

Evaluación del Desempeño de un Protocolo RPL para la Comunicación de Datos del Estado
de una Micro Red Eléctrica

Zaray Viviana Rey Viviescas

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniera de Sistemas

Director

Pedro Javier Trujillo Tarazona
Ing. de Sistemas, Mg. Informática

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática
Bucaramanga

2018

Agradecimientos

A Dios en primera instancia, quien es la base de mi fe, por permitirme alcanzar mis objetivos dándome la fuerza necesaria para luchar por cada uno de ellos.

A mis padres por el apoyo moral, cognitivo y económico para poder culminar mis estudios y forjarme como profesional.

A mi director de tesis por toda su guía y gestión de apoyo e interés durante el desarrollo de mi proyecto de grado y motivación a realizar más de lo que se puede.

A la Escuela de Ingeniería de Sistemas por el préstamo de recursos necesarios para implementar las simulaciones oportunas para la presente investigación.

A Nelson por su apoyo, motivación, dedicación y confianza durante tantos semestres como jefe, maestro y amigo.

A mis compañeros, soporte durante toda la carrera. A Daniel, Javier, Santiago y Lizeth por toda su colaboración incondicional e impecable amistad. A German, fiel compañero por su absoluto apoyo, amor y comprensión.

Y a todos los docentes que de cualquier manera influyeron con sus enseñanzas y consejos para poder desarrollarme como ingeniera teniendo los conocimientos necesarios para poder desarrollar la presente tesis.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos.....	17
1.1 Objetivo general.....	17
1.2 Objetivos específicos	17
2. Marco conceptual	17
2.1 Redes de sensores inalámbricos (wireless sensor networks)	17
2.1.1 Redes de baja potencia y con pérdidas (LLN).....	18
2.1.2 IEEE 802.15.4.....	19
2.1.3 Herramientas de simulación.....	23
2.2 Protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia y con pérdidas, RPL.....	26
2.2.1 Construcción de la topología	27
2.2.2 Algoritmo trickle.....	32
2.3 Microrredes eléctricas	34
2.3.1 Esquemas de gestión de energía basados en la comunicación.....	36
3. Metodología	37
4.Simulación.	39
5.Resultados.....	47
5.1 Análisis comparativo.....	53
6.Conclusiones	55
7.Recomendaciones	56
Referencias bibliográficas.....	57

Lista de Tablas

Tabla 1: Características de la capa física de IEEE 802.15.4. Tomado de (Kermajani & Gómez Montenegro, 2014)	21
Tabla 2: Comparación de simuladores de red de código abierto. Tomada de (Saad, Chauvenet, & Tourancheau, 2011)	25
Tabla 3: Escenarios Urbanos de Simulación	44
Tabla 4: Escenarios Rurales de Simulación	44
Tabla 5: Parámetros utilizados para escenarios urbanos de simulación	45
Tabla 6: Parámetros utilizados para escenarios rurales de simulación	45
Tabla 7: Mensajes en las micro redes y requisitos de latencia. Tomada de (Marzal, Salas, Gonzáles Medina, Garcerá, & Figueres, 2017)	53
Tabla 8: Latencia y ancho de banda en aplicaciones Smart Grid. Tomada de (Tsado, Lund, & Gamage, 2015).....	54

Lista de Figuras

Figura 1: Arquitectura LR-WPAN. Tomada de (Working Group of IEEE 802.15.4 Standards Association, 2015)	20
Figura 2: Estructura del PDDU del estándar IEEE 802.15.4	21
Figura 3: Formato de la trama de datos de IEEE 802.15.4	23
Figura 4: Instancia RPL. Tomada de (Winter, 2012).....	28
Figura 5: Versión de un DODAG. Tomada de (Winter, 2012)	28
Figura 6: Formación de un grafo DODAG. Tomada de (Canalejo & Estepa Alonso, 2017)..	31
Figura 7: Diagrama de flujo del algoritmo Trickle. Tomada de (Ali, 2012)	33
Figura 8: Diagrama de metodología. Tomado de (Rojas, 2012).....	39
Figura 9: Interfaz Mote Output	41
Figura 10: Interfaz de Radio Messages.....	42
Figura 11: Interfaz Network.....	43
Figura 12: Mapa de rutas de la topología.....	46
Figura 13: Datos recolectados a partir de la herramienta Collect View de Contiki	46
Figura 14: Mote Output de una simulación.	47
Figura 15: Nodos totales vs Nodos conectados en escenarios urbanos y rurales	48
Figura 16: Paquetes recibidos y perdidos en escenarios urbanos y rurales	48
Figura 17: Cantidad de paquetes recibidos por nodo.....	49
Figura 18: Promedio de saltos vs Cantidad de nodos en escenarios urbanos y rurales	49
Figura 19: ETX vs Cantidad de nodos en escenarios urbanos y rurales	50
Figura 20: Tiempo entre paquetes vs Cantidad de nodos en escenarios urbanos y rurales.	50

Figura 21: Energía consumida vs Cantidad de nodos en escenarios urbanos y rurales	51
Figura 22: Consumo de energía por los nodos durante una simulación.	52
Figura 23: Latencia promedio vs Cantidad de nodos en escenarios urbanos y rurales.....	52

Lista de Apéndices

- A. Datos de simulaciones rurales
- B. Datos de simulaciones urbanas
- C. Datos promedios de simulaciones
- D. Latencia 2500m²
- E. Latencia 67600m²
- F. Latencia 250000 m²
- G. Latencia 17.5 km²

Nota: Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

Glosario

AMI: Advanced Metering Infrastructure (Infraestructura de Medición Avanzada). Sistema integrado de medidores inteligentes, redes de comunicaciones y sistemas de administración de datos que permite la comunicación bidireccional entre los servicios públicos y los clientes.

DAG: Directed Acyclic Graph (Gráfico Acíclico Dirigido). Un gráfico dirigido sin ciclos dirigidos (un gráfico formado por una colección de vértices y bordes dirigidos donde cada borde conecta un vértice con otro, de modo que no hay forma de comenzar en algún vértice v y sigue una secuencia de bordes que eventualmente gira hacia atrás al vértice v de nuevo).

DAO: DODAG Destination Advertisement Object (Objeto de Anuncio de Destino de un DODAG). Propaga información de un nodo hacia los nodos ancestros para soportar tráfico Downward.

Data Sink: Sumidero de datos. Un dispositivo que recopila datos de nodos en una red LLN.

DIO: DODAG Information Object (Objeto de Información de un DODAG). Crea, forma, mantiene y descubre el DODAG. Contiene información de la configuración del DODAG.

DIS: DODAG Information Solicitation (Solicitud de Información del DODAG). Solicita explícitamente mensajes DIO de sus vecinos.

DODAG: Destination-Oriented DAG (DAG Orientado a los Destinos). DAG con una sola raíz.

Downstream: Dirección de datos que viaja desde fuera de la LLN a través de un enrutador de borde LLN o, en general, "más profundo" en el gráfico acíclico dirigido calculado por el enrutamiento protocolo.

IED: Intelligent Electronic Device. Controladores basados en microprocesadores de equipos de sistema de potencia. Los IED reciben datos de sensores y equipos de potencia y pueden emitir

comandos de control, como disparar interruptores si detectan anomalías de voltaje, corriente o frecuencia, o subir/bajar niveles de voltaje para mantener el nivel deseado.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).

IETF: Internet Engineering Task Force (Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet).

IP: Internet Protocol (Protocolo de Internet).

LAN: Local Area Network (Red de Área Local).

