

La investigación presentada en este libro tiene como enfoque el funcionamiento y adaptabilidad del protocolo RPL frente a diferentes escenarios de investigación y configuración de redes de sensores y por supuesto en arquitecturas de Internet de las Cosas (IoT - Internet of Things), ofreciendo sensibilidad a los cambios en el entorno de red, beneficiando a los usuarios de IoT; usuarios que están cambiando hacia aplicaciones de alta definición, velocidad e interactividad.

Escanee el código QR para conocer más títulos publicados por Ediciones Universidad Simón Bolívar



ISBN 978-958-53184-7-2



9 789585 318472 >

EDICIONES
UNIVERSIDAD
SIMÓN BOLÍVAR



UNIVERSIDAD
SIMÓN BOLÍVAR

BARRANQUILLA Y CÚCUTA - COLOMBIA | VIGILADA MINECUCACIÓN

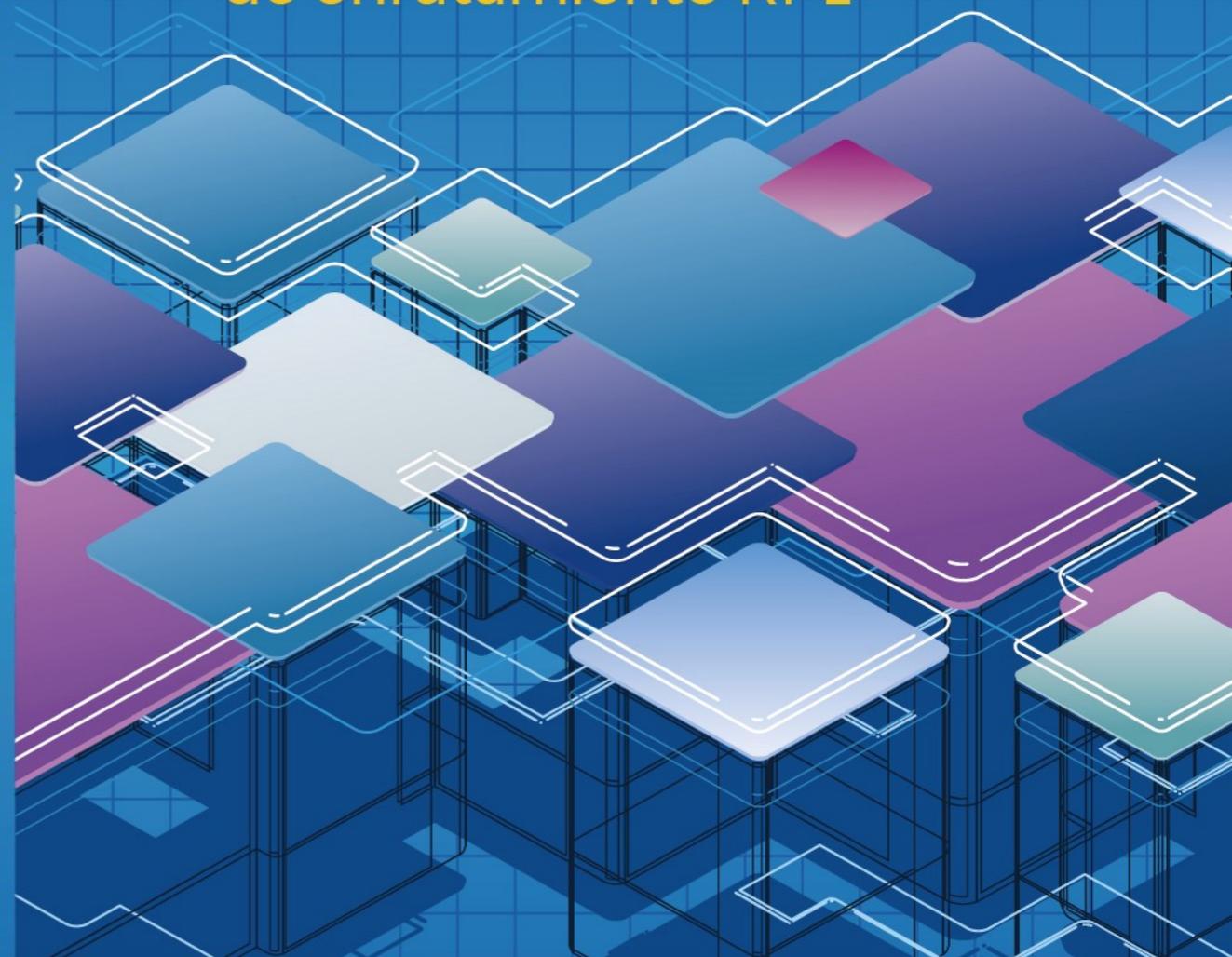


Res. 23095 del MEN

Métrica con calidad de servicio para el protocolo de enrutamiento RPL

Paul Sanmartin Mendoza - Elker Martínez Pinedo
Randy Sierra Ibáñez - Daladier Jabba Molinares

Métrica con calidad de servicio *para el protocolo de enrutamiento RPL*



Paul Sanmartin Mendoza - Elker Martínez Pinedo
Randy Sierra Ibáñez - Daladier Jabba Molinares

**Métrica con calidad
de servicio** *para el protocolo*
de enrutamiento RPL

**MÉTRICA CON CALIDAD DE SERVICIO PARA EL
PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO RPL**

© Paul Sanmartín Mendoza - Elker Martínez Pinedo
Randy Sierra Ibáñez - Daladier Jabba Molinares

Facultad de Ingeniería

Grupo de Investigación: Innovación Tecnológica y Salud

Director: Rodolfo Vega Llamas

Proceso de arbitraje doble ciego

Recepción: Junio 2020

Evaluación de propuesta de obra: Agosto 2020

Evaluación de contenidos: Septiembre 2020

Correcciones de autor: Octubre 2020

Aprobación: Noviembre 2020

Paul Sanmartín Mendoza - Elker Martínez Pinedo
Randy Sierra Ibáñez - Daladier Jabba Molinares

Métrica con calidad de servicio *para el protocolo* de enrutamiento RPL

Métrica con calidad de servicio para el protocolo de enrutamiento RPL / Paul Sanmartín Mendoza [y otros 3] -- Barranquilla: Ediciones Universidad Simón Bolívar, 2020.

110 páginas: gráficas

ISBN: 978-958-53184-7-2 (Pdf descargable)

1. Protocolo de enrutamiento (Protocolo de redes de computadores) 2. Enrutamiento (Administración de redes de computadores) 3. Internet de las cosas 4. Telemática 5. Tecnología de la información 6. Telecomunicaciones I. Sanmartín Mendoza, Paul II. Martínez Pinedo, Elker III. Sierra Ibáñez, Randy IV. Jabba Molinares, Daladier V. Título

658.45 M594 2020 Sistema de Clasificación Decimal Dewey 22ª edición

Universidad Simón Bolívar – Sistema de Bibliotecas

Producido en Barranquilla, Colombia. Depósito legal según el Decreto 460 de 1995. El Fondo Editorial Ediciones Universidad Simón Bolívar se adhiere a la filosofía del acceso abierto y permite libremente la consulta, descarga, reproducción o enlace para uso de sus contenidos, bajo una licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



©Ediciones Universidad Simón Bolívar

Carrera 54 No. 59-102

<http://publicaciones.unisimonbolivar.edu.co/edicionesUSB/>

dptpublicaciones@unisimonbolivar.edu.co

Barranquilla - Cúcuta

Producción Editorial

Editorial Mejoras

Calle 58 No. 70-30

info@editorialmejoras.co

www.editorialmejoras.co

Diciembre de 2020

Barranquilla

Made in Colombia

Resumen

La calidad de servicio es esencial en la implementación de las redes de baja potencia y pérdida de paquetes LLN (*Low Power and Lossy Networks*), sin embargo, las características de estas redes imponen varias limitantes para garantizar dicha calidad. Aunque estas redes cuentan con un protocolo de enrutamiento específico RPL (*Routing Protocol Low Power and Lossy Networks*), el cual define funciones objetivo, métricas y restricciones, este protocolo no provee calidad de servicio por defecto, deteriorando el proceso de selección de ruta [1] y alejándose de su objetivo en el concepto del Internet de las Cosas.

En el presente documento se plantea una nueva métrica de enrutamiento llamada BFETX, con ayuda del diseño de escenarios de red, del estudio de resultados en simulaciones y del empleo de criterios de evaluación de métricas de enrutamiento; además, mediante el método inductivo y especificaciones funcionales estandarizadas, se hallan los hitos apropiados para incrementar la calidad de servicio de las LLN en cuanto a tiempo de vida, consumo de energía, latencia y pérdida de paquetes. Se implementaron y analizaron las funciones objetivo OF0, MRHOF y BFETX validando la nueva métrica de enrutamiento; sin embargo, aspectos de diseño que afectan el proceso de envío de paquetes se escapan de la presente investigación, pero pueden abordarse en trabajos futuros como despliegue, heterogeneidad de nodos o enlaces, tolerancia a fallas, escalabilidad, movilidad, conectividad y cobertura, entre otros.

Este trabajo aporta significativamente al enrutamiento de redes telemáticas; específicamente en redes de sensores, ofreciendo sensibilidad a los cambios en el entorno de red, beneficiando a los usuarios del Internet de las Cosas IoT (*Internet of Things*); usuarios que están cambiando hacia aplicaciones de alta definición, velocidad e interactividad soportadas en estas redes.

Palabras clave: redes de baja potencia y pérdidas, protocolo de enrutamiento, función objetivo, métrica de enrutamiento.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1.1 REDES DE SENSORES INALAMBRICOS.....	19
1.2. INTERNET DE LAS COSAS	20
1.2.1. Ámbitos de aplicación.....	21
1.2.2. Estándar IEEE 802.15.4 [12]	21
1.3. REDES CON BAJA POTENCIA Y PÉRDIDAS DE PAQUETES	22
1.3.1. Encaminamiento en LLN [6].....	25
1.3.2. Problema del encaminamiento [6].....	26
1.3.3. Calidad de servicio.....	29
1.3.4. Dispositivos para LLN.....	30
1.3.5. Sistemas operativos para nodos de LLN....	30
1.4. PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO PARA REDES LLN.....	31
1.5. FUNCIÓN OBJETIVO.....	34
1.5.1 Función Objetivo Cero [17].....	34
1.5.2 Función Objetivo del rango mínimo con histéresis [18].....	35
1.6. MÉTRICAS.....	36
1.6.1. Algebra de métricas de enrutamiento	38

1.6.2. Propiedades y reglas de las métricas básicas y derivadas.....	39
1.6.4. Dominio de la métrica.....	39
1.6.5. Operador de la métrica.....	40
1.6.6. Relación de orden en métricas	40
1.7. TRABAJOS RELACIONADOS.....	41
1.7.1. Cuenta de saltos [30] [34] [40]	41
1.7.2. Energía residual [30] [33] [34].....	42
1.7.3. Tiempo de vida del sistema [40]	42
1.7.4. Cobertura [40]	42
1.7.5. Escalabilidad [40]	43
1.7.6. Conectividad [33].....	43
1.7.7. Rendimiento [33]	43
1.7.8. Latencia [33] [40]	43
1.7.9. Confiabilidad [33] [40].....	44
1.7.10. Tiempo de transmisión esperado [41] [42].	46
1.7.11. Interferencia consciente [41]	46
1.7.12. Métricas relacionadas de energía [43] [41]	47
1.7.13. Distribución basada en ETX [41].....	47
1.7.14. Tasa de datos esperados [41]	48
1.7.15. Número efectivo de transmisiones [41]	49
1.7.16. ETT acumulado y ponderado [44]	50
1.7.17. Tiempo de transmisión exclusivo esperado [41].....	50
1.7.18. Rendimiento esperado [41].....	51
1.7.19. Protocolo de enrutamiento multicanal [41]	52
1.7.20. Métrica de interferencia y conmutación de canal [45] [46] [41]	53
1.7.21. Métrica de tiempo del consumo del medio físico [41].....	53
1.7.22. Tiempo de transmisión estimado [41].....	54
1.7.23. Distancia ETX [41].....	54
1.7.24. Multidifusión ETX [41].....	55
1.7.25. Por Salto ETX [47]	55

1.8. PROBLEMAS Y LIMITACIONES VIGENTES.....	56
1.9. ALCANCES DE LA INVESTIGACION.....	57
1.9.1. Alcance del proyecto	57
1.9.2. Alcance del producto.....	58
1.10 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	58
1.10.1 Objetivo general	58
1.10.2 Objetivos específicos.....	58
1.11. METODOLOGÍA	59
1.11.1 Observación	59
1.11.2. Abstracción	60
1.11.3. Comparación.....	60
1.11.4. Experimentación.....	60
1.11.5. Generalización.....	61
MODELO DE ADAPTACIÓN DE LA FUNCION OBJETIVO.....	63
2.1. Características del modelo propuesto	65
2.2. Análisis diferencial de los modelos	66
2.3 Escenarios de red para comparación de los modelos.....	68
2.3.1 Escenario de red (a) sin vecinos	69
2.3.2. Escenario de red (b) de un vecino.....	69
2.3.3. Escenario de red (c) de dos vecinos.....	70
2.3.4 Escenario de red (d) de n vecinos.....	70
2.4. Comparación de los modelos	71
2.4.1. Resultados del modelo estandarizado	71
2.4.2. Resultados del modelo propuesto	72
2.4.3. Discusión de resultados de los modelos....	74
DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED	75

3.1. Modelo de dispositivo.....	76
3.2. Sistema operativo	76
3.3. Área y densidad de nodos.....	76
3.4. Topología y modelo de despliegue.....	77
3.5. Simulador seleccionado	77
3.6. Métricas de evaluación	78
3.6.1. Las Mediciones de rendimiento.....	78
3.6.2. Recopilación de información.....	79
3.6.3. Organización y sistematización de datos...	80
3.7. Escenarios y pruebas de simulación	80
3.7.1. Escenario I.....	83
3.7.2. Escenario II.....	84
3.7.3. Escenario III.....	85
3.7.4. Escenario IV.....	86
DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS	89
4.1. Resultados de OF0, MRHOF, BFETX en Latencia de la Red	90
4.2. Resultados de OF0, MRHOF, BFETX en Relación de entrega de paquetes	91
4.3. Resultados de OF0, MRHOF, BFETX en Consumo de Energía de la Red.....	91
4.4. Resultados de OF0, MRHOF, BFETX en Tiempo de Vida de la Red	92
4.5. Resultados de BFETX y PHETX.....	93
4.5.1. Latencia de red entre BFETX y PHETX.....	93
4.5.2. PDR entre BFETX y PHETX.....	94
4.5.3. Consumo de energía entre BFETX y PHETX	95
4.5.4. Tiempo de vida entre BFETX y PHETX.....	95

4.5.5. Consumo de la energía sobre la entrega de paquetes entre BFETX y PHETX	96
CONCLUSIONES	97
TRABAJOS FUTUROS.....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Ámbitos de Internet de las Cosas. [12].....	21
Figura 2.	Selección de Nodo Principal en DODAG [30]....	33
Figura 3.	Ejemplos de nodos con enlaces [39].....	38
Figura 4.	Escenario (a) sin vecinos	69
Figura 5.	Escenario (b) de un vecino	69
Figura 6.	Escenario (c) de 2 vecino	70
Figura 7.	Escenario (d) con n vecinos.....	70
Figura 8.	Simulación de la Red Inalámbrica en Cooja.....	82
Figura 9.	Escenario I	83
Figura 10.	Escenario II	84
Figura 11.	Escenario III.....	85
Figura 12.	Escenario IV.....	86
Figura 13.	Latencia de Red.....	90
Figura 14.	Relación de entrega de paquetes	91
Figura 15.	Consumo de energía	92
Figura 16.	Tiempo de vida de la red	92
Figura 17.	Latencia de red entre BFETX y PHETX	93
Figura 18.	PDR entre BFETX y PHETX.....	94

Figura 19.	Consumo de Energía entre BFETX y PHETX	95
Figura 20.	Tiempo de vida entre BFETX y PER HOT ETX....	95
Figura 21.	Consumo de energía Vs. PDR.	96



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Principales nodos sensores y fabricantes [22] [23] [24]	30
Tabla 2.	Características y compatibilidad de los sistemas operativos [25]	31
Tabla 3.	Términos asociados al protocolo RPL [6].....	32
Tabla 4.	Términos asociados a las métricas de enrutamiento [37].....	37
Tabla 5.	Ejemplo de Registro LQL	45
Tabla 6.	Características de la red	75
Tabla 7.	Resumen de parámetros de simulación.....	81

1

INTRODUCCIÓN

Recientemente ha surgido un gran interés por la investigación y experimentación de las redes de sensores inalámbricos, específicamente en el enrutamiento IPv6 para las de bajo consumo de energía con altas tasas de pérdida de paquetes. A través de los años, la comunidad de las redes inalámbricas ha investigado cientos de nuevos protocolos de enrutamiento dirigidos a los diferentes escenarios de este espacio de diseño [2]. Sin embargo, la mayoría de los requerimientos de protocolos consisten en la energía y la calidad de servicio, por lo que se han estado empleando estándares o técnicas agresivas para administrar la seguridad de las redes, la autonomía de las baterías de los terminales, la calidad de enlace, el tiempo de vida de la red, la calidad del servicio ofrecida al usuario, etc. [3]

Las LLN cobran importancia como la tecnología que permite la escalabilidad del Internet de las Cosas (ver epígrafe 1.2.); con la funcionalidad suficiente para proporcionar su integración con la arquitectura actual de Internet [4] [5]. Esto podría corresponderse con los nuevos retos para solucionar las necesidades de los usuarios

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

que están cambiando hacia aplicaciones que requieren altas velocidades de transmisión, interactividad o definición de vídeo tales como juegos en 3D, situaciones de apoyo a desastres, labores industriales, comerciales o militares, aplicaciones medioambientales, estudios sísmicos, aplicaciones médicas, aplicaciones en el hogar/ edificios con las redes de sensores inalámbricos [5]. Cada una de esas aplicaciones impone varias restricciones en las capacidades de la red para garantizar los requisitos de la calidad de servicio.

RPL, es el estándar presentado y propuesto por el Grupo de Trabajo de Ingeniería e Internet IETF (*Internet Engineering Task Force*), para enfrentar el desafío de la comunicación de datos y al mismo tiempo prolongar la vida útil de la red; esto lo hace buscando mejorar las características de calidad de servicio de los nodos, mediante el uso de una función objetivo y una colección de métricas de enrutamiento para construir grafos de destino, orientados, dirigidos y no cíclicos [6].

El objetivo principal del proyecto es adaptar e implementar el protocolo RPL, replanteando la función objetivo MRHOF (*minimum range with hysteresis objective function*) en términos del estado de la ruta. Esto con el fin de lograr un mejor rendimiento del envío de paquetes en escenarios de redes LLN, planteándose una nueva métrica de enrutamiento validada mediante simulaciones.

Para la sistematización de lo anterior y para favorecer su comprensión, este documento se estructura por capítulos. En el capítulo 1 se describen los temas de interés, se realiza el análisis necesario para la comprensión del funcionamiento de las redes LLN, del protocolo RPL y trabajos relacionados al tema de investigación de este proyecto. Además, se exponen cada una de las métricas, las

Introducción

funciones objetivo indexadas y las propuestas por otras investigaciones; se describen los problemas y limitaciones de este tipo de redes; también se plantean los objetivos del proyecto, preguntas de investigación y metodología utilizada, lo que permite orientar y organizar el trabajo de forma integral.

En el capítulo 2 se detalla el modelo de adaptación a implementar en este proyecto, se realizan sus respectivas demostraciones y pruebas bajo escenarios seleccionados para comprobar su funcionamiento y aportes en el diseño de una nueva métrica de enrutamiento.

La estructura de este trabajo continúa en el capítulo 3 con el diseño de la red LLN. Dicha red es soportada en plataformas que permiten experimentar y analizar la ejecución de las simulaciones con escenarios cercanos a la realidad; además, permite la implementación de la nueva métrica en cada uno de los escenarios planteados, la recopilación de la información en los experimentos, la organización y la sistematización de los datos, para garantizar el funcionamiento del protocolo adaptado.

