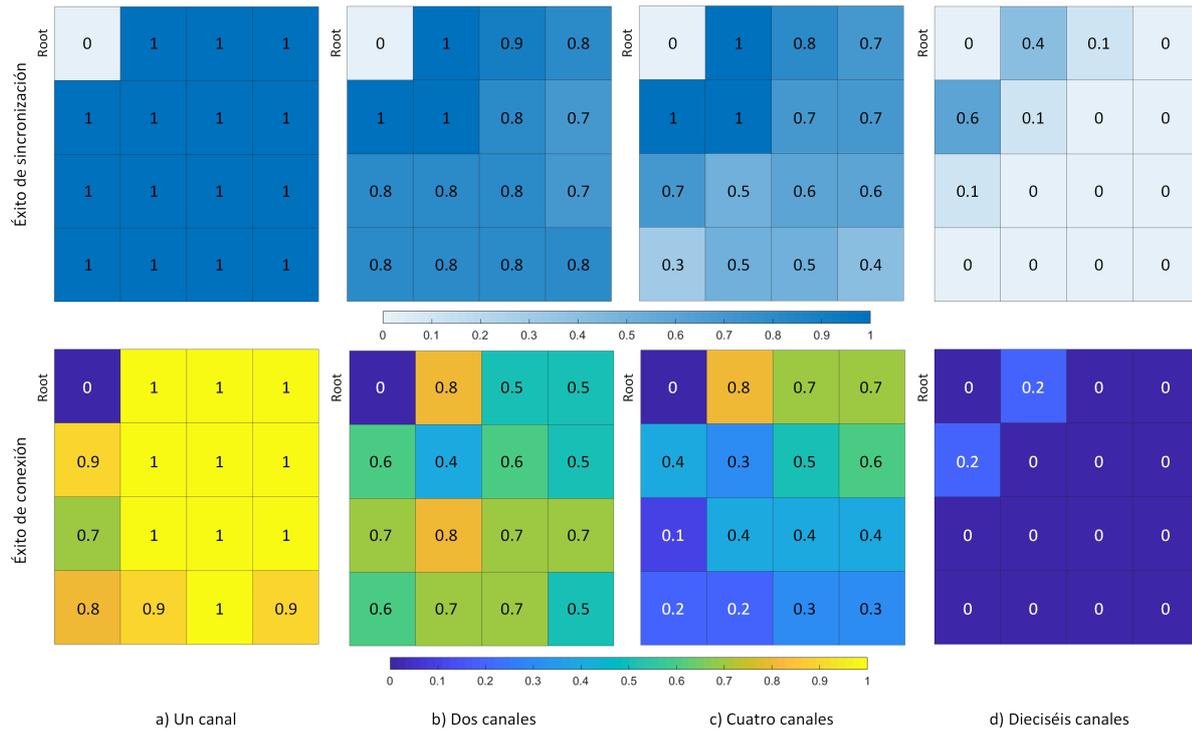


Figura 5.3: Probabilidad éxito de sincronización y conexión para las simulaciones con diferente número de canales

Otra conclusión que se puede extraer de estos resultados, es el impacto del protocolo RPL en la sincronización de TSCH. Cuando un nodo no consigue establecer una conexión con sus vecinos para pasar a formar parte de la topología, este nodo no empieza a transmitir sus propios mensajes EB, por lo que está impidiendo que otros nodos que haya por debajo puedan recibir la sincronización. Este comportamiento se puede ver claramente en la configuración que utiliza un único canal. En esta configuración, todos los nodos consiguen obtener la sincronización de sus vecinos, ya que el porcentaje de éxito es del 100%. Sin embargo, algunos nodos no han conseguido unirse a la topología RPL, perjudicando así a los nodos que tienen por debajo.

En la configuración que utiliza 16 canales es posible ver el efecto de propagación de la sincronización, ya que la probabilidad disminuye en cada nivel. Los nodos que hay en los siguientes niveles no son capaces de sincronizarse porque no se están transmitiendo mensajes EB hacia abajo.

A partir de estos resultados, se ha probado a modificar únicamente los canales que intervienen en la fase de escaneo, dejando un número de canales fijo durante el funcionamiento normal de las comunicaciones (correspondiente a la tabla 5.4). De esta forma, los nodos que ya están conectados utilizan los cuatro canales para transmitir tanto los mensajes de sincronización como el resto de paquetes de información, y los nodos que están esperando para unirse a la red solo escanean un número reducido de estos canales. La figura 5.4 muestra los resultados para una configuración en la que hay cuatro canales asignados para el funcionamiento normal, pero se utilizan diferente número de canales para la fase de escaneo.

En estas tres configuraciones se utiliza el Trickle Timer para modificar el periodo de transmisión de balizas. Como se puede ver, la probabilidad de conexión mejora ligeramente cuando

se utilizan menos canales al escanear. Sin embargo, estas mejoras no son lo suficientemente significativas como para considerarla una configuración óptima.

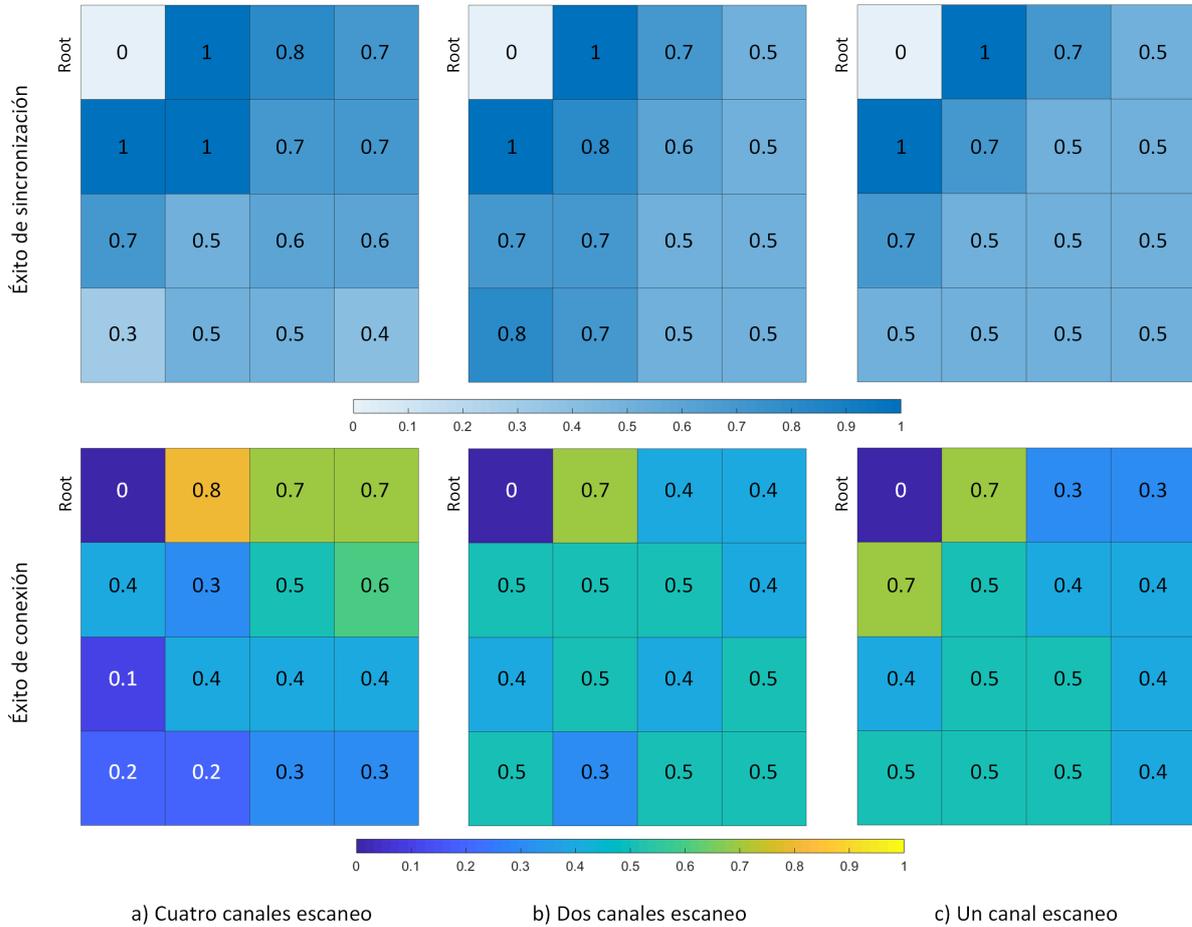


Figura 5.4: Probabilidad de éxito de sincronización y conexión para diferente número de canales de escaneo

Finalmente se han realizado diferentes simulaciones en las que se mide el impacto que tiene el proceso de formación de la red cuando se modifica el periodo de transmisión de balizas (correspondiente a la tabla 5.5). En estas simulaciones se ha probado la configuración que modifica el periodo de transmisión de balizas basándose en el Trickle Timer, tal y como se propone en el sistema Contiki. Sin embargo, esto implica que cuando la red ya se haya estabilizado, no se van a enviar suficientes mensajes EB ya que el Trickle Timer no tiene en cuenta el método de TSCH y solo se podrá reiniciar por el protocolo RPL. El otro método que se ha simulado consiste en dejar un periodo de transmisión de balizas fijo, tal y como viene definido en el estándar y como se propone en OpenWSN [74]. Estos dos mecanismos se van a comparar con el método desarrollado que permite modificar el periodo de transmisión conforme pasa el tiempo de manera independiente a RPL.

La solución propuesta, a la que se ha denominado (Custom Trickle Timer) consiste en diferenciar dos fases con periodos de transmisión diferentes. Durante la primera etapa de este Custom Trickle Timer, se utiliza un periodo de transmisión de balizas lo suficientemente bajo como para desplegar y configurar una red de manera ágil. En la segunda etapa, para evitar realizar un consumo excesivo debido al tráfico generado por TSCH, se configura un periodo mayor.

Con esta configuración, el periodo de transmisión puede cumplir con las necesidades de dos situaciones distintas, pudiendo cambiar dinámicamente esta configuración.

Los tiempos escogidos en este caso concreto permiten configurar un periodo de transmisión de balizas de 4 segundos durante los 2 primeros minutos, tiempo suficiente para que todos los vecinos dentro del área de cobertura de un nodo se conecten. Una vez han pasado estos dos minutos, el periodo de transmisión de balizas se cambia a 16 segundos.

Este comportamiento permite mejorar el proceso de sincronización durante un corto periodo de tiempo, para después estabilizarse ya que los nodos del siguiente nivel, que se acaban de conectar, empiecen a enviar balizas con su propio intervalo de 4 segundos. Por lo tanto, este mecanismo se aprovecha del comportamiento de la propagación de la sincronización, agilizando las conexiones, pero manteniendo un consumo eficiente de energía y reduciendo la congestión de tráfico de la red.

En la figura 5.5 se pueden ver los resultados obtenidos para las configuraciones que se acaban de comentar. Como se puede ver, incrementar el número de balizas que se envían mejora considerablemente la probabilidad de que los nodos se conecten con éxito, consiguiendo que se conecten correctamente casi en un 100% para los 15 minutos de simulación.

En la primera configuración, figura 5.5a, el periodo de transmisión se modifica siguiendo el Trickle Timer utilizado por RPL, lo que significa que durante los primeros segundos desde que inicia la red, este periodo va a ser incrementando considerablemente. La segunda configuración, figura 5.5b, utiliza un periodo de transmisión de balizas fijo, tal y como se recomienda en el estándar. Este periodo de transmisión se ha configurado a 16 segundos, obteniendo resultados similares a los que se obtienen por la configuración del Trickle Timer.

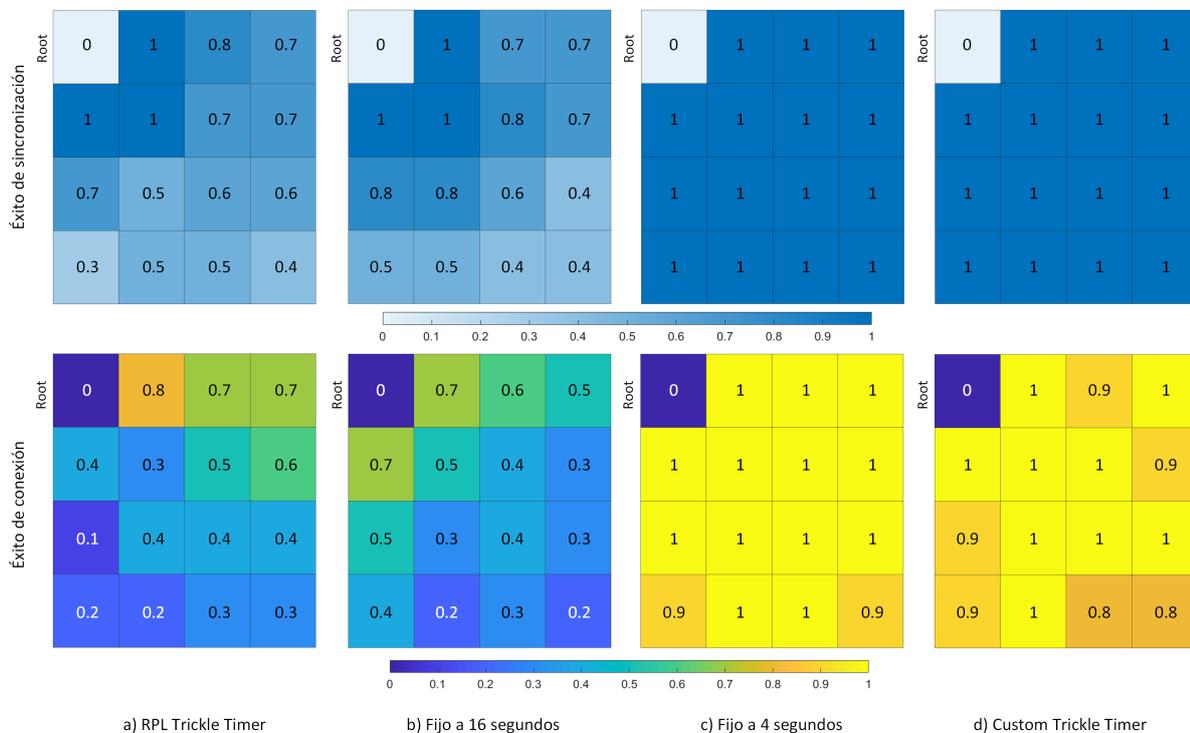


Figura 5.5: Probabilidad de éxito de sincronización y conexión para diferentes valores del periodo de transmisión de balizas

En las dos últimas configuraciones se puede ver un resultado bastante mejor que en los otros dos casos. En la figura 5.5c, se muestran los resultados obtenidos para un periodo de transmisión fijo, pero de un valor de 4 segundos entre cada baliza, consiguiendo resultados de casi el 100% de éxito para los 15 minutos de simulación. En la figura 5.5d, se observan resultados similares a la anterior, obtenidos por el mecanismo propuesto en este estudio. La principal diferencia que hay entre estas dos configuraciones tiene que ver con el número de mensajes que se transmiten, y que afectará directamente a la energía consumida.