LLN: Low-Power and Lossy Network (Red de Baja Potencia y con Pérdidas). Por lo general, está compuesto por muchos dispositivos integrados con energía, memoria y recursos de procesamiento limitados interconectados por una variedad de enlaces, como IEEE 802.15.4 o Wi-Fi de baja potencia.

MP2P: Multipoint-to-Point (Multipunto a Punto). Se usa para describir un patrón de tráfico particular (por ejemplo, flujos de MP2P que recopilan información de muchos nodos que fluyen corriente arriba hacia un nodo colectivo).

MAC: Medium Access Control (Control de Acceso al Medio). Se refiere a los algoritmos y procedimientos utilizados por la capa de enlace de datos para coordinar el uso de la capa física.

OF: Objective Function (Función Objetivo).

P2P: Point to Point (Punto a Punto). Se refiere al tráfico intercambiado entre dos nodos (independientemente del número de saltos entre los dos nodos).

P2MP: Point-to-Multipoint (Punto a Multipunto). Se refiere al tráfico entre un nodo y un conjunto de nodos. Un caso de uso común para el protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia y pérdidas (RPL) implica flujos P2MP desde o a través de una raíz DAG hacia afuera hacia otros nodos contenidos en el DAG.

QoS: Quality of Service. Calidad de Servicio.

RAM: Random Access Memory (Memoria de Acceso Aleatorio). Una memoria volátil.

RPL: Routing Protocol for LLNs (Protocolo de Enrutamiento de Redes de Baja Potencia y Pérdidas).

Sensor: un dispositivo que mide una cantidad física y la convierte en una señal analógica o digital que puede leer un programa o un usuario.

Smart Grid: una amplia clase de aplicaciones para red y automatizar infraestructura de servicios.

WSN: Wireless Sensor Network (Red de Sensores Inalámbricos).

Resumen

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN PROTOCOLO RPL PARA LA COMUNICACIÓN DE DATOS DEL ESTADO DE UNA MICRO RED ELÉCTRICA*

AUTOR: ZARAY VIVIANA REY VIVIESCAS**

PALABRAS CLAVE: RPL, CONTIKIOS, COOJA, REDES, LLN.

DESCRIPCIÓN:

Las redes de baja potencia y con pérdidas conocidas por sus siglas en inglés como Low Power and Lossy Networks (LLN), son una clase de red en la que tanto los enrutadores como su interconexión están restringidos: los enrutadores LLN normalmente operan con restricciones de procesamiento, memoria y energía, y sus interconexiones son caracterizadas por altas tasas de pérdida, bajas velocidades de datos e inestabilidad. (Cisco Systems Inc, 2015)

El protocolo de encaminamiento para redes inalámbricas de baja potencia y redes con pérdidas (RPL) es un protocolo vector-distancia diseñado por el IETF, que podría mejorar la comunicación de datos en una microrred eléctrica cuando se usan redes de baja potencia y con pérdidas en esa comunicación.

En este estudio se revisa el desempeño mediante simulaciones de una implementación del protocolo RPL para aplicarlo en el encaminamiento de datos en redes inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.15.4, estándar que define la familia de facto de las interfaces de radio de bajo costo y comunicaciones inalámbricas de baja potencia, baja velocidad y corto alcance.

El objetivo final de esta tesis consiste en observar, analizar y evaluar el rendimiento del protocolo tomando factores significativos como las métricas de enrutamiento y tiempos de envío de paquetes para deducir cuales son las posibles ventajas y limitaciones en la utilización de este protocolo en LLNs.

Finalizando el desarrollo del presente Trabajo de Grado es posible concluir entre varios puntos, que RPL propone parámetros que hacen posible un mejor enrutamiento de datos aplicable a redes de baja potencia y con pérdidas (LLNs).

* Trabajo de grado en Modalidad de Investigación.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Mg. Pedro Javier Trujillo Tarazona.

Abstract

TITLE: RPL PROTOCOL PERFORMANCE EVALUATION FOR MICROGRID STATUS DATA COMMUNICATION*

AUTHOR: ZARAY VIVIANA REY VIVIESCAS**

KEYWORDS: RPL, CONTIKIOS, COOJA, NETWORK, LLN.

DESCRIPTION:

Low power networks and lossy networks (LLN) are a class of network in which both routers and their interconnection are restricted: LLN routers operate with processing, memory and power restrictions, and their interconnections are characterized by high loss rates, low data rates and instability. (Cisco Systems Inc, 2015)

The routing protocol for low-power and lossy networks (RPL) is a vector-distance protocol designed by the IETF, which could improve the communication of data in an electric microgrid when using low power networks and with losses in that communication.

This study reviews performance through simulations of an implementation of the RPL protocol for use in the routing of data in wireless networks based on the IEEE 802.15.4 standard, which defines family of low-cost radio interfaces and wireless communications with low power, low speed and short range.

The final objective of this thesis is to observe, analyze and evaluate the performance of the protocol taking significant factors such as routing metrics and packet delivery times to deduce what are the possible advantages and limitations in the use of this protocol in LLNs.

Finalizing the development of the present Degree Work it is possible to conclude between several points, that RPL proposes parameters that make possible a better routing of data applicable to Low Power and Lossy Networks (LLNs).

* Undergraduate final Project, research modality.

** Department of Physical-mecanical Engineering. School of System Engineering and Computer Science. Advisor: Mg. Pedro Javier Trujillo Tarazona.

Introducción

El reciente progreso en comunicaciones inalámbricas y las mejoras tecnológicas que han permitido producir dispositivos de comunicación inalámbricos pequeños, económicos y de baja potencia han hecho que las redes de sensores inalámbricos (WSN) sean cada vez más importantes.

Una de las principales características de las WSN está en la limitación con respecto a las capacidades de procesamiento, memoria y fuente de energía. Al ser inalámbricos, los enlaces entre dispositivos suelen presentar pérdidas y por lo general, admiten bajas velocidades de datos. El IETF ha decidido llamar a las redes con estas características *Redes de Baja Potencia y Pérdidas* (LLN por sus siglas en inglés Low-Power and Lossy Networks). (Vasseur, 2014)

En la última década han surgido muchas tecnologías de LLNs ya que las LLN basadas en IP ofrecen una forma abierta y estandarizada de conectar LLN a Internet habilitando Internet de las Cosas (IoT). El IETF anticipó esta necesidad creando el Grupo de Trabajo (WG) sobre IPv6 de baja potencia WPAN (6LoWPAN), que proporciona una capa de adaptación para habilitar y optimizar la transmisión de paquetes IPv6 sobre redes IEEE 802.15.4. De esta manera, el IETF creó el enrutamiento sobre redes de baja potencia y pérdidas con el fin de analizar la idoneidad y/o crear la funcionalidad de enrutamiento basado en IP para LLN, este protocolo de enrutamiento fue denominado *Protocolo de enrutamiento IPv6 para LLN* (RPL). (IETF working group)

El enrutamiento es un factor crucial que influye en la conectividad y el rendimiento del intercambio de información. El rendimiento general de Low Power and Lossy Network (LLN) depende en gran medida de la elección del protocolo de enrutamiento y la calidad de su implementación. Se presenta una breve descripción del protocolo RPL con el fin de estudiar el

desempeño de este para aplicarlo en el encaminamiento de datos en redes inalámbricas IEEE 802.15.4, dentro de un contexto limitado de una microrred eléctrica.