En el capítulo 4, una vez obtenidos los resultados de las métricas estandarizadas y la métrica propuesta BFETX, estos se exponen y se comparan gráficamente, validando así la adaptación y el aporte que esta hace a la Ingeniería de Sistemas y futuras investigaciones.

1.1. REDES DE SENSORES INALÁMBRICA

Las redes inalámbricas de sensores (en inglés: *Wireless Sensor Network* - WSN) se caracterizan por una serie de dispositivos para obtener información de un entorno seleccionado; dichos dispositivos, fijos o móviles, generalmente de bajo consumo de energía

y de bajo costo, procesan la información y la envían a través de conexiones inalámbricas a otros dispositivos hasta un nodo central. Estos dispositivos o nodos sensores se distribuyen en distintos puntos para obtener información del entorno, como la temperatura, el movimiento, el sonido, la luz, la humedad, etc. [7]

Actualmente, las WSN han recibido mucha atención en la comunidad de investigadores [8] [9], diseñando nuevas estrategias para ofrecer mayor calidad de servicio y buscando proyectarlas hacia el campo de trabajo del Internet de las Cosas [10]. Las redes de sensores inalámbricos permiten al IoT informar y monitorear eventos y fenómenos de interés que toman lugar en un área específica, con comunicación inalámbrica y vinculando a cualquier objeto con conexión digital a internet.

1.2. INTERNET DE LAS COSAS

El Internet de las Cosas es un concepto que hace referencia a la conexión de cualquier objeto digital con internet. Para efecto de orientar la presente investigación se utiliza el concepto ampliado por el *Cluster of European Research Projects* en su documento [11] como:

Una infraestructura de red global y dinámica con capacidad de auto configuración basada en protocolos de comunicación estandarizados e interoperables donde las cosas (things) físicas y virtuales tienen identidades, atributos físicos, personalidad virtual, y haciendo uso de interfaces inteligentes se integran perfectamente en la red de información”.

Introducción

Este concepto relaciona cada aspecto de la vida del hombre con la tecnología de las redes telemáticas y genera muchas expectativas frente a las implicaciones por el proceso de transformación social que impone.

1.2.1. Ámbitos de aplicación

Los ámbitos de aplicación del Internet de las Cosas están abarcando todas las dimensiones del mundo conocido, de formas muy heterogéneas y a múltiples propósitos; sin embargo, se pueden enunciar las principales aplicaciones como lo señala la empresa multinacional de comunicaciones CISCO en la Figura 1, que incluye ejemplos específicos, como: automóviles, seguridad, comunicación, comercio y hogar, entre otros, con capacidad de análisis, seguridad y administración permiten que el posicionamiento de este tipo de redes sea más consolidado [12].

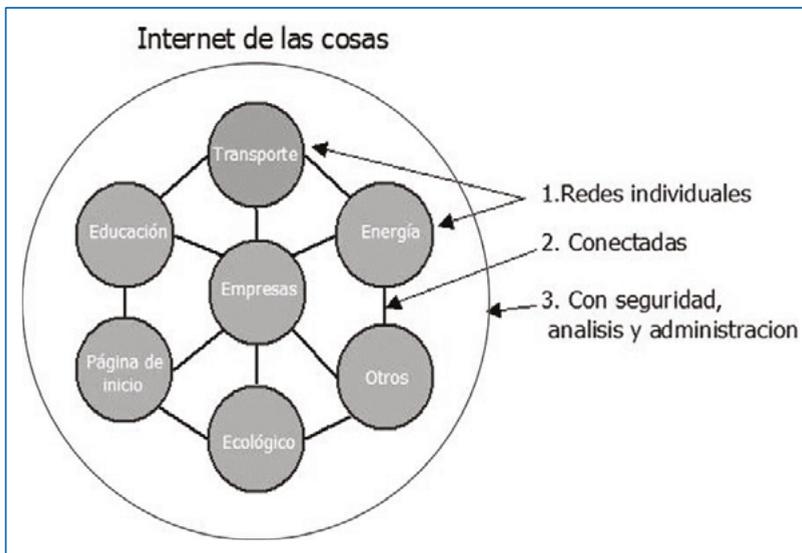


Figura 1. Ámbitos de Internet de las Cosas [12]

1.2.2. Estándar IEEE 802.15.4 [12]

El estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 describe la capa física y la de acceso al medio para redes personales de bajo consumo y es la base para tecnologías como ZigBee, MiWi o WirelessHART. Este estándar está específicamente diseñado para redes inalámbricas de área personal (en inglés: *Wireless Personal Área Network* - WPAN) con dispositivos desplegados con muy poca distancia entre ellos, y con una infraestructura casi que nula o totalmente nula; se enfoca en las bajas velocidades de transmisión y bajo consumo, convirtiéndose en el estándar ideal para IoT. En resumen, los pilares sobre los que se ha diseñado este estándar son:

- Conseguir que el precio de fabricación y operación de los dispositivos sea muy bajo (del orden de dólares).
- Conseguir que sea tecnológicamente sencillo.
- No renunciar a la flexibilidad o las posibilidades de uso.
- Muy bajo consumo de energía.
- El marco básico de funcionamiento establece comunicaciones a 10 metros con 250kb/s, siendo posible disminuir la velocidad para conseguir una mayor eficiencia de energía.

1.3. REDES CON BAJA POTENCIA Y PÉRDIDAS DE PAQUETES

Con la aparición de las redes de sensores dentro del estándar IEEE 802.15.4, nace el desafío de implementar grandes cantidades de potencia de cálculo y energía, incluso en la transmisión de un paquete IPv6 con largas direcciones de 128 bits. Por lo anterior, el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (en inglés: *Internet Engineering Task Force* - IETF) comenzó a investigar adaptaciones de IPv6 para redes LLN: direcciones de compresión, la eliminación

Introducción

de las opciones consideradas que rara vez se utilizan, simplificación del procesamiento de paquetes, etc. [6]

Las LLN requieren protocolos eficientes de enrutamiento que deben cumplir los requisitos de las aplicaciones en tiempo real como la fiabilidad y alta disponibilidad [13] [14]. Alrededor de 2005, los protocolos de enrutamiento fueron considerados demasiado pesados para las LLN [15], por lo que el IETF formalizó el Grupo de Trabajo llamado ROLL (en inglés: *Routing Over Low Power and Lossy Networks*) específicamente para esta gestión [15]. Este grupo de trabajo elaboró un protocolo de enrutamiento para este tipo de redes llamado RPL [16]. Dicho protocolo usa una función objetivo y métricas, lo que le permite combinar métricas y restricciones para calcular “la mejor ruta”. Las funciones objetivo estandarizadas a la fecha por la IETF para el protocolo son: Función Objetivo Cero [17] (ver epígrafe 1.5.1) y Función Objetivo de Rango Mínimo con Histéresis [18] [15] (ver epígrafe 1.5.2); pero no proveen calidad de servicio por defecto al protocolo.

Las redes de baja potencia y pérdida de paquetes cuentan con RPL para que proporcione un mecanismo que permita a dispositivos de tráfico multipunto a punto y para transmitir paquetes hacia un punto central de control, así como el tráfico de punto a multipunto desde el punto de control central a los dispositivos que son compatibles.

Teniendo en cuenta el marco de trabajo de Internet de las Cosas, desde unas pocas docenas a miles de enrutadores, las LLN generalmente operan con limitaciones en la potencia de procesamiento, memoria y energía (energía de la batería) con altas tasas de pérdida de datos e inestabilidad en sus interconexiones [6].

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

Las siguientes son sus características principales [6]:

- Restricciones de *hardware*: Los sensores generalmente tienen restricciones de volumen, son desechables, autónomos y adaptativos al ambiente, por lo que se requiere que sean confiables aun con este límite.
- Consumo de energía: La vida útil de la red es la vida útil del sensor, y este a su vez es la vida útil de la batería; por ello se generan códigos sensibles al aprovechamiento de la energía, dado que la duración de la batería generalmente es limitada y no se puede recargar.
- Costo: El costo de la red depende del precio de cada sensor y, teniendo en cuenta que en este tipo de redes el número de sensores puede ser bastante grande, el valor de un sensor incide en el costo de la red.
- Ambiente: Los espacios de trabajo de estas redes incluyen retos, como trabajo desatendido, lugares geográficos remotos, retos de administración densamente desplegados o dentro del ambiente observado.
- Canales de transmisión: Existen restricciones de ancho de banda y otras métricas en los medios de comunicación inalámbricos, lo que exige que esté disponible en todo momento.
- Conectividad y topología: Se requieren algoritmos que soporten cambios de topología por gran variedad de razones, como: interferencia, movilidad, disponibilidad, pérdidas de datos, mal funcionamiento, etc.
- Estándares: Estándares y protocolos abiertos son necesarios para la capa de red. El uso de algoritmos para cada aplicación, retarda la comercialización a gran escala.

Introducción

- Nodos: Están limitados en capacidad de procesamiento, memoria, energía y por cantidad de 10 a 1000 nodos.
- Enlaces: En cuanto a los enlaces, están caracterizados por su baja tasa de entrega de paquetes, baja velocidad y su inestabilidad.
- Elementos de la red: Se encuentran los nodos sensores, los nodos routers y los nodos sensores y router.
- Tipos de tráfico: M2P (*multipoint-to-point*) para recolección de datos, P2M (*point-to-multipoint*) para distribución y/o diseminación y también P2P (*point-to-point*) entre nodos dentro de la red.
- Capas de las LLN: Las capas y sus funciones se detallan a continuación:
 - a. Capas superiores: Aplicaciones residentes en la red, procesamiento, agregación, procesamientos de consultas externas y bases de datos externas.
 - b. Capa 4: Transporte, incluyendo desimanciación y acumulación de datos, caché y almacenamiento.
 - c. Capa 3: Red, administración dinámica de la topología y encaminamiento.
 - d. Capa 2: Enlace, administración del canal compartido, competencia por el canal, y acceso al medio, sincronización y localización.
 - e. Capa 1: Física, canal de comunicación, procesamiento de señal.

1.3.1. Encaminamiento en LLN [6]

En todos los nodos existe una tabla de ruteo donde se indica cuáles nodos se encuentran en el grafo formado por dichos nodos para

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

el enrutamiento respectivo, por lo cual el enrutamiento de RPL es proactivo. De esa manera, un mensaje es enviado por cada nodo al nodo solicitado o, en su defecto, si no se encuentra en la tabla de ruteo, al nodo mejor padre. Si estos pasos se repiten, el mensaje puede llegar al nodo raíz, que conoce cómo llegar a todos los nodos del grafo.

Existen dos tipos de encaminamiento para LLN:

- Encaminamiento jerárquico: Los algoritmos de esta clase se caracterizan por establecer una topología de red jerárquica. La jerarquía virtual se construye dividiendo la red en niveles, utilizando un criterio conveniente; por ejemplo, por funcionalidad o por ubicación de los nodos.
- Encaminamiento geográfico: La posición geográfica real o virtual es usada en este modelo de encaminamiento para usar al nodo más cercano al destino del mensaje; dicha posición facilita la información sobre a qué nodo debe enviarse el mensaje.

1.3.2. Problema del encaminamiento [6]

Uno de los principales desafíos de diseño en LLN es la comunicación de datos intentando al mismo tiempo prolongar la vida útil de la red empleando técnicas agresivas de administración de energía. A continuación, se presentan algunas cuestiones de diseño que afectan el proceso del encaminamiento:

- Despliegue: El despliegue de los nodos depende de la aplicación y afecta el desempeño del protocolo. Cuando el despliegue es determinístico, los datos se encaminan a través de rutas predefinidas. Cuando es al azar, la estructura de red

Introducción

se crea ad hoc y probablemente las rutas se compongan de múltiples saltos de enlaces inalámbricos.

- **Conservación de energía:** Los nodos solo cuentan con su limitado suministro de energía para procesar y comunicar datos en un ambiente inalámbrico, por lo que se deben buscar maneras de optimizar esas actividades.
- **Modelo de reporte de datos:** El censado y reporte de datos depende de la aplicación y sus requerimientos temporales, y pueden clasificarse en continuos, por evento, por consulta o híbridos. En el modelo continuo, los sensores censan y transmiten periódicamente. En los modelos de reporte por evento y por consulta, los sensores reaccionan a un cambio drástico y repentino del valor censado por haber ocurrido un evento o para responder a una consulta iniciada por la estación base. El protocolo de encaminamiento está fuertemente influido por el modelo requerido.
- **Heterogeneidad de nodos o enlaces:** Los nodos pueden ser homogéneos en capacidad o pueden diferir incluso en el rol. Por ejemplo, una aplicación puede requerir una combinación de diversos sensores para monitorear temperatura, presión y humedad del ambiente, detectando movimiento con señales acústicas y capturando video de objetos en movimiento. Los sensores pueden ser desplegados independientemente, o las diferentes funcionalidades pueden ser incluidas en los mismos nodos sensores.
- **Tolerancia a fallas:** Cuando los nodos fallan, por falta de energía, daño físico o interferencia, no deberían afectar el funcionamiento de la red. Los protocolos de acceso al medio y encaminamiento deben formar nuevos enlaces y rutas al sumidero, lo que puede requerir el ajuste de la intensidad

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

de transmisión y el encaminamiento de paquetes a regiones de la red de mayor energía. Pueden requerirse múltiples niveles de redundancia dependiendo de los requerimientos de tolerancia a fallas.

- **Escalabilidad:** La cantidad de nodos sensores desplegados en una determinada área puede ser del orden de los cientos o miles. El esquema de encaminamiento debe ser capaz de operar con una gran cantidad de nodos.
- **Movilidad:** Cuando los nodos de la red deben moverse, la ruta presenta mayor desafío al no poder asumir que los nodos estarán en el mismo lugar afectando su desempeño.
- **Canal de transmisión:** Los problemas tradicionales de un canal inalámbrico, atenuación y alta tasa de errores, también afectan a las redes de sensores. En general, el ancho de banda requerido es bajo.
- **Conectividad:** Por la gran densidad de nodos se espera que la red esté altamente conectada, aunque habrá cambios de topología debido a fallas en los nodos.
- **Cobertura:** Cada nodo obtiene una cierta vista del ambiente, limitada en alcance y exactitud.
- **Agregación de datos:** Dado que los nodos pueden generar una cantidad importante de información redundante, la agregación de datos permite reducir la cantidad de transmisiones. La agregación es la combinación de diferentes fuentes de acuerdo a una cierta función, por ejemplo, mínimo, promedio, máximo. Algunos métodos de procesamiento de señales se pueden utilizar para combinar señales y reducir su ruido, técnica que se conoce como fusión de datos.

Introducción

- Calidad de servicio: Algunas aplicaciones tienen requerimientos temporales y de latencia. Sin embargo, en muchas otras, la conservación de energía, relacionada con la vida útil de la red, es considerada mucho más importante que la calidad de servicio. Para cumplir este requerimiento, se necesitan protocolos conscientes de la energía.

1.3.3. Calidad de servicio

La llegada de las redes de sensores inalámbricos en los últimos años, al igual que el progresivo interés en las aplicaciones de tiempo real han hecho estrictas limitantes tanto en el rendimiento como en el retardo de reportes de datos críticos al sumidero (ver epígrafe 1.4.) dentro de cierto tiempo límite y requisitos de ancho de banda sin ninguna pérdida. Estas métricas de rendimiento como: retardo, latencia, consumo de energía, se consideran requisitos de calidad de servicio (en inglés: *Quality of Service* - QoS) [19]. Los protocolos apoyados en la calidad de servicio permiten a los nodos sensores hacer una compensación entre el consumo de energía y algunas métricas de QoS antes de entregar los datos al nodo sumidero [20].

Las aplicaciones en tiempo real en las redes de sensores requieren de energía y aprovechamiento sobre la calidad de servicio. No es lo mismo llevar la supervisión contable de un almacén mediante sensores de entrada y salida, que admiten ciertos retardos en la comunicación, que una fábrica robotizada y completamente automatizada y sincronizada, operando múltiples sistemas a la vez leyendo los datos de los sensores. Por esto, la calidad de servicio es un tema importante a la hora de nuevas implementaciones e investigaciones de redes de sensores.

1.3.4. Dispositivos para LLN

Los nodos sensores o motes son dispositivos sensores, inalámbricos y autónomos, que funcionan con baterías muy similares a las de los teléfonos celulares y que permiten ser cargadas por paneles solares en el momento que así se requiera, usan protocolos de bajo consumo para realizar sus comunicaciones; tienen la habilidad de intercambiar mensajes entre ellas y pasar información de otros sensores hasta el nodo raíz (sumidero), donde incluso se pueden tomar decisiones [21]. En la Tabla 1 se exponen los principales nodos sensores existentes y sus fabricantes:

Tabla 1. Principales nodos sensores y fabricantes [22] [23] [24]

FABRICANTE	NODOS
CROSSBOW	Mica, Mica2, Mica3, Mica2dot, telos, telosb, Iris e Imote2
SENTILLA	TmoteSky y TmoteInvent
SHOCKFISH	TinyNode
ETH Zurich, TIK, RGDS	BTNODE, NCCS MICS y Smart-Its
EMBER	Ember
SUN	SunSPOT
Nano-RK	Fire Fly

1.3.5. Sistemas operativos para nodos de LLN

Los sistemas operativos para nodos son típicamente menos complejos que los de propósito general, tanto debido a los requisitos especiales de las aplicaciones en las que se usan, como a las restricciones de recursos encontradas en las plataformas *hardware* utilizadas. Las funciones principales de un sistema operativo son gestionar eficientemente los recursos de *hardware* y facilitar la

Introducción

programación de aplicaciones de alto nivel [25]. A continuación, en la Tabla 2 se resumen aspectos fundamentales de los sistemas operativos más utilizados [25] [26] :

Tabla 2. Características y compatibilidad de los sistemas operativos [25]

Sistema Operativo	Basado en tareas	Soporte para Threads	Simulador asociado	Reprogramación inalámbrica	Compatibilidad TCP/IP
TinyOS	X		TOSSIM		No
Contiki		X	Cooja	X	Sí
Mantis		X	N/A	X	No
Nano-RK		X	N/A	X	No

Estos sistemas operativos están diseñados específicamente para tener en cuenta las restricciones de *hardware* de los nodos sensores, sobre todo relacionadas con el tamaño de memoria, consumo y requisitos de las aplicaciones.

1.4. PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO PARA REDES LLN

Debido a que el estándar 6LoWPAN y el IEEE 802.15.4 no definen protocolos de enrutamiento, lo que juega un papel clave en la transferencia de datos en enlaces multisalto, la IETF decide fundar en el año 2008 un nuevo grupo llamado ROLL para hacer frente a este asunto en particular [27]. Luego de comparar otros protocolos existentes, como AODV y DyMO, entre otros, no obtienen resultados satisfactorios y optan por crear un nuevo protocolo llamado RPL, que fue publicado por primera vez en agosto del año 2009 [28].