En la figura 5.6 se muestra el tráfico generado por cada una de las configuraciones que se han mostrado en la figura anterior. Por una parte, las dos primeras configuraciones muestran una cantidad de tráfico bastante reducida, en comparación con las dos últimas. Esto provoca que haya dificultades para que los nodos se puedan conectar y sincronizar correctamente en un periodo reducido de tiempo.

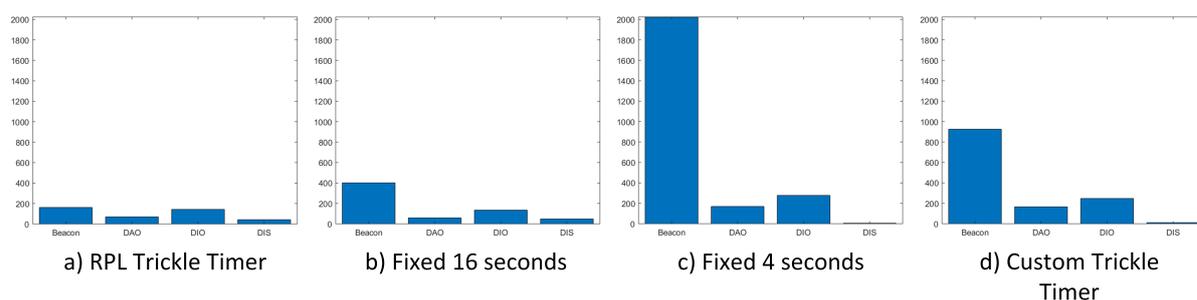


Figura 5.6: Número de paquetes enviados para diferentes configuraciones del periodo de transmisión de balizas

Por otra parte, se puede ver como la configuración que se propone, con un periodo de transmisión variable, obtiene resultados similares en cuanto a probabilidad de éxito de conexión, pero con una cantidad mucho menor de tráfico en comparación con la configuración que utiliza un periodo de transmisión fijo de 4 segundos.

Es importante resaltar la influencia que tienen los mensajes DIS que utiliza el protocolo RPL al solicitar la información de la topología. Tal y como se observa en los resultados de la figura 5.6, las dos configuraciones que muestran mejores resultados apenas necesitan de estos mensajes para construir la topología. Esto se debe a que estos mensajes han sido diseñados para solicitar la información del árbol RPL. Sin embargo, al utilizar TSCH, todos estos mensajes son descartados hasta que no se obtenga una sincronización con el origen de tiempos.

Tras sincronizarse, un nodo puede unirse al árbol RPL sin necesidad de enviar un mensaje DIS si durante ese tiempo recibe un mensaje DIO con la información de la topología. Esto provoca además que no se transmitan mensajes DIS para reiniciar el Trickle Timer de otros nodos, uno de los motivos por los que la configuración que utiliza el Trickle Timer obtenga peores resultados. Se han realizado otras simulaciones para ver cómo afecta a la sincronización si se varía el periodo de transmisión de los mensajes DIS (correspondiente a la tabla 5.5) y se ha observado que estos mensajes apenas influyen en la optimización del proceso de formación de la red.

Otra de las variables a tener en cuenta es el tiempo máximo que requiere para que los nodos de la red se conecten. La figura 5.7 muestra el tiempo de conexión que requiere cada nodo para conectarse. En los casos en los que un nodo no ha llegado a conectarse se ha fijado un valor máximo de 8 minutos para evitar así las desviaciones que no hacen comparables las diferentes simulaciones.

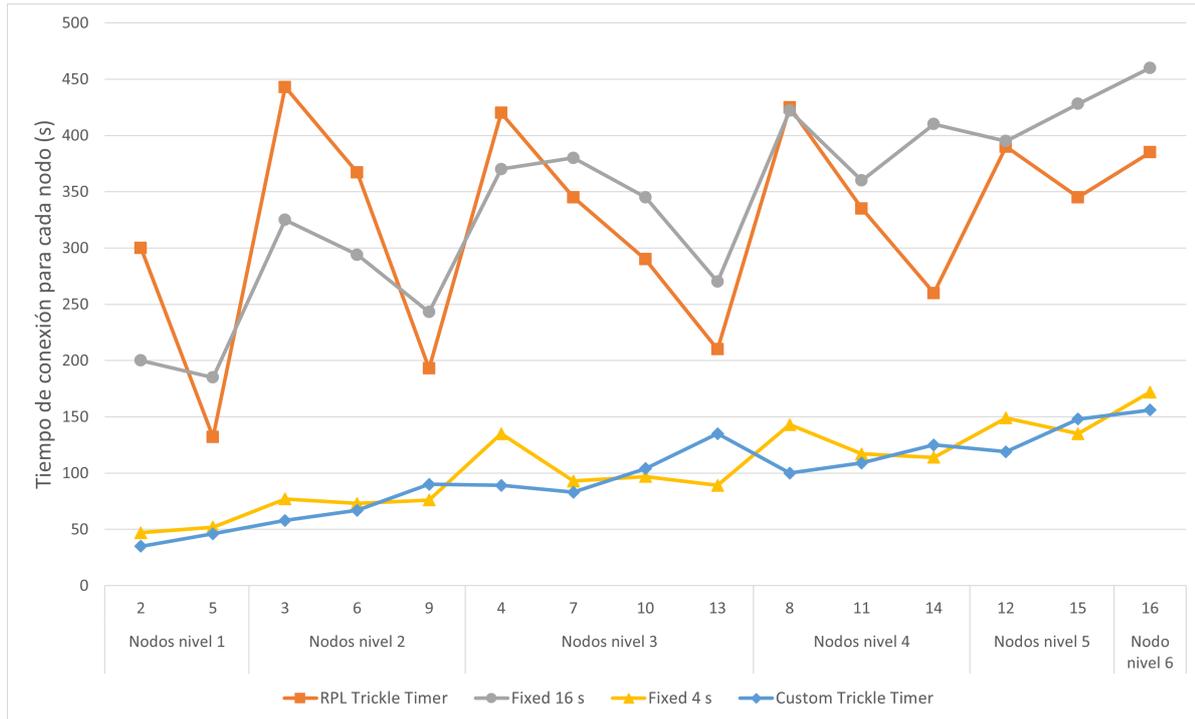


Figura 5.7: Tiempo de conexión para diferentes configuraciones del periodo de transmisión de balizas

Al igual que ocurre con el resto de resultados, se puede ver como las dos primeras configuraciones obtienen unos tiempos de conexión mucho más largos que los dos últimos, principalmente porque muchos de los nodos no se llegan a conectar en estos 8 minutos de simulación. Para las dos configuraciones que comienzan enviando mensajes EB cada 4 segundos, el tiempo que le lleva para conectar la red completa es de alrededor de unos 3 minutos, teniendo en cuenta que el nodo del nivel más alejado (el nodo 16 de la figura 5.2) está al menos a 6 saltos del nodo coordinador.

Reducir el tiempo de conexión también tendrá un gran impacto en el consumo energético de los nodos. Esto se debe a que durante el tiempo en que los nodos están escaneando, los dispositivos tienen sus interfaces radio conectadas continuamente, lo que reduce la autonomía de estos nodos que no se consiguen conectar durante un largo periodo de tiempo. En la figura 5.8 se muestran los consumos de energía para los diferentes nodos en cada una de las configuraciones utilizadas durante los experimentos.

En las configuraciones que utilizan una menor cantidad de tráfico, figura 5.8a y figura 5.8b, el consumo energético es mucho mayor, aunque se están enviando muchos menos mensajes de señalización, ya que los nodos emplean mucho más tiempo escaneando antes de poder sincronizarse.

Para las otras dos configuraciones, figura 5.8c y figura 5.8d, el consumo de energía es mucho menor durante los primeros 15 minutos de simulación, y sus resultados son muy similares. Las pequeñas variaciones en los niveles de consumo se deben principalmente a la reducida masa estadística de los experimentos. Si el número de repeticiones en la simulación se incrementase, entonces el nivel de consumo energético debería tender al mismo valor en las dos configuraciones, ya que en los dos casos los nodos están dos minutos enviando balizas cada 4 segundos, y a partir

de este momento, la configuración con un periodo variable cambiará el valor para enviar balizas cada 16 segundos, tal y como se propone en las recomendaciones.

Si los resultados de consumo se analizan teniendo en cuenta los tiempos de conexión de la figura 5.6, se puede ver como el consumo energético está afectado principalmente por la fase de escaneo, cuando cada nodo mantiene su radio en un estado activo hasta que consigue recibir un mensaje de sincronización. Una vez todos los nodos están conectados, la configuración que envía balizas con un periodo fijo, tendrá un mayor consumo ya que estará transmitiendo 4 veces más mensajes. En la figura 5.9 se muestra la evolución del consumo de energía para estas dos configuraciones durante 100 horas de simulación, en el que una de ellas mantiene su periodo fijo a 4 segundos y la otra cambia a un periodo de 16 segundos.

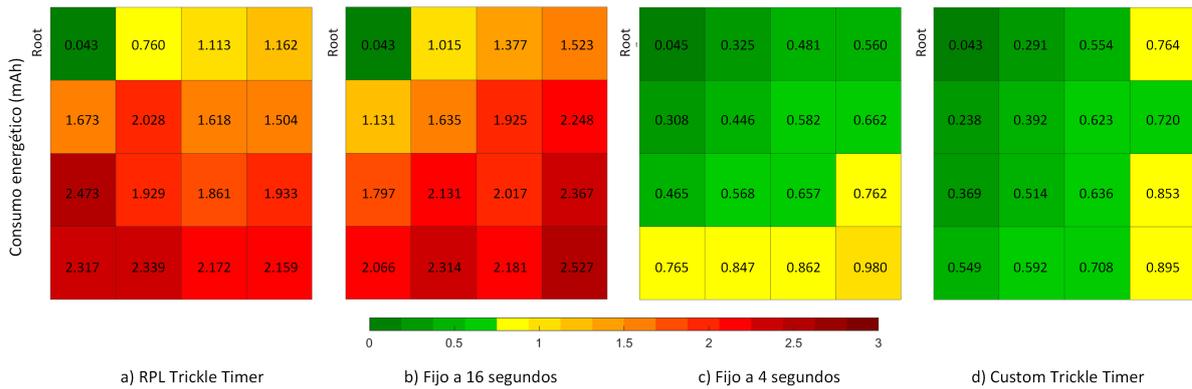


Figura 5.8: Potencia consumida para diferentes configuraciones del periodo de transmisión de balizas

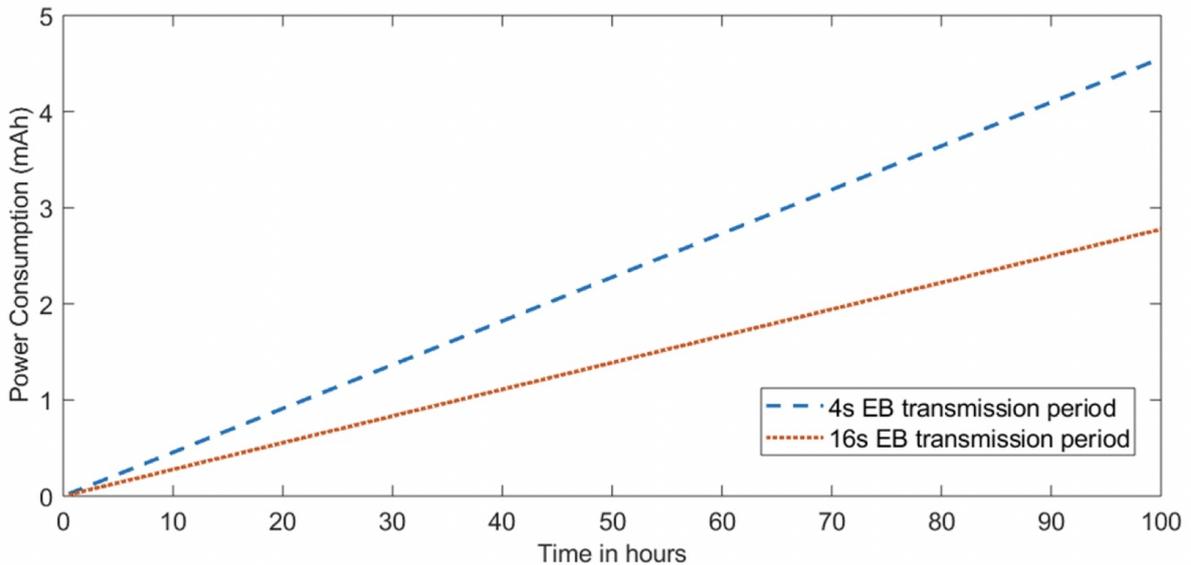


Figura 5.9: Potencia consumida para diferentes configuraciones del periodo de transmisión de balizas tras 100 horas de simulación

Estos resultados se pueden extrapolar a cualquier tipo de topología con mayor cantidad de nodos en la red. Esto se debe a que, utilizando Custom Trickle Timer, se consigue mejorar

el tiempo de conexión para los nodos dentro del área de cobertura, y a partir de ahí, está sincronización y el periodo variable de transmisión se irán propagando por la red.

Con esta serie de experimentos se ha conseguido demostrar que, gracias a los desarrollos propuestos, se consigue mejorar el comportamiento de las configuraciones utilizadas por defecto, tanto la propuesta por el estándar, como las modificaciones propuestas en Contiki. Utilizando la solución propuesta se consiguen mejores prestaciones en los tiempos de conexión, en la congestión de tráfico y también en el consumo energético de la red.

5.4 Diseño y evaluación del mecanismo Bell-X para la transmisión de balizas

TSCH ha demostrado ser una de las soluciones más relevantes propuestas por el estándar IEEE 802.15.4e, gracias al hecho de que su objetivo es proporcionar un comportamiento determinista, que pueda garantizar un cierto grado de fiabilidad y robustez, características que son imprescindibles en un escenario industrial. Aunque es cierto que, una vez los nodos se han sincronizado mediante TSCH, se ofrece una alta fiabilidad a las comunicaciones, el estándar presenta ciertas dificultades cuando se trata de formar la red de una manera rápida y eficiente energéticamente.

El protocolo RPL también es una herramienta indispensable a la hora de formar una red de sensores mallada, ya que proporciona conectividad y encaminamiento a los dispositivos que se acaban de sincronizar mediante TSCH. Estos dos protocolos no ha sido diseñados originalmente para trabajar entre ellos, y algunos procedimientos, como el envío de mensajes DIS en RPL, se vuelven menos necesarios cuando se trabaja con una planificación determinista como la utilizada en TSCH. Con el objetivo de mejorar la fase de sincronización, estos dos protocolos han combinado algunas de sus características. En el sistema operativo Contiki es posible configurar el periodo de transmisión de balizas para que siga la misma evolución que el Trickle Timer utilizado en el protocolo RPL, obteniendo el mismo comportamiento cuando se transmiten balizas que cuando se envían los mensajes de control en RPL. Aunque esta combinación pueda ayudar a reducir el tráfico y el consumo energético, el valor del Trickle Timer crece tan rápidamente que llega a su valor máximo en unos pocos minutos, perjudicando así al proceso de sincronización si este no se lleva a cabo durante las primeras fases del despliegue de la red.