En el próximo capítulo se describen los objetivos de investigación a desarrollar mediante la realización del presente estudio. Los antecedentes y marco conceptual del campo necesarios para comprender los conceptos en este estudio se encuentran organizados en el capítulo 2. En el capítulo 3 se presenta la metodología adoptada para la elaboración de la actual investigación. El desarrollo de la tesis se presenta en el capítulo 4 en donde se llevan a cabo las correspondientes simulaciones de estudio. En el capítulo 7 se muestran los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en el capítulo anterior. Finalmente, en el capítulo 8 se exponen las conclusiones obtenidas a partir de la investigación elaborada y en el capítulo 9 se mencionan algunas recomendaciones.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de un protocolo RPL para la comunicación de datos del estado de una microrred eléctrica.

1.2 Objetivos Específicos

- Definir una herramienta que permita simular redes inalámbricas que soporten las características necesarias para realizar pruebas de desempeño del protocolo RPL en redes IEEE 802.15.4
- Proponer escenarios de prueba para evaluar el desempeño del protocolo RPL en redes IEEE 802.15.4
- Realizar y analizar las pruebas de desempeño del protocolo RPL con base en los escenarios propuestos.

2. Marco Conceptual

2.1 Redes de Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Networks)

Durante las últimas dos décadas, las redes de sensores inalámbricos, conocidas por sus siglas en inglés WSN (Wireless Sensor Networks) y sus aplicaciones han sido el tema de muchos estudios. WSN son redes responsables de la recolección, procesamiento y distribución de datos inalámbricos a la base de datos del centro de almacenamiento previsto.

Un nodo sensor, también conocido como “mote” es un nodo perteneciente a una red de sensores capaz de realizar algún procesamiento, recopilar información sensorial y comunicarse con otros nodos conectados en la red. (Wikipedia, 2016)

Debido a que estos sensores generalmente se instalan en sitios remotos, a pesar de los avances recientes en la tecnología WSN, sus aplicaciones aún enfrentan desafíos significativos. Entre estos, las amenazas a la seguridad de la red, la arquitectura de la red, la recopilación de datos, la implementación y, la cobertura de la red surgen como las principales preocupaciones. (Yasaroglu, y otros, 2016)

Las redes de sensores inalámbricos se usan principalmente, para la adquisición, intercambio y encaminamiento de información capturada a través de los nodos sensores, con el fin de analizarla y tomar decisiones basadas en los requerimientos de aplicación. (Singh, Lal Dua, & Mathur, 2012)

Existen numerosas aplicaciones de WSN en automatización industrial, monitoreo y control de tráfico, aplicaciones militares y ambientales, monitoreo de dispositivos médicos y domésticos, y muchas otras áreas. (Malik, 2015)

2.1.1 Redes de Baja Potencia y con Pérdidas (LLN). Las redes de baja potencia y con pérdidas conocidas por sus siglas en inglés como Low Power and Lossy Networks (LLN), son una clase de red en la que tanto los enrutadores como su interconexión están restringidos: los enrutadores LLN normalmente operan con restricciones de procesamiento, memoria y energía, y sus interconexiones son caracterizadas por altas tasas de pérdida, bajas velocidades de datos e inestabilidad. Los LLN se componen desde pocos hasta miles de enrutadores, admiten el tráfico punto a punto, el tráfico punto a multipunto y el tráfico multipunto-a-punto. (Cisco Systems Inc, 2015)

Existe una amplia gama de áreas de aplicación para LLN, que incluyen monitoreo industrial, automatización de edificios (calefacción, ventilación y aire acondicionado, iluminación, control de acceso, incendios), cuidado de la salud, monitoreo ambiental, redes de sensores urbanos, administración de energía, seguimiento de activos, y refrigeración. (Borman, Ersue, & Keranen , 2014)

2.1.2 IEEE 802.15.4. El estándar IEEE 802.15.4 es la familia de facto de las interfaces de radio estándar de bajo costo y comunicaciones inalámbricas de baja potencia, baja velocidad y corto alcance. Una red de área personal inalámbrica de baja velocidad (LR-WPAN) es una red de comunicación simple y de bajo costo que permite la conectividad inalámbrica en aplicaciones con una potencia limitada y requisitos de rendimiento relajados. Los principales objetivos de un LR-WPAN son la facilidad de instalación, la transferencia de datos confiable, un costo extremadamente bajo y una duración de batería razonable, a la vez que se mantiene un protocolo simple y flexible. (Working Group of IEEE 802.15.4 Standards Association, 2015)

La arquitectura IEEE 802.15.4 se define en términos de una cantidad de bloques para simplificar el estándar. Estos bloques se llaman capas. Cada capa es responsable de una parte del estándar y ofrece servicios a las capas superiores. Un dispositivo LR-WPAN comprende al menos una capa física (PHY), que contiene el transceptor de radiofrecuencia (RF) junto con su mecanismo de control de bajo nivel, y una subcapa de acceso al medio (MAC) que proporciona acceso al canal físico para todos los tipos de transferencia. La Figura 1 muestra estos bloques en una representación gráfica. (Working Group of IEEE 802.15.4 Standards Association, 2015)

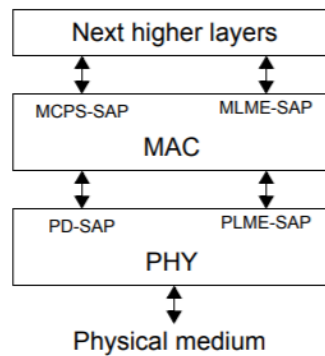


Figura 1: Arquitectura LR-WPAN. Tomada de (Working Group of IEEE 802.15.4 Standards Association, 2015)

2.1.2.1 Capa Física (PHY). La capa física (PHY) proporciona una interfaz entre la subcapa de acceso al medio (MAC) y el canal de radio físico. Provee dos servicios, el servicio de datos PHY y el servicio de gestión PHY. La capa PHY es responsable de las siguientes tareas: (Zheng & Lee, 2004)

- Activación y desactivación del transceptor de radio
- Detección de energía (ED) dentro del canal
- Indicación de calidad de enlace (LQI) para los paquetes recibidos
- Evaluación de canal claro (CCA) para acceso múltiple con detección de portador con prevención de colisiones (CSMACA)
- Selección de frecuencia de canal
- Transmisión y recepción de datos

La especificación original, IEEE 802.15.4, especifica la frecuencia de radio (RF), parámetros del enlace, incluidos el tipo de modulación, codificación, difusión, velocidad de bits y canalización. Esta especificación define 27 canales repartidos en tres bandas de frecuencia

diferentes: 1 canal en la banda de 868 MHz disponible en Europa, 10 canales en la banda de 915 MHz, disponible en la región de América, y 16 canales en la banda de 2,4 GHz disponible en todo el mundo. (Kermajani & Gómez Montenegro, 2014)

La tabla 1 muestra las características más importantes de la capa física, del estándar IEEE 802.15.4.