Para ampliar la definición de RPL, según las especificaciones de la IETF expresadas en su documento RFC 6550 [6], primero se definen los siguientes términos en la Tabla 3:

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

Tabla 3. Términos asociados al protocolo RPL [6]

TÉRMINO	DEFINICIÓN
DAG	Grafo Dirigido Acíclico (en inglés: <i>Directed Acyclic Graph</i> - DAG) Estructura de nodos y conexiones contenidas en caminos orientados hacia y terminando en uno o más nodos raíz, de manera que no existan ciclos.
Raíz de DAG	(En inglés: <i>DAG Root</i>) Nodo dentro del DAG que recibe todos los mensajes de los demás nodos en el DAG. Todos los DAG deben tener al menos una raíz DAG y todos los caminos terminan en un DAG.
DAG de destino orientado	(En inglés: <i>Destination Oriented DAG</i> - DODAG) Es un DAG arraigado en un solo destino, es decir, en una sola raíz DAG (la raíz DODAG) sin conexiones salientes.
Raíz DODAG	(En inglés: <i>DODAG root</i>) Es la raíz DAG de un DODAG (sumidero) y puede actuar como un enrutador fronterizo para el DODAG; en particular, agregar rutas y redistribuirlas.
Rango	(En inglés: <i>Rank</i>) El rango de un nodo define la posición individual del nodo relativo a otros nodos con respecto a una raíz DODAG. La clasificación estrictamente aumenta en la dirección hacia abajo y disminuye estrictamente en la dirección ascendente. La forma exacta en que se calcula el Rank depende de la Función Objetivo del DAG.
Función Objetivo	(En inglés: <i>Objective Function</i> - OF) Una OF define el cómo las métricas de enrutamiento, los objetivos de optimización y las funciones relacionadas calculan el rango. Además, la OF define los padres DODAG y, por lo tanto, la formación DODAG.
RPLInstanceID	Es un identificador único dentro de una red. Los DODAG con el mismo RPLInstanceID comparten la misma Función Objetivo.
Instancia RPL	Una instancia RPL es un conjunto de uno o más DODAG que comparten un RPLInstanceID. A lo sumo, un nodo RPL puede pertenecer a una DODAG en una instancia de RPL. Cada Instancia RPL funciona independientemente de otras instancias RPL.
SubDODAG	El subDODAG de un nodo es el conjunto de otros nodos cuyas rutas de acceso a la raíz DODAG pasan a través de ese nodo. Nodos en el Sub-DODAG de un nodo tiene un rango mayor que ese nodo.
DIS	(En inglés: <i>DODAG Information Solicitation</i>) Puede utilizarse para solicitar un mensaje de información DODAG desde un nodo RPL.
DIO	(En inglés: <i>DODAG Information Object</i>) Es un mensaje de información DODAG que permite a un nodo descubrir una instancia de RPL, conocer sus parámetros de configuración, seleccionar un conjunto de padres de DODAG y mantener el DODAG.
DAO	(En inglés: <i>Destination Advertisement Object</i>) Mensaje de anuncio de destino. Se utiliza para propagar la información de destino hacia arriba a lo largo de la DODAG.

Introducción

Finalizando los términos requeridos en la definición de RPL, cabe señalar que el objetivo principal de RPL es proporcionar eficientes caminos de enrutamientos para tres tipos de patrones de tráfico: multi-punto a punto (MP2P), punto a multipunto (P2MP) y punto a punto (P2P) [29] [15].

Cuando un nodo trabaja con RPL, obtiene primero una dirección global IPv6 (por ejemplo, vía DHCPv6) e intenta unirse a una DODAG por medio de intercambiar mensajes DIS o DIO [6].

En el protocolo RPL, cuando un mensaje es enviado a un vecino, se espera un reconocimiento. Si este no es recibido, entonces se reenvía el mensaje. Se pueden generar hasta 5 reintentos, luego se da el mensaje por perdido.

Empleando estos mensajes de control, un nodo raíz de un RPLDODAG se presenta como padre ante los otros nodos en su vecindad. Por otro lado, una vez que un nodo RPL selecciona a su padre, propaga su propio DIO hacia las ramificaciones contrarias o inferiores de jerarquía en toda la red para formar un sub-DODAG. Cuando un DIO es recibido y un nodo intenta conectarse a un RPL DODAG, el nodo inicia el cómputo de su propio rango o “rank” que es una representación escalar del nodo dentro de la DODAG visto desde el nodo raíz [6]. Teniendo en cuenta la Figura 2, un nodo RPL *i* tiene como padres a los nodos *j* y *k* para poder enviar mensajes al nodo raíz (en inglés: DODAG *root*). Sin embargo, *j* tendría mejor rango al estar más cerca.

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

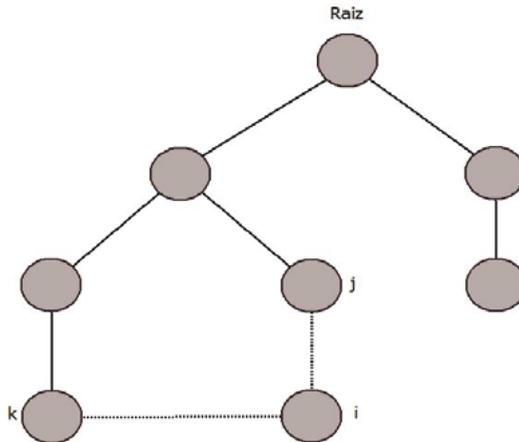


Figura 2. Selección de nodo principal en DODAG [30]

En el caso del patrón de tráfico multipunto a punto, el tráfico puede ser soportado con un pequeño enrutamiento de estado, por lo que cada nodo almacena su siguiente salto, que lo conduce a su destino (el nodo raíz de la DODAG). Este estado puede ser mantenido por una DODAG apropiadamente confeccionada a través del intercambio de mensajes DIO. En los otros dos tipos de patrones de tráfico, punto a multipunto y punto a punto, RPL suministra rutas separadas “hacia abajo” usando mensajes DAO que anuncian rutas y prefijos dentro de una red RPL. Al recibir un mensaje DAO, dependiendo de cómo se encuentre la red configurada, los nodos pueden localmente reenviar la ruta (*non storing mode*) hasta la raíz de la DODAG o almacenarla localmente (*storing mode*). Al recoger la información de las rutas de la red, un paquete puede viajar hasta su último destino por las ramificaciones de la red dado que tiene el conocimiento [6] [31]. RPL puede ser usado con los sistemas operativos de redes de sensores inalámbricos más difundidos, TinyOS y ContikiOS, con los nombres de TinyRPL y ContikiRPL, respectivamente [32] [21].

1.5. FUNCIÓN OBJETIVO

Las especificaciones de RPL lo definen como un protocolo de vector de distancia genérico y adaptado a una variedad de tipos de red por las aplicaciones específicas de las funciones objetivo (OF). Una OF es el resultado del proceso utilizado por un nodo de RPL para seleccionar y optimizar las rutas dentro de una instancia RPL, basado en los objetos de información disponible; un OF no es un algoritmo. Las siguientes son dos funciones objetivo estandarizadas por IETF para RPL:

1.5.1. Función Objetivo Cero [17]

Como lo indica la IETF en su documento RFC 6552, la función objetivo cero (en inglés: *Objective Function Zero* - OF0) está diseñada para encontrar la más cercana ruta que lo dirija a la raíz y lo logra si el rango de un nodo está muy cerca de una función abstracta de su distancia a la raíz. Esta necesidad es equilibrada con la otra necesidad de mantener cierta diversidad de trayectoria, que puede ser lograda por el aumento del *Rank*. En ausencia de una raíz a tierra, la conectividad interna dentro de la LLN sigue siendo deseable. El DAG se formará arraigado en los nodos de la más alta preferencia administrativa.

1.5.2. Función Objetivo del rango mínimo con histéresis [18]

Como lo indica IETF en su documento RFC 6719, la función objetivo del rango mínimo con histéresis MRHOF selecciona las rutas que minimicen una métrica. El uso de histéresis es para reducir la rotación en respuesta a pequeños cambios de las métricas. MRHOF trabaja con métricas aditivas a lo largo de una ruta, como el ETX

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

(ver epígrafe 1.6.7) que se utiliza para indicar la estabilidad de un camino [18]. En MRHOF se calcula la métrica ETX como se indica en (1):

$$ETX = 0,9 * ((S_{ALM} + F_{ALM})/S_{ALM}) + 0,1 * ETX_{up} \quad \mathbf{1}$$

Donde, S_{ALM} es el número almacenado de paquetes entregados con éxito, F_{ALM} es el número almacenado de paquetes enviados a cabo sin éxito y ETX_{up} se refiere a cuántas transmisiones fueron necesarias para que el último paquete que se envió fuera reconocido por el vecino. Hay que tener en cuenta que si el paquete no fue reconocido este valor es definido como 15.

El nuevo valor de ETX se calcula cada vez que se le envía un mensaje al vecino, por ello tomará nuevos valores en el futuro replanteando el valor de ETX_{up} .

Los valores posibles para la variable EXT y ETX_{up} son 1, 2, 3, 4, 5 o 15, donde del 1 al 5 son los posibles reintentos y 15 el valor en caso fallido.

Cuando se descubre un vecino con el primer paquete que se envíe se inicializará $ETX = ETX_{up}$, ya que no hay ningún valor almacenado. A partir de este momento, se utiliza la fórmula general en la ecuación (2). El rango de un nodo se calcula, de forma estandarizada, tomando como base el rango del mejor padre y sumándole la calidad del enlace.

$$Rangonodo = Rangomejorpadre + [ETXconsumejorpadre] * 256 \quad \mathbf{2}$$

Donde los signos “[]” significan parte entera del valor que encierra. Si el enlace de capa 2 con el mejor padre es perfecto, es decir, siempre

Introducción

se reciben los reconocimientos en el primer intento, entonces el ETX será 1; en ese caso, el rango del nodo se incrementará en 256; como lo indica la ecuación (2):

$$\text{Rangonodo} = \text{Rangomejorpadre} + [1 * 256]$$

1.6. MÉTRICAS

Una métrica es un valor cuantitativo que se utiliza para evaluar el coste de una decisión por un protocolo; por ejemplo, una métrica de enrutamiento evalúa el coste de seleccionar una ruta. La mejor ruta será la que satisfaga todas las restricciones suministradas (si las hay) y que tenga el costo más bajo con respecto a alguna métrica especificada [33] [34]. Para cada métrica existe un caso ideal, el cual representa un valor máximo posible que acerque a la red a su mejor desempeño. Aunque este sea muy difícil de cumplir, o inalcanzable, permite observar gráficamente si la tendencia de los resultados es deseable o no. Este valor puede variar de acuerdo al significado de la métrica. Por ejemplo, tender a cero cuando la métrica implica un concepto no deseable en la red es positivo, también puede ser de valor uno cuando busca idealmente un 100 % o tender al infinito.

Las métricas de cada protocolo desempeñan un papel importante en la distribución de paquetes en la red. Cada protocolo usa diferentes métricas. Cuando las rutas son redistribuidas, se debe(n) definir métrica(s) comprensible(s) para el protocolo receptor [35]. Sin embargo, ROLL, quienes son el grupo responsable del mantenimiento del protocolo RPL, requieren la aprobación para cada nuevo elemento de trabajo que se proponga. Por lo anterior, no especificó el conjunto de métricas y/o limitaciones que se utilizarán para la ruta preferida y lo dejó abierto a las implementaciones [36].

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

A continuación, en la Tabla 4 se refieren términos en relación a las métricas definidos por la IETF en su documento RFC5835 y requeridos para esta investigación [37] :

Tabla 4. Términos asociados a las métricas de enrutamiento [37]

TÉRMINO	DEFINICIÓN
Métrica básica	Una métrica regida por reglas y propiedades específicas, capturando características específicas de enlace o nodo. Ejemplos de las métricas básicas son HOP-COUNT, ETX, LQL, etc.
Métrica derivada	Una métrica que se define en términos de una métrica básica, conservando las propiedades y reglas de la métrica básica. Por ejemplo, $(1-(1/ETX))$ es una métrica derivada de ETX, ya que mantiene las reglas y propiedades de la métrica básica (ETX).
Métrica compuesta	Métrica de enrutamiento que consiste en varias métricas básicas y / o derivadas mediante la aplicación de proceso determinista o función (función de composición).
Función de composición	Proceso determinístico aplicado a y / o métricas derivadas para derivar una métrica compuesta.
Ruta óptima	Ruta en el DAG que minimiza (o maximiza, respectivamente) el valor de rango entre cualquier par de nodos fuente-destino, así como sus subcaminos.
Subcamino	Cualquier parte de la trayectoria recorrida entre cualquier dado par de nodos origen-destino.
Peso de la ruta	Un valor que representa las características del enlace o / y del nodo de un camino (costo de trayectoria [18]).
Relación de orden de Métrica	Se utiliza para la comparación de peso de ruta entre los nodos de origen y de destino, lo que conduce al siguiente salto vecino. Por ejemplo: '>' (mayor que) es un orden.
Operador métrico	Se utiliza para la transformación de enlace y nodo, y pesos en pesos de trayectoria. Como ejemplo, la adición '+' es definida como un operador métrico.

Existen muchos tipos de métricas de acuerdo a la aplicación de cada protocolo. A continuación se detallan las características principales y se citan las métricas estandarizadas para el enrutamiento y la calidad de servicio [34] [38].

1.6.1. Álgebra de métricas de enrutamiento

Una métrica de enrutamiento puede ser representada en álgebra como una “estructura de peso de trayectoria” con una cuadrupleta,

Introducción

simbolizada así: $(S, \oplus, w, <)$, donde S es el conjunto de todos los trayectos, W es una función que asigna un peso a un camino, $<$ es una relación de orden y \oplus es la operación de concatenación de trayectos. [39]

De acuerdo a lo anterior, las características que deben cumplir las métricas de enrutamiento pueden ser analizadas algebraicamente.

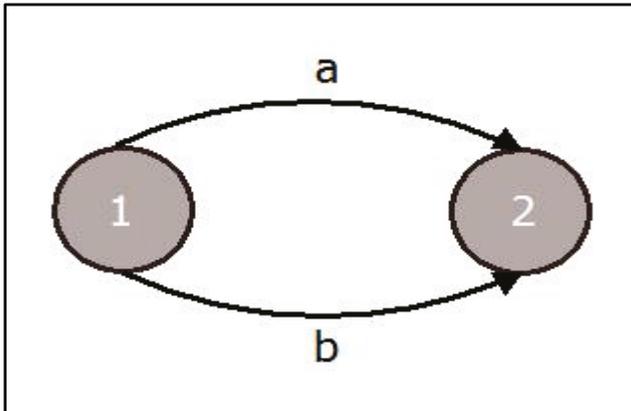


Figura 3. Ejemplos de nodos con enlaces [39]

En la Figura 3 se observan nodos enlazados por dos caminos, que para el caso es posible representar algunas de sus situaciones así:

- $S = \{a, b\}$ representa el conjunto de caminos de este ejemplo.
- $W(a)$ representa el peso de enviar un paquete por el camino a.
- $W(a \oplus b)$ representa el peso concatenado de los caminos a y b.
- $W(a) < W(b)$ representa que el peso de recorrer el camino a es menor a recorrer el camino b y se usa para definir una relación de orden.

1.6.2. Propiedades y reglas de las métricas básicas y derivadas

Siguiendo el formalismo de álgebra de encaminamiento presentado, las métricas de enrutamiento deben tener propiedades específicas (isotonicidad y monotonicidad) para cumplir con los requisitos del protocolo de enrutamiento (convergencia, optimalización y libertad de bucles) [34]. En las siguientes secciones, las métricas básicas se presentan y categorizan de acuerdo con sus propiedades y reglas.

1.6.3. Dominio de la métrica

Las métricas básicas se definen en diferentes dominios. Por ejemplo, LQL en $[0, 7]$, donde 0 significa indeterminado, 1 indica el más alto y 7 la calidad de enlace más baja. Intuitivamente, la selección de las métricas básicas para derivar una métrica compuesta debe tener en cuenta el dominio de cada una de las métricas básicas seleccionadas. Esto se puede lograr mediante la definición de métricas derivadas, como se explica más adelante [34].

1.6.4. Operador de la métrica

Según la IETF en su documento RFC6551, una métrica puede ser registrada o agregada a lo largo del camino. En este último caso, la métrica puede ser de tipo máximo ($A = 0x01$), tipo mínimo ($A = 0x02$), tipo aditivo ($A = 0x00$) o tipo multiplicativo ($A = 0x03$). Sea $w(i, j)$ el valor de la métrica para las características del enlace y del nodo entre los nodos i y j . Entonces, para cualquier camino $p(i, j, k, \dots, q, r)$, se define que [33]:

Introducción

- Una métrica es aditiva si: $w(p) = w(i, j) + w(j, k) + \dots + w(q, r)$
- Una métrica es multiplicativa si: $w(p) = w(i, j) * w(j, k) * \dots * w(q, r)$
- Una métrica es cóncava si: $w(p) = \max [w(i, j), w(j, k), \dots, w(q, r)]$ o $W(p) = \min [w(i, j), w(j, k), \dots, w(q, r)]$.

1.6.5. Relación de orden en métricas

Otra categorización de las métricas básicas se deriva del hecho de que algunas son 'maximizables' (el valor más alto, mejor) mientras que otras son 'minimizables' (el valor inferior, mejor). Por ejemplo, un nodo selecciona como su padre DODAG al nodo vecino que anuncia (a través de mensajes DIO) el valor mínimo de conteo de saltos (*hop count*) para alcanzar el nodo raíz de DAG. Entonces se aplicó en el ejemplo una métrica minimizable, donde el mejor camino es quien tenga menor número de saltos.

1.7. TRABAJOS RELACIONADOS

Las propiedades y reglas de la mayoría de las métricas de enrutamiento que se exponen en el presente epígrafe siguen la descripción presentada. Los parámetros que recibe cada métrica son valores consultados por el paquete de librerías del protocolo RPL a otras capas de la tecnología donde dicha información esté disponible. Sin embargo, es importante mencionar que una métrica de enrutamiento puede seguir diferentes propiedades y reglas. [33]

Además, algunas de las métricas también pueden ser utilizadas por RPL como restricciones. En tales casos, si un enlace o un nodo no cumple con una restricción requerida, se excluye del vecino, lo que conduce a un camino más restringido. A continuación, se

amplían las principales métricas relacionadas y expuestas en otras investigaciones.

1.7.1. Cuenta de saltos [30] [34] [40]

(En inglés: *Hop Count* - HC) Es la cuenta de saltos entre un nodo j y la raíz para que un nodo i seleccione a j como padre, donde se selecciona la ruta con menor valor en esta medida. La métrica de HC es representada en [30] con la ecuación (3), donde *HopCount* representa una función de consulta de número de saltos presente en el protocolo.

$$HC = \text{HopCount}_{i,j} \quad (3)$$

1.7.2. Energía residual [30] [33] [34].

(En inglés: *Residual Energy* - RE). Esta métrica revela la energía disponible en un nodo. La métrica de RE se calcula como en la ecuación (4).

$$RE_{i,j} = (V_{\text{inicial}} / V_{\text{actual}}) \quad (4)$$

Cuando, V_{inicial} y V_{actual} son la energía inicial y actual de un nodo respectivamente. Se calcula el valor RE si el nodo i selecciona el nodo j como su nodo padre hacia la raíz. Es importante aclarar que la métrica de tiempo de vida es derivada de esta métrica (ver epígrafe 1.7.3).

1.7.3. Tiempo de vida del sistema [40]

(En inglés: *System Life Time* - SLT) Esta métrica depende del valor de RE y es el tiempo que dura la red en agotar la energía de cualquier

Introducción

nodo. Generalmente se mide en segundos y es el resultado de la ecuación (5).

$$SLT = TEU * REm/EU \quad (5)$$

Donde TEU es el tiempo en que el sensor agota una unidad energética, REm es la menor energía residual de un nodo de la red y EU es la unidad energética aplicada.

1.7.4. Cobertura [40]

(En inglés: *Coverage - Cov*) Expresa qué fracción de la región a monitorear es alcanzada por los nodos que quedan activos, representada en [40] con la ecuación (6).

$$Cov = Sub_R / R \quad (6)$$

Donde R es el espacio total monitoreado inicialmente y Sub_R es el espacio monitoreado con los nodos activos.

1.7.5. Escalabilidad [40]

(En inglés: *Scalability*) Variación del comportamiento del protocolo al cambiar la densidad y cantidad de nodos. Podrá pensarse como la variación de las métricas de interés en función de la cantidad de nodos.

1.7.6. Conectividad [33]

(En inglés: *Scalability*) Mide cuán bien conectada está la red, o cuántos nodos han quedado aislados [40].

1.7.7. Rendimiento [33]

(En inglés: *Throughput*) Es la tasa promedio de mensajes efectivos entregados, representada por la ecuación (7).

$$\text{Throughput} = \left(\frac{s}{s + f} \right) \quad (7)$$

Donde s es el número de paquetes entregados con éxito, mientras que f es el número de paquetes enviados a cabo sin éxito.