En el apartado anterior se ha detallado el mecanismo de transmisión de balizas variable, que se centraba en mejorar el proceso de sincronización durante la fase inicial de despliegue de la red, configurando un periodo de transmisión de balizas lo suficientemente bajo como para que los nodos se conecten rápidamente y después cambiándolo para que el tráfico de señalización sea mucho menor. Esta rápida conexión permite ahorrar tiempo y energía, ya que durante las fases de escaneo el ciclo de trabajo del interfaz radio es cercano al 100%, por lo que largos tiempos de escaneo pueden afectar significativamente al nivel de batería de los dispositivos. Además, si un nodo se sincroniza rápidamente durante las fases de despliegue de la red, el Trickle Timer aún no habrá alcanzado su valor máximo, por lo que la conexión con la topología RPL será también más rápida.

La técnica que se propone a continuación, consiste también en un proceso dinámico y configurable, donde la respuesta temporal se asemeja a una campana escalonada que se repite periódicamente en el tiempo. Debido a su semejanza con una campana, este mecanismo se ha denominado Bell-X (donde la X representa uno de los parámetros configurables que definen su comportamiento temporal). Las zonas de pico determinan el rango de tiempo en el que el periodo de transmisión está configurado en su valor máximo, lo que se traduce en una reducción del consumo energético. La evolución de este periodo va a cambiar dinámicamente para reducir

el tiempo de transmisión hasta las zonas de valle, en las que se envían más balizas durante un tiempo pre-configurado.

Dependiendo de los requisitos del dominio de aplicación, existirá una relación de compromiso entre el tiempo que tardan los nuevos nodos en conectarse a la red y la energía consumida. Durante este tiempo en el que el temporizador se reduce, se crea una ventana en la que la probabilidad de éxito de conexión se incrementa, mientras que las zonas de pico permiten compensar el consumo energético resultante de enviar mayor cantidad de mensajes. Entre las zonas de pico y las de valle, se lleva a cabo una serie de transiciones escalonadas, de tal forma que el periodo de transmisión se dobla cada vez que un temporizador expira, de la misma forma que se comporta el Trickle Timer de RPL. En la figura 5.10 se puede ver el comportamiento temporal de una de las posibles configuraciones de Bell-X.

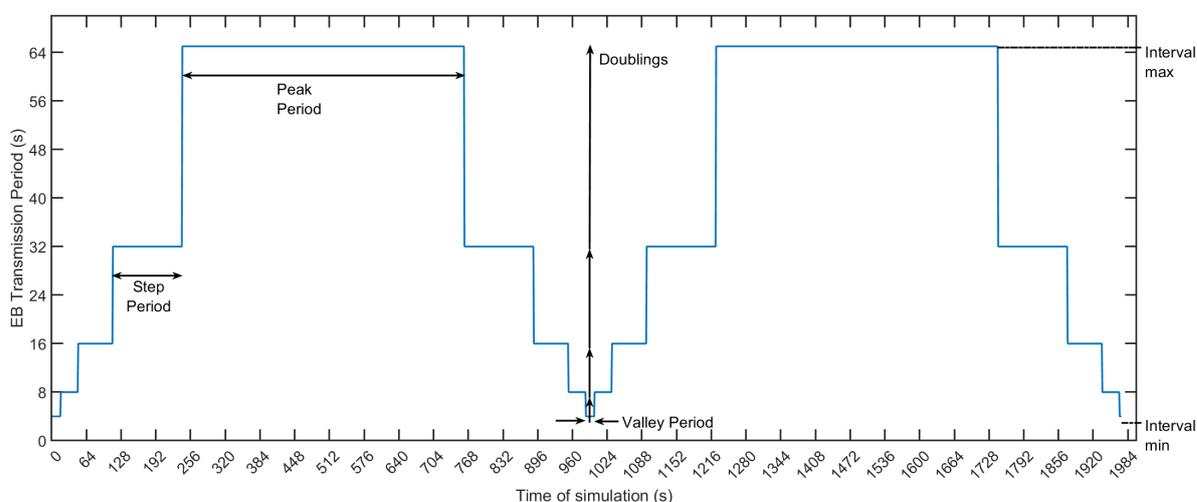


Figura 5.10: Ejemplo de una posible configuración de Bell-X (Interval min: 4s - Doublings: 4 - Valley factor:4 - Step factor: 4 - Peak factor: 8)

Tal y como se ha mencionado, este mecanismo permite configurar diferentes aspectos de la campana, de tal forma que se puedan obtener diferentes respuestas dependiendo del tipo de aplicación. A continuación, se detalla el proceso de funcionamiento de esta técnica de envío de balizas:

1. Cuando los nodos ya están sincronizados por TSCH y conectados al árbol RPL, los nodos comienzan la transmisión de balizas configurando su periodo de transmisión al valor indicado en el parámetro Interval min.
2. Además de configurar el periodo de balizas, se inicia un temporizador con una duración igual al valor de Interval min multiplicado por el valor del parámetro Factor de Valle. Durante este tiempo, el periodo de transmisión de balizas está configurado en su valor mínimo, lo que significa que se enviarán tantas balizas como las indicadas en el parámetro Factor de Valle.
3. Una vez el temporizador configurado expire, Bell-X modifica el periodo de transmisión de balizas duplicando el valor previo del periodo de balizas. Además, se vuelve a configurar un temporizador utilizando el valor actual del periodo de balizas multiplicado por el

parámetro Factor de Transición. Este proceso se va a repetir tantas veces como el periodo de balizas se doble.

4. Cuando el periodo de balizas alcanza su valor máximo, se configura un temporizador igual al valor actual del periodo de balizas multiplicado por el Factor de Pico. El valor máximo del periodo de balizas debe ser suficiente para mantener la sincronización de los nodos que ya pertenecen a la red, que debe ser de entre 50 y 130 segundos.
5. Una vez venza el temporizador configurado durante el periodo de pico, comienza el proceso contrario, en el que el valor del periodo de transmisión de balizas se reduce hasta llevar a la zona de valle. Este proceso se repetirá periódicamente en el tiempo.

Ajustando los valores que se muestran en la tabla 5.8 es posible controlar el periodo de cada una de las zonas, controlando el ciclo de trabajo de los mensajes de señalización y por tanto el consumo energético que tiene cada configuración.

Tabla 5.8: Parámetros de configuración para Bell-X

Parámetros	Descripción
Interval min (I_{min})	Valor mínimo del periodo de balizas, que coincide con la zona de valle.
Doublings (D)	Indica cuantas veces se dobla el temporizador antes de llegar a su valor máximo.
Interval max (I_{max})	Valor máximo del periodo de balizas. Este no es un parámetro configurable y se corresponde con el resultado de multiplicar Interval min tantas veces como las indicadas en el parámetro Doublings, tal y como se indica en esta ecuación. $I_{max} = I_{min} \cdot 2^D$
Factor de Valle (V_F)	Permite configurar el tiempo que un nodo permanece con el valor mínimo del periodo de balizas. La duración del temporizador en la zona de valle se puede obtener multiplicando el valor del periodo de transmisión de balizas en esta zona por el Factor de Valle.
Factor de Transición (S_F)	Permite configurar el tiempo que un nodo permanece en cada una de las transiciones entre el mínimo y máximo valor del periodo de balizas. La duración del temporizador en cada una de las zonas se puede obtener multiplicando el valor del periodo de transmisión de balizas en esa zona por el Factor de Transición.
Factor de Pico (P_F)	Permite configurar el tiempo que un nodo permanece con el valor máximo del periodo de balizas. La duración del temporizador en la zona de pico se puede obtener multiplicando el valor del periodo de transmisión de balizas en esta zona por el Factor de Pico.

En el algoritmo 4 se detalla el proceso que sigue Bell-X. Para reducir la complejidad computacional se han utilizado potencias en base 2, donde el parámetro I_{min} es el exponente. De esta manera, cuando tiene un valor de $I_{min} = 11$, el periodo de transmisión de EB será de $2^{11} = 2048ms$.

Algoritmo 4: Funcionamiento de Bell-X

```

input :  $I_{min}$ ,  $D$ ,  $V_F$ ,  $S_F$ ,  $P_F$ 
output: currentPeriod

/* Se identifica la zona actual de la campana */;
repeat
  switch currentPeriod do
    case  $I_{min}$  do
      zone =  $V_F$ ;
      rise = 1;
      break;
    case  $I_{min} + D$  do
      zone =  $P_F$ ;
      rise = 0; break;
    otherwise do
      zone =  $S_F$ ;
      break;

  /* Se configura el temporizador y el periodo actual */;
  timerSet(zone * currentPeriod);
  ebPeriodSet(currentPeriod)

  /* Se modifica el periodo según la zona de la campana */;
  if (currentPeriod <  $I_{min} + D$ ) and (rise == 1) then
    | currentPeriod ++;

  if (currentPeriod >  $I_{min}$ ) and (rise == 0) then
    | currentPeriod --;

until timer expire;

```

Como característica adicional, se ha añadido la posibilidad de reiniciar el estado actual de la campana a un valor mínimo, permitiendo que el mecanismo actúe frente a eventos que puedan ocurrir en la red. Gracias a esta característica, es posible reiniciar el valor del periodo de balizas cuando se produzca un cambio en la topología RPL o incluso ejecutado por una solicitud a nivel de usuario o aplicación. Por tanto, el periodo de transmisión tiene la posibilidad de reiniciarse cuando recibe cualquier solicitud de las capas superiores de la pila de protocolos. En la figura 5.11 se muestra la evolución del periodo de transmisión de balizas en el tiempo, señalando el momento en que se interrumpe el proceso normal de funcionamiento por un reinicio solicitado por los niveles superiores de la pila.

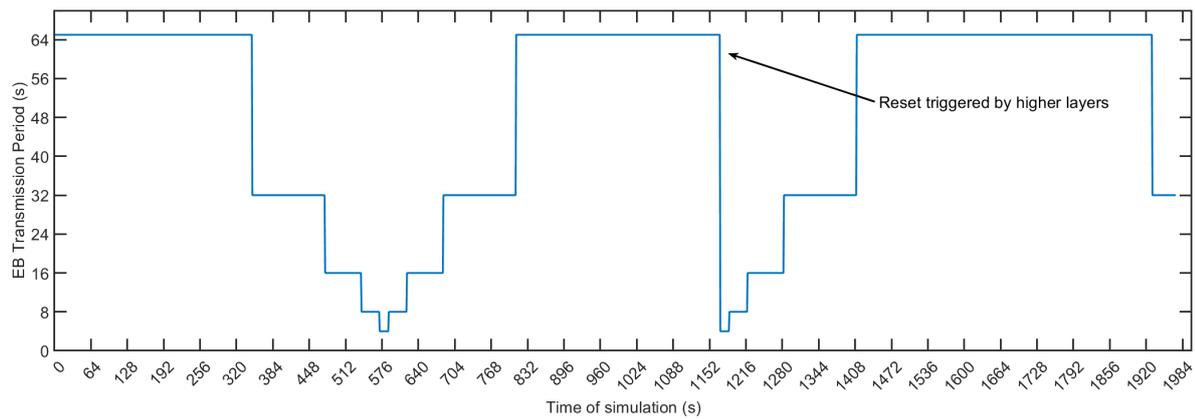


Figura 5.11: Evolución del periodo de transmisión de balizas y reinicio solicitado por las capas superiores

Una de las ventajas que tiene Bell-X, es que cada nodo de la red puede llegar a ejecutar una configuración diferente de la campana, ya que el proceso de transmisión de balizas es independiente para cada nodo. Además, aunque varios nodos tengan la misma configuración de la campana, estos procesos no están sincronizados, por lo que un nodo puede estar transmitiendo balizas en su zona de valle, mientras que el resto de sus vecinos está en la zona de pico. Dada esta característica individual, existe la posibilidad de utilizar configuraciones diferentes de la campana dependiendo del rol que un nodo tenga dentro de la red, utilizando una campana con un ciclo de trabajo mayor si es un nodo enrutador, alimentado a una fuente externa, y una configuración más eficiente energéticamente para aquellos nodos limitados por el uso de baterías.

En la figura 5.12 se muestra la evolución temporal del periodo de transmisión de balizas para tres nodos diferentes. Los nodos que representan las gráficas a) y b) tienen configurado un valor más largo del periodo de pico, lo que ahorraría batería si estos nodos no tuvieran alimentación externa. El nodo representado en la gráfica c) tiene configurado un periodo de valle más largo, por lo que estaría enfocado en nodos que tengan alimentación externa. El diagrama d) representa una combinación de los otros tres dispositivos, lo que deja ver como aquellas zonas de valle pueden compensar las zonas de pico para un nodo nuevo que se conecte a la red con estos tres dispositivos como vecinos.