Tabla 1: Características de la capa física de IEEE 802.15.4. Tomado de (Kermajani & Gómez Montenegro, 2014)

Frecuencia de banda	Número de canales	Técnica de propagación	Modulación	Velocidad de símbolo por canal (kbaud)	Velocidad de bits por canal (kbits/s)
868 MHz	1	DSSS Binario	BPSK	20	20
915 MHz	10	DSSS Binario	BPSK	40	40
2.4 GHz	16	Arreglo de 16 DSSS	O-QPSK	62.5	250

El servicio principal de la capa física es habilitar la transmisión y recepción de la Unidad de Datos de Protocolo PHY (PPDU) IEEE 802.15.4, que transporta la unidad de datos de capa superior (es decir, la trama MAC) a través del canal de radio físico. Hay tres componentes en la PPDU: el Encabezado de Sincronización (SHR), el Encabezado PHY (PHR) y la carga útil PHY. La estructura de la PDDU se muestra en la figura 2. (Kermajani & Gómez Montenegro, 2014)

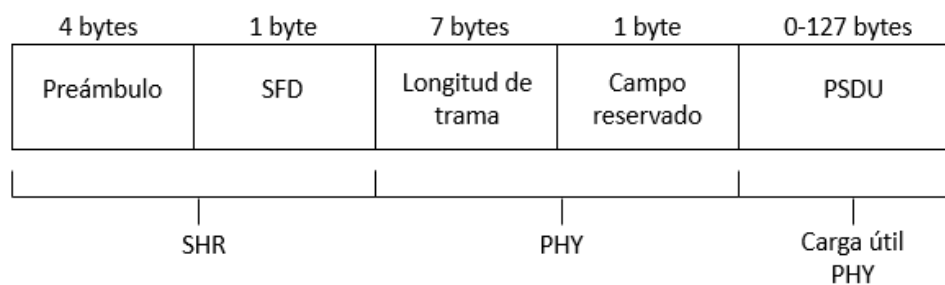


Figura 2: Estructura del PDDU del estándar IEEE 802.15.4

SHR permite que un nodo de recepción se sincronice y se bloquee en el flujo de bits. Se compone de un campo de preámbulo, que es utilizado por el transceptor para obtener la sincronización de chips y símbolos, y el Delimitador de inicio de trama (SFD) que indica el final de la SHR y el inicio del paquete de datos. El PHR contiene la longitud de la carga PHY y, finalmente, la carga útil PHY lleva el marco de la subcapa MAC. La carga útil PHY también se denomina Unidad de datos de servicio PHY (PSDU). (Kermajani & Gómez Montenegro, 2014)

2.1.2.1 Capa de Acceso al Medio (MAC). El servicio de datos MAC permite la transmisión y recepción de unidades de datos de protocolo MAC (MPDU) a través del servicio de datos PHY. Las características de la subcapa MAC son gestión de balizas, acceso a canales, gestión de GTS, validación de marcos, entrega de cuadros confirmados, asociación y des asociación. Además, la subcapa MAC proporciona ganchos para implementar mecanismos de seguridad apropiados para la aplicación. (Working Group of IEEE 802.15.4 Standards Association, 2015)

La capa de Control de acceso medio (MAC) gestiona el acceso a un canal de radio físico compartido entre los nodos de la red. En la capa MAC, las redes IEEE 802.15.4 se pueden configurar en dos modos: sobre la base de una estructura de supertrama delimitada por balizas, o en un modo sin luces. Este último es generalmente preferido debido a su simplicidad y no requiere ninguna organización de red específica. (Kermajani & Gómez Montenegro, 2014)

2.1.2.1.1 Formato de Unidad de Datos de un Trama MAC. Todas las tramas de datos MAC están encapsuladas en la PSDU. El formato de un marco de datos MAC se muestra en la Figura 6. Cada marco de datos MAC se compone de tres componentes (Figura 3): (Kermajani & Gómez Montenegro, 2014)

- Encabezado MAC: Contiene tres subcampos. El primero es el Campo de control de cuadro (FCF), que tiene un tamaño de 2 bytes e incluye información sobre el tipo de cuadro, los campos de direccionamiento y otros indicadores de control. El segundo campo es el número de secuencia, que tiene un tamaño de un byte. Finalmente, los campos de direccionamiento pueden incluir un identificador PAN de destino de dos bytes, una dirección de destino de 16 o 64 bits, un identificador PAN de fuente de dos bytes y una dirección fuente de 16 o 64 bits.
- Carga útil MAC (MSDU): El contenido de este campo depende del tipo y tamaño de la trama. Sin embargo, la trama completa de MAC no debe exceder los 127 bytes de información.
- Pie de Página MAC (MFR): Este campo contiene una secuencia de verificación de trama (FCS) y tiene un tamaño de 2 bytes.

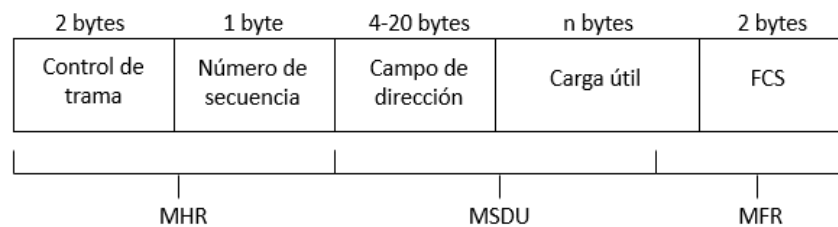


Figura 3: Formato de la trama de datos de IEEE 802.15.4

2.1.3 Herramientas de Simulación. Las redes de sensores se enfrentan a varios tipos de problemas que normalmente no ocurren en otros tipos de redes, como restricciones de potencia, restricciones de recursos, disponibilidad de hardware, bajo rango de comunicación, procesamiento y almacenamiento limitados, costo, etc.

Simuladores y emuladores son herramientas efectivas para probar y analizar el desempeño de los protocolos y algoritmos propuestos. Con la ayuda de herramientas de simulación es posible desarrollar y probar fácilmente un nuevo protocolo para redes de sensores. Existen numerosas ventajas relacionadas con este enfoque, como la implementación sencilla, el bajo costo, el análisis de los resultados en tiempo real e incluso conocer los efectos secundarios y otros parámetros de efectividad en toda la red. (Nayyar & Singh, 2015). En la tabla 2 se presenta una comparación entre simuladores de red de código desarrollados para simular redes de sensores inalámbricas.

2.1.3.1 Simulador Cooja. Cooja es un simulador basado en Java, diseñado para simular redes de sensores que ejecutan el sistema operativo de red de sensores Contiki. El simulador se implementa en Java, pero permite que el software del nodo del sensor se escriba en C. Contiki es un sistema operativo para Internet de las Cosas (IoT). Conecta pequeños microcontroladores de bajo costo y bajo consumo a Internet. (Contiki, s.f.)

El sistema operativo Contiki incluye un potente simulador de red llamado Cooja. Este permite simular nodos que ejecutan aplicaciones Contiki y que se organizan en una red de sensores inalámbricos. Cooja brinda la posibilidad de emular cada nodo a nivel de hardware para poder observar de manera más precisa su comportamiento a la vez que facilita la comunicación con otros nodos que pertenecen a la misma red. (Lobato Fernández, 2013)

Las principales herramientas de análisis que brinda el simulador COOJA son “Radio Listener”, “Timeline”, “Code Watcher”, “Mote Output” y “Collect View”. Se trata de distintas formas de presentar la información de la simulación y además son herramientas de ejecución paso a paso y marcado de eventos de simulación. La simulación se controla desde el panel de control permitiendo pararla, detenerla o avanzar en intervalos de un ms.