1.7.8. Latencia [33] [40]

(En inglés: *Latency*) Retardo promedio entre la transmisión de un evento y la recepción en el sumidero. Esta métrica es inversamente proporcional a la calidad de servicio percibida por los usuarios, es decir que entre más alto sea su valor menor es la calidad obtenida. Por dicha razón el interés de esta métrica es que tienda a cero (0).

1.7.9. Confiabilidad [33] [40]

(En inglés: *Confiability* - Conf) Una medida de la tasa de éxito en la transmisión de paquetes, como lo indica la ecuación (8).

$$\text{Conf} = \frac{\text{Data}_t}{\text{Data}_r} \quad (8)$$

- Data_t = Total de paquetes de datos enviados
- Data_r = Total de paquetes de datos recibidos

La métrica PDR, aunque es una tasa inversamente proporcional a esta métrica, también es una métrica de Confiabilidad expresada en porcentaje, como lo indica la ecuación (9):

Introducción

$$PDR = \left(\frac{Data_r}{Data_t} \right) * 100 \% \quad (9)$$

La tasa de pérdidas, la cual indica el porcentaje de paquetes de datos no recibidos por ningún nodo, es derivada de la tasa de confiabilidad y se calcula a partir de la ecuación **(10)**:

$$Loss = 1 - Conf \quad (10)$$

De acuerdo con la definición de métrica de confiabilidad, las siguientes métricas es posible ubicarlas como métricas de este tipo:

- Nivel de calidad de enlace (en Inglés: *Link Quality Level* - LQL).[33]: Esta métrica toma valores en un conjunto limitado de 7 niveles, con 1 informando el nivel de calidad de enlace más alto. El LQL de una ruta se expresa como un registro que contiene, para cada valor LQL encontrado, solo el número de enlaces coincidentes. Ejemplo: En una ruta en la que se encuentran tres enlaces de nivel 2 de calidad y cinco enlaces de nivel seis la Tabla 5 sería su registro LQL:

Tabla 5. Ejemplo de registro LQL

NIVEL (k)	1	2	3	4	5	6	7	Total enlaces encontrados
No. de enlaces (Pk)		3			6			9

Para evitar los ciclos en el enrutamiento, el peso de la trayectoria $w(a)$ se define con la ecuación **(11)**:

$$LQL(a) = w(a) = \sum_{k=1} p_k k \quad (11)$$

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

Donde k es el nivel de calidad del enlace y p_k el número de enlaces que coinciden con el k -ésimo LQL. Sin embargo, este enfoque requiere la definición de niveles de calidad para clasificar cada enlace a uno de los 7 niveles soportados con el nivel 0, correspondiente a enlaces con calidad desconocida.

- Cuenta de Transmisiones Esperada (en inglés: *Expected Transmission Count - ETX*) [30] [34] [33]: Se utiliza para indicar la estabilidad de un camino. ETX se calcula como en la ecuación (12).

$$ETX = \left(\frac{s + f}{s} \right) \quad (12)$$

Cuando S es el número de paquetes entregados con éxito, mientras que F es el número de paquetes enviados sin éxito.

1.7.10. Tiempo de transmisión esperado [41] [42]

(En inglés: *Expected Transmission Time - ETT*) Esta métrica puede calcularse mediante el ajuste de la métrica ETX de acuerdo con el tamaño del paquete y la capacidad de transmisión del enlace. Por lo tanto, con la ecuación (13), se expresa esta métrica así:

$$ETT = ETX \times \frac{S}{B} \quad (13)$$

Donde S es el tamaño de paquete y B es la capacidad del enlace. Para estimar B , los nodos utilizan un paquete pequeño seguido de uno grande (sondas), enviándolos a cada vecino. Cada vecino, luego, mide el tiempo de llegada entre los dos paquetes e informes de vuelta al remitente de las sondas. Tras la recepción de un número predefinido de muestras de retardo, el emisor calcula la capacidad

Introducción

del enlace dividiendo el tamaño de la sonda mayor por la muestra de retardo más pequeño obtenido.

1.7.11. Interferencia consciente [41]

(En inglés: *Interference AWARE* - AWARE) Esta métrica considera la interferencia del flujo y se caracteriza por el modelo de interferencia física, pero también toma en cuenta la variación de calidad del enlace. Esta métrica utiliza el ruido de la señal (SNR) y la interferencia y ruido de señal (SINR) para reproducir de forma continua variaciones de interferencia en las métricas de enrutamiento, definiendo primero a IR_j con la ecuación (14):

$$IR_j = \frac{SINR_j}{SNR_j} \quad (14)$$

La métrica *AWARE*, para el enlace j , calcula el promedio de tiempo que el medio está ocupado por las transmisiones de cada vecino ETT_j y considera dentro de la corriente y la inestabilidad del medio a IR_j de la ecuación (15):

$$iAWARE_j = \frac{ETT_j}{IR_j} \quad (15)$$

1.7.12. Métricas relacionadas de energía [43] [41]

(En inglés: *Energy Related Metrics* - BAMER) Es una estructura de peso-ruta propuesta para capturar el consumo de energía para comunicaciones fiables más enlaces inalámbricos con pérdida. En BAMER, el peso de un camino p entre los nodos s y v se define de forma recursiva con la ecuación (16) así:

$$w(p_{s,v}) = N(u,v) * [w(p_{s,v}) + E(l_{u,v})] \quad (16)$$

Donde $E(l_{u,v})$ es el consumo de energía para una transmisión a través del enlace (u, v) y $N(u, v)$ es el número esperado de transmisiones de una entrega exitosa por el enlace (u, v) y $N(u, v) \geq 1$. El peso ruta $w(p_{s,v})$ representa esencialmente el consumo de energía para el éxito de la entrega de un paquete sobre $p_{s,v}$ camino, a través de las retransmisiones de extremo a extremo. Un camino p es más ligero que un camino q ($w(p) < w(q)$) si $w(p)$ es menor que $w(q)$.

1.7.13. Distribución basada en ETX [41]

(En inglés: *Based Distribution ETX- DBETX*) A través de una vista de un canal físico completo, distribución basada en el contador de transmisión esperado (DBETX), se propone para mejorar el rendimiento de la red para diferentes canales en presencia de desvanecimiento del rendimiento. Utilizando mediciones de enlace, DBETX se define como la ecuación (17) así:

$$DBETX(l) = E[ANT(l)] * \frac{1}{1 - P_{out_{MAC}}} \quad (17)$$

La Función ANT es el número esperado de las retransmisiones en un enlace teniendo en cuenta el valor de MaxRetry, que es el número máximo de retransmisiones permitidas por la capa MAC.

$P_{out_{MAC}}$ Es la probabilidad cuando $P_{Suc}(x) > P_{limit}$ donde $ANT(l)$ se dan por las ecuaciones (18) y (19):

$$ANT(l) = \frac{1}{P_{Suc}(x)}; P_{Suc}(x) > P_{limit} \quad (18)$$

$$ANT(l) = \frac{1}{P_{limit}}; P_{Suc}(x) < P_{limit} \quad (19)$$

Introducción

Calcular DBETX requiere la información del comportamiento real del enlace inalámbrico en lugar del comportamiento promedio.

1.7.14. Tasa de datos esperados [41]

(En inglés: *Expected Data Rate* - EDR) TCD es la fracción promedio del tiempo para la cola de salida del transmisor de enlace que no está vacío. Con lo anterior presente, EDR se define como la ecuación (20):

$$EDR_t = \frac{b_t}{ETX_i * \sum_{i=1}^n TDC_i(i)} \quad (20)$$

Donde b_t es la tasa nominal de enlace, $TDC_i(i)$ es utilizado para contabilizar la reducción de rendimiento. Si los enlaces tienen diferentes velocidades binarias nominales, reciben el mismo rendimiento promedio, pero si son de diferente tiempo compartido del canal no podrán capturar el mecanismo de distribución de ancho de banda.

1.7.15. Número efectivo de transmisiones [41]

(En inglés: *Effective Number of Transmissions* - ENT) Los protocolos de capa superior, como TCP, SPX, etc., tienen un límite a tolerar (re) transmisiones. Para este problema se propuso ENT. ENT limita rutas a un número aceptable de retransmisiones de acuerdo con los requisitos de la capa superior. Mide el número de retransmisiones sucesivas por enlace teniendo en cuenta la variación de encontrar un camino que logra alta capacidad de la red al tiempo garantiza que la tasa de pérdida de paquetes de extremo a extremo sea visible a las capas superiores (como TCP) y que no supere el valor especificado; pero esto puede no ser suficiente, ya que implica vínculos

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

con altas tasas de pérdida. Si se toma a M como el número de umbral de retransmisiones (especificado por las capas superiores), P_{al} (probabilidad real de una pérdida de paquetes), usando en un enfoque grandes desviaciones, se puede definir como la ecuación (21):

$$P_{al} \approx \exp[-(\log M - \mu)^2 / 2\sigma^2] \quad (21)$$

Donde G es la diversidad temporal para enlaces inalámbricos dada por la ecuación (22):

$$G = \log(P_{at}) / \log M \quad (22)$$

Donde P_{at} especifica la probabilidad de pérdida deseada. Es entonces que se define ENT como la ecuación (23):

$$ENT = \exp(\mu + 2G\sigma^2) \quad (23)$$

1.7.16. ETT acumulado y ponderado [44]

(En inglés: *Weighted Cumulative ETT* - WCETT) Esta métrica se centra en nodos fijos de redes locales, donde su propósito es seleccionar la ruta de mayor rendimiento para evitar información no deseada entre el origen y el destino [44]. La métrica asigna pesos a los enlaces de cada nodo, llamados ETT; dicho peso es una estimación del retardo de extremo a extremo, que experimenta un paquete que viaja por un camino entre dos nodos X Y en un enlace i .

A través de la ecuación (24) se calcula WCETT:

$$WCETT = (1 - \beta) * \sum_{i=1}^n ETT_i + \beta * \max_{1 < j < k} X_j \quad (24)$$

Introducción

β es un valor variable entre $0 \leq \beta \leq 1$, esta ecuación es un equilibrio entre el bien global y el egoísmo, lo que representa un nivel de cooperación entre los nodos de la red [44]. El primer término $\sum_{i=1}^n ETT_i$ es la suma de tiempo de transmisión a lo largo de todos los saltos en la red, esto refleja el consumo total de recursos a lo largo de este camino; el segundo término $\max_{1 < j < k} X_j$ refleja el conjunto de saltos que tenga el mayor impacto en el rendimiento de este camino. De todos los caminos, se selecciona el mejor WCETT (el de menor valor numérico) y por esta ruta se envía la información.

1.7.17. Tiempo de transmisión exclusivo esperado [41]

(En inglés: *Expected Exclusive Transmission Time - EETT*) Cuando los canales se distribuyen en un camino largo, EETT selecciona rutas multicanal con la menor interferencia para maximizar el rendimiento de extremo a extremo. EETT se utiliza para dar una mejor evaluación de un camino multi-canal. Por un camino N-hop con los canales de K, en un enlace, el Set de Interferencia (IS) es el conjunto de enlaces que interfieren con él. Entonces EETT se define como la ecuación (25):

$$EETT_i = \sum_{i=IS(l)}^n ETT_i \quad (25)$$

EETT considera el impacto de otros enlaces, por tanto, EETT se supone que tiene un mejor rendimiento, ya que refleja con mayor precisión el impacto de la interferencia entre el flujo.

1.7.18. Rendimiento esperado [41]

(En inglés: *Expected Throughput - ETP*) ETP deja múltiples enlace de radio que pertenecen a la trayectoria P en el dominio $S_i \cap P$. Dicho

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

dominio es el conjunto de enlaces en la trayectoria P que lidian con enlace i . r_i es la velocidad de bits nominal del enlace i . Todos los enlaces tienen igual número de oportunidades para la transmisión cuando se satura [41]. El ancho de banda que se espera recibir por cada enlace es como lo indica la ecuación (26):

$$b_i = \frac{1}{\sum_{j \in S_i \cap P} \frac{1}{r_i}} \quad (26)$$

Pero las pérdidas de paquetes menores al actual rendimiento del enlace. $P_i^{(f)}$ y $P_i^{(r)}$ se supone que son las probabilidades de éxito de paquetes de enlace de i en el avance y retroceso de direcciones respectivamente. Entonces, la ETP de enlace k viene dada por la ecuación (27):

$$ETP_i = \frac{P_i^{(f)} * P_i^{(r)}}{b_i} \quad (27)$$

En la forma ETX , tenemos la ecuación (28):

$$ETP_i = \frac{1}{ETX_i * b_i} \quad (28)$$

Así se calcula el rendimiento del enlace directamente. $f(P)$ es el rendimiento de las rutas con enlaces que sufren embotellamiento, como se indica en la ecuación (29).

$$f(P) = \min_{k \in P} ETP(k) \quad (29)$$

1.7.19. Protocolo de enrutamiento multicanal [41]

(En inglés: *Multichannel Routing Protocol* - MCR) Se expresa como lo señala la ecuación (30):

$$MRC = (1 - \beta) * \sum_{i=1}^n (ETT_i + SC(c_i)) + \beta * \max_{1 \leq j \leq c} X_j \quad (30)$$

Introducción

Donde $SC(c_i)$ se define como la ecuación **(31)**:

$$SC(c_i) = \sum_{i=1}^n (InterfaceUsage(i) * SwitchingDelay) \quad (31)$$

Este valor no figura en el intervalo de tiempo que esta interfaz se sintoniza en el canal j , pero está inactivo. *SwitchingDelay* es la latencia para la conmutación de una interfaz y se puede medir fuera de línea. Cuando un paquete llega en el canal j , *InterfaceUsage(i)* mide la probabilidad de que el Interfaz conmutable será en un canal diferente. MCR no logra entender la interferencia entre el flujo además de la suposición de que todos los canales disponibles son ortogonales.

1.7.20. Métrica de interferencia y conmutación de canal [45] [46] [41]

(En inglés: *Metric of Interference and Channel-switching* - MIC) Aborda el proceso de enrutamiento proporcionando las características: 1) cada nodo calcula la interferencia entre el flujo contando el número de nodos que interfieren; 2) nodos virtuales MIC garantizan rutas coste mínimo de cálculo; 3) MIC calcula por sí mismo el ETT métrica. MIC para un camino p se define como la ecuación **(32)**:

$$MIC_{(p)} = \frac{1}{N * \min(ETT)} \sum_{i \in p} IRU + \sum_{i \in p} CSC_i \quad (32)$$

N es el número total de nodos de la red y $\min(ETT)$ es el más pequeño ETT en la red. Los dos componentes del MIC son: IRU, es la Interferencia de uso de recursos y CSC, es el costo de conexión del canal [45].

1.7.21. Métrica de tiempo del consumo del medio físico [41]

Conocida por su sigla MTM, esta métrica minimiza el tiempo de consumo del medio físico. Debido a la naturaleza compartida de las redes inalámbricas, no solo enlaces individuales pueden interferir (interferencia intra-flujo), pero las transmisiones compiten por el medio unos con otros en el mismo dominio geográfico. Cuanto más larga sea la distancia física de un salto, los resultados en el consumo de energía son más altos y los otros saltos se ven afectados. El MTM de un paquete P en una trayectoria P se define como sigue en la ecuación (33):

$$MTM(P, p) = \sum_{\forall l \in P} \tau(l, p) \quad (33)$$

Donde $\tau(l, p)$ es el tiempo requerido para transferir paquetes p sobre el enlace l . $\tau(l, p)$ es definida en la ecuación (34) así:

$$\tau(l, p) = \frac{\text{overhead}(l) + \frac{\text{size}(p)}{\text{rate}(l)}}{\text{reliability}(l)} \quad (34)$$

La sobrecarga del enlace ($\text{overhead}(l)$) puede calcularse a partir de las normas y especificaciones, así como con el tipo y la configuración del dispositivo inalámbrico utilizado. El tamaño del paquete ($\text{size}(p)$) debe ser de fácil acceso a través del protocolo de enrutamiento. La Tasa de transferencia de enlace $\text{rate}(l)$ y la fiabilidad $\text{reliability}(l)$ por lo general se conocen en la capa MAC.

1.7.22. Tiempo de transmisión estimado [41]

(En inglés: *Estimated Transmission Time* - EstdTT) Asumiendo como constante el tamaño del paquete se sugiere una métrica de tiempo de transmisión estimado definida en la ecuación (35) como

Introducción

una razón inversamente proporcional a la Tasa de transferencia de enlace y la fiabilidad:

$$EstdTT(l) = \frac{1}{reliability(l) * rate(l)} \quad (35)$$

Esta puede ser escrita como en la ecuación (36):

$$EstdTT(l) = \frac{ETX(l)}{rate(l)} \quad (36)$$

1.7.23. Distancia ETX [41]

(En inglés: *Distance ETX- DETX*) Es la distancia virtual entre dos nodos X_i y X_j como el ETX mínimo entre todas las rutas de enrutamiento de conexión X_i y X_j representada por la ecuación (37).

$$\delta(X_i, X_j) = \min_{l_i \in L} ETX(l_i) \quad (37)$$

Donde L es el conjunto de saltos o caminos que conectan X_i y X_j . Distancia ETX comparada con el reenvío codicioso guían un paquete hacia la dirección correcta y a entregar el paquete a través de HOP consecutivo por el reenvío de salto, debido a que Distancia ETX refleja directamente la longitud de una ruta de comunicación entre un par de nodos en una WSN.

1.7.24. Multidifusión ETX [41]

(En inglés: *Multicast ETX- METX*) Es una métrica de enrutamiento eficiente de la energía y tiene como objetivo minimizar la energía total de transmisión, en la presencia de una capa de enlace fiable, por la ruta de acceso, y se expresa como en la ecuación (38).

$$C(s, d) = \frac{C(s, d) + W(u, d)}{I - P_{el}} \quad (38)$$

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

Es la energía-costo esperado de la transmisión de una fuente s de destino d , l es la relación entre u y d en el camino, P_{el} es la tasa de error de ese vínculo, y $W(u, d)$ es la energía de transmisión requerida entre los nodos u y d .

1.7.25 Por Salto ETX [47]

(En inglés: *Per Hop* ETX - PHETX) Cuando el número de nodos aumenta, especialmente en un escenario de red densa, una ruta de encaminamiento puede contener más nodos y el valor ETX de todo el camino será más grande que la de un solo salto largo. Y tan largo salto se puede convertir en un cuello de botella, restringiendo toda la red.

Para resolver este problema, PHETX calcula la mejor ruta con la suma de los valores de ETX entre cada nodo y el recuento n de los nodos se utiliza para obtener el valor medio ETX, como se observa en la ecuación (39), para evitar con éxito el problema de salto de longitud.

$$PHETX = \sum_{i=1}^n \frac{ETX_i}{n} \quad (39)$$

1.8. PROBLEMAS Y LIMITACIONES VIGENTES

Es fundamental que las LLN estén a la vanguardia de los avances tecnológicos, particularmente los algoritmos de transmisión de paquetes a nivel de capas de red. El Internet de las Cosas plantea un desafío para las nuevas investigaciones en términos de calidad de servicio para estas redes. Las redes LLN presentan múltiples deficiencias en materia de calidad de servicio para brindar un buen desempeño en Internet de las Cosas; con miles y millones

Introducción

de dispositivos interconectados a través de redes de malla de saltos múltiples poseen características que las limitan en cuanto al enrutamiento con calidad de servicio como: limitados recursos de memoria, baja potencia, altos índices de pérdida de paquetes y el nivel de especificidad de sus aplicaciones emergentes [48]. Como respuesta a estas limitantes, en la IoT se implementa el protocolo RPL [28].

El hecho de que RPL permita la comunicación bidireccional IPv6 de extremo a extremo en los dispositivos LLN con recursos limitados, implica un proceso de selección de ruta que impacta el envío de paquetes en estas redes [1]. Este proceso se basa en la implementación de métricas estandarizadas de enrutamiento por la IETF [33], pero estas no se adaptan a cambios de red, desconociendo situaciones respecto al entorno de los dispositivos y, consecuentemente, RPL tiende a tasas muy bajas para entrega de paquetes [49] [50].