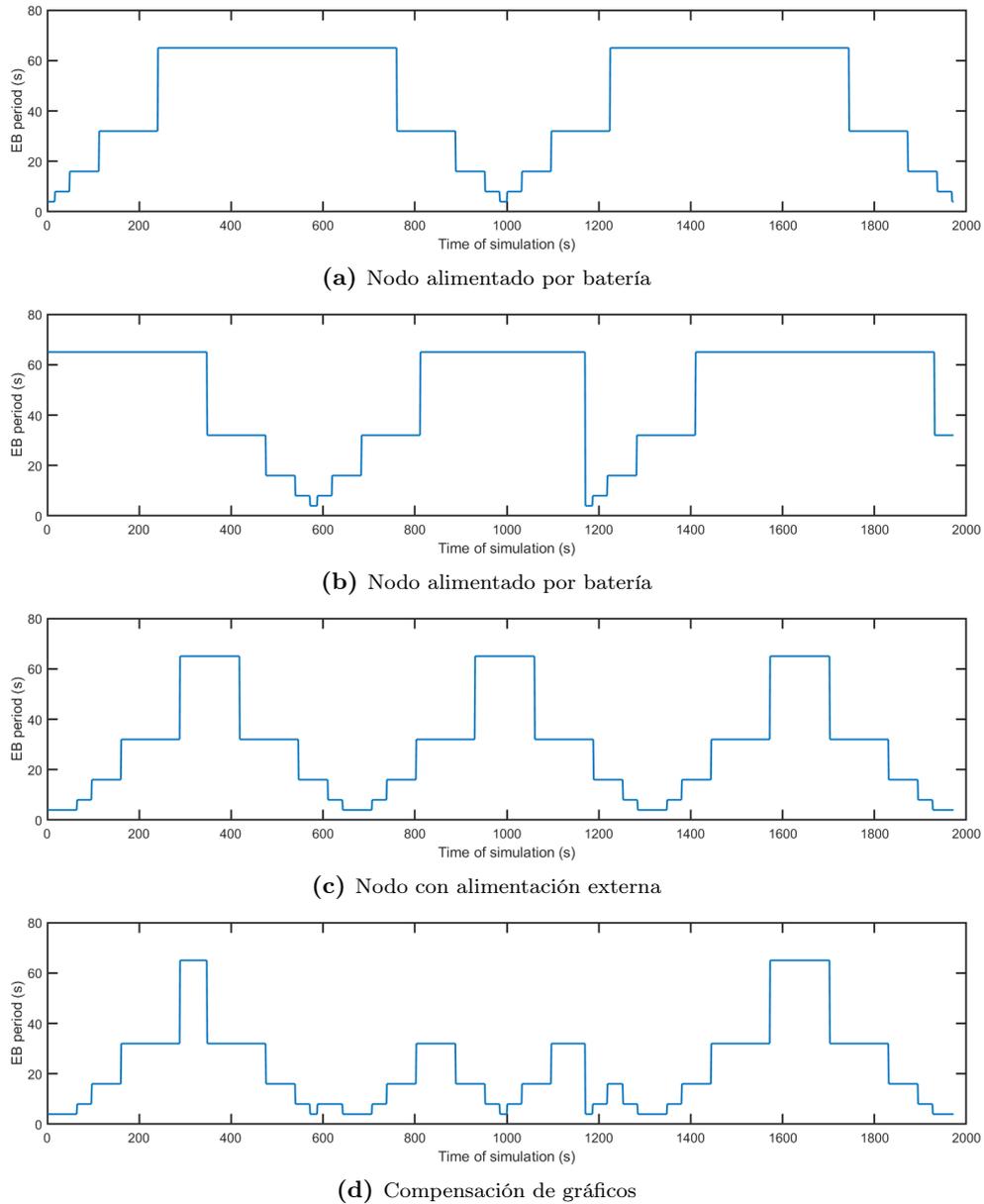


Figura 5.12: Compensación entre nodos del periodo de transmisión de balizas gracias a Bell-X

5.4.1 Simulaciones de Bell-X

Para la evaluación de Bell-X se han llevado a cabo diferentes simulaciones para comparar el mecanismo propuesto con el estado del arte. Para llevar a cabo esta comparación es importante considerar diferentes aspectos de rendimiento, como la probabilidad de éxito, tanto de la sincronización mediante TSCH como de la conexión del árbol RPL. Otra característica a considerar es la energía consumida, que estará relacionada con el tráfico generado, y por último el tiempo que tarda un nodo nuevo en obtener la sincronización en comparación con el resto de soluciones.

Los resultados que se obtuvieron en la primera versión, utilizando Custom Trickle Timer, mostraban que era posible mejorar el proceso de escaneo del protocolo TSCH durante las

primeras fases del despliegue, reduciendo así los tiempos de conexión y mejorando el consumo de energía.

Sin embargo, este nuevo mecanismo y estas nuevas simulaciones están centradas en demostrar un correcto funcionamiento no solo durante las fases de despliegue, sino que también se comporte de manera optimizada durante las fases de estado estacionario.

Para realizar estas simulaciones se ha escogido una topología formada por 16 nodos, en el que el nodo superior izquierdo será el coordinador que inicie la red. Se ha escogido esta topología regular para que los resultados no se vean afectados por variaciones en el número de vecinos, ya que al tener más nodos transmitiendo balizas, la sincronización se realiza más rápidamente.



Figura 5.13: Topología física de las simulaciones de Bell-X

En la tabla 5.9 se resumen los parámetros físicos que controlan la simulación. Los nodos están separados 40 metros entre ellos, de tal forma que se creen redes multi-salto. Para cada una de las configuraciones, se han realizado un total de 15 simulaciones con una duración máxima de una hora.

Tabla 5.9: Parámetros de configuración de las simulaciones de Bell-X

Parámetros físicos	
Distancia entre vecinos	40 m
Número de vecinos para el nodo central (11)	4
Número de vecinos para los nodos del borde	3
Número de vecinos para los nodos en esquina	2
Semillas por cada configuración	15
Tiempo mínimo antes de reiniciar el nodo 11	20 min

En la tabla 5.10 se muestran los parámetros de configuración relacionados con el proceso de sincronización y conexión. Para la planificación en TSCH, se ha escogido Orchestra, ya que permite crear slotframes dedicados a diferentes planos de tráfico. En cuanto al protocolo RPL, se han escogido unos parámetros para configurar el trickle timer, de tal forma que su valor máximo sea de aproximadamente 17 minutos.

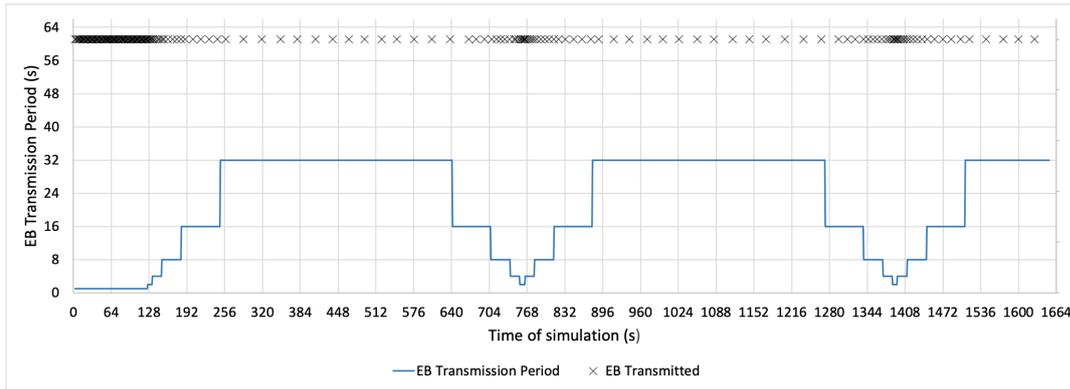
Tabla 5.10: Configuración de la pila de protocolos para las simulaciones de Bell-X

Parámetros	Valores
Duración del escaneo (T_{scan})	1 s
Duración del slot temporal (T_{slot})	10 ms
Planificación orchestra EBs	Slotframe de 101 con dos slots habilitados (TX y RX)
Planificación orchestra RPL	Slotframe de 31 con un solo slot habilitado
Número de canales (C)	4 canales
Número de canales de escaneo (C_S)	4 canales
Intervalo mínimo para Trickle Timer ($Trickle_{min}$)	4 s
Intervalo de doblaje para Trikle Timer ($Trickle_D$)	8
Constante de redundancia para Trickle Timer ($Trickle_R$)	10
Periodo de transmisión de mensajes DIS (T_{dis})	60 s

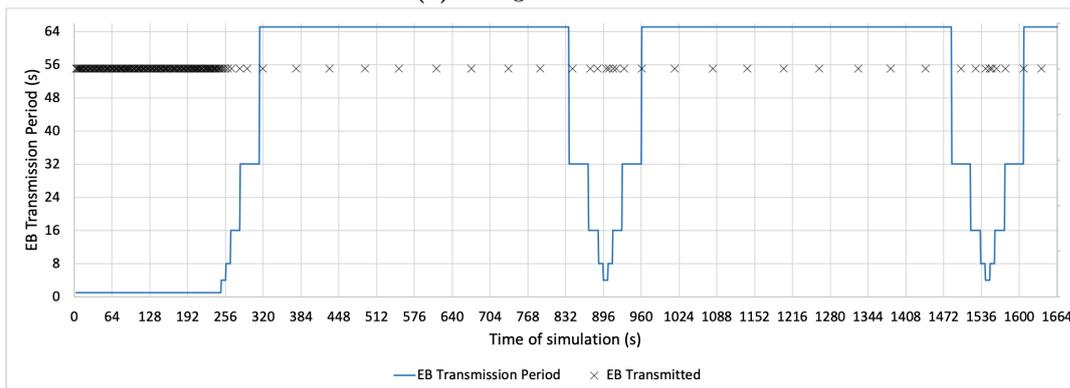
Se han simulado seis configuraciones diferentes, cuatro se corresponden con diferentes variaciones de los mecanismos utilizados por defecto, y dos son diferentes configuraciones de Bell-X. Cada una de estas simulaciones se ha repetido 15 veces utilizando diferentes semillas.

Las simulaciones consisten en dos fases diferenciadas. En la primera fase, los 16 nodos de la red deben sincronizarse y conectarse correctamente. Esta fase se corresponde con el despliegue inicial de la red, y por lo tanto se ha escogido un periodo de transmisión de balizas fijo para que los nodos puedan conectarse rápidamente. Después de esta primera fase, el periodo de transmisión de balizas comienza a funcionar con Bell-X. Esta primera fase no se tendrá en cuenta a la hora de realizar la comparación, ya que solo interesa comprobar el comportamiento en estado estacionario.

Durante la segunda fase, ya que todos los nodos están correctamente conectados, el nodo 11 se reinicia para observar el tiempo que tarda en volver a obtener la sincronización y la información del árbol RPL. Únicamente se ha estudiado el comportamiento de este nodo para mantener un escenario común para todas las configuraciones, ya que del estudio previo se ha podido determinar que el número de vecinos afecta de la misma forma independientemente de la configuración escogida.



(a) Configuración Bell-32



(b) Configuración Bell-65

Figura 5.14: Configuraciones de la campana seleccionadas

En la figura 5.14 se muestra los patrones seleccionados para cada configuración analizada. La primera de ellas para un Interval Max de 32 segundos y la segunda para uno de 65 segundos. A partir de ahora, estas configuraciones pasarán a llamarse Bell-32 y Bell-65 para identificarlas más fácilmente.

Aunque las diferentes configuraciones vengán identificadas por su valor máximo, es importante destacar el resto de parámetros de configuración para cada una de las variaciones de la campana Bell-X. En la tabla 5.11 se resumen los parámetros de configuración de Bell-X.

Tabla 5.11: Parámetros de configuración para Bell-32 y Bell-65

Parámetros	Bell-32	Bell-65
Interval min (I_{min})	2 s	4 s
Doublings (D)	4	4
Factor de Valle (V_F)	4	2
Factor de transición (S_F)	4	1
Factor de pico (P_F)	12	8

Se han escogido estas dos configuraciones para poder evaluar diferentes comportamientos de la campana en Bell-X. Mediante la configuración Bell-32 es posible tener una conexión de los dispositivos más rápida, mientras que la configuración Bell-65 permite ahorrar más energía ya que envía menor cantidad de tráfico. Configurando los valores del Factor de Valle, Factor de Transición y Factor de Pico es posible controlar el porcentaje de tiempo que el periodo de transmisión está configurado con su valor máximo. Esto significa que, para configuraciones en las que premie el ahorro energético, será necesario escoger una configuración con Periodos de Pico más largos y valores de Interval Max mayores, mientras que para conexiones de red más rápidas se escogen Periodos de Valle más largos y valores de Interval Max más cortos.

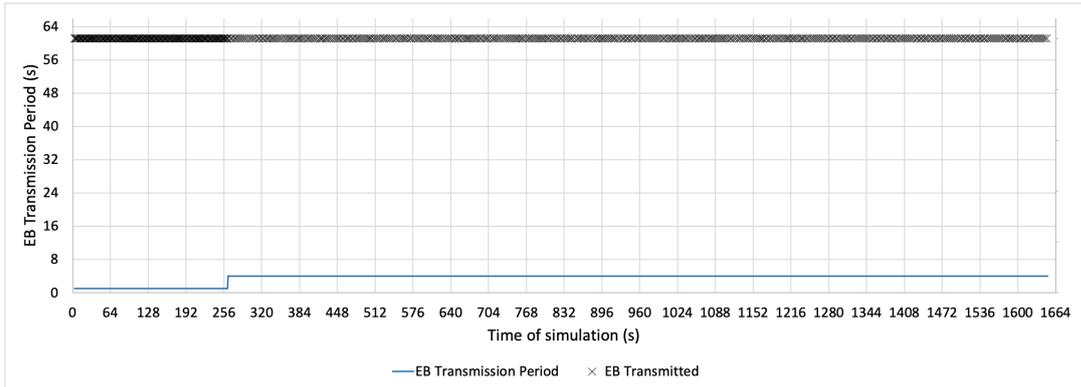
En la figura 5.15 se muestran las configuraciones escogidas para realizar la comparación con los resultados obtenidos de Bell-X. Estas configuraciones son las más extendidas en el estado del arte y en las configuraciones por defecto, como son el periodo de transmisión de balizas fijo o el periodo de transmisión de balizas basado en el Trickle Timer de RPL. Las configuraciones con un periodo de balizas fijo se llamarán M4s, M16s y M32s para las configuraciones con 4, 16 y 32 segundos para el periodo de balizas TSCH. El caso de la configuración basada en Trickle Timer de RPL en adelante se denominará MT.

5.4.2 *Análisis de resultados de Bell-X*

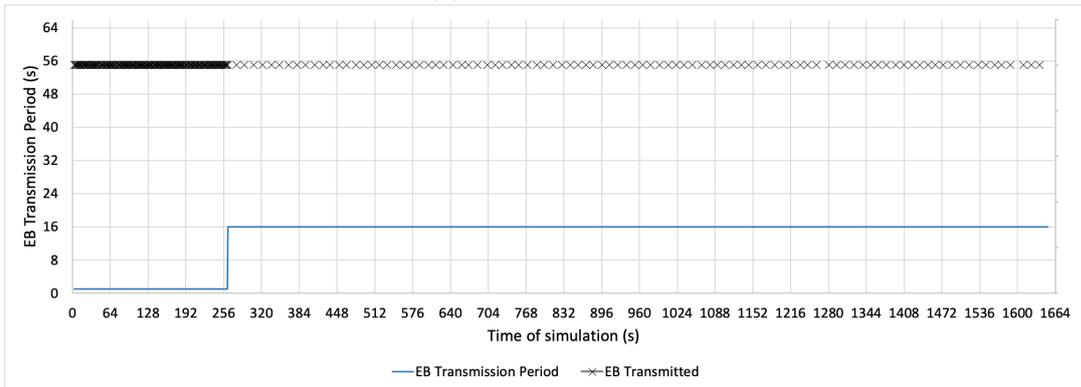
Durante las simulaciones se han recopilado diferentes estadísticas para poder comparar el rendimiento de cada una de las configuraciones bajo estudio. Esta comparación se ha centrado en analizar tres factores de rendimiento para ver como de efectiva y rápido ha sido el proceso de sincronización. Estos parámetros son los siguientes:

- La probabilidad de éxito de la conexión, debido a que hay configuraciones en las que los nodos nuevos no siempre consiguen unirse a la red.
- Tiempo transcurrido hasta que un nodo consigue conectarse a la red, esto incluye tanto el proceso de sincronización de TSCH como el tiempo de unión al árbol RPL.
- Consumo de potencia, que estará relacionado con la cantidad de tráfico intercambiado y el tiempo que el interfaz radio de los nodos está activo (tanto si está transmitiendo como escuchando).