Tabla 2: Comparación de simuladores de red de código abierto. Tomada de (Saad, Chauvenet, & Tourancheau, 2011)

Simulator	ns2	Castalia OMNet++	TOSSIM	Cooja/MPSim	WSim/WSNet
Level of details	generic	generic	code level	all levels	all levels
Timing	discrete event	discrete event	discrete event	discrete event	discrete event
Simulator platforms	FreeBSD, Linux, SunOS, Solaris, Windows (Cygwin)	Linux, Unix, Windows (Cygwin)	Linux, Windows (Cygwin)	Linux	Linux, Windows (Cygwin)
WSN platforms	n/a	n/a	MicaZ	Tmote Sky, ESB, MicaZ	MicaZ, Mica2, TelosB, CSEM Wisenode, ICL BSN nodes, eZ430
GUI support	Monitoring of simulation flow	Monitoring of simulation flow, c++ development, topology definition, result analysis and visualization	None	Yes	None
Wireless channel	Free space, two-ray ground reflection, shadowing	lognormal shadowing, experimentally measured, path loss map, packet reception rates map, temporal variation, unit disk	lognormal shadowing	multi-path ray-tracing with support for attenuating for obstacles, unit disk, directed graph	file static, disk model, free space, two-ray ground, lognormal shadowing, rayleigh fading, ITU indoor model, nakagami fading
PHY	Lucent Wave-Lan DSSS	CC1100, CC2420	CC2420	CC2420, TR1001	CC1100, CC1101, CC2500, CC2420
MAC	802.11, preamble based TDMA (preliminary stage)	TMAC, SMAC, Tunable MAC (can approximate BMAC, LPL, etc.)	Standard TinyOS 2.0 CC2420 stack	CSMA/CA, TDMA, X-MAC, LPP, NullMAC, contikiMAC, SicslowMAC	DCF, BMAC, ideal MAC
Network	DSDV, DSR, TORA, AODV	Simple Tree, Multi-path Rings	No data	RPL, AODV	Greedy Geographic, file static
Transport	UDP, TCP	None	No data	UDP, TCP	None
Sensing	Random process with Mannasim add-on	Generic moving time varying physical process	No data	Moving nodes	Generic moving time varying physical process
Energy consumption model	Yes	Yes	With Power TOSSIM add-on	Yes	Yes

2.2 Protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia y con pérdidas, RPL

El protocolo RPL es un protocolo de encaminamiento diseñado para las LLNs en el cual la selección de ruta es un factor importante y, a diferencia de los protocolos de enrutamiento de redes tradicionales, RPL utiliza más factores al calcular las mejores rutas, por ejemplo, métricas de enrutamiento, funciones objetivo y restricciones de enrutamiento. RPL utiliza TCP / IP para la comunicación, ya que se ha convertido en un estándar global después del éxito de Internet. IP se utiliza en LLN para proporcionar conectividad de extremo a extremo. Resuelve el problema de la interoperabilidad entre estos dispositivos de diferentes proveedores y facilita el desarrollo de aplicaciones e integraciones en términos de recopilación y configuración de datos. (Ali, 2012)

El protocolo RPL admite tres métricas de enrutamiento, ETX, latencia y rango DAG.

La ETX se define como la métrica de conteo de transmisión esperado. Es la cantidad de transmisiones que un nodo espera realizar en un destino para entregar un paquete con éxito. (Cisco Systems Inc, 2015) La fórmula para calcular la ETX es:

$$ETX = \frac{1}{Df * Dr}$$

Donde Df es la probabilidad medida de que un paquete es recibido por el vecino y Dr es la probabilidad medida de que el paquete de acuse de recibo se reciba con éxito. (Cisco Systems Inc, 2015)

La latencia se conoce como el tiempo exacto que tarda en transmitirse un paquete dentro de la red, el tiempo que tarda en recibir un paquete del servidor. La latencia promedio de la red se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$Latencia\ promedio = \frac{\sum_{k=1}^n (Tiempo\ de\ respuesta(k) - Tiempo\ de\ envío(k))}{Total\ de\ paquetes\ recibidos}$$

2.2.1 Construcción de la Topología. RPL se caracteriza por ser un protocolo proactivo basado en vector de distancia, el cual define las rutas antes de que sean necesarias por los nodos de la red. Su modo de funcionamiento está basado en el intercambio de mensajes de control (enviados de forma periódica) para encontrar y propagar rutas en la red, estos mensajes pueden ser a nivel local o de enlace permitiendo el envío de información a los vecinos o a nivel global para propagar la información relacionada con la topología a todos los nodos de la red. (Canalejo & Estepa Alonso, 2017)

Las rutas RPL están optimizadas para el tráfico hacia o desde uno o más nodos que actúan como raíces para la topología. Como resultado, RPL organiza una topología como un Gráfico Acíclico Dirigido (DAG) que está dividido en uno o más DAG Orientado a Destino (DODAG), un DODAG por receptor. Si el DAG tiene múltiples raíces, entonces se espera que las raíces estén asociadas por una red troncal común, como un enlace de tránsito. (Winter, 2012)

RPL utiliza cuatro valores para identificar y mantener la topología:

ID de instancia RPL (RPLInstanceID): identifica el conjunto de uno o más DODAGs.

Una red puede tener múltiples RPLInstanceID en la que cada una define un conjunto independiente de DODAGs que puede ser optimizado para diferentes funciones objetivo o aplicaciones. Un conjunto de DODAGs identificados por un RPLInstanceID es llamado Instancia RPL. Todos los DODAGs en el mismo RPLInstanceID utilizan la misma función objetivo. En la figura 4 se muestran tres DODAGs pertenecientes a una sola instancia.

DODAG ID: El alcance de un DODAGID es una instancia de RPL. La combinación de RPLInstanceID y DODAGID identifica de forma única un único DODAG en la red. Una instancia RPL puede tener múltiples DODAG, cada uno de los cuales tiene un DODAGID único.

Número de Versión de DODAG (DODAGVersionNumber): El alcance de un DODAGVersionNumber es un DODAG. Un DODAG es a veces reconstruido desde la raíz de un DODAG, incrementando el DODAGVersionNumber. La combinación de una RPLInstanceID, un DODAGID y un DODAGVersionNumber identifican de forma única la versión de un DODAG. En la figura 5 se puede apreciar cómo cambia la versión de un DODAG.

Rango (Rank): El alcance del Rank es la DODAGVersionNumber. El Rank establece una orden parcial sobre la DODAGVersionNumber, definiendo las posiciones individuales de los nodos respecto a la raíz del DODAG.

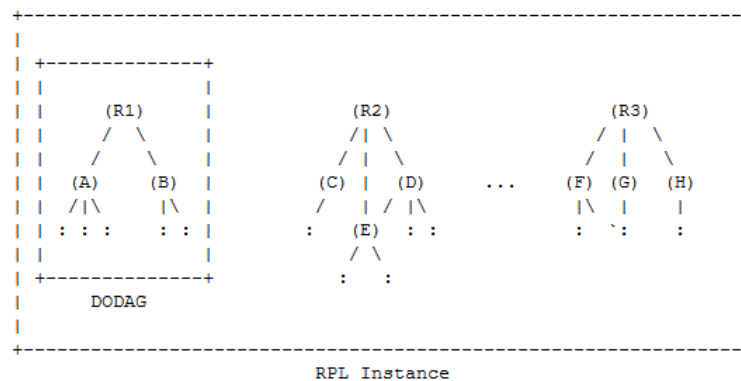


Figura 4: Instancia RPL. Tomada de (Winter, 2012)