Este tipo de red es construida de acuerdo a su función objetivo y en cada nodo se indica el conjunto de métricas y limitaciones utilizados en la implementación de RPL. Sin embargo, a pesar de que RPL tenga dichas métricas y permita la combinación de nuevos parámetros y restricciones, la calidad de servicio representa un dilema de complejidad [51] y no está presente en el protocolo estandarizado por el grupo de trabajo IETF; esto disminuye la calidad de la elección de caminos en las redes LLN [1] y en Internet de las Cosas, es importante que esto se solucione.

En afán de aportar una solución a la problemática presente en las métricas de enrutamiento con calidad de servicio para el protocolo RPL, se eleva la siguiente pregunta problema que orienta la

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

investigación: *¿Cómo mejorar el rendimiento de enrutamiento en escenarios de redes LLN?*; de la misma manera, es necesario garantizar el funcionamiento de dicha mejora en redes LLN. Entonces, *¿cómo se debe desarrollar su implementación apropiadamente?*; además, teniendo en cuenta que es importante que la investigación realice un aporte productivo al enrutamiento en términos de calidad de servicio para este tipo de redes, *¿de qué manera se mide su desempeño frente a la actualidad en el enrutamiento de las redes LLN?*

1.9. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

1.9.1. Alcance del proyecto

La presentación de este trabajo está soportada en el proceso de enrutamiento de las redes LLN, por lo que el mismo, ofrece una nueva métrica “BFETX” en la función objetivo al protocolo RPL que le permite discriminar las rutas a punto de desaparecer por falta de respaldo de nodos vecinos que reduzcan el agotamiento al nodo en ruta; métrica demostrada teórica y funcionalmente, comparable con otras investigaciones de su tipo.

Esta nueva métrica ofrece mejor desempeño de enrutamiento de paquetes en términos de calidad de servicio en redes LLN densamente desplegadas.

1.9.2. Alcance del producto

BFETX propenderá por mejorar de manera significativa el desempeño del enrutamiento de redes LLN, que pueden interactuar en zonas de desastre, difícil acceso o simplemente con una mayor

Introducción

demanda de calidad de servicio, con bajo consumo de energía y memoria de procesamiento.

1.10. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.10.1. Objetivo general

Adaptar e implementar el protocolo RPL replanteando la función objetivo MRHOF en términos del estado de la ruta para mejorar la calidad de servicio del enrutamiento de paquetes en LLN.

1.10.2 Objetivos específicos

- Analizar el funcionamiento de las LLN y del protocolo RPL con base en fuentes estandarizadas e investigaciones indexadas y recientes para la adaptación de métricas de enrutamiento en su función objetivo.
- Diseñar e implementar una nueva métrica de enrutamiento adaptando la función objetivo del protocolo mediante un conjunto de simulaciones basadas en los escenarios seleccionados para garantizar el funcionamiento del protocolo adaptado en redes LLN.
- Comparar el desempeño de las funciones objetivo OF0 y MRHOF con la nueva función objetivo propuesta, mediante el análisis de los datos recopilados y las observaciones en las simulaciones para corroborar la validez de la nueva métrica en el protocolo de enrutamiento RPL.

1.11. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en esta investigación se basa en el método inductivo para la creación de un modelo que busca la

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

conformación de una nueva métrica de enrutamiento y varios escenarios experimentales de red que discriminan la configuración apropiada del protocolo RPL. Esto para aplicar la métrica propuesta, dando como resultado un mejor desempeño respecto a cuatro métricas de calidad de servicio: tiempo de vida, latencia, pérdida de paquetes y consumo de energía.

A continuación, se expone cómo se alcanza el objetivo general del presente proyecto investigativo a través de las etapas de la metodología inductiva:

1.11.1. Observación

La primera etapa consta de una exhaustiva revisión literaria que permitió conocer de antemano cómo funcionan las redes LLN (ver epígrafe 1.4) y su protocolo de enrutamiento RPL; además, se concretó un estado del arte (ver epígrafe 1.8), sobre investigaciones publicadas en revistas reconocidas, que permitió identificar la oportunidad de aporte que ofrece el presente proyecto a la Ingeniería de Sistemas y la Computación (ver Capítulo 2).

1.11.2. Abstracción

En la segunda etapa, fue indispensable plantear el modelo que permitiera realizar un aporte significativo al enrutamiento de redes LLN según la literatura analizada. Fue necesario diseñar la configuración de escenarios con parámetros que enfrentan las redes LLN, emular cada sensor a nivel *hardware*, y la implementación de la adaptación del protocolo de enrutamiento; por ello se requirió conocer y aprender a manejar correctamente las herramientas necesarias. En este sentido, se realizó un amplio estudio

Introducción

del funcionamiento del sistema operativo Contiki (ver epígrafe 3.2), el simulador Cooja (ver epígrafe 3.5) y lenguaje nativo de programación C++ (ver anexo 1).

1.11.3. Comparación

Para la tercera etapa se comparan los modelos de las funciones objetivo estandarizadas OF0 y MRHOF con la nueva función objetivo propuesta con base a escenarios de red iguales a todas las funciones mencionadas. Esto para demostrar la validez del protocolo adaptado en el enrutamiento de LLN en términos de calidad de servicio.

1.11.4. Experimentación

Esta etapa se concretó mediante una serie de pruebas de simulación de situaciones enfrentadas por las redes. Entre dichas situaciones estaban las condiciones de *hardware*, *software* y de entorno apropiadas para poder observar de manera más precisa su comportamiento, obtener la información necesaria y poder garantizar el funcionamiento del protocolo adaptado en redes LLN.

1.11.5. Generalización

Finalmente, se propone una alternativa para decidir entre métricas de enrutamiento para redes LLN que permita el planteamiento estratégico necesario, para mejorar la calidad de servicio de este tipo de redes, fundamentalmente en el marco de trabajo del Internet de las Cosas, y aportar al crecimiento del sector de la Ingeniería de Sistemas y la Computación.

2

MODELO DE ADAPTACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

El rango de un nodo representa qué tan bueno es el camino del nodo al sumidero. Este parámetro depende de todos los enlaces de capa 2 que se usan para llegar al sumidero. Cuanto más bajo es el valor del rango, significa que mejor es el camino al sumidero. El nodo con el rango más bajo es el propio sumidero, cuyo rango vale 256 (unidad mínima indivisible para medir rangos llamada MinHopRankIncrease).

63

El mejor padre de un nodo es el nodo vecino con el cual se consigue el mejor camino para llegar al sumidero. De esta manera se minimiza el rango del nodo. El rango depende de la calidad de los enlaces intermedios. Para medir la calidad del enlace con un nodo vecino RPL en su más reciente función objetivo, MRHOF utiliza la métrica ETX (ver capítulo 1.5.1).

MRHOF efectúa el cálculo del ETX utilizando la ecuación **(1)** con tasas estáticas 0,9 y 0,1. Estas generan una ponderación entre un valor almacenado y un valor consultado así:

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

$$ETX = 0,9 * \left(\frac{S_{ALM} + F_{ALM}}{S_{ALM}} \right) + 0,1 * ETX_{up}$$

Y de acuerdo con la definición de ETX el término $\left(\frac{S_{ALM} + F_{ALM}}{S_{ALM}} \right)$ puede expresarse como ETX_{ALM} en la ecuación **(40)** así:

$$ETX = 0,9 * ETX_{ALM} + 0,1 * ETX_{up} \quad (40)$$

En el presente proyecto, se realiza una sustitución en la ecuación **(42)** de sus tasas estáticas por el gradiente en la ecuación **(41)**, adaptable a las condiciones del nodo en cuanto al número de vecinos y sus estados de enlace. Dentro de este modelo la nueva métrica BFETX [3] es representada como dicho gradiente de estado de la ruta entre el nodo analizado y su mejor conexión a otro nodo en relación a la conectividad con sus nodos vecinos. Para calcular dicho gradiente de conectividad, se divide el ETX que presenta el nodo con su mejor padre entre la sumatoria de todos los ETX del nodo analizado con todos sus vecinos directos, incluido el mejor padre (ver anexo 1). Dicho gradiente se constituye como se expresa en la ecuación **(41)**:

$$BFETX = \frac{ETX_{UP}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i + F_i}{S_i} \right)} \quad (41)$$

Donde n representa el número de vecinos, S_i y F_i son el número de paquetes enviados con éxito y sin éxito respectivamente por cada nodo vecino. De acuerdo con la definición de ETX, también es posible expresarla como la ecuación **(42)**:

$$BFETX = \frac{ETX_{UP}}{\sum_{i=1}^n (ETX_i)} \quad (42)$$

Con la ecuación **(44)** se obtiene la tasa representativa del valor de ETX del nodo elegido en relación al ETX de todos sus nodos vecinos,

Modelo de adaptación de la función objetivo

y al sustituirla en la ecuación (40) resulta el modelo propuesto en la ecuación (43).

$$ETX = (1 - BFETX) * (ETX_{ALM}) + (BFETX) * ETX_{UP} \quad (43)$$

De esta forma, si el número de vecinos aumenta para un nodo, el valor de BFETX disminuye tendiendo a cero y el impacto de ETX_{UP} sobre el valor final de ETX también disminuye, mientras que el valor del ETX_{ALM} tiene mayor efecto en el resultado al aumentar su coeficiente tendiendo a 1. Sin embargo, la ecuación (43) no incluye el caso inicial donde no existen vecinos, lo que nos lleva al modelo propuesto en la ecuación (44) como una función compuesta así:

$$ETX = \begin{cases} 0,9 * ETX_{ALM} + 0,1 * ETX_{up}, & n < 1; \\ (1 - BFETX) * (ETX_{ALM}) + BFETX * ETX_{up}, & \end{cases} \quad (44)$$

La ecuación (44) se puede expresar en términos de paquetes enviados con y sin éxito como en la ecuación (45) así [3]:

$$f\left(\frac{S_{ALM} + F_{ALM}}{S_{ALM}}, ETX_{UP, n}\right) = \begin{cases} 0,9 * \left(\frac{S_{ALM} + F_{ALM}}{S_{ALM}}\right) + 0,1 * ETX_{UP}, & n < 1; \\ \left(1 - \frac{\left(\frac{S+F}{S}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i+F_i}{S_i}\right)}\right) * \left(\frac{S_{ALM} + F_{ALM}}{S_{ALM}}\right) + \frac{\left(\frac{S+F}{S}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i+F_i}{S_i}\right)} * ETX_{UP}, & \end{cases} \quad (45)$$

2.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO PROPUESTO

Teniendo en cuenta la definición de características para el diseño de métricas IETF aplicables a RPL (ver epígrafe 1.6), a continuación, se resaltan algunos aspectos del modelo propuesto con dichos parámetros validando su aplicación en el protocolo:

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

- Dominio de la métrica: Por ser una métrica derivada de ETX aplica el mismo dominio definido en [1, 512].
- Operador y relación de orden: Su operador es suma dado que la métrica es aditiva a lo largo de la ruta de los paquetes, mientras su relación de orden es minimizable.
- Característica monotónica y asintónica: Al definir la función del peso de la ruta con la ecuación **(46)**:

$$w(a) = \sum_{i=1}^n ((1 - BFETX) * ETX_{i-1} + BFETX * ETX_i) \quad (46)$$

Donde i es el número del nodo actual y n es el número total de nodos en la ruta. Entonces $w(a)$ es estrictamente asintónico, monotónico y minimizable, al considerar que para cualquier enlace a , b y c sus pesos $w(a)$, $w(b)$ y $w(c)$, son mayores que cero (0), y para todo $w(a) < w(b)$ el valor de su concatenación $w(a) < w(a \oplus b)$ y $w(a) < w(c \oplus a)$, y además se cumple que $w(a) < w(b)$ pero $w(c \oplus b) < w(c \oplus a)$. Esto es justificable teniendo en cuenta las características de la métrica propuesta. Al ser todos los pesos mayores que cero y una métrica aditiva, el peso concatenado de dos enlaces siempre será mayor al de uno solo de ellos para ser monotónica y la concatenación de dos enlaces con un tercero no cambia su relación de orden para ser asintónicas.

2.2. ANÁLISIS DIFERENCIAL DE LOS MODELOS

Para ambos modelos, el estandarizado en la ecuación **(1)** y el propuesto en este proyecto en la ecuación **(47)**, se obtiene una descripción de su comportamiento a través de criterio de la derivada de funciones. Las ecuaciones para obtener los nuevos ETX con respecto al ETX almacenado representan las funciones a analizar, mientras que el resultado de sus derivadas representa la razón de cambio de dichas funciones. Al obtener las razones de cambio se

Modelo de adaptación de la función objetivo

alcanza un indicador del tipo de respuesta que ofrece el modelo matemático a los diferentes valores de ETX almacenados, es decir, cuál será el comportamiento del protocolo con dicho modelo frente a cambios en el entorno del sensor.

El modelo propuesto es una función compuesta donde existen dos casos: cuando no existe un valor de ETX almacenado (en el arranque de la red) y cuando sí existe. En el primer caso no es necesario realizar una derivación puesto que las ecuaciones del modelo estandarizado y el modelo propuesto son iguales, y al tratarse solo del arranque de la red puede considerarse despreciable. Por el contrario, en el caso dos se realiza la derivada de la función con respecto al valor del ETX almacenado y según la ecuación No. 7.

En el modelo estandarizado, se puede decir que los valores ETX son funciones del cálculo del ETX almacenado y del EXT consultado, pero indiferente al número de vecinos así:

$$\text{Si } f(\text{ETX}_{\text{ALM}}, \text{ETX}_{\text{UP}}) = 0,9 * ((S_{\text{ALM}} + F_{\text{ALM}})/S_{\text{ALM}}) + 0,1 * \text{ETX}_{\text{up}}$$

Entonces la derivada de la función con respecto a ETX_{ALM} sería: $\frac{\partial f(\text{ETX}_{\text{ALM}}, \text{ETX}_{\text{UP}})}{\partial (\text{ETX}_{\text{ALM}})} = 0,9$ y la derivada de la función con respecto a ETX_{UP} sería: $\frac{\partial f(\text{ETX}_{\text{ALM}}, \text{ETX}_{\text{UP}})}{\partial (\text{ETX}_{\text{UP}})} = 0,1$. Ambos resultados son pendientes estáticas.

El resultado de la derivada en el modelo estandarizado refleja un comportamiento lineal e invariable a los cambios en la conectividad con los vecinos.

En el modelo propuesto, además de los parámetros del estandarizado incluye el número de vecinos n:

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

Si $f(ETX_{ALM}, ETX_{UP}, n) = (1 - BFETX) * ETX_{ALM} + BFETX * ETX_{up}$

Entonces la derivada de la función con respecto a ETX_{ALM} sería:

$$\frac{\partial f(ETX_{ALM}, ETX_{UP}, n)}{\partial (ETX_{ALM})} = (1 - BFETX)$$

Y la derivada de la función con respecto a ETX_{UP} sería:

$\frac{\partial f(ETX_{ALM}, ETX_{UP}, n)}{\partial (ETX_{UP})} = BFETX$ Ambos resultados son pendientes dinámicas. Estos resultados con respecto a ambas variables incluyen el gradiente mencionado y se adaptan a los diferentes valores del estado de la ruta del nodo con sus vecinos.

2.3. ESCENARIOS DE RED PARA COMPARACIÓN DE LOS MODELOS

Dado que la relación de vecindad de los nodos define un grafo no dirigido [52] se trazan cuatro escenarios en las Figuras 4, 5, 6 y 7 con 0, 1, 2 y n vecinos respectivamente, que deben ser diferenciados por el modelo y así especificar la solución. Para centrar el análisis en la capacidad del protocolo, de tener en cuenta el número de vecinos se pueden fijar valores iguales de ETX, donde solo un nodo cualquiera será elegido como padre y tiene un menor valor de ETX de acuerdo con el funcionamiento del protocolo RPL. En dichos escenarios se probarán las posibles decisiones del protocolo RPL al elegir el mejor nodo padre con la función objetivo MRHOF basada en la métrica ETX frente a las decisiones de la métrica propuesta. [3].

2.3.1. Escenario de red (a) sin vecinos

Este escenario se observa en la Figura 4. El nodo a elegir como padre no tiene vecinos de respaldo. Según la definición de los modelos comportamiento de ambos, será el mismo en este caso,

Modelo de adaptación de la función objetivo

por ello no será necesario comparar los resultados de ambos modelos en este escenario.

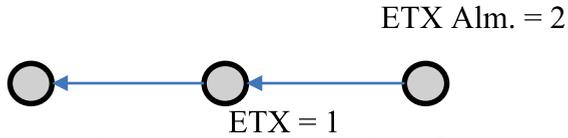


Figura 4. Escenario (a) sin vecinos

2.3.2. Escenario de red (b) de un vecino

Este escenario se observa en la Figura 5. El nodo seleccionado como padre solo tiene un vecino. Presenta menor respaldo si se presenta un desgaste o falla del nodo en ruta.

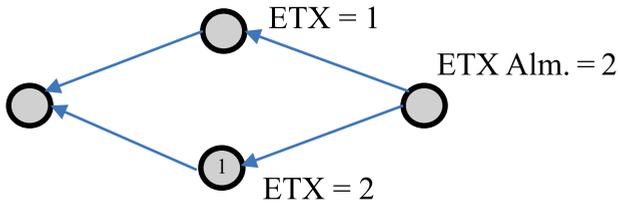


Figura 5. Escenario (b) de un vecino

2.3.3. Escenario de red (c) de dos vecinos

Este escenario se observa en la Figura 6. El nodo seleccionado como padre solo tiene dos vecinos. Presenta mayor respaldo que el caso anterior.

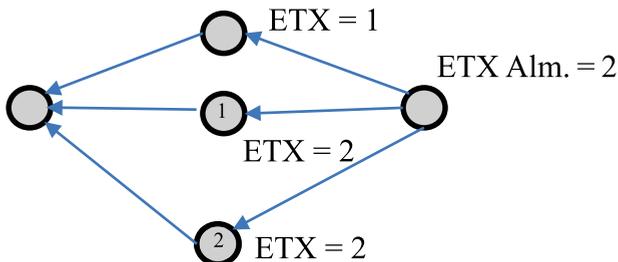


Figura 6. Escenario (c) de dos vecinos

2.3.4. Escenario de red (d) de n vecinos

Este escenario se observa en la Figura 7. El nodo seleccionado como padre tiene n vecinos. Presenta mayor respaldo que cualquiera de los casos anteriores.

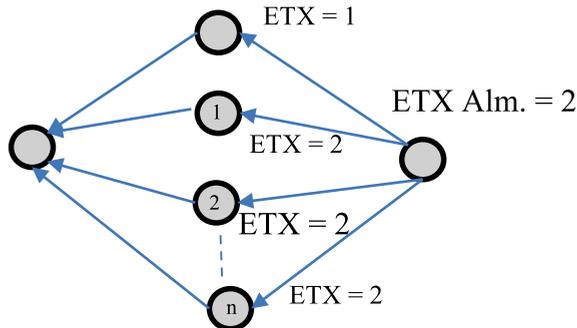


Figura 7. Escenario (d) con n vecinos

En dichos escenarios, el mejor nodo padre elegido por la función objetivo es quien ofrece el menor ETX; en ambos casos se elegiría al nodo 1 e indiferentemente al momento de recalcularse su ETX se le daría el mismo valor. Sin embargo, al agotarse los recursos de ese nodo se pierde su cobertura, además de la subutilización de la ruta en la que estaba presente el nodo, al no tener más nodos vecinos que lo reemplacen en la ruta.

Para darle solución a este problema se plantea en el presente trabajo que el valor del ETX del nodo no respaldado debe ser mayor en comparación al nodo con más vecinos directos, por ello programa la métrica BFETX para la actualización del valor del EXT de los nodos con distinción de los casos donde los nodos no se encuentren respaldados (sensibilidad a los cambios de entorno), evitando así caminos aislados que pierdan rápidamente vida útil y

Modelo de adaptación de la función objetivo

puedan formar cuellos de botella en el futuro del funcionamiento de la red.