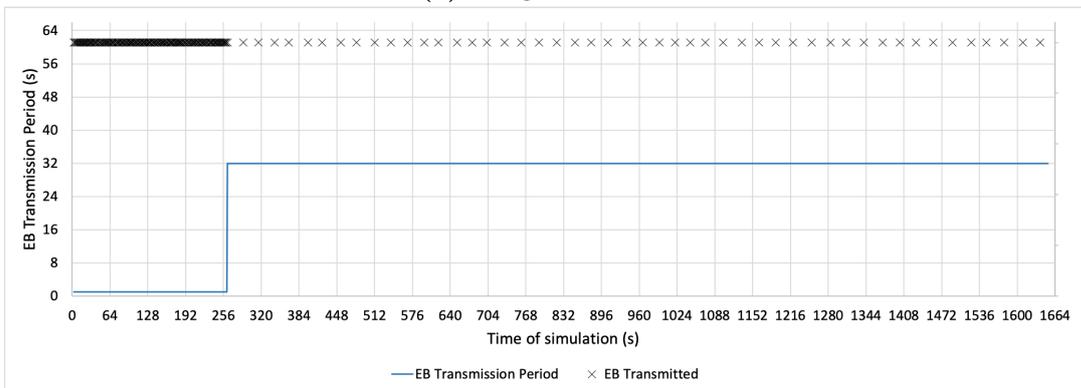
En la tabla 5.12 se muestran las probabilidades de éxito de la conexión para cada una de las configuraciones evaluadas durante las 15 simulaciones. Como se puede apreciar, hay configuraciones donde el tiempo de unión de un nodo no ha sido inferior al tiempo de simulación de una hora. Este límite se ha escogido como valor máximo aceptable para la conexión de un nuevo nodo a la red.



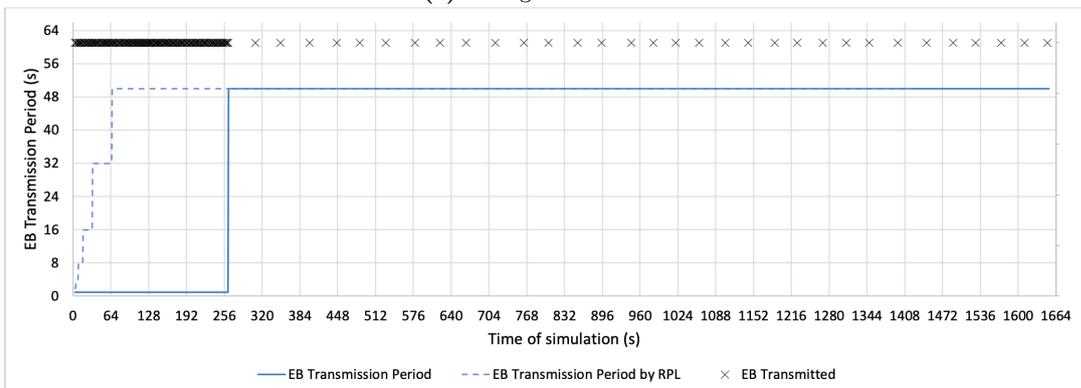
(a) Configuración M4s



(b) Configuración M16s



(c) Configuración M32s



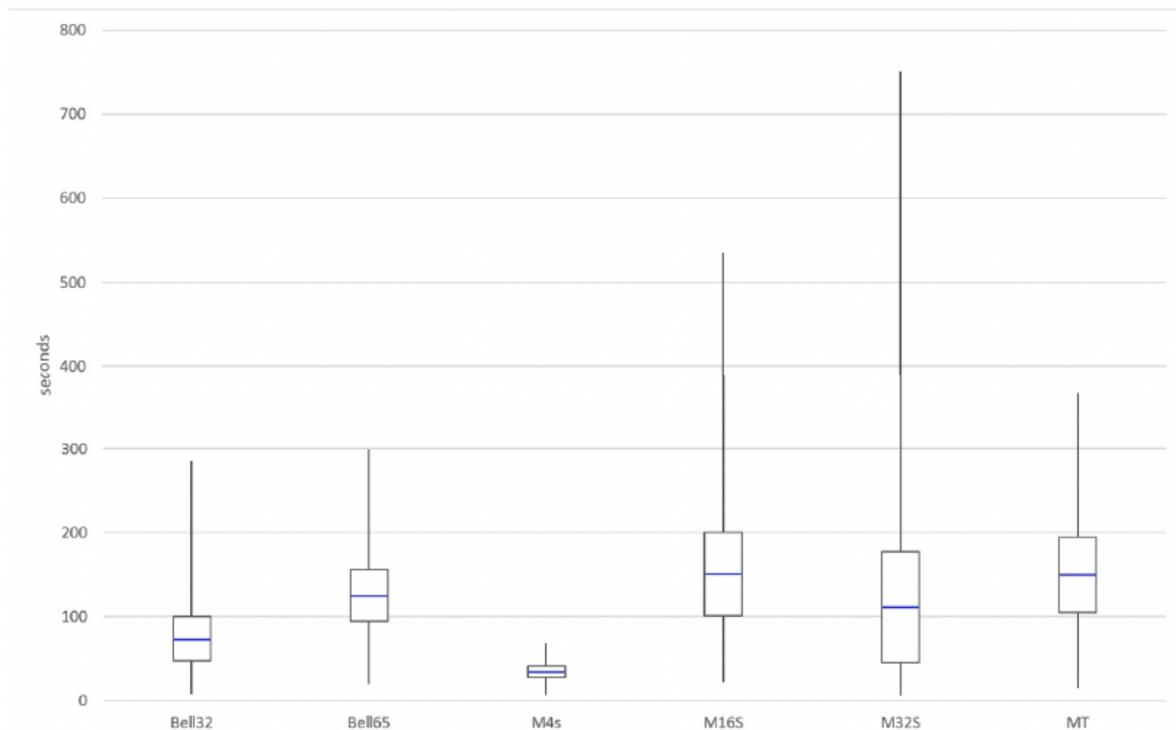
(d) Configuración MT

Figura 5.15: Configuraciones utilizadas por defecto seleccionadas

Tabla 5.12: Probabilidad de éxito de la sincronización/conexión para las simulaciones de Bell-X

	Éxito en sincronización	Éxito en conexión
Bell-32	100%	100%
Bell-65	100%	100%
M4s	100%	80%
M16s	100%	93%
M32s	100%	93%
Trickle Timer	100%	93%

Por otro lado, en la figura 5.16 se analiza el valor máximo, el valor mínimo, el promedio y la desviación estándar del tiempo necesario por un nuevo nodo para unirse correctamente a una red RPL, de tal forma que pueda comenzar a enviar información. Todas estas estadísticas se han obtenido a partir del valor promedio de las 15 simulaciones para cada una de las configuraciones.

**Figura 5.16:** Comparación estadística de las diferentes configuraciones simuladas en Bell-X

Lo primero que se puede observar de estos resultados es que la configuración M4 muestra los mejores resultados, en cuanto a tiempo de conexión se refiere, en comparación con el resto de configuraciones. En este análisis solo se han tenido en cuenta aquellas simulaciones en las que se ha conseguido conectar, por lo que hay que tener en cuenta los resultados mostrados en la tabla 5.12. En el caso de la configuración M32 también se observa que tiene un valor promedio

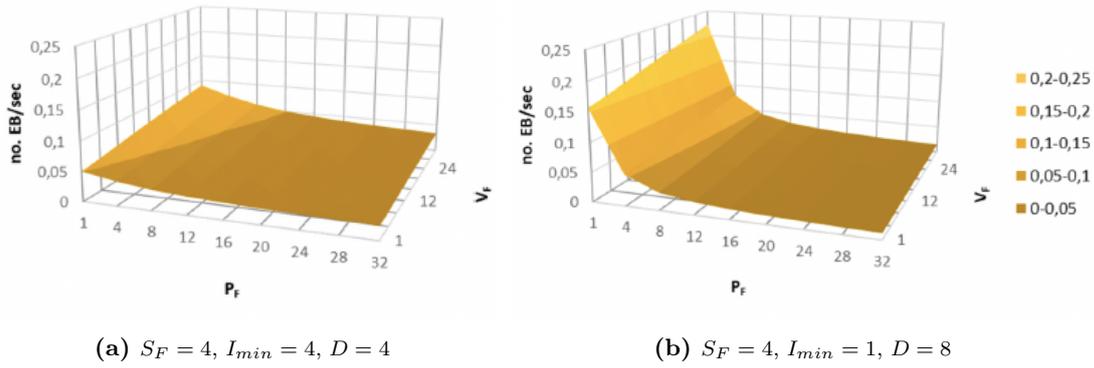


Figura 5.17: Número de balizas por segundo para diferentes configuraciones de Bell-X

mejor que la solución Bell65, pero con una dispersión mayor, resultando en valores máximos más altos sin garantizar la conexión.

Estos resultados muestran que las configuraciones Bell32 y Bell65 consiguen mejores resultados en términos de valor promedio y dispersión del tiempo de conexión, además teniendo en cuenta que consiguen un 100% de probabilidad de éxito de conexión.

El último de los puntos a comparar es la energía consumida, que está relacionada con la cantidad de tráfico de señalización que se envía. Para poder comparar las diferentes configuraciones en términos de energía se ha propuesto la ecuación 5.1.

$$EB/sec = \frac{V_F + 2 \cdot (D - 1) \cdot S_F + P_F}{V_F \cdot I_{min} + 2 \cdot S_F \cdot \sum_{i=1}^{D-1} I_{min} \cdot 2^i + P_F \cdot I_{min} \cdot 2^D} \quad (5.1)$$

En esta ecuación, el numerador representa el número de balizas transmitidas durante un ciclo de la campana, mientras que el denominador representa el tiempo total de un ciclo de la campana. Esta ecuación permite calcular el valor promedio de balizas por segundo utilizando los parámetros de configuración del mecanismo propuesto.

En la figura 5.17 se muestran los valores obtenidos dos rangos de configuraciones diferentes, en las que se modifica tanto el Factor de Pico como el Factor de Valle. Se puede ver que, cuando el valor del periodo de pico incrementa, el número de balizas transmitidas disminuye, debido a que la zona de pico de la campana es más larga. Por otro lado, si el valor del Factor de Valle es mayor, la campana permanece más tiempo en su valor mínimo, lo que se traduce en un mayor envío de balizas. Utilizando este modelo, es posible escoger una configuración optimizada, que garantice que los nodos se conectan rápidamente en las zonas de valle que en el resto de configuraciones.

En la figura 5.18 se muestra la cantidad de balizas intercambiadas para cada una de las configuraciones, con el objetivo de representar el impacto que tiene cada una de ellas en términos de energía consumida. En este caso, la configuración Bell65 consigue el valor más bajo de balizas por hora, solo mejorada por el Trickle Timer. Sin embargo, la configuración basada en Trickle Timer depende de RPL, lo que significa que estos resultados se darán en el caso más optimista en el que el Trickle Timer permanezca en su valor máximo una vez llegue a él. En situaciones normales, las condiciones de la red pueden cambiar con el tiempo, reiniciando este periodo del Trickle Timer y por lo tanto incrementando el número de balizas enviadas. Esto significa

que la configuración Bell65 es la más eficiente energéticamente, ya que es independiente de las condiciones de la red.

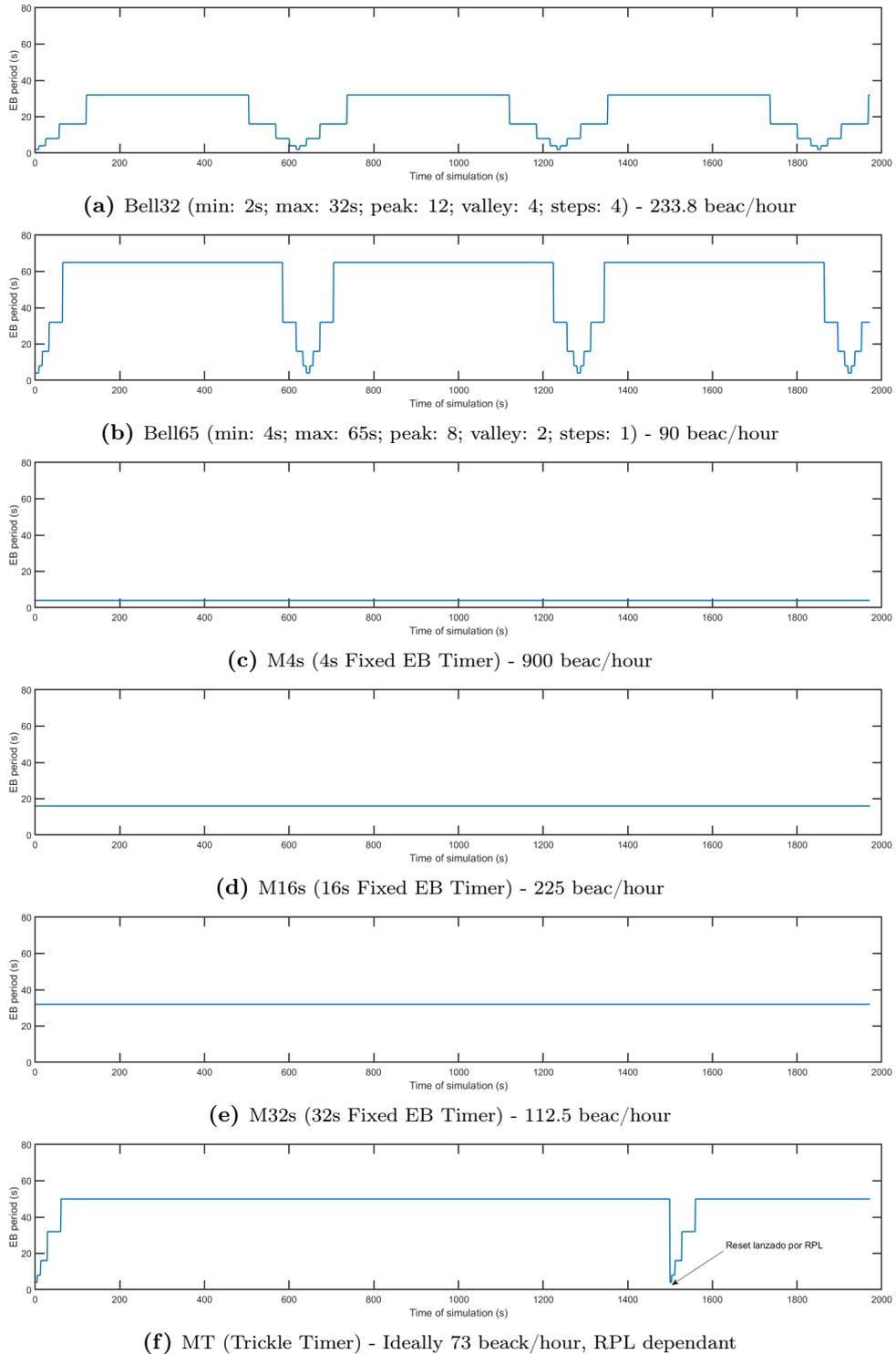


Figura 5.18: Comparación de las diferentes configuraciones simuladas en cuanto a balizas por segundo

El efecto que tienen las diferentes configuraciones en la evolución del consumo de potencia, también debe tener en cuenta la fase de escaneo, ya que cuanto menor sea el tiempo de conexión,

menos tiempo permanecerá la radio activa al 100% en busca de balizas. En la figura 5.19 se representa el consumo en esta fase. Como se puede ver, para valores de X más altos en la configuración Bell-X, la energía utilizada es mucho menor que el resto de configuraciones, resultando en un mayor tiempo de vida del nodo.