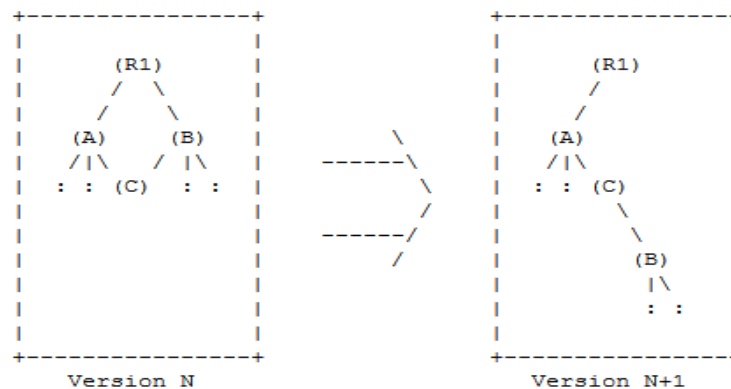


Figura 5: Versión de un DODAG. Tomada de (Winter, 2012)

Hay dos tipos de DODAG en RPL: DODAG conectado a tierra y flotante. UN El DODAG que, además de proporcionar conectividad interna dentro de sí mismo, puede proporcionar conectividad a nodos en otras redes, se denomina DODAG con conexión a tierra. Por el contrario, un DODAG flotante solo ofrece conectividad entre nodos dentro del DODAG y no puede proporcionar rutas a nodos en otros DODAG. (Kermajani & Gómez Montenegro, 2014)

Para la formación de un grafo RPL debe construirse un DODAG siguiendo el siguiente proceso:

1. Escoger los nodos que estarán configurados como DODAG raíz y contendrán la configuración del DODAG.
2. Los nodos seleccionados como raíz deben anunciar su configuración, afiliación con un DODAG y su coste de encaminamiento a través de la difusión de mensajes DIO (DODAG Information Object).

La información mínima que debe transportar un mensaje DIO se compone del RPLInstance ID, el DODAGID, el DODAGVersionNumber y el Rank.

El nodo raíz para iniciar la formación del DODAG enviará mensajes DIOs de tipo broadcast a sus vecinos, siendo el único capaz de llevar a cabo este proceso y ningún otro nodo podrá realizarlo. Durante este proceso de difusión de mensajes, los campos RPLInstanceID y el DODAGID permanecerán sin cambios durante la formación de la topología, mientras que el único campo que se verá alterado cada vez que un mensaje DIO atraviese la red, será el Rank.

El nodo raíz por defecto tiene un valor de Rank igual a 0 ya que la distancia hacía sí mismo es cero, mientras que los demás nodos que reciben el mensaje de difusión DIO deben

calcular este valor en función de la OF como el número de saltos o distancia desde cada uno hasta el nodo raíz.

3. Los demás nodos estarán a la escucha de estos mensajes DIOs y los usarán para unirse al nuevo DODAG e iniciar el proceso de selección para elegir al mejor *nodo padre* o seguir perteneciendo al DODAG anteriormente elegido. Las decisiones tomadas por cada nodo dependerán de cómo hayan definido su OF y su Rank, y los de sus vecinos. Cuando un nodo de la red reciba el mensaje DIO, éste mantendrá a un conjunto de nodos vecinos candidatos eligiendo aquellos que tengan un valor de Rank igual o inferior al suyo para que se conviertan en *nodos padres*.
4. Cada entrada de la tabla de encaminamiento de los nodos registrará los destinos especificados según el mensaje DIO. Los nodos que decidan unirse a este DODAG deben elegir uno o más *padres DODAG* como siguientes saltos para la ruta por defecto de esa instancia. Una vez calculado el Rank de un nodo, éste propagará el mensaje DIO actualizado al resto de sus vecinos, los cuales repetirán el mismo proceso para calcular el Rank en función del OF y reenviando el mensaje DIO actualizado al resto de nodos vecinos. (Canalejo & Estepa Alonso, 2017). La descripción de este procedimiento se puede ver reflejada en la figura 6.

Cuando se haya formado el grafo DODAG, cada nodo debe seleccionar un nodo padre de todos sus vecinos y calcular su propio Rank, cuyo valor tendrá que ser mayor que el de los nodos padres para evitar la formación de bucles al realizar el encaminamiento.

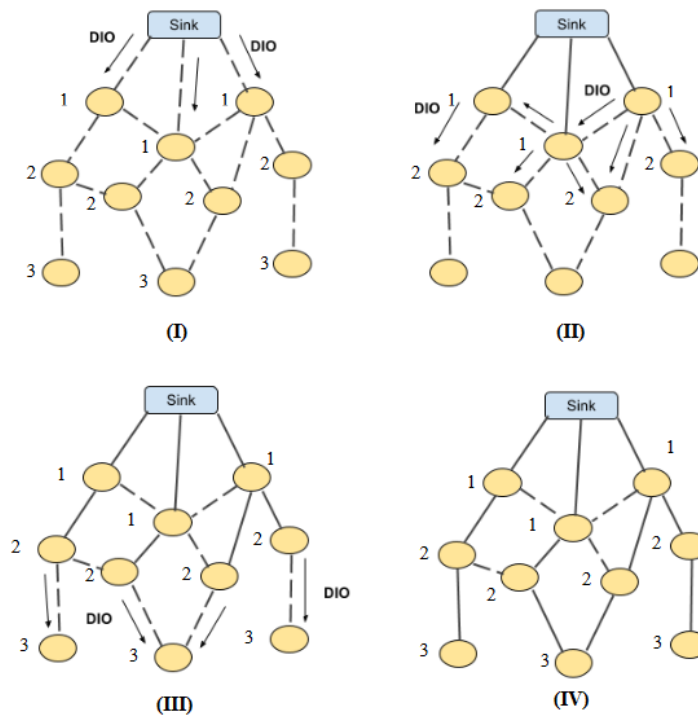


Figura 6: Formación de un grafo DODAG. Tomada de (Canalejo & Estepa Alonso, 2017)

Para definir una Función Objetivo (OF) es necesario basarse en un conjunto de métricas como el nivel de energía o potencia de un nodo, el cual puede ser usado para calcular el Rank, de manera que cuando un nodo seleccione a su nodo padre, elija al vecino con el valor del Rank más bajo y a la vez con el nivel de energía y potencia más bajo también.

Por defecto, el protocolo RPL dispone de un mecanismo multipunto a punto (MP2P) para el envío de los datos de los nodos de la red hacía el nodo raíz. Este tipo de tráfico se conoce como “upward” o “tráfico hacia arriba” y esta implementado con el uso de mensajes DIO. Sin embargo, RPL es capaz de funcionar mediante otro mecanismo denominado flujo de tráfico “hacia abajo” o “downward” basado en una conexión punto a multipunto (P2MP). El establecimiento de rutas downward se realiza mediante el intercambio de mensajes DAO (Destination Advertisement

Object). El tráfico P2P (Punto a Punto) es encaminado mediante tráfico “upward” hasta encontrar un nodo ancestro común que conozca una ruta del DODAG hasta su destino.