2.4. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS

Para efectos prácticos, se toman los valores de los escenarios de red (ver Figura 4) para comprobar el resultado de la actualización del ETX; en dichos escenarios se plantean dos situaciones respecto al número de vecinos de respaldo que el modelo debe diferenciar en su resultado. Para tal efecto se considera la ecuación (46) en el caso de que ya exista un valor almacenado de ETX:

2.4.1. Resultados del modelo estandarizado

En los escenarios de red (a), (b), (c) y (d) de las Figuras 4, 5, 6 y 7, dado que ETX_{up} y $ETX_{ALM} = 1$ y según la ecuación No. 42 es el mismo valor, pues es indiferente al número de vecinos.

$$\begin{aligned} ETX &= 0,9 * ETX_{ALM} + 0,1 * ETX_{up} \\ ETX &= 0,9 * 1 + 0,1 * 2 \\ ETX &= 0,9 + 0,2 = 1,1 \\ ETX &= 1,1 \end{aligned}$$

2.4.2. Resultados del modelo propuesto

Para el mismo efecto que la prueba anterior, se toman los valores de los escenarios de red (ver Figura 4) para comprobar el resultado de la actualización del ETX del modelo propuesto. De ese modo se prueba así [3]:

- En el escenario de red (b) de la Figura 4. Dado que $ETX_{up} = 2$ y $ETX_{ALM} = 1$ y según la ecuación No.9, 16 y 17

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

$$\sum_{i=1}^n (ETX_i) = (1 + 2) = 3$$

$$BFETX = \frac{1}{3} = 0,33$$

$$ETX = (1 - BFETX) * ETX_{Alm} + (BFETX) * ETX_{up}$$

$$ETX = (1 - 0,33) * 1 + (0,33) * 2$$

$$ETX = 0,66 + 0,66$$

$$ETX = 1,32$$

- En el escenario de red (c) de la Figura 4. Dado que $ETX_{up} = 2$ y $ETX_{ALM} = 1$ y según las ecuaciones No. 9, 16 y 17

$$\sum_{i=1}^n (ETX_i) = (1 + 2 + 2) = 5$$

$$BFETX = \frac{1}{5} = 0,2$$

$$ETX = (1 - \nabla BFETX) * ETX_{Alm} + (\nabla BFETX) * ETX_{up}$$

$$ETX = (1 - 0,2) * 1 + (0,2) * 2$$

$$ETX = 0,8 + 0,4 = 1,2$$

- En el escenario de red (d) de la Figura 4. Dado que $ETX_{up} = 2$ y $ETX_{ALM} = 1$ y según las ecuaciones No. 9, 16 y 17:

$$\sum_{i=1}^n (ETX_i) = (1 + 2 * (n - 1)) = 2n - 1$$

Modelo de adaptación de la función objetivo

$$\text{Entonces } \nabla BFETX = \frac{1}{2n-1}$$

$$ETX = (1 - \nabla BFETX) * ETX_{Alm} + (\nabla BFETX) * ETX_{up}$$

$$ETX = \left(1 - \frac{1}{2n-1}\right) * 1 + \frac{1}{2n-1} * 2$$

$$ETX = \frac{2n-2}{2n-1} + \frac{2}{2n-1}$$

$$ETX = \frac{2n}{2n-1}$$

Entonces: $ETX = \frac{2n}{2n-1}$ indica que será racionalmente variable dependiendo del número de vecinos y por definición de límite es posible determinar la tendencia del valor de ETX cuando n tiende a infinito.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2n}{2n-1} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\frac{2n}{n}}{\frac{2n}{n} - \frac{1}{n}} \right) = \frac{2}{2-0} = 1$$

Es decir que el valor de ETX tiende a disminuir hasta 1 a medida que el número de vecinos aumenta.

2.4.3. Discusión de resultados de los modelos

En el modelo estandarizado en el protocolo RPL para los cuatro escenarios de red no se diferencian los resultados del ETX, y aunque el valor de su ETX sea menor en los resultados no significa que esté actuando mejor. El modelo estandarizado continuará utilizando la misma ruta en cualquiera de los escenarios, por lo que no evitará seleccionarla reiteradamente acelerando el consumo de energía de los nodos y generando la posibilidad de embotellamiento de

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

los paquetes en una ruta no respaldada. Mientras que el modelo propuesto en el presente proyecto ofrece discriminación de los escenarios de red diferenciando el valor de ETX al reconocer un número de vecinos diferente, siendo esta una forma más completa de reconocer que la ruta uno es más estable. Como se muestra en el epígrafe 2.4.2, el resultado del ETX para este modelo es inversamente proporcional al número de vecinos; de esta forma el estado del enlace con más vecinos tendrá menor valor y por ende será más preferible para el protocolo de acuerdo con la definición de la métrica ETX.

El poseer más de un nodo amigo o vecinos implica que el protocolo tenga mejor desempeño a la hora de seleccionar las rutas con la nueva métrica BFETX, evitando seleccionar rutas con menor cantidad de nodos de apoyo, ya que en caso de agotamiento del nodo la ruta se pierde al no tener otro nodo que lo reemplace.

3

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED

Para el análisis del funcionamiento del protocolo RPL y la solución propuesta, es necesario establecer condiciones funcionales y actuales en las que podrá ser comparada dicha solución con otras alternativas en igualdad de condiciones. En la Tabla 6, se muestran las características de red seleccionadas y los procesos para su simulación.

75

Tabla 6. Características de la red

Característica	Descripción
Nodo sensor	TmoteSKY
Sistema operativo	Contiki
Topología	20, 40, 50 y 100 nodos más el sumidero
Terreno	500 * 500
Tiempo max. simulación	4500 sg
Despliegue	Al azar
Modelo de aplicación	Consulta

A continuación, se expone por qué son ampliamente soportados.

3.1. MODELO DE DISPOSITIVO

Es necesario un módulo inalámbrico de bajo consumo de energía para uso en redes de sensores, aplicaciones de monitoreo y creación rápida de prototipos de aplicaciones. TmoteSky es un tipo de mota utilizado en el simulador Cooja, esta aprovecha los estándares IEEE 802.15.4 y USB para operar sin problemas con otros dispositivos. TmoteSky permite una amplia gama de aplicaciones de red de malla gracias a que proporciona interconexión flexible con los periféricos, y que hace uso de estándares de la industria, integra sensibilidad a la humedad, la temperatura y la luz [53].

TmoteSky aprovecha los protocolos inalámbricos emergentes, el movimiento de *software* de código abierto y ofrece los sensores para aumentar la robustez, disminuir el costo y el tamaño del paquete [53].

3.2. SISTEMA OPERATIVO

Dado que el sistema operativo Contiki se ha convertido en la aplicación estándar del protocolo RPL [54], la simulación realizada en el presente proyecto es aplicada en una implementación original de dicho sistema (ver epígrafe 1.3.5). Para ampliar acerca de la implementación de Contiki ver anexo 3 [55].

3.3. ÁREA Y DENSIDAD DE NODOS

Se toma como área de prueba una zona de 250.000 m². En la configuración de los simuladores de red es posible especificar las dimensiones del área en metros. Para buscar cubrir el espectro de posibilidades en redes LLN se trabaja con diferentes densidades de

nodos, desde una baja densidad hasta una bastante alta de acuerdo al radio de transmisión de los nodos: 20, 40, 50 y 100 nodos.

3.4. TOPOLOGÍA Y MODELO DE DESPLIEGUE

RPL es utilizado en sensores inalámbricos que se dispersan en unas áreas específicas de interés con el fin de recabar datos de ese entorno. Para las simulaciones de este trabajo, se utilizó topología aleatoria en los experimentos, es decir, una distribución de nodos en forma aleatoria, incluyendo el nodo sumidero, que permite a los nodos llegar al sumidero directa o indirectamente.

Por lo anterior, la topología utilizada se compone de dos tipos de nodo. El número de nodo 1 con el color verde es representativo del nodo sumidero (receptor), y se coloca inicialmente en el centro (250.0, 250.0) para formar un DODAG bien equilibrado. Los nodos sensores (remitentes) son colocados al azar. Estos nodos son de color amarillo, y son representativos de los nodos remitentes en nuestros experimentos.

3.5. SIMULADOR SELECCIONADO

El simulador Cooja está incorporado en el sistema operativo de Contiki y ofrece una visión general de alto nivel de simulación de redes de sensores, ayuda a entender fácilmente los problemas de estas redes, limitaciones y características. Cooja se conecta a Contiki a través de algunas funciones, como por ejemplo, informar al sistema Contiki para tratar un evento o recolectar la información para poder analizarla.

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

Se elige el simulador Cooja por ser una herramienta para el desarrollo de *software* en redes de sensores inalámbricos muy útil, y por proporcionar un método adecuado para establecer las necesidades del entorno. El funcionamiento del simulador y el entorno de simulación de la red inalámbrica de sensores multi salto es ampliado en el anexo 4.

3.6. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN

Dadas las limitaciones de energía de los nodos de las LLN, se busca optimizar los protocolos para extender el tiempo que dura la red en operación, es decir, que puede proveer información del terreno censado; por ello, la métrica Tiempo de Vida de la red es indispensable para estimar la calidad de servicio ofrecida en las pruebas. Además, las métricas de calidad de servicio, como la latencia y la métrica PDR.

3.6.1. Las mediciones de rendimiento

En el presente proyecto se utilizan tres parámetros de rendimiento estándar:

- La primera métrica es el consumo de energía (RE) (ver epígrafe 1.7.2). Para hacer una buena estimación de la energía, se utilizó el 100 % de relación de recepción de paquetes que domina el uso de energía en los nodos sensores. Para calcular el consumo de energía se utiliza el mecanismo de carga del sistema de rastreo disponible en Contiki [31]. Utilizando el seguimiento de estado de energía, Power-Trace en Cooja proporciona una estimación de consumo de energía de un sistema. Estructuras conocidas

Diseño y simulación de la red

como cápsulas de energía también se usan para asignar el uso de energía en procesos como transmisión y recepción de paquetes [31]. Su valor ideal es 0, sin embargo, no es posible que una red funcionando no consuma energía, por lo que se trata de aminorar su valor.

- La segunda métrica es la relación de la entrega de paquetes (PDR) (ver epígrafe 1.7.9), que se define como el número de paquetes recibidos en el nodo con el número de paquetes enviados al nodo. Se promedian los PDR de todos los paquetes recibidos con éxito en el nodo. Con el fin de calcular el promedio PDR se mide el número de paquetes recibidos con éxito en el sumidero y se divide por el número de los paquetes enviado de todos los nodos hacia el sumidero. Su valor ideal es de 1 (o 100 %), sin embargo, es un ideal muy difícil de alcanzar en este tipo de redes.
- La tercera métrica es la latencia. Se mide con el retardo promedio entre la transmisión de un evento y la recepción en el sumidero. Aunque es posible utilizarla como una métrica que no exceda un cierto valor. También, puede ser utilizada como una métrica aditiva agregada, donde el valor se actualiza a lo largo de la ruta para reflejar la latencia camino [33]. Se utilizará como indicador de calidad de servicio, cuyo valor ideal es cero. No es posible que una red funcionando no ocupe tiempo de procesamiento de paquetes en cada nodo, por lo que se trata de reducir su valor.

3.6.2. Recopilación de información

La recopilación de información se realiza modificando directamente los archivos del sistema operativo Contiki, insertando un

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

script que visualizará la información requerida en tiempo real de las variables estudiadas por cada nodo de la red simulada. Para mayor información sobre el *script* ver anexo 1, y sobre la visualización de datos en el simulador ver anexo 4.

3.6.3. Organización y sistematización de datos

Para el proceso de organización de la información recopilada se agrega el mensaje `printf` en la ejecución de la función objetivo (ver anexo 1) lo que nos permite la publicación de los datos estudiados en la ventana *Radio Messages* con las siguientes estructuras:

Informacion del nodo parent (NODO_ID, NODO_IP, NODO_LINKMETRIC).

Informacion de vecinos directos (NODO_ID, NODO_IP,)

Una vez exportada la información generada por las simulaciones a archivos planos, se filtran los resultados organizados mediante esta estructura. Este resultado permitió y/o permite exportar los resultados a diferentes entornos gráficos, como Excel, o a motores de bases de datos.

Para el caso se utilizó el sistema de hojas de cálculo Excel donde se organizaron los datos filtrados en forma de tablas y se generaron los gráficos para realizar el análisis de datos (ver capítulo 4).

3.7. ESCENARIOS Y PRUEBAS DE SIMULACIÓN

En este estudio, teniendo en cuenta los pasos en el anexo 3, se ha simulado una red con un nodo de sumidero, y se utiliza topología con distribución de nodos en forma aleatoria con el fin de distribuir los nodos en un área de 250.000 m² (ver Figura 5). Se diseña la red

Diseño y simulación de la red

LLN utilizando MRHOF y la métrica propuesta para su comparación BFETX mediante simulaciones bajo diferentes densidades de nodos, con un nodo receptor o sumidero adicional. Son dichas densidades de nodos las que definen los escenarios de prueba. Las posiciones son generadas aleatoriamente por el simulador, y por ello, puede que algún nodo quede desconectado de la red y no participe de la transmisión. Además, se investigó el comportamiento de RPL en términos de relación de entrega de paquetes (con un número de 200 paquetes entregados, el rango de transmisión está en 100 metros) y el consumo de energía. Los principales parámetros RPL por defecto utilizados en las simulaciones se muestran en la Tabla 7 [3].

Tabla 7. Resumen de parámetros de simulación

Parámetros	Valor
Área	500m*500m
Retardo de arranque por nodo	1 seg
Número de Nodos a comparar	20, 40,50 y 100
Rango TX (de transmisión)	100m
Tiempo max. simulación	4500 seg
Protocolo de red	RPL
Funciones Objetivo a comparar	OFO, MRHOF, BFETX
Funciones Objetivo propuestas por otros autores a comparar	PHETX, BFETX
Estándar	802.15.4
Topología	Aleatoria
Número de paquetes	200
Modelo de radio	UDG

Cada uno de los escenarios simulados de la red de sensores inalámbricos multi salto fue probado en términos de calidad de servicio con las funciones OF0, MRHOF y BFETX respectivamente (ver anexo 1).

Métrica con calidad de servicio para el protocolo de enrutamiento RPL

The screenshot displays the SimOfoxosky - Cooja: The Contiki Network Simulator interface. The interface is divided into several panels:

- Network Topology (Top Left):** A circular network diagram with nodes and links. Nodes are labeled with numbers 1 through 16. The network is mostly green, indicating a healthy state, with some nodes showing 100.0%.
- Radio Messages (Top Middle):** A list of messages with columns for Time, From, To, and Data. The messages are:

Time	From	To	Data
236597	4	1	62: 15:4 0 0012:7403:0004:0404 0012:7403:0001:0101 FHC 11066304 001E...
236600	4	4,13	62: 15:4 0 0012:7404:0004:0404 0012:7401:0001:0101 FHC 11066304 001E...
236603	1	4,13	5: 15:4 A 102001342 97
237259	18	*	82: 15:4 0 0012:7412:0012:1212 0012:7410:0010:1010 IPV6 04020402 0012...
237262	18	*	82: 15:4 0 0012:7412:0012:1212 0012:7410:0010:1010 IPV6 04020402 0012...
237266	18	19	82: 15:4 0 0012:7412:0012:1212 0012:7410:0010:1010 IPV6 04020402 0012...
237269	18	16	82: 15:4 0 0012:7412:0012:1212 0012:7410:0010:1010 IPV6 04020402 0012...
237272	16	18,20	5: 15:4 A 10200064F 4D
237291	16	*	62: 15:4 0 0012:7410:0010:1010 0012:7401:0001:0101 FHC 11066304 001E...
237294	16	*	62: 15:4 0 0012:7410:0010:1010 0012:7401:0001:0101 FHC 11066304 001E...
237296	16	*	62: 15:4 0 0012:7410:0010:1010 0012:7401:0001:0101 FHC 11066304 001E...
237299	16	*	62: 15:4 0 0012:7410:0010:1010 0012:7401:0001:0101 FHC 11066304 001E...
237302	1	16	5: 15:4 A 102002248 87
- File Editor (Top Right):** A window titled 'File Edit Analyzer Payload' showing the same radio message log.
- Simulation Control (Bottom Left):** A panel with buttons for Start, Pause, Step, Reload, and Run Speed limit. The time is 03:57.463 and the speed is ---.
- Variable Watcher (Bottom Right):** A window titled 'Variable Watcher (Sky 1)' showing the variable name 'cc2420_packets_read' with a value of 200.
- Control Panel (Bottom Middle):** A panel with text instructions:
 - The control panel controls the simulation.
 - Start starts the simulation.
 - Pause stops the simulation.
 - The keyboard shortcut for starting and pausing the simulation is Ctrl+S.
 - Stop runs the simulation for one millisecond.
 - Reload reloads and restarts the simulation.
 - Simulation speed is controlled via the Speed limit menu.

Figura 8. Simulación de la red inalámbrica en Cooja

Diseño y simulación de la red

A continuación, se describe brevemente cada escenario en las pruebas realizadas (ver Figuras 6, 7, 8 y 9) donde el área marcada en color verde indica el alcance que tiene el nodo sumidero respecto a los demás nodos y cada una de las flechas indica la comunicación que hay entre nodos en el momento de la simulación:

3.7.1. Escenario I

En este escenario se trabaja con 20 nodos, como lo muestra la Figura 6 en el despliegue de los sensores en el área fijada, donde un nodo más asume como sumidero.

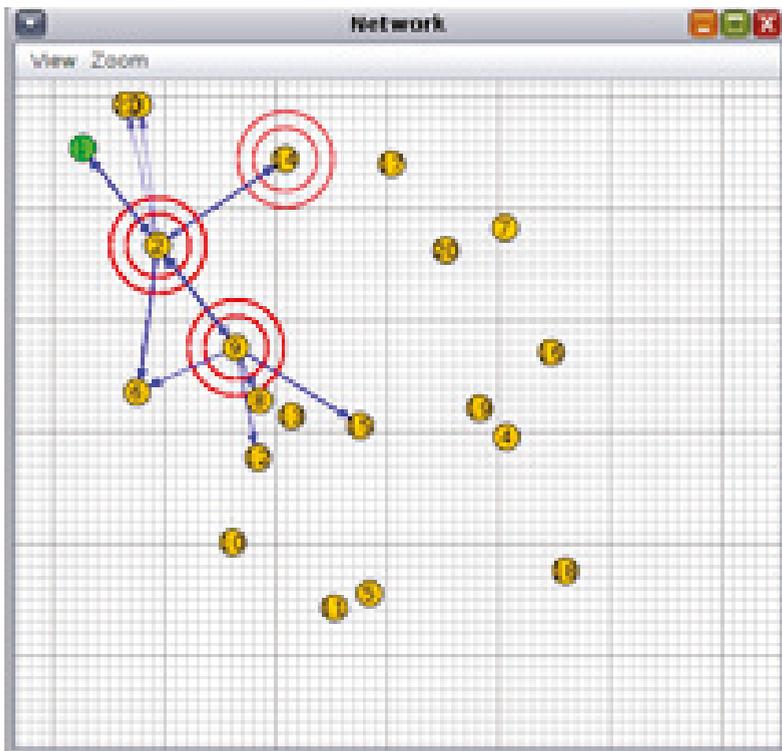


Figura 9. Escenario I

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

Debido a la baja densidad, la probabilidad de formar rutas de transmisión de paquetes de hasta 10 nodos es la más baja de todos los escenarios, mientras que la probabilidad de obtener nodos aislados es mayor; sin embargo, el área seleccionada y el alcance de los nodos reducen estos problemas.

3.7.2. Escenario II

Con 40 nodos, como lo muestra la Figura 7, en el despliegue de los sensores de forma aleatoria en el área fijada para su respectiva simulación.