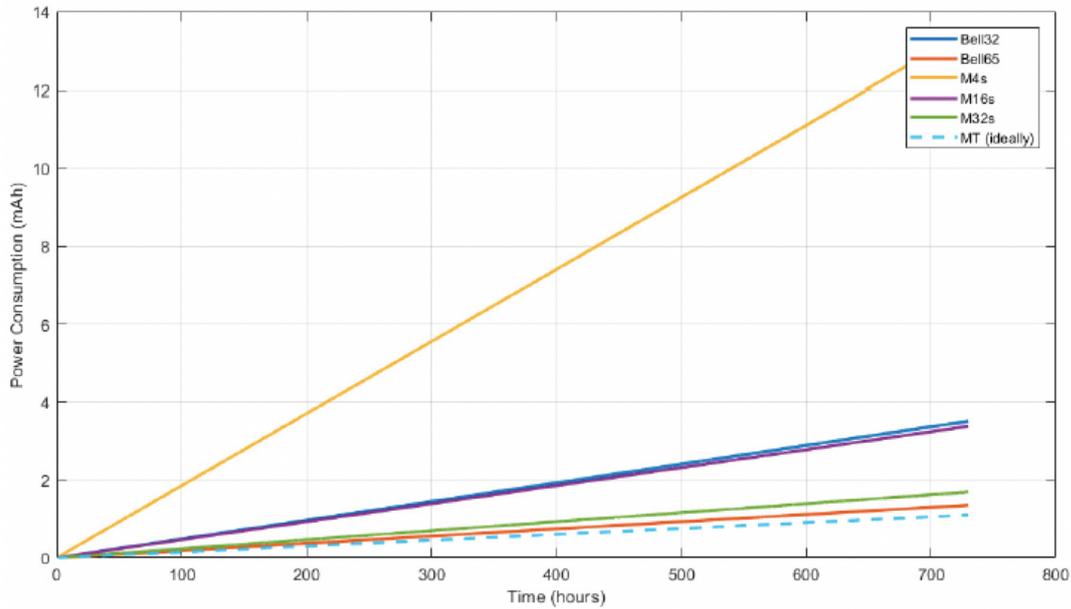


Figura 5.19: Tendencia de consumo durante un mes de operación para cada configuración

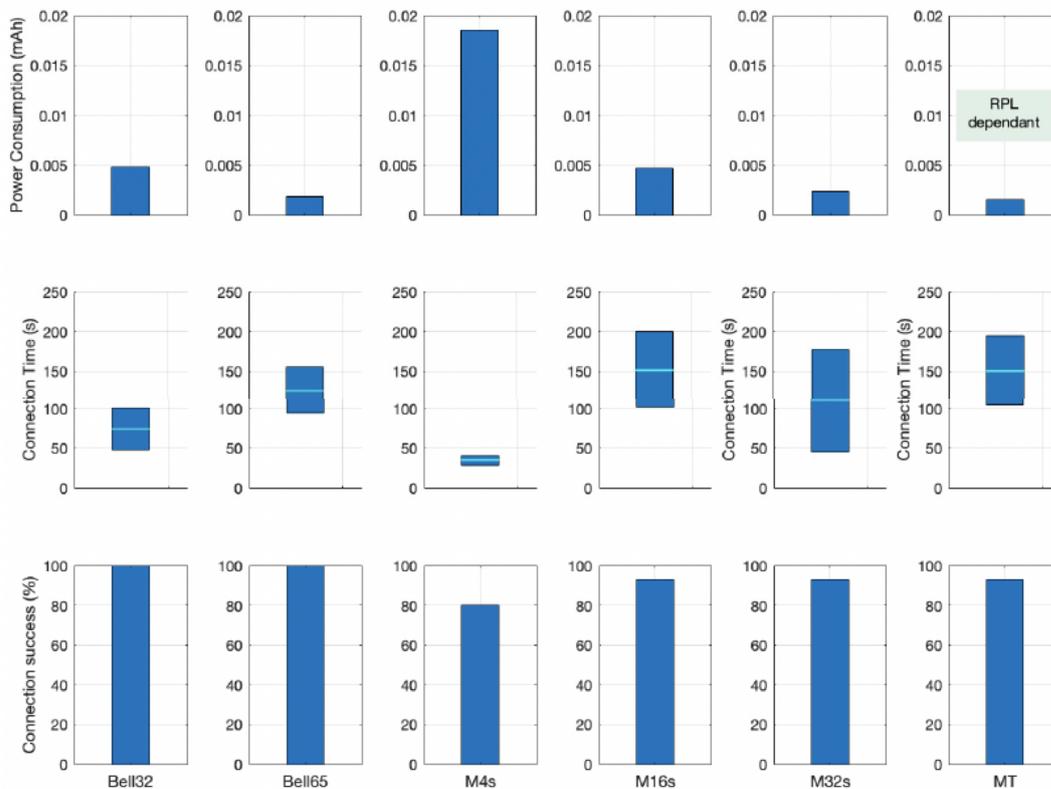


Figura 5.20: Factores clave de rendimiento para las diferentes configuraciones simuladas en Bell-X

Para poder comparar fácilmente los resultados que se acaban de exponer, la figura 5.20 muestra los diferentes factores de rendimiento para cada uno de los mecanismos simulados, de tal forma que se pueda identificar rápidamente la mejor opción dependiendo del campo de aplicación y de las necesidades del caso de uso.

5.5 Conclusiones

En este capítulo se han propuesto diferentes mecanismos que permiten mejorar el proceso de sincronización TSCH y de formación del árbol RPL. Estos dos protocolos están considerados como tecnologías de facto en la implantación de redes de sensores inalámbricos, sobre todo centrados en el ámbito industrial gracias a la fiabilidad y robustez que se consiguen debido a TSCH. Sin embargo, las primeras fases de despliegue de estas redes presentan ciertas dificultades que derivan del uso de TSCH, ya que obtener estos mensajes de señalización resulta más complejo comparado con los mecanismos de acceso aleatorio. Estas dos propuestas tienen como objetivo optimizar estos procesos de sincronización y conexión a la topología RPL, permitiendo mejorar el éxito de la sincronización a la vez que se reduce el tiempo que lleva formar estas redes, lo que se traduce también en un ahorro energético.

En la primera solución propuesta en este capítulo se ha llevado a cabo un estudio sobre los parámetros que intervienen en los procesos de sincronización y conexión con RPL, identificando aquellas configuraciones que tienen un impacto más significativo a la hora de mejorar los procesos de formación de la red. A partir de este análisis, se ha propuesto una técnica de balizamiento dinámico que consigue mejorar tanto la probabilidad de éxito de la conexión, como el tiempo que lleva realizar este proceso, comparándolo con las configuraciones utilizadas en el estado del arte. Este primer desarrollo es especialmente útil durante la fase de despliegue, ya que una vez desplegada la red el periodo de transmisión de balizas permanece en su valor máximo

A partir de estos resultados, se ha implementado un nuevo mecanismo al que se ha denominado Bell-X, cuya evolución temporal se asemeja a la forma de una campana. Bell-X tiene como objetivo no solo mejorar los procesos de sincronización y conexión durante las fases de despliegue, sino que también sea útil una vez la red ya está desplegada y se encuentra en estado estacionario. Además de cambiar dinámicamente el periodo de transmisión de balizas, puede configurarse para favorecer determinados ámbitos de aplicación, consiguiendo una relación de compromiso entre el tiempo de conexión y la energía consumida. Esto significa que, si en una determinada aplicación es necesario que la conexión se realice más rápidamente, Bell-X puede ajustarse para enviar un mayor número de balizas, lo que se traduce en mayor consumo energético. Sin embargo, gracias a la evolución del periodo de transmisión, puede conseguir mantener un valor promedio inferior al que se obtienen con un periodo de transmisión fijo.

Conclusiones y trabajos futuros

El tema central de la tesis ha girado en torno a las comunicaciones inalámbricas de ámbito industrial, en concreto aquellas pensadas para llevar a cabo un proceso de digitalización que alimenten otros sistemas de Industria 4.0 como *Big Data Analytics* o *Cloud*. Esta digitalización busca complementar a las tecnologías legadas, añadiendo nuevas fuentes de información, en ocasiones de carácter temporal o itinerante, que permitan gestionar de manera más eficiente los procesos industriales a un bajo coste y consumo energético, pero sin comprometer la calidad de servicio y la fiabilidad.

Se ha realizado un estado del arte sobre tecnologías de comunicación inalámbricas y su posible aplicación en escenarios industriales, poniendo de manifiesto el crecimiento que ha tenido la adopción de estas tecnologías inalámbricas en la industria. Se ha trabajado con tecnologías basadas en el estándar IEEE 802.15.4e, que gracias al mecanismo de acceso al medio TSCH, permite cumplir con unos elevados requisitos de fiabilidad y robustez de las comunicaciones. Para completar el sistema IoT, el estándar IEEE 802.15.4e se ha integrado con otros protocolos como RPL, enfocado a crear y mantener una topología y las tablas de encaminamiento en este tipo de redes con bajas capacidades de computación. También con el protocolo 6LoWPAN, que sirve como capa de adaptación para que estas redes puedan interoperar con redes basadas en IPv6.

La investigación llevada a cabo ha identificado algunas limitaciones de estas tecnologías, evaluándolas y proponiendo mecanismos que permiten optimizar el funcionamiento de los protocolos en entornos industriales. A continuación, se muestran en detalle las aportaciones realizadas gracias al estudio desarrollado.

- Se ha trabajado con mecanismos de evaluación de calidad del enlace, orientado a complementar el funcionamiento del protocolo RPL. Las WSN utilizadas en aplicaciones temporales o itinerantes, buscan optimizar el tiempo de vida útil de todo el sistema, permitiendo captar datos durante más tiempo de manera homogénea en toda la red. Para mejorar esta característica, se ha tenido en cuenta diferentes tipos de métricas, como el consumo energético de los dispositivos, de tal forma que ayuden a RPL a tomar las decisiones para construir una topología más eficiente energéticamente.

También se ha desarrollado un mecanismo de evaluación de calidad multi-parámetro, combinando diferentes métricas para mejorar la construcción de la topología y obtener mayor fiabilidad que con las métricas tradicionales utilizadas en RPL.

- Se han investigado en profundidad los mecanismos relacionados con la etapa de despliegue y sincronización de redes basadas en TSCH y RPL. Este proceso tiene mayor complejidad si se compara con otras tecnologías de acceso aleatorio, debido al uso de múltiples frecuencias y a la distribución en *slots* del eje temporal. Sin una correcta configuración, esta fase de sincronización y conexión puede alargarse demasiado, llegando a tener situaciones en las que un nodo no llegue a conectarse a la red.

Para caracterizar este proceso, se ha analizado la influencia de diferentes parámetros de configuración de cada mecanismo o protocolo, determinando cuales de ellos son más relevantes en el proceso de formación de la red. De esta forma, se ha propuesto un modelo analítico que permite caracterizar el tiempo que lleva obtener la sincronización de TSCH y formar tanto las rutas ascendentes como las descendentes en RPL. Este modelo se ha validado a través de diferentes simulaciones y pruebas en entorno real, obteniendo un comportamiento similar al compararlo con el modelo.

El modelo permite calcular ante diferentes configuraciones, el tiempo estimado de formación de la red, facilitando la configuración de estas redes según el ámbito de aplicación de las mismas.

- Tras evaluar el comportamiento de este proceso de sincronización, se ha trabajado en proponer un sistema que permita agilizar el proceso de sincronización y conexión. Para ello, se han desarrollado mecanismos que permiten mejorar este proceso de conexión. Estos se basan en utilizar un periodo de transmisión de balizas variable y dinámico, de tal forma que en aquellos momentos en los que sea necesario obtener una sincronización rápida se utilice un periodo de transmisión más bajo.

Basado en este planteamiento, se ha desarrollado un mecanismo dinámico para la transmisión de balizas, al que se ha denominado Bell-X debido a que su comportamiento se asemeja con el de una campana. Gracias a esto, no solo se optimiza el proceso de sincronización durante las fase inicial de despliegue, sino que también se favorece una sincronización ágil en etapas más estables de la red, ya que se crean ventanas de oportunidad en las zonas de valle del mecanismo Bell-X.

Con las diferentes aportaciones de esta tesis se ha conseguido mejorar algunos aspectos de las redes de sensores inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.15.4e. Los desarrollos se han centrado en mejorar la fiabilidad y robustez de las comunicaciones, además de conseguir un sistema que sea rápido y sencillo de desplegar, optimizando los procesos de sincronización y conexión a la red, y siendo capaz de auto-repararse en caso de que se produzcan cambios en la topología, seleccionando las mejores rutas según el ámbito de aplicación. Con esto se pretende mejorar la imagen que la industria tiene de las WSN, y en general de las tecnologías inalámbricas, para que así mejore su grado de adopción en escenarios de tipo industrial.

Esta tecnología ha demostrado sus grandes capacidades en diferentes ámbitos de aplicación como automatización, proyectos de digitalización industrial, construcción de modelos de Gemelo Digital o el uso de herramientas WSN para auditorías en las que se requiere el uso de sistemas de despliegue fácil y autónomo.

Las redes de sensores siguen teniendo un largo recorrido de futuro, ya que recientemente se están proponiendo estudios que modifican el paradigma de comunicación tal y como se conoce hasta ahora.

- La planificación de recursos en TSCH sigue siendo uno de los temas de estudio. Tras el diseño de mecanismos autónomos como Orchestra, se han presentado diferentes propuestas que lo complementan y mejoran, aunque está bastante extendido e integrado en plataformas como Contiki. Se trata de un campo difícil de tratar, ya que no hay un único mecanismo que pueda cubrir las necesidades de diferentes requisitos y aplicaciones.
- Relacionado también con la planificación y la gestión de calidad de servicio, el uso de las *Software Defined Networking* (SDN) está generando grandes expectativas no solo en el ámbito de las WSN, sino en las comunicaciones en general. Esta tecnología permite gestionar de manera centralizada los recursos de una red, permitiendo definir diferentes flujos de datos con determinados niveles de calidad de servicio.
- El uso de nodos móviles también tiene interesantes aplicaciones en las redes WSN, y debido a la propia definición de estas redes de baja tasa de transferencia, puede ser todo un desafío modificar las topologías de manera ágil y eficaz.
- Otro de los puntos interesantes relacionado con TSCH, tiene que ver con el uso de este mecanismo en redes subGHz, no solo en las bandas de frecuencia del propio estándar IEEE 802.15.4e, sino en la combinación de diferentes tipos de transceptores radio, o la integración del mecanismo TSCH en redes LoRa.