Durante la formación del DODAG los nodos de la red tendrán que comunicar al nodo raíz que han decidido unirse al DODAG que éste ha ofrecido a través del mensaje DIO. Para ello, se propagará el mensaje DAO siguiendo las rutas upward hasta llegar al nodo raíz. Cuando un nodo padre o el nodo raíz reciban un mensaje DAO, tendrán que responder con un paquete unicast que contendrá un asentimiento DAO-ACK. (Canalejo & Estepa Alonso, 2017)

2.2.2 Algoritmo Trickle. El funcionamiento básico de Trickle es simple, un nodo transmite datos a menos que escuche algunas otras transmisiones, cuyos datos sugieren que la transmisión es redundante. Un temporizador de Trickle se ejecuta para un intervalo definido y tiene tres parámetros de configuración: el tamaño de intervalo mínimo I_{min} , el tamaño de intervalo máximo I_{max} y una constante de redundancia k . Además de tres variables, el tamaño de intervalo actual I , el tiempo dentro del intervalo actual t y un contador c . (Levis, Clausen, Hui, Gnawali, & Ko, 2011)

Tal como se describe en la RFC 6206 (Levis, Clausen, Hui, Gnawali, & Ko, 2011), el funcionamiento del algoritmo Trickle es el siguiente:

1. Al comenzar la ejecución del algoritmo, se establece un valor I comprendido entre el rango $[I_{min}, I_{max}]$, el cual será mayor o igual a I_{min} y menor o igual que I_{max} . El algoritmo empezará en este intervalo.
2. Cuando un intervalo se inicia, se resetea a 0 el contador y establece un tiempo aleatorio para dicho intervalo, cuyo valor está comprendido entre $[I/2, I]$ y terminará en I .
3. Si se obtiene una transmisión consistente, el algoritmo incrementará su contador.

4. En un momento t del intervalo, se transmitirá si y sólo si el contador es menor que la constante de redundancia k .
5. Cuando el intervalo I expire, se duplicará el tamaño del intervalo. Si el nuevo tamaño del intervalo es mayor que el tiempo especificado en I_{max} , se actualizará el tamaño del intervalo I por el valor de I_{max} .
6. Si se detectase una transmisión inconsistente y el intervalo I es menor que I_{min} , se reseteará el temporizador del algoritmo. Una vez reseteado, se establecerá el valor de I_{min} al que tenía I volviéndose al paso 2. Si el valor de I es igual al de I_{min} y la transmisión es inconsistente, no se hará nada, aunque podría resetearse el temporizador si ocurriera un evento externo.

En la figura 7 se puede apreciar mediante diagrama flujo el funcionamiento del algoritmo Trickle.

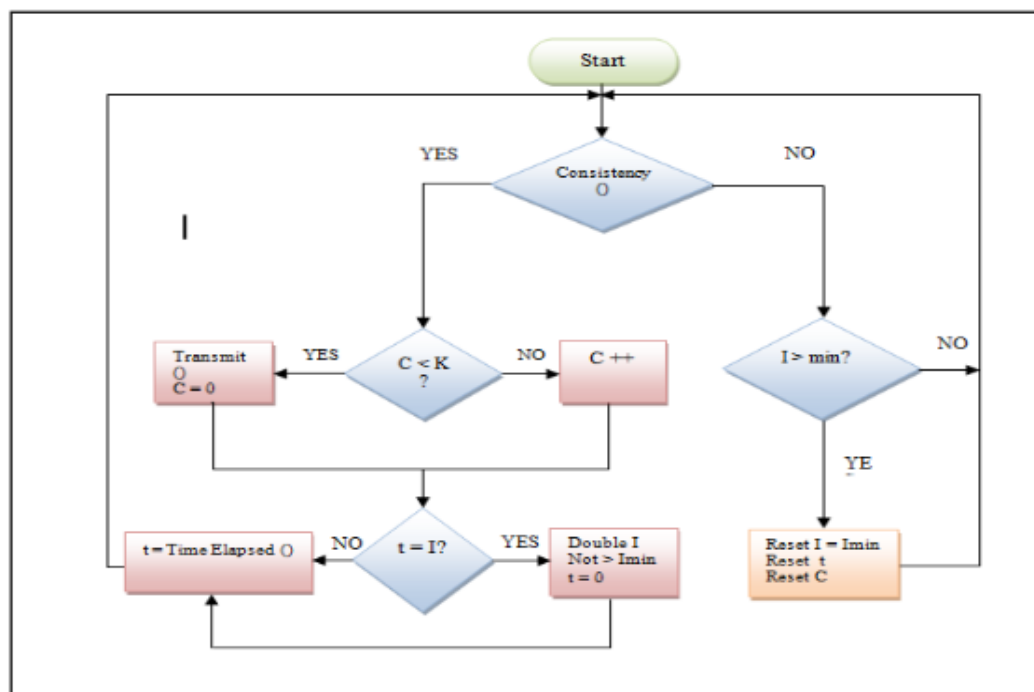


Figura 7: Diagrama de flujo del algoritmo Trickle. Tomada de (Ali, 2012)

2.3 Microrredes Eléctricas

El concepto de red eléctrica inteligente (Smart Grid), está asociado con el manejo eficiente y controlado, de la energía eléctrica, a través del uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, mejorando aspectos como la seguridad, la gestión de los recursos y la estabilidad en el servicio eléctrico. Esas redes son consideradas una integración de los conceptos de microrred y generación distribuida, y se caracterizan por su capacidad de control de parámetros como la frecuencia, la tensión y las variaciones de consumo en las cargas, en tiempo real, permitiendo el aprovechamiento de todos los recursos energéticos que la componen, como los tradicionales generadores de combustible fósil o de energía renovable. (Moallem, Bakhshai, & Jain, 2011)

Una microrred es un sistema compuesto principalmente de generadores distribuidos, elementos de almacenamiento y cargas, integrados bajo un esquema de control encargado de gestionar la información y los recursos asociados a la calidad de generación y distribución de energía eléctrica a los usuarios. Operan conectadas a una red de distribución principal o de forma aislada, y está basada en una arquitectura compuesta por generadores como paneles solares, turbinas de viento, microturbinas, elementos de almacenamiento como las baterías, Buses DC o AC, convertidores, y las cargas. (Lasseter, 2011)

Las tecnologías inalámbricas proporcionan un menor costo de instalación, una implementación más rápida, mayor movilidad y flexibilidad que sus contrapartes cableadas; estas se recomiendan en la mayoría de las aplicaciones de redes inteligentes.

Una Smart Grid es una plataforma que consta de diferentes dominios, que incluyen generación, transmisión, distribución, clientes, proveedores de servicios, operaciones y mercados, para permitir diversas aplicaciones. El dominio de transmisión es responsable de la transferencia de energía eléctrica desde fuentes de generación a sistemas de distribución a largas distancias a través

de múltiples subestaciones. El dominio de distribución es la interconexión eléctrica entre la transmisión y los dominios del cliente. Distribuye electricidad desde/a los clientes. (Kuzlu, Pipattanasomporn, & Rahman, 2014)

Existen varias aplicaciones Smart Grid que usan los componentes de trabajo de red. Las aplicaciones se han clasificado en una serie de categorías esperando que tengan la mayor seguridad, fiabilidad y requisitos de Calidad de Servicio (QoS). La categoría más importante de estas aplicaciones se llama Infraestructura de Medición Avanzada (AMI).

AMI se considera la parte más fundamental y crucial de la red inteligente. Está diseñado para leer, medir y analizar los datos de consumo de energía de los consumidores a través de medidores inteligentes con el fin de permitir la fijación de precios de electricidad automática y dinámica. Los datos de AMI requieren una comunicación bidireccional y una amplia conexión entre los componentes de la red inteligente de la red. AMI va más allá de los escenarios de Lectura Automática de Contadores (AMR) que solo tienen que ver con la lectura del medidor, los eventos del medidor, los eventos de la red y las alarmas. (Tsado, Lund, & Gamage, 2015)

Con Advanced Metering Infrastructure (AMI), una utilidad puede realizar comunicaciones bidireccionales en tiempo real entre medidores y un sitio de administración centralizado, lo que mejora la precisión de lectura del medidor y reduce los costos operativos.