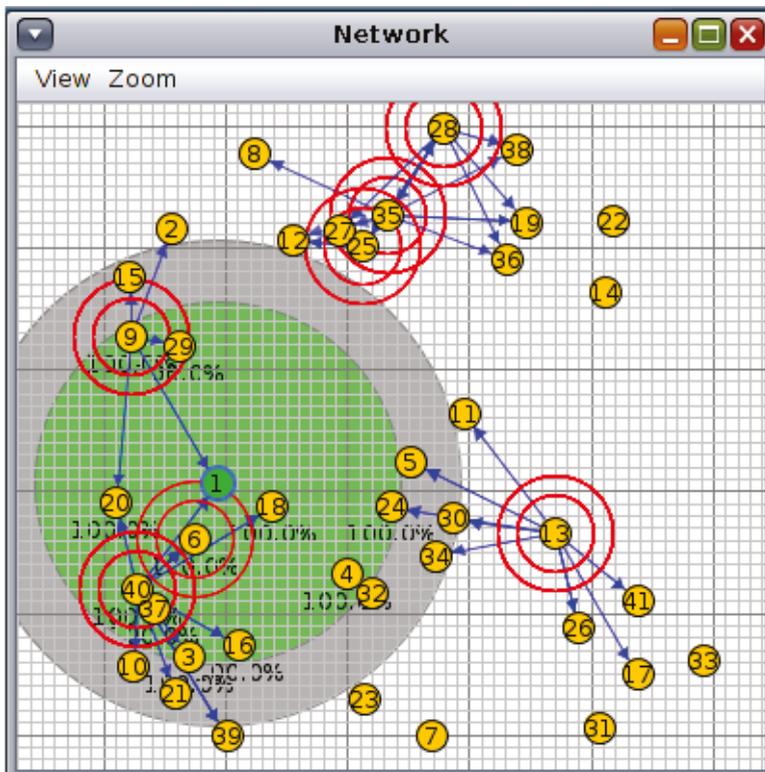


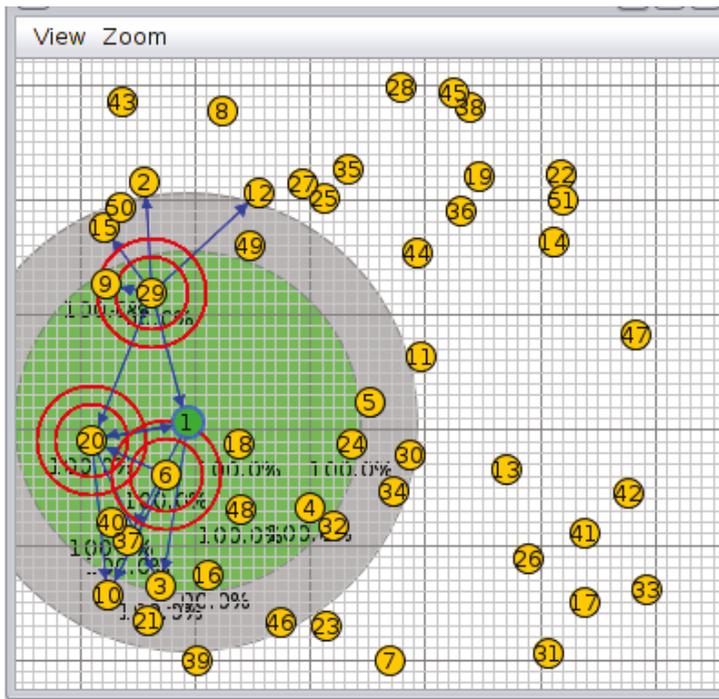
Figura 10. Escenario II

Diseño y simulación de la red

En dicha figura se encuentran un número de 41 nodos, teniendo en cuenta que el nodo número 1 asume como sumidero por defecto. La densidad de nodos es mayor que el escenario anterior, y por ende la probabilidad de obtener nodos aislados desde el inicio de la simulación es bastante baja y la probabilidad de formar rutas de transmisión de paquetes de hasta 10 nodos es también mayor a medida que se va produciendo desgaste de nodos.

3.7.3. Escenario III

Con 50 nodos, como lo muestra la Figura 8, al igual que la anterior figura, muestra el despliegue de los sensores con un nodo asumiendo como sumidero por defecto.

**Figura 11. Escenario III**

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

La densidad de nodos es mayor que el escenario anterior, y por ende la probabilidad de obtener desde el inicio de la simulación nodos aislados es bastante baja y la probabilidad de formar rutas de transmisión de paquetes de hasta 10 nodos es también mayor a medida que se va produciendo desgaste de nodos.

3.7.4. Escenario IV

Con 100 nodos como se muestran en la Figura 9, se configuran al igual que los demás escenarios los parámetros establecidos en la Tabla 7, con el despliegue de los nodos en forma aleatoria para analizar el comportamiento de la red con una mayor densidad de nodos.

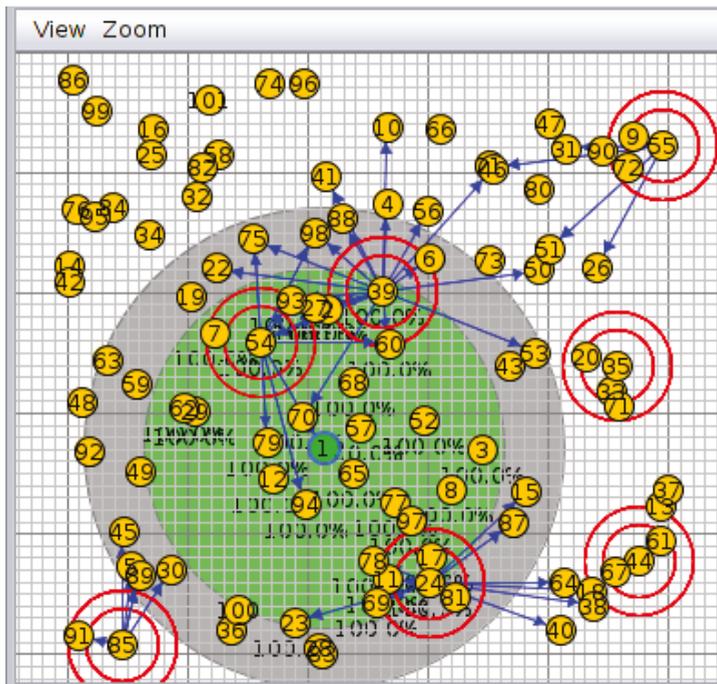


Figura 12. Escenario IV

Diseño y simulación de la red

La densidad de nodos es la más alta, la probabilidad de obtener nodos aislados es mucho menor que todos los escenarios anteriores y la probabilidad de formar rutas de transmisión de paquetes de hasta 10 nodos es la más alta.

4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Mediante las simulaciones, se hicieron comparaciones entre la nueva función objetivo propuesta BFETX con OF0 y MRHOF; se tomaron varios experimentos, como se indica en la Tabla 4 en el simulador Cooja; también se simula y compara la función objetivo BFETX con una función objetivo propuesta por otros autores PHETX [3].

89

Para realizar una adecuada comparación del desempeño de las métricas de enrutamiento, se presentan las gráficas de los resultados con eje X, denotando el número de saltos para las métricas latencia, pérdida de paquetes y consumo de energía; de esta forma se identifica la evolución de las métricas durante el recorrido del paquete por una ruta. A mayor número de nodos, mayor la probabilidad de que aumente el número de saltos. En cuanto al tiempo de vida, el eje X se grafica por número de nodos para establecer el impacto de las métricas comparadas en los diferentes escenarios.

Debido a la configuración de los escenarios (en particular por el número y alcance de los nodos y el área del terreno), las rutas

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

formadas tienden a un máximo de 10 saltos entre los nodos por ruta. Por lo tanto, a continuación se compara el desempeño de las funciones objetivo a medida que el paquete recorre una ruta con un número determinado de saltos (de 1 a 10 nodos). En las Figuras 14 a 17, las funciones objetivo OF0, MRHOF, BFETX y el caso ideal de la respectiva métrica (ver epígrafe 1.6), se representan con los colores rojo, amarillo, azul y verde respectivamente.

4.1. RESULTADOS DE OF0, MRHOF, BFETX EN LATENCIA DE LA RED

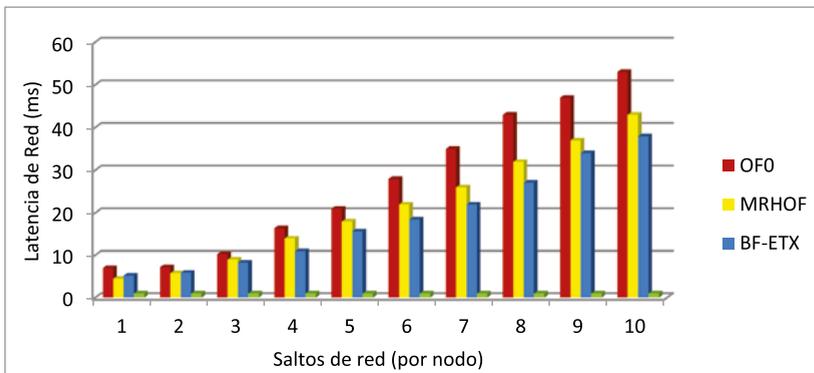


Figura 13. Latencia de Red

En la Figura 13, el eje Y representa la suma de retardos temporales dentro de la red (ver epígrafe 3.8.1 inciso 1), y el caso ideal es cero por ciento (0 %). La latencia de OF0 y MRHOF se presenta frente a BFETX como de mayor porcentaje; si se observa la gráfica, comparando BFETX con MRHOF, la diferencia de su ventaja no es tan superior, pero aun así presenta mejor rendimiento. Esto se debe a que hace una óptima selección de las rutas, es decir, el cálculo para seleccionar caminos con mayor número de nodos amigos o vecinos para el envío de paquetes lo hace superior a las otras dos métricas.

Discusión de resultados obtenidos

4.2. Resultados de OF0, MRHOF, BFETX en Relación de entrega de paquetes

En la Figura 14, las funciones objetivo OF0, MRHOF y la propuesta en este trabajo BFETX, se muestran gráficamente los resultados derivados de las simulaciones. El eje Y representa la tasa (%) de entrega de paquetes (ver epígrafe 3.8.1 inciso 2); el caso ideal es cien por ciento (100 %) de entrega de paquetes. Al analizar los resultados de las funciones objetivo estandarizadas y BFETX, se comprueba que la tasa de entrega de paquetes de BFETX es ligeramente mejor en un 5 % más que MRHOF, pero muy superior (21 %) más que OF0, lo que demuestra la validez de BFETX.

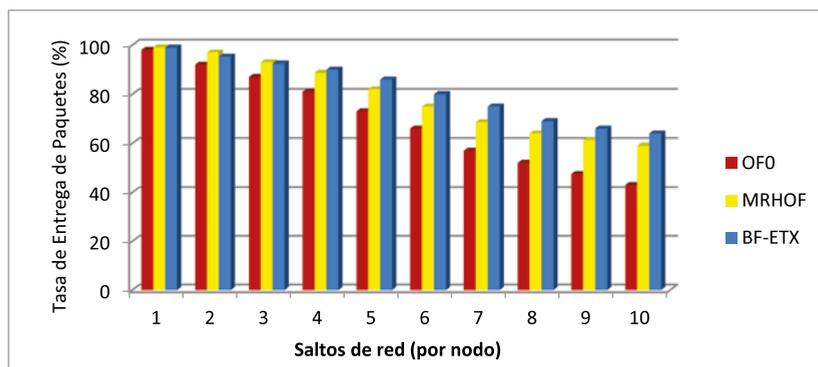


Figura 14. Relación de entrega de paquetes

4.3. RESULTADOS DE OF0, MRHOF, BFETX EN CONSUMO DE ENERGÍA DE LA RED

Con el fin de estimar con precisión el consumo de energía, se utilizó el porcentaje de radio sobre tiempo, dado que del radio depende el consumo de corriente en los nodos sensores (ver epígrafe 1.8.3).

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

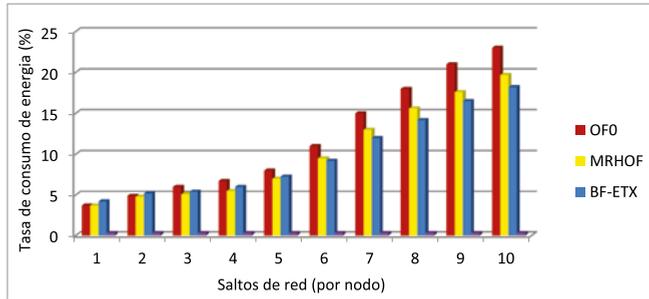


Figura 15. Consumo de energía

En la Figura 15, el eje Y representa la tasa (%) de consumo de energía, y el caso ideal es cero por ciento (0 %). Cuando la red es pequeña, por motivos de cálculos complejos, BFETX puede consumir más energía que las funciones objetivo estandarizadas OF0 y MRHOF, como se observa en los 5 primeros saltos de red. Sin embargo, cuando la red se expande, BFETX puede mantener mejores conexiones gracias al proceso que realiza para seleccionar mejores rutas con mejores vecinos, y por ende presentar menor consumo de energía, 1,5 % menos que MRHOF; mientras que OF0 presenta un alto consumo de energía, un 4,8 % más; esto es ocasionado por la debilidad de sus conexiones.

4.4 RESULTADOS DE OF0, MRHOF, BFETX EN TIEMPO DE VIDA DE LA RED

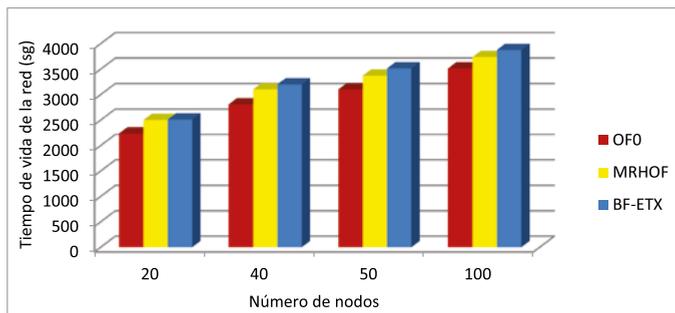


Figura 16. Tiempo de vida de la red

Discusión de resultados obtenidos

En la Figura 16, el eje Y constituye el tiempo de vida en segundos (seg) de la red (ver epígrafe 1.6.7), donde el tiempo máximo estipulado para la simulación es de 4500 seg (1 hora y 15 min), y el eje X representa la cantidad de nodos utilizados en cada escenario de simulación, por lo tanto, la gráfica muestra el tiempo de vida por escenario. Lo anterior valida la optimización de BFETX en cuanto a la vida útil de la red; esto debido al proceso de selección para identificar la mejor ruta con mejores vecinos que puedan respaldar al nodo sensor en caso de agotamiento. Es así como se evita la pérdida de paquetes o latencia, ya que a mayor pérdida de paquetes, mayor retransmisiones y a su vez mayor consumo de energía.

4.5 RESULTADOS DE BFETX Y PHETX

En esta sección se realizan comparaciones con la función objetivo [6] denominada PHETX, donde el número de saltos y el recuento de transmisión esperado se combinan para diseñar su nueva métrica de enrutamiento (ver epígrafe 1.8.5).

4.5.1. Latencia de red entre BFETX y PHETX

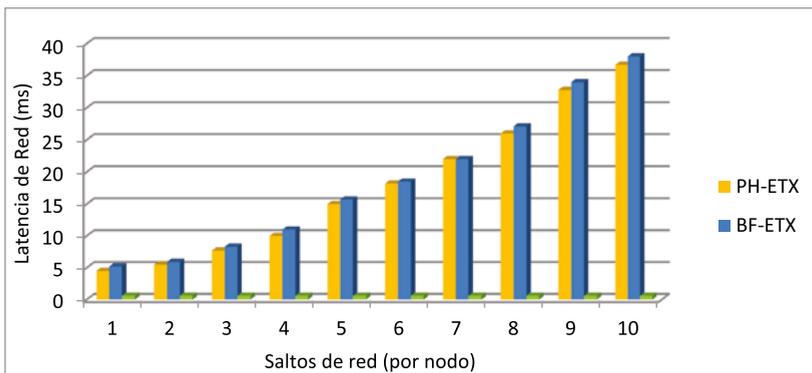


Figura 17. Latencia de red entre BFETX y PHETX

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

En la Figura 17, en comparación con las anteriores funciones objetivos, BFETX presenta una menor latencia de red, lo que la hace eficiente a la hora de seleccionar las rutas con mayor número de vecinos y así mejor respaldo; pero comparándola con PHETX, BFETX presenta el mismo rendimiento, aunque levemente inferior, pero sí de una manera óptima cuando la red se hace densa (mayor número de vecinos) y así evita el retardo por aumento del número de nodos. Esto se debe a que BFETX es un poco más compleja en el cálculo del ETX.

4.5.2. PDR entre BFETX y PHETX

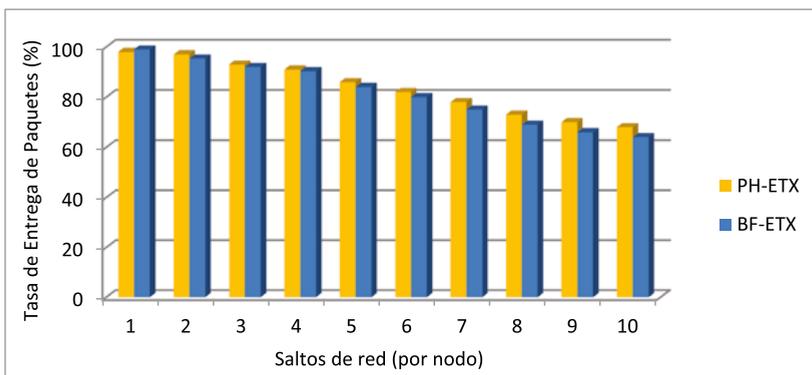


Figura 18. PDR entre BFETX y PHETX

En la Figura 18, PHETX presenta un mejor rendimiento en cuanto a la entrega de paquetes, pero cabe notar que PH-ETX trabaja bajo el cálculo del promedio de los ETX, lo que no prevé el agotamiento de dichas rutas, y por ende las posibles pérdidas de caminos, mientras que sí se hace en BFETX, el cual soluciona este inconveniente seleccionando la mejor ruta, con mayor número de vecinos de respaldo.

Discusión de resultados obtenidos

4.5.3. Consumo de energía entre BFETX y PHETX

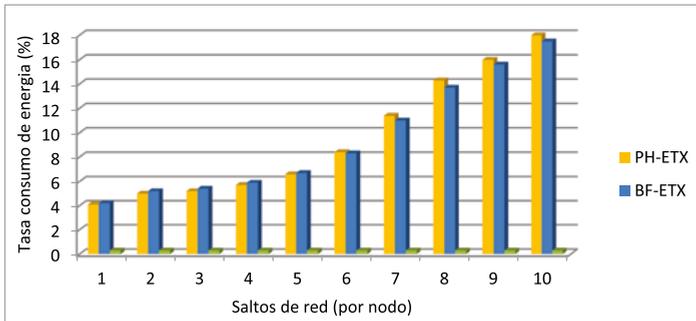


Figura 19. Consumo de Energía entre BFETX y PHETX

En la Figura 19, BFETX puede consumir más energía que la función objetivo PH-ETX propuesta [6], si se observan los 5 primeros saltos de red, al igual que en la Figura 12, comparada con la función objetivo estandarizada MRHOF, presenta un mayor consumo BFETX. En cuanto al consumo de energía, cuando la red se va haciendo más densa presenta un menor porcentaje de consumo en promedio de (0,5 %) respecto a PH-ETX a partir del salto de red 7; esto gracias al cálculo que hace para seleccionar las rutas con mayor número de nodos vecino que brinden respaldo a la hora de agotamiento por cantidad de paquetes enviados o número de saltos, cosa que no tiene en cuenta PH-ETX.