Anexo A: Sistema Deploy&Forget para la puesta en marcha de las WSN

En este anexo se detalla el funcionamiento de la solución Deploy&Forget, un mecanismo patentado en 2015 (P2015.300.39), como colaboración entre el Instituto Tecnológico de Informática y UPV, donde se ha estado trabajando durante el desarrollo de la tesis. Aunque el trabajo es posterior a la solicitud de esta patente, la investigación y los desarrollos conseguidos han contribuido a mejorar y completar algunos procesos presentes en este mecanismo.

Esta patente propone un sistema que permite facilitar el proceso de despliegue de una red de sensores inalámbricos en escenarios industriales. Desplegar este tipo de redes supone todo un reto, ya que los dispositivos pueden contar con diferentes enlaces alternativos por los que encaminar la información, lo que dificulta escoger una ubicación óptima donde instalarlos. Para facilitar esta tarea, el sistema dota a los dispositivos de la capacidad de evaluar la calidad de los diferentes canales alternativos, en base a unas métricas que determinan la eficiencia del enlace establecido. El resultado de esta evaluación, se puede representar a través de un interfaz humano-máquina o *Human Machine Interface* (HMI), permitiendo visualizar durante el despliegue si una ubicación es más adecuada que otra. Además, el sistema utiliza protocolos y mecanismos que permiten un funcionamiento autónomo y desatendido de la red, auto-gestionándose y reparándose en caso de que haya modificaciones en la topología, como dispositivos que agoten su batería u obstáculos que interfieran la comunicación entre dos nodos.

Estas características mencionadas son las que dan nombre a la solución, conseguir un sistema que sea rápido y sencillo de desplegar (*Deploy*) y que funcione de manera desatendida y autónoma (*Forget*). A continuación, se exponen en detalle estas dos características principales.

Mecanismo de asistencia durante el despliegue de la red

Para conseguir que un proceso de despliegue sea sencillo, rápido y eficiente, es necesario evitar utilizar todo tipo de herramientas o sistemas externos que extiendan el proceso de despliegue. Algunos ejemplos de estos análisis previos o herramientas pueden ser los estudios radioeléctricos del escenario, con el fin de conocer como se comporta el medio ante unas condiciones acotadas; manuales de buenas prácticas que den unas pautas a seguir durante la instalación; o mecanismos de medición externos que den soporte al despliegue. Este tipo de sistemas únicamente alargan el proceso de despliegue, y en muchos casos no resultan de utilidad, ya que

las tecnologías inalámbricas utilizan un medio de comunicación muy variable, sobre todo en escenarios industriales. Además, los citados sistemas hacen uso de modelos idealizados de canal, mediciones puntuales del medio radioeléctrico, o simulaciones de red que se alejan de las complejidades del mundo real.

El sistema busca evitar el uso de herramientas o análisis previo, integrando un mecanismo de evaluación de calidad del enlace en cada uno de los nodos de la red. Esta evaluación no solo permite conocer si la ubicación en la que se va a instalar el dispositivo dispone de un nivel aceptable de calidad, sino que esta métrica también se utiliza por cada uno de los nodos para escoger la ruta óptima que garantice un funcionamiento fiable y robusto de la red.

Integrar este tipo de interfaces en cada nodo supone un incremento de la complejidad, tanto en el apartado hardware como en el propio mecanismo de obtención y representación de calidad. Sin embargo, estas mejoras técnicas en cada dispositivos no tendrán un gran impacto en el coste final del dispositivo, pero si que suponen una gran diferencia a la hora de realizar el despliegue de una red WSN de manera ágil y optimizada.

En base a este planteamiento, el despliegue de una red completa se realiza de manera jerárquica, ubicando cada nodo siguiendo un proceso estructurado. A continuación, se detalla el procedimiento de despliegue de una red WSN siguiendo el mecanismo propuesto por el sistema patentado.

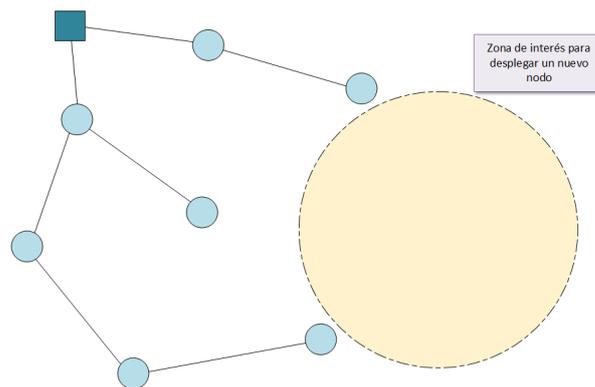


Figura A.1: Primera etapa de despliegue de un nodo

En la figura A.1 se representa la primera etapa de la fase de despliegue del sistema. El diagrama muestra parte de una red ya desplegada, donde el cuadrado representa el coordinador y los círculos los dispositivos ya desplegados. La zona sombreada representa el área de interés en la que desplegar un nuevo nodo. Antes de instalar el dispositivo en una zona arbitraria dentro de este área, se lleva a cabo un test de calidad para determinar si la ubicación es óptima para desplegar el siguiente nodo.

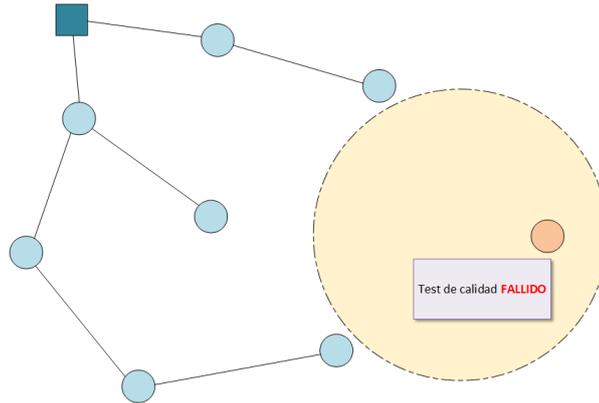


Figura A.2: Segunda etapa de despliegue

La figura A.2 muestra como el test falla, por lo que el nodo no llega a tener conectividad con ninguno de los dispositivos ya desplegados. El dispositivo evalúa continuamente las diferentes alternativas de conexión con la red, por lo que en el momento que se conecte a la red mostrará un resultado válido.

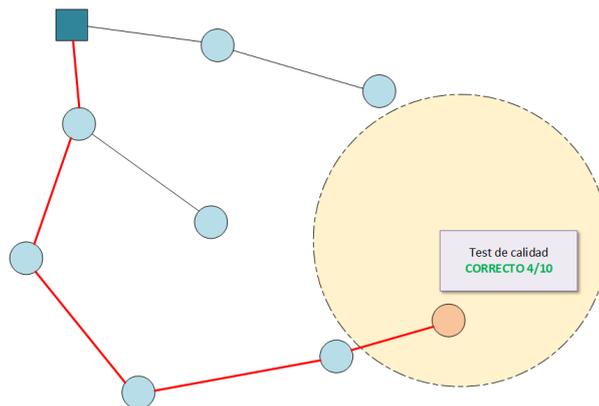


Figura A.3: Tercera etapa de despliegue

En la figura A.3 el nodo se ha reubicado hasta que ha conseguido conectarse a la red, dando un resultado positivo en el test de calidad. Esta evaluación de los enlaces depende de diferentes métricas, como las mencionadas en el Capítulo 3, y permiten a los dispositivos escoger un enlace que cumpla con determinados requisitos de aplicación, como mantener un consumo de energía estable, o escoger la ruta con menor número de saltos hasta el coordinador.

Los nodos representan los resultados del test de manera sencilla, reduciendo la complejidad para escoger la ubicación e instalar el dispositivo de manera rápida. El interfaz HMI puede ser un código de colores, diferentes variaciones de luminosidad, una pantalla que muestre en detalle las diferentes métricas evaluadas, o cualquier otro sistema que permita mostrar si una ubicación es óptima para instalar el dispositivo.

Aunque el dispositivo tenga conectividad y pueda intercambiar información sin problemas, el resultado del test de calidad puede no ser óptimo, ya que la ubicación escogida no cumple con los objetivos de diseño que tiene en cuenta el mecanismo para determinar que un enlace es mejor que otro. Utilizando el ejemplo del mínimo número de saltos hasta el coordinador, si el

test pretende minimizar esta variable, lo óptimo es que el nuevo nodo se conecte directamente al coordinador, algo que no siempre es posible debido al despliegue. El test representaría un peor resultado que si se conectara directamente, aunque esto no significa que la conexión multisalto no sea buena.

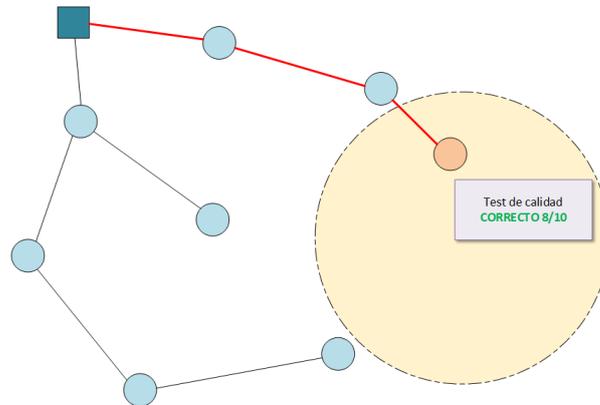


Figura A.4: Cuarta etapa de despliegue

Si hay libertad para escoger la ubicación del dispositivo dentro de esta zona de interés, el mecanismo permite ver los resultados del test de calidad en diferentes ubicaciones, lo que facilita instalar el dispositivo en la mejor zona dentro del área de interés. La figura A.4 muestra como se realiza de nuevo el test en otra ubicación, obteniendo un resultado mejor que en el caso anterior. Esta evaluación de la calidad vendrá determinada por las métricas utilizadas, cuyos parámetros pueden configurarse de la misma forma a la mostrada en el Capítulo 3.

La novedad de esta solución es que, gracias a que los nodos conocen la información de las diferentes rutas cercanas, se puede evaluar la calidad de todo el camino hasta el nodo coordinador. Este planteamiento es especialmente relevante en redes malladas, ya que la fiabilidad de las comunicaciones no depende únicamente de la conectividad con el siguiente salto, sino que vendrá determinada por la calidad de todos los enlaces presentes en el camino entre dos nodos.

Para poder evaluar esta variable acumulada en todo el camino, se realiza una difusión de esta información de manera descendente en la topología, partiendo desde el coordinador hasta los nodos hoja. Los nodos agregan su evaluación de la calidad al valor recibido por su padre en la topología, retransmitiendo este resultado a los nodos descendentes. En la figura A.5 se muestra un diagrama de este proceso de propagación. El coordinador *A* comienza a propagar la información de su propio enlace, que en este caso, al ser el nodo raíz se utiliza un valor base. Este mensaje se propaga a los nodos del siguiente salto en la jerarquía, de tal forma que puedan calcular la variable acumulada a partir de la métrica recibida del enlace superior y la calidad de su propio enlace.

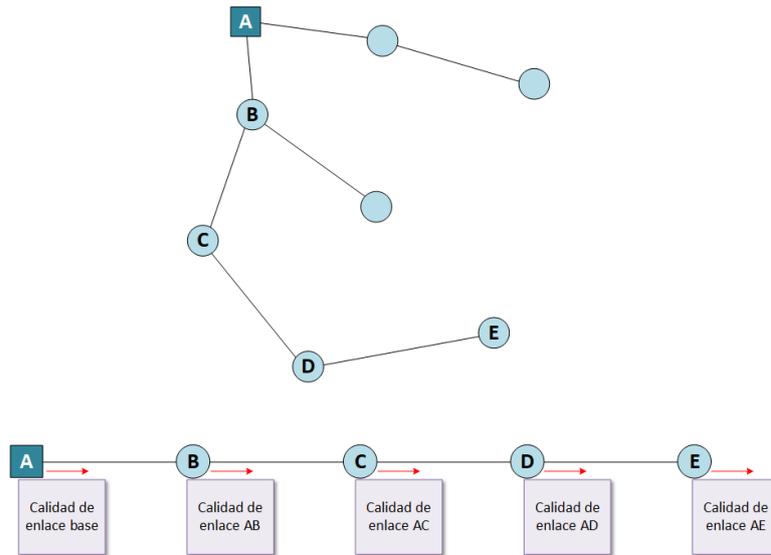


Figura A.5: Propagación de los valores calidad en una red mallada

Mantenimiento autónomo durante el estado estacionario

Otra de las características del sistema es la capacidad que debe tener de auto-gestionarse de manera desatendida una vez desplegada la red. Esta característica permite que pueda adaptarse de manera dinámica frente a determinadas cambios en la topología, como desconexiones debidas a fallos en los dispositivos o a que hayan agotado su batería. Estas capacidades son inherentes a algunos de los protocolos que se utilizan para implementar la red de sensores inalámbricos.

El uso de redes malladas frente a las tradicionales topologías en estrella supone de por sí un incremento de la fiabilidad de las comunicaciones en la red de sensores, ya que gracias a la posibilidad de escoger entre varias rutas permite obtener redundancia en caso de que algún nodo no esté disponible. El estándar IEEE 802.15.4e, junto con el mecanismo de acceso al medio TSCH, permite no solo desplegar redes malladas con estas garantías, sino que también hace un uso más eficiente de los recursos radio si se compara con otros mecanismos de acceso aleatorio. Gracias a la sincronización temporal y al acceso organizado en *slots* temporales, el intercambio de información se realiza de manera determinista, consiguiendo evitar posibles colisiones entre mensajes a través de una correcta planificación de los recursos.

Sin embargo, para que este tipo de redes puedan adaptarse ante posibles cambios en la distribución de los nodos, es necesario tener en cuenta el protocolo de encaminamiento, que permitirá actualizar las rutas de cada nodo en función de las métricas de calidad escogidas. En este sentido, el protocolo RPL permite construir diferentes arboles de encaminamiento, y a través de sus funciones objetivo, actualizar las rutas de encaminamiento frente a posibles cambios en la calidad de los enlaces de toda la red. Todas estas características permiten que la red WSN siga la filosofía planteada por el sistema Deploy&Forget, facilitando que la red funcione durante más tiempo de manera desatendida, manteniendo unas garantías de fiabilidad gracias al uso de los protocolos TSCH y RPL.