4.5.4. Tiempo de vida entre BFETX y PHETX

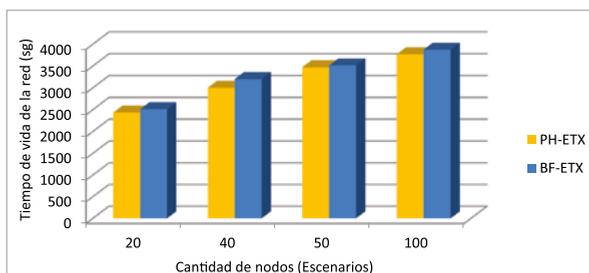


Figura 20. Tiempo de vida entre BFETX y PER HOT ETX

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

Gracias al proceso de selección de rutas, y con el fin de evitar los cuellos de botella por agotamiento de energía, BFETX disminuye evidentemente mucho más el consumo de energía y aumenta en promedio por escenario la vida útil de la red en 218,25 seg. más que PH-ETX (ver Figura 20).

4.5.5. Consumo de la energía sobre la entrega de paquetes entre BFETX y PHETX

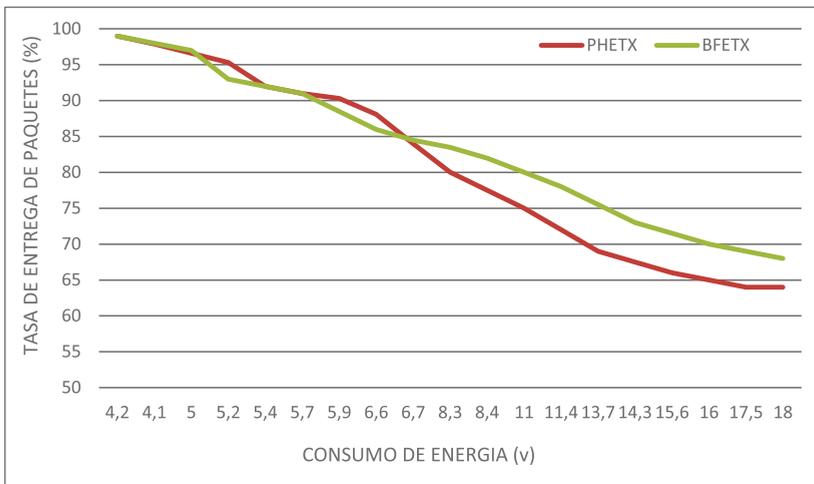


Figura 21. Consumo de energía Vs. PDR.

En la Figura 21, PHETX presenta una menor tasa en cuanto a la entrega de paquetes, lo que no prevé el agotamiento de dichas rutas cuando se aumenta el consumo de energía, mientras que en BFETX, con el aumento del consumo de energía aumenta, reduce significativamente la pérdida de paquetes estimadas en una ruta y propende en el aumento de la vida útil para toda la red, como se observa en la Figura 20.

CONCLUSIONES

Como se observa en el análisis de los resultados de las pruebas realizadas, es posible concluir que:

- Al realizar análisis del funcionamiento de las LLN y del protocolo RPL se logró formular un marco conceptual y un estado del arte apropiado, que hizo posible vislumbrar la necesidad de nuevas métricas de enrutamiento para redes LLN con calidad de servicio como un aporte significativo en su direccionamiento al Internet de las Cosas; dicho resultado responde al primer interrogante de investigación: *“¿Cómo mejorar el rendimiento de enrutamiento en escenarios de redes LLN?”*.
- En el diseño e implementación de una nueva métrica de enrutamiento se logró el bosquejo de un nuevo modelo matemático que supera a las funciones estandarizadas en el cálculo del estado del enlace, el establecimiento de modelos de escenarios para configuración apropiadas para el funcionamiento del protocolo adaptado en redes LLN y la selección de herramientas actuales y apropiadas, respondiendo al

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

segundo interrogante de investigación: “¿Cómo se debe desarrollar su implementación apropiadamente?”.

- En respuesta al tercer interrogante de investigación: “¿De qué manera se mide su desempeño frente a la actualidad en el enrutamiento de las redes LLN?”, en la comparación de los desempeños de las funciones objetivos OF0 y MRHOF, con la nueva función objetivo propuesta, se logró corroborar la validez de la nueva métrica en el protocolo de enrutamiento RPL. Demostrando que la métrica BFETX es más eficiente que las funciones objetivo estandarizadas OF0, MRHOF y PHETX; todos los casos en redes de gran número de nodos en términos de calidad de servicio para el enrutamiento de LLN.

Además, BFETX puede sortear de manera positiva una mejor ruta de enrutamiento en escenarios de redes densas y lograr el objetivo de menor latencia, relación de entrega de paquetes más alto y un menor consumo de energía que los métodos estandarizados y propuestos por otros autores. Lo anterior estimulará a investigaciones posteriores a esta a tener en cuenta algunas métricas de evaluación específicas en el escenario establecido de la red, tal como estructura en continuo cambio o topología dinámica. Con una evaluación adecuada de las métricas de red se podrán detectar problemas de latencia o consumo de energía y poder así lograr una optimización apropiada para seleccionar determinada aplicación.

En campos de aplicación como en Internet de las Cosas, esta investigación aporta directamente a las redes LLN capacidades de enrutamiento más eficientes, permitiéndoles a los nodos de la red ofrecer un mejor rendimiento frente a la calidad de servicio y la sensibilidad a los cambios en el entorno de red, por lo que apoyará la

Conclusiones

solución de futuros interrogantes respecto a las redes de sensores inalámbricos LLN y representa un aporte significativo en el campo de la Ingeniería de Sistemas y la Computación.

TRABAJOS FUTUROS

En el espectro de la investigación de este tipo de redes quedan muy pocos espacios inexplorados de forma general, sin embargo, hay que tener en cuenta las características de este tipo de redes que exigen especificaciones muy precisas para cada caso en su amplia gama de aplicaciones.

De entre dichos espacios más específicos se expone la necesidad de investigar otros tipos de métricas y sus combinaciones, como: despliegue, conservación de energía, modelo de reporte de datos, heterogeneidad de nodos o enlaces, tolerancia a fallas, escalabilidad, movilidad, canal de transmisión, conectividad, cobertura y agregación de datos. Es muy importante el pronto estudio de la relación entre dicho tipo de métricas con la vida útil del nodo, la latencia de los nodos y la relación de entrega de paquetes, lo que permitirá a futuros investigadores definir parámetros para el aprovechamiento de los recursos de los nodos y mejorará importantemente la calidad de servicio de las redes LLN.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S., Balandin, S., Andreev & Y., Koucheryavy. *Internet of things, smart spaces, and next generation networking*, Berlin: Springer, 2013.
- [2] A., Boukerche, B., Turgut, N., Aydin, M., Ahmad & L., Bölöni. *Routing protocols in ad hoc networks: A survey*, *Computer Networks*, pp.3032-3080, 2011.
- [3] P., Sanmartin, R., Sierra, E., Martinez & D., Jabba, *Objective Function BF-ETX for RPL Routing Protocol*, *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 16(8), pp.2275-2281, 2018..
- [4] D., Gascó. COIT, 2010. [En línea]. Available: <http://www.coit.es/publicaciones/bit/bit180-181/53-55.pdf>. [Último acceso: 22 feb 2016].
- [5] P., Tarrío Alonso. *Redes de sensores, fundamentos y aplicaciones, G.d. P.d.D. y Simulacion and U.P.d.* Madrid, ed, 2008.
- [6] IETF. «RFC 6550: RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks», marzo 2012 [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc6550> [Último acceso: marzo 2017].

- [7] A., Pinto, E., De la Hoz Franco & D. C., Pinto. Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas, Inge Cuc, pp. 163-172, 2012.
- [8] P., Wang, D., Zhu & X. Lu. «Wireless sensor networks (WSNs),» *Telecommunication Systems*, 64(1), pp. 113-133, 2017.
- [9] M., Hasan, H., Al-Rizzo & F., Al-Turjman. «Survey on Multipath Routing Protocols for QoS Assurances in Real-Time Wireless Multimedia Sensor Networks», enero 2017 [En línea]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7835615/>.
- [10] M., Lazarescu. «Wireless Sensor Networks for the Internet of Things: Barriers and Synergies In Components and Services for IoT Platforms,» Springer International Publishing, pp. 155-186, 2017.
- [11] B., Del Valle & J., David. «IoT: Tecnologías, usos, tendencias y desarrollo futuro,» Master's thesis, Universitat Oberta de Catalunya. 2015.
- [12] D., Evans. «Internet de las cosas: Cómo la próxima evolución de internet lo cambia todo». abril 2011 [En línea]. Available: http://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf.
- [13] IETF. «RFC 5548: Routing Requirements for Urban Low power and Lossy Networks». marzo 2012 [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc5548> [Último acceso: marzo 2017].
- [14] IETF. «RFC 5826: Home Automation Routing requirements in Low Power and Lossy Networks». abril 2010 [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc5826>. [Último acceso: marzo 2017].

Referencias bibliográficas

- [15] ITU-T. «E.800: Definitions of terms related to quality of service». septiembre 2008 [En línea]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I> [Último acceso: marzo 2017].
- [16] R., Román & J., López. «Integrating wireless sensor networks and the Internet: A security analysis». 2009.
- [17] IETF. «RFC 6552: Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)». marzo 2012 [En línea] Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc6552>. [Último acceso: marzo 2017].
- [18] IETF. «RFC 6719: The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function». septiembre 2012. [En línea] Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc6719> [Último acceso: marzo 2017].
- [19] K., Akkaya & M., Younis. «A survey on routing protocols for wireless sensor networks». Journal of Ad Hoc Networks, p. 325–349, 2005.
- [20] A., Martirosyan, A., Boukerche, R., Werner & N. Pazzi. «Energy-aware and quality of service-based routing in wireless sensor networks and vehicular ad hoc networks». Annales des Télécommunications, p. 669–681, 2008.
- [21] M., Zennaro. «Introducción a las Redes de sensores inalámbricos». 2010.
- [22] W., Calderón. «Diseño e implementación de un sistema genérico de monitoreo usando las redes de sensores inalámbricos con el protocolo 6lowPAN». 2014 [En línea] Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/50050/1/1032428362.2015.pdf>.
- [23] E., Flores. «Redes de Sensores Inalámbricas,» octubre 2012 [En línea]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/>

- bitstream/handle/10902/1288/349251.pdf?sequence=1.
[Último acceso: 11 06 2016].
- [24] J. C. R., Ramirez. «Evaluación de desempeño de la Plataforma de Redes de Sensores Inalámbricos», 2009 [En línea]. Available: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/3360/2/129985.pdf>. [Último acceso: marzo 2017].
- [25] S., Campam. «Sistema operativo para redes inalámbricas de sensores». Pontificia Universidad Católica de Chile, p.14, 2012.
- [26] Levis, P., Madden, S., Polastre, J., Szewczyk, R., Whitehouse, K., Woo, A., & Culler, D. «TinyOS: An operating system for sensor networks. In Ambient intelligence . Springer Berlin Heidelberg». pp.115-148, 2005.
- [27] IETF. «RFC 5673: Industrial Routing requirements in Low Power and lossy Networks». octubre 2009 [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc5673>. [Último acceso: marzo 2017].
- [28] M., Felsche, A., Huhn & H., Schwetlick. «Routing protocols for 6LoWPAN,» Lecture Notes of the Institute for Computer sciences. Social informatics and Telecommunications Engineering, pp. 71-83,, 2012.
- [29] H., Kermajani & C., Gomez. «Route change latency in Low Power and Lossy wireless Networks using RPL and 6LoWPAN Neighbor Discovery». IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), pp.937 - 942, 2012.
- [30] C., Chang & Y., Lin. «Composite Metrics for Routing in Low Power and Lossy Networks». Department of Computer Science, National Taichung University of Education Taichung, Taiwan, 2013.

Referencias bibliográficas

- [31] JeonggilKo, A., Terzis, S., Dawson-Hag-Gerty, D., Culler, J., Hui & P., Levis. «Connecting low-power and lossy networks to the Internet,» Communications Magazine, IEEE, vol. 49(4), pp. 96-101, 2012.
- [32] N., Thanh, N., De Caro, W., Colitti, A., Touhafi & K., Steenhaut. «Comparative Performance Study of RPL in Wireless Sensor Networks». IEEE 19th Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), pp. 1-6, 2012.
- [33] IETF. «RFC 6551: Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks». marzo 2012 [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc6551>. [Último acceso: marzo 2017].
- [34] P., Karkazis, H., Leligou, L., Sarakis, T., Zahariadis, P., Trakadas, T., Velivassaki & C., Capsalis. «Design of Primary and Composite Routing Metrics for RPL - Compliant Wireless Sensor Networks». Proceeding of IEEE Telecommunications and Multimedia Conference, pp. 13-18, 2012..
- [35] CISCO. «Notas Técnicas de Troubleshooting,» mayo 2008 [En línea]. Available: http://www.cisco.com/cisco/web/support/LA/7/73/73348_redist.html. [Último acceso: 22 06 2016].
- [36] O., Gaddour, A., Koubâa, N., Baccour & M., Abid, «OF-FL: QoS-aware fuzzy logic objective function for the RPL routing protocol, in Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt) 2014 12th International Symposium on». 2014 [En línea].
- [37] IETF. «RFC 5835: Framework for Metric Composition». marzo 2012 [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc5835>.

- [38] R. M., Ruairi, M. T., Keane & G., Coleman. «2A Wireless Sensor Network Application Requirements Taxonomy. Sensor Technologies and Applications». 2008 [En línea].
- [39] P., Karkazis, P., Trakadas, H. L. C. L., Sarakis, I., Papaefstathiou & T., Zahariadis. «Evaluating routing metric composition approaches for QoS differentiation in low power and lossy networks. Wireless networks». pp. 1269-1284, 2013.
- [40] J., Garbarino & A., Echeverría. Protocolos para redes inalámbricas de sensores. España: Acad Mica, 2012.
- [41] N., Javaid, A., Javaid, I., Khan & K., Djouani. «Performance study of ETX based wireless routing metrics». Computer, Control and Communication, pp.1-7, 2009.
- [42] P. M., Esposito, M. E. M., Campista, I. M., Moraes, L. H. M., Costa, O. C. M., Duarte & R. M. G., «Implementing the expected transmission time metric for OLSR wireless mesh networks». vol. In 2008 1st IFIP Wireless Days. IEEE, pp. 1-5, 2008.
- [43] Yang & J., Wang. «Design guidelines for routing metrics in multihop wireless networks». De In INFOCOM 2008. The 27th conference on computer communications, 2008.
- [44] E., Aguirre, L., Pedraza & P., Puerta. «Evaluación del establecimiento de la métrica de enrutamiento WCETT en una red de radio cognitiva». marzo 2013 [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2013000100006.
- [45] Y., Yang, J., Wang & R., Kravets. «Interference-aware Load Balancing for Multihop Wireless Networks». Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-champaign, pp.2005-2526, 2005.

Referencias bibliográficas

- [46] Y., Yang, J., Wang & R., Kraverts. «Designing Routing Metric for Mesh Networks». WiMesh, 2005..
- [47] Wei Xiao, Nan Jiang, Jianfei Liu, Hongzhou Shi. An Optimization of the Object Function for Routing Protocol of Low-Power and Lossy Networks. C. B. Institute of Computing Technology, Ed., China, 2014.
- [48] K., Machado, D., Rosário, E., Cerqueira, A., Loureiro, A., Neto & J., Neuman. «A Routing Protocol Based on Energy And Link Quality for Internet of Things Applications». 2013.
- [49] N., Accettura, L., Grieco, G., Boggia & P., Camarda. «Performance analysis of the RPL routing protocol. In Mechatronics (ICM),» 2011 IEEE International Conference on. pp.767-772, 2011.
- [50] E., Ancillotti, R., Bruno & M., Conti. «Reliable data delivery with the ietf routing protocol for low-power and lossy networks». IEEE Transactions on Industrial Informatics, pp.1864-1877, 2014.
- [51] J., Vasseur. «Patent No. 8, 996, 666: Quality of service (QoS) configuration in low-power and lossy networks». Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2015.
- [52] N., Santoro. «Design and Analysis of Distributed Algorithms». Wiley, 2014.
- [53] Moteiv Corporation. «Ultra low power IEEE 802.15.4 compliant». junio 2006 [En línea]. Available: <http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>. [Último acceso: 11 03 2016].
- [54] N., Tsiftes, J., Eriksson & A., Dunkels. «Low-power wireless IPv6 routing with ContikiRPL». De Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2010.

- [55] Contiki-os.org. «Contiki: The Open Source OS for the Internet of Things,» Thingsquare, [En línea]. Available: <http://www.contiki-os.org/index.html>. [Último acceso: marzo 2017].
- [56] «SHOCKFISH» [En línea]. Available: <http://www.shockfish.com>. [Último acceso: 11 06 2016].
- [57] «EMBER» [En línea]. Available: <http://www.ember.com>. [Último acceso: 11 06 2016].
- [58] «SUNSPOTWORLD» [En línea]. Available: <http://www.sunspotworld.com>. [Último acceso: 11 06 2016].
- [59] «NANORK» [En línea]. Available: <http://www.nanork.org>. [Último acceso: 11 06 2016].
- [60] Ignacio de Mula, Germán Ferrari, Gabriel Firme. "Estudio, Análisis y Diseño de redes de sensores Inalámbricas con Contiki OS. Facultad de ingeniería - UDELAR, 2009.
- [61] Gartner. «TyN Internet of Things». marzo 2017 [En línea]. Available: <http://www.tyniot.com/las-ciudades-inteligentes-utilizaran-9-700-millones-de-objetos-conectados-para-2020/>.
- [62] K., Sohraby, D., Minoli & T. Znati. «Wireless Sensor Networks». Wiley, 2007. [En línea].
- [63] S., Tilak, N. B., Abu-ghazaleh & W., Heinzelman. «A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models. ACM Mobile Computing And Communications Review». 2002 [En línea].
- [64] IETF. «RFC 4919: IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals». agosto 2007 [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc4919>. [Último acceso: marzo 2017].

Referencias bibliográficas

- [65] Jeonggilko, O., Gnawali, D., Culler & A., Terzis. «Evaluating the Performance of RPL and 6LoWPAN in TinyOS». In: Proceedings of the workshop on extending the internet to low power and lossy networks, 2011.
- [66] Z., Wei, Z., Dongbo & Q., Daji. «Comparative study of routing metrics for multi- radio multi-channel wireless networks». Wireless Communications and Networking conference. IEEE, pp.270-275, 2006.
- [67] J., Zurita. «Tutorial de redes de sensores *ad hoc* con eficiencia en energia». ResearchGate, 2006.
- [68] IETF. «RFC 5867: Building Automation Routing requirements in Low power and lossy Networks». junio 2010 [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc5867>. [Último acceso: marzo 2017].
- [69] BTNODE. «BTnodes - A Distributed Environment for Prototyping Ad Hoc Networks». abril 2008 [En línea]. Available: <http://www.btnode.ethz.ch>. [Último acceso: 11 06 2016].
- [70] M., Friedemann & F., Christian. «From the Internet of computers to the Internet of Things». 2010.
- [71] ITU-T. «Rec. I.350: Aspectos generales de Calidad de Servicio y de Calidad de Funcionamiento en las Redes Digitales Incluidas las Redes Digitales de Servicios Integrados». agosto 2008 [En línea]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-I.350/es>.
- [72] ITU-T. «ITU Internet reports 2005: The Internet of Things». noviembre 2005 [En línea]. Available: <http://www.itu.int/osg/spu/publications/internetofthings>.
- [73] A., Palma. «Análisis de protocolos de enrutamiento para redes de sensores inalámbricos». diciembre 2009 [En

Métrica con calidad de servicio
para el protocolo de enrutamiento RPL

línea]. Available: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/8493/PFC_AntonioManuel_Palma_Gomez.pdf?sequence=1.

- [74] N., Javaid, A., Javaid, I. A., Khan & K., Djouani, *et al.* "Performance study of ETX based wireless routing metrics". Computer, Control and Communication. pp.1-7, febrero 2009.
- [75] Thingsquare. «Contiki: The Open Source OS for the Internet of Things». enero 2005 [En línea]. Available: <http://www.contiki-os.org>. [Último acceso: marzo 2017].