Bibliografía

- [1] Sandro Nižetić y col. “Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future”. En: *Journal of Cleaner Production* 274 (2020), pág. 122877 (vid. pág. 1).
- [2] Yazdan Ahmad Qadri y col. “The future of healthcare internet of things: a survey of emerging technologies”. En: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2 (2020), págs. 1121-1167 (vid. pág. 1).
- [3] Ali Nauman y col. “Multimedia Internet of Things: A comprehensive survey”. En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 8202-8250 (vid. pág. 1).
- [4] Ankit Kumar, Pankaj Dadheech y Utpaladitya Chaudhary. “Energy conservation in WSN: A review of current techniques”. En: *2020 3rd International Conference on Emerging Technologies in Computer Engineering: Machine Learning and Internet of Things (ICETCE)*. IEEE. 2020, págs. 1-8 (vid. pág. 1).
- [5] Ekereuke Udoh y Vladimir Getov. “Proactive energy-efficiency: Evaluation of duty-cycled MAC protocols in wireless sensor networks”. En: *2018 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*. IEEE. 2018, págs. 1-5 (vid. pág. 2).
- [6] Domenico De Guglielmo, Giuseppe Anastasi y Alessio Seghetti. “From iee 802.15. 4 to iee 802.15. 4e: A step towards the internet of things”. En: *Advances onto the Internet of Things*. 2014, págs. 135-152 (vid. pág. 2).
- [7] Soraya Touloum y col. “Performance modeling of the IEEE 802.15. 4e TSCH enabling both shared and dedicated links in industrial WSNs”. En: *Computing* (2021), págs. 1-33 (vid. pág. 2).
- [8] Maria Rita Palattella y col. “Traffic aware scheduling algorithm for reliable low-power multi-hop IEEE 802.15. 4e networks”. En: *2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications-(PIMRC)*. 2012, págs. 327-332 (vid. págs. 2, 32).
- [9] Nicola Accettura y col. “Decentralized traffic aware scheduling for multi-hop low power lossy networks in the internet of things”. En: *2013 IEEE 14th International Symposium*

- on *A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. 2013, págs. 1-6 (vid. págs. 2, 32).
- [10] Ridha Soua, Pascale Minet y Erwan Livolant. “Wave: a distributed scheduling algorithm for convergecast in IEEE 802.15. 4e TSCH networks”. En: *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* 27.4 (2016), págs. 557-575 (vid. págs. 2, 32).
- [11] Simon Duquennoy y col. “Orchestra: Robust Mesh Networks Through Autonomously Scheduled TSCH”. En: *Proceedings of the 13th ACM conference on embedded networked sensor systems*. 2015, págs. 337-350 (vid. págs. 2, 32).
- [12] Chansook Lim. “A survey on congestion control for RPL-based wireless sensor networks”. En: *Sensors* 19.11 (2019), pág. 2567 (vid. pág. 2).
- [13] Thomas Carlsson. *News from HMS*. March 2021 (vid. pág. 11).
- [14] Akash Kadechkar y col. “Feasibility analysis of bluetooth 5 for real-time data transmission in high-voltage AC and DC substations”. En: *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018, págs. 5228-5233 (vid. pág. 13).
- [15] Paula Fraga-Lamas y col. “Design and Empirical Validation of a Bluetooth 5 Fog Computing Based Industrial CPS Architecture for Intelligent Industry 4.0 Shipyard Workshops”. En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 45496-45511 (vid. pág. 13).
- [16] Woolley Martin. *Bluetooth Core Specification Version 5.2*. 2020 (vid. pág. 14).
- [17] *ZigBee Pro Specification*. 2015 (vid. pág. 14).
- [18] *Thread 1.1 Specification* (vid. pág. 14).
- [19] *IEC 62591:2016 - Industrial Networks - Wireless communication network and communication profiles - WirelessHART(TM)*. 2016 (vid. pág. 14).
- [20] *IEC 62734:2014 - Industrial networks - Wireless communication network and communication profiles - ISA 100.11a*. 2014 (vid. pág. 14).
- [21] Dave Cavalcanti y col. “Extending accurate time distribution and timeliness capabilities over the air to enable future wireless industrial automation systems”. En: *Proceedings of the IEEE* 107.6 (2019), págs. 1132-1152 (vid. pág. 17).
- [22] Stefano Vitturi, Claudio Zunino y Thilo Sauter. “Industrial communication systems and their future challenges: next-generation Ethernet, IIoT, and 5G”. En: *Proceedings of the IEEE* 107.6 (2019), págs. 944-961 (vid. pág. 18).
- [23] Pal Varga y col. “5g support for industrial iot applications—challenges, solutions, and research gaps”. En: *Sensors* 20.3 (2020), pág. 828 (vid. pág. 18).
- [24] Emiliano Sisinni y col. “LoRaWAN range extender for Industrial IoT”. En: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 16.8 (2019), págs. 5607-5616 (vid. pág. 18).

-
- [25] “Performance Analysis of LoRaWAN in Industrial Scenarios”. En: 2020, págs. 1-1 (vid. pág. 18).
- [26] Wun-Cheol Jeong y Junhee Lee. “Performance evaluation of IEEE 802.15. 4e DSME MAC protocol for wireless sensor networks”. En: *2012 The First IEEE Workshop on Enabling Technologies for Smartphone and Internet of Things (ETSIoT)*. IEEE. 2012, págs. 7-12 (vid. pág. 27).
- [27] Mashood Anwar y Yuanqing Xia. “Ieee 802.15. 4e lldn: Superframe configuration for networked control systems”. En: *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*. IEEE. 2014, págs. 5568-5573 (vid. pág. 27).
- [28] Yaarob Al-Nidawi, Harith Yahya y Andrew H Kemp. “Impact of mobility on the IoT MAC infrastructure: IEEE 802.15. 4e TSCH and LLDN platform”. En: *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. IEEE. 2015, págs. 478-483 (vid. pág. 28).
- [29] Giuliana Alderisi y col. “Simulative assessments of the ieee 802.15. 4e dsme and tsch in realistic process automation scenarios”. En: *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. IEEE. 2015, págs. 948-955 (vid. pág. 28).
- [30] Aea Brandt y col. “RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks”. En: *RFC 6550*. 2012 (vid. pág. 32).
- [31] Kris Pister y col. “Industrial routing requirements in low-power and lossy networks”. En: (2009) (vid. pág. 32).
- [32] A Brandt, J Buron y G Porcu. “Home Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks”, RFC 5826”. En: (2010) (vid. pág. 32).
- [33] Jerry Martocci y col. “Building automation routing requirements in low-power and lossy networks”. En: *Internet Engineering Task Force (IETF)*. 2010, 27-pages (vid. pág. 32).
- [34] JP Vasseur y col. “Routing metrics used for path calculation in low-power and lossy networks”. En: *RFC 6551*. IETF, 2012, págs. 1-30 (vid. págs. 32, 35, 40).
- [35] Xiyuan Liu y col. “Performance analysis of routing protocol for low power and lossy networks (RPL) in large scale networks”. En: *IEEE Internet of Things Journal* 4.6 (2017), págs. 2172-2185 (vid. pág. 39).
- [36] Shimaa A Abdel Hakeem, Anar A Hady y HyungWon Kim. “RPL routing protocol performance in smart grid applications based wireless sensors: Experimental and simulated analysis”. En: *Electronics* 8.2 (2019), pág. 186 (vid. pág. 39).
- [37] Pascal Thubert y col. “Objective function zero for the routing protocol for low-power and lossy networks (RPL)”. En: (2012) (vid. pág. 39).
- [38] Omprakash Gnawali y Philip Levis. “The minimum rank with hysteresis objective function”. En: *RFC 6719* (2012) (vid. págs. 39, 45).
- [39] Nurrahmat Pradeska, Warsun Najib, Sri Suning Kusumawardani y col. “Performance analysis of objective function MRHOF and OF0 in routing protocol RPL IPV6 over low

- power wireless personal area networks (6LoWPAN)". En: *2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*. IEEE. 2016, págs. 1-6 (vid. pág. 39).
- [40] Wail Mardini, Maad Ebrahim y Mohammed Al-Rudaini. "Comprehensive performance analysis of RPL objective functions in iot networks". En: *International Journal of Communication Networks and Information Security* 9.3 (2017), págs. 323-332 (vid. pág. 39).
- [41] Patrick Olivier Kamgueu y col. "Energy-based routing metric for RPL". Tesis doct. INRIA, 2013 (vid. pág. 39).
- [42] Daler Rakhmatov y Sarma Vrudhula. "Energy management for battery-powered embedded systems". En: *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)* 2.3 (2003), págs. 277-324 (vid. pág. 39).
- [43] Hyung-Sin Kim, Jeongyeup Paek y Saewoong Bahk. "QU-RPL: Queue utilization based RPL for load balancing in large scale industrial applications". En: *2015 12th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*. IEEE. 2015, págs. 265-273 (vid. pág. 39).
- [44] Chenyang Ji y col. "TAOF: Traffic aware objective function for RPL-based networks". En: *2018 Global information infrastructure and networking symposium (GIIS)*. IEEE. 2018, págs. 1-5 (vid. pág. 40).
- [45] Pietro Gonizzi, Riccardo Monica y Gianluigi Ferrari. "Design and evaluation of a delay-efficient RPL routing metric". En: *2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE. 2013, págs. 1573-1577 (vid. pág. 40).
- [46] Nouha Baccour y col. "Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey". En: *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 8.4 (2012), págs. 1-33 (vid. pág. 40).
- [47] Panagiotis Karkazis y col. "Design of primary and composite routing metrics for RPL-compliant wireless sensor networks". En: *2012 international conference on telecommunications and multimedia (TEMU)*. IEEE. 2012, págs. 13-18 (vid. pág. 40).
- [48] Nouha Baccour y col. "F-lqe: A fuzzy link quality estimator for wireless sensor networks". En: *European Conference on Wireless Sensor Networks*. Springer. 2010, págs. 240-255 (vid. pág. 40).
- [49] Sana Rekik y col. "Holistic link quality estimation-based routing metric for RPL networks in smart grids". En: *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE. 2016, págs. 1-6 (vid. pág. 40).
- [50] Olfa Gaddour y col. "OF-FL: QoS-aware fuzzy logic objective function for the RPL routing protocol". En: *2014 12th International symposium on modeling and optimization in mobile, ad hoc, and wireless networks (WiOpt)*. IEEE. 2014, págs. 365-372 (vid. pág. 40).
- [51] Parmod Singh y Yaw-Chung Chen. "RPL enhancement for a parent selection mechanism and an efficient objective function". En: *IEEE Sensors Journal* 19.21 (2019), págs. 10054-10066 (vid. pág. 40).

-
- [52] Hanane Lamaazi y col. “OF-ECF: a new optimization of the objective function for parent selection in RPL”. En: *2019 international conference on wireless and Mobile computing, networking and communications (WiMob)*. IEEE. 2019, págs. 27-32 (vid. pág. 40).
- [53] Contiki NG Operative System. <https://github.com/contiki-ng/contiki-ng/wiki> (vid. pág. 42).
- [54] David Stanislawski y col. “Adaptive synchronization in IEEE802. 15.4 e networks”. En: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10.1 (2013), págs. 795-802 (vid. pág. 94).
- [55] Tengfei Chang y col. “Adaptive synchronization in multi-hop TSCH networks”. En: *Computer Networks* 76 (2015), págs. 165-176 (vid. pág. 94).
- [56] Atis Elsts y col. “Microsecond-accuracy time synchronization using the IEEE 802.15. 4 TSCH protocol”. En: *2016 IEEE 41st conference on local computer networks workshops (LCN Workshops)*. IEEE. 2016, págs. 156-164 (vid. pág. 94).
- [57] Atis Elsts y Simon Duquennoy. “Competition: Adaptive Time-Slotted Channel Hopping”. En: *EWSN 2017, February 20-22, 2017, Uppsala, Sweden*. ACM Press. 2017, págs. 274-275 (vid. pág. 94).
- [58] Simon Duquennoy y col. “TSCH and 6TiSCH for Contiki: Challenges, design and evaluation”. En: *2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. IEEE. 2017, págs. 11-18 (vid. pág. 94).
- [59] Thomas Watteyne, Maria-Rita Palattella y Luigi Alfredo Grieco. “Using IEEE 802.15. 4e time-slotted channel hopping (TSCH) in the internet of things (IoT): Problem statement”. En: *Internet Engineering Task Force* (2015) (vid. pág. 94).
- [60] Xavier Vilajosana, Kris Pister y Thomas Watteyne. “Minimal IPv6 over the TSCH Mode of IEEE 802.15. 4e (6TiSCH) configuration”. En: *Internet Engineering Task Force RFC series RFC8180* (2017) (vid. pág. 94).
- [61] Elvis Vogli y col. “Fast join and synchronization schema in the IEEE 802.15. 4e MAC”. En: *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. IEEE. 2015, págs. 85-90 (vid. pág. 95).
- [62] Elvis Vogli y col. “Fast network joining algorithms in industrial IEEE 802.15. 4 deployments”. En: *Ad Hoc Networks* 69 (2018), págs. 65-75 (vid. pág. 95).
- [63] Thang Phan Duy y YoungHan Kim. “An efficient joining scheme in IEEE 802.15. 4e”. En: *2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. IEEE. 2015, págs. 226-229 (vid. pág. 95).
- [64] Thang Phan Duy, Thanh Dinh y Younghan Kim. “A rapid joining scheme based on fuzzy logic for highly dynamic IEEE 802.15. 4e time-slotted channel hopping networks”. En: *International Journal of Distributed Sensor Networks* 12.8 (2016), pág. 1550147716659424 (vid. pág. 95).

- [65] Ines Khoufi y col. “Building an IEEE 802.15. 4e TSCH network”. En: *2016 IEEE 35th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*. IEEE. 2016, págs. 1-2 (vid. pág. 95).
- [66] Ines Khoufi, Pascale Minet y Badr Rmili. “Beacon advertising in an IEEE 802.15. 4e TSCH network for space launch vehicles”. En: *Acta Astronautica* 158 (2019), págs. 76-88 (vid. pág. 95).
- [67] Jae-Young Kim, Sang-Hwa Chung y Yu-Vin Ha. “A fast joining scheme based on channel quality for IEEE802. 15.4 e TSCH in severe interference environment”. En: *2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE. 2017, págs. 427-432 (vid. pág. 95).
- [68] Apostolos Karalis. “Atp: A fast joining technique for ieee802. 15. 4-tsch networks”. En: *2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)*. IEEE. 2018, págs. 588-599 (vid. pág. 95).
- [69] Apostolos Karalis, Dimitrios Zorbas y Christos Douligeris. “Collision-free advertisement scheduling for IEEE 802.15. 4-TSCH networks”. En: *Sensors* 19.8 (2019), pág. 1789 (vid. pág. 95).
- [70] Domenico De Guglielmo y col. “A performance analysis of the network formation process in IEEE 802.15. 4e TSCH wireless sensor/actuator networks”. En: *2014 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. IEEE. 2014, págs. 1-6 (vid. pág. 95).
- [71] Lu Wang y Andreas Reinhardt. “A simulative study of network association delays in IEEE 802.15. 4e TSCH networks”. En: *2017 IEEE 18th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. IEEE. 2017, págs. 1-3 (vid. pág. 95).
- [72] Carlo Vallati y col. “Improving network formation in 6TiSCH networks”. En: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 18.1 (2018), págs. 98-110 (vid. pág. 95).
- [73] Alakesh Kalita y Manas Khatua. “Faster joining in 6TiSCH network using dynamic beacon interval”. En: *2019 11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)*. IEEE. 2019, págs. 454-457 (vid. pág. 96).
- [74] University of Berkeley. openwsn.atlassian.net/wiki/spaces/OW/overview (vid. pág. 103).