Generalmente, en una Micro Red Eléctrica una carga útil típica va desde 20 a 100 bytes de datos, la cual contiene datos de corrientes, tensión, voltajes, entre otros, para una transmisión de datos de un medidor a una utilidad con un requisito de latencia de menos de 15 s. (Kuzlu, Pipattanasomporn, & Rahman, 2014)

2.3.1 Esquemas de Gestión de Energía Basados en la Comunicación. En estos esquemas de gestión o control, la información del sistema (corriente, tensión y potencia) debe transferirse a través de la microrred a todos sus elementos, para determinar el punto de operación adecuado de cada generador distribuido. Estos esquemas integran tecnologías de comunicación y procesamiento para determinar la potencia de salida de cada generador distribuido o el consumo de las cargas. En el caso de una microrred rural, el método apropiado de comunicación se determina teniendo en cuenta factores como la distancia entre generadores, la seguridad, los costos y las tecnologías disponibles, basándose en tecnologías de transmisión como la fibra óptica, microondas, infrarrojo, power line carrier (PLC) o redes inalámbricas basadas en radio (GSM y CDMA), junto a una combinación de protocolos industriales y el protocolo IP. (Li & Nejabatkhah, 2014)

Los esquemas basados en la comunicación se dividen en dos: centralizados y descentralizados:

Centralizados: conocida como “supervisory energy management”. En este esquema, un sistema basado en un nodo central toma las decisiones y determina los puntos de operación de los generadores distribuidos. Recibe todas las señales de tensión, corriente y potencia, medidas en las unidades de energía de la microrred y establece los puntos de operación de los generadores distribuidos, basándose en los objetivos y restricciones, como el minimizar la operación del sistema y sus costos de mantenimiento, impactos ambientales y aumentar la eficiencia. Después de tomar las decisiones, las señales de control son llevadas a los controladores locales de cada generador distribuido, los cuales definen la operación de los convertidores electrónicos de potencia. (Li & Nejabatkhah, 2014)

El sistema central recibe toda la información del sistema logrando una optimización basado en la información disponible a través de un sistema de gestión de energía de

múltiples objetivos, sin embargo, la carga computacional es mayor y cualquier falla puede generar un apagado general. (Lagos, 2017)

Descentralizado: Todos los controladores locales de cada generador distribuido están conectados a través de un bus de comunicación para intercambiar datos entre ellos, y cada controlador conoce el punto de operación de los distintos convertidores, lo cual permite determinar el punto de operación de su propio generador distribuido de acuerdo a los objetivos establecidos. Puede extender la capacidad de control al momento de conectar nuevos generadores, el poder reducir los requerimientos de procesamiento de cada controlador y mejorar la redundancia y la modularidad del sistema. (Lagos, 2017)

3. Metodología.

Para el desarrollo del presente proyecto se tomó como referencia la metodología propuesta en la investigación “Simulación de redes de sensores inalámbricos: un modelo energético a nivel de nodo-sensor bajo las especificaciones IEEE 802.15.4 y Zigbee” formulada por (Rojas, 2012) la cual se compone de un sistema real, un modelo conceptual y un modelo operacional. El modelo conceptual se construye teniendo como base los datos de un sistema real para poder probarlos en el sistema operacional. Teniendo construidos el modelo conceptual y operacional, se valida el modelo de simulación hasta que ambos modelos coincidan y de esa manera, se llega al producto final. Ver figura 8.

En ese sentido, para el desarrollo del actual proyecto, tenemos los siguientes componentes:

Sistema Real: Para el modelo de simulación de la Wireless Sensor Network (WSN) se tienen en cuenta aspectos de dispositivos del mundo real que implementan las especificaciones del protocolo RPL y de la red IEEE 802.15.4.

Modelo Conceptual: Para la construcción del modelo conceptual se debe tener en cuenta la arquitectura y funcionamiento del simulador de redes a utilizar además de las especificaciones de RPL e IEEE 802.15.4.

Modelo Operacional: Se utiliza el modelo conceptual para la construcción del modelo operacional (algoritmo) en el simulador de redes elegido.

Verificar el Modelo Operacional: Es el proceso donde el modelo operacional es revisado con el fin de que el modelo operacional pueda procesar el modelo conceptual construido.

Validación del Modelo de Simulación: El modelo conceptual se valida a través del modelo operacional, ya que en el modelo operacional que se construye se pueden recolectar las estadísticas de la simulación, construidas a partir de definiciones de escenarios de prueba y de evaluaciones, para luego ser analizadas y así determinar el comportamiento del protocolo RPL en la WSN para la transmisión de los datos estipulados de acuerdo a los requisitos definidos por las características y necesidades de comunicación de la micro red.

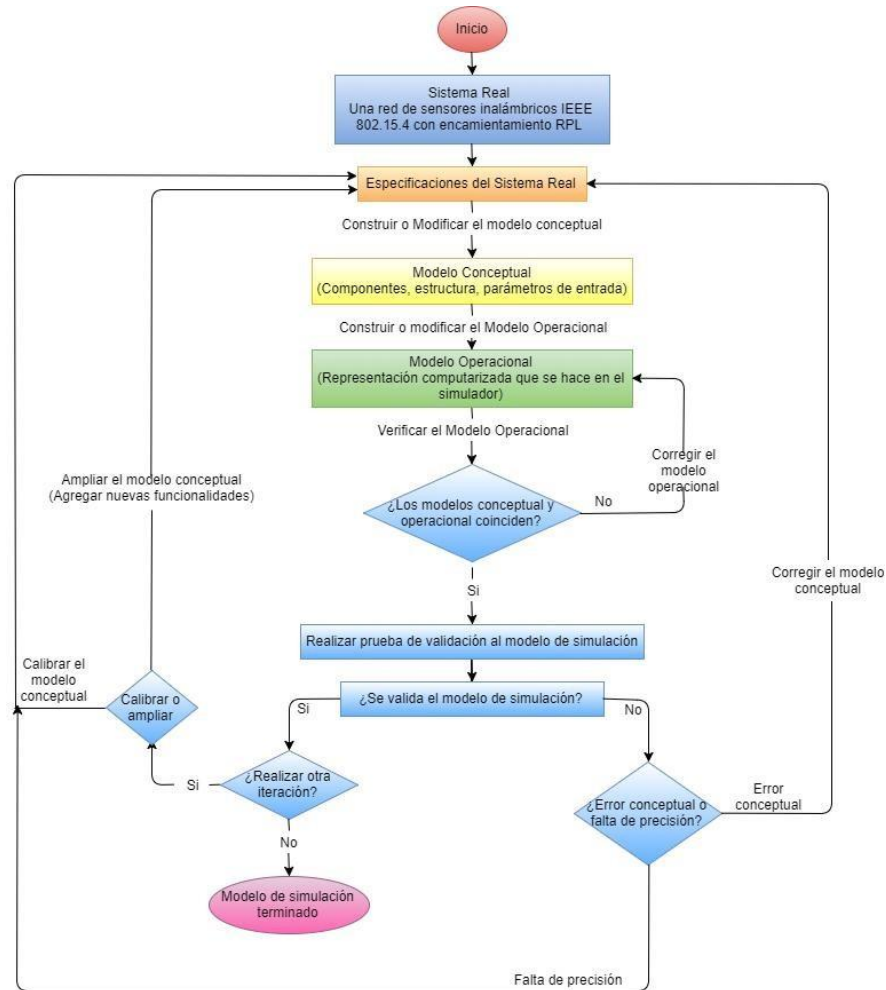


Figura 8: Diagrama de metodología. Tomado de (Rojas, 2012)

4. Simulación.

En este capítulo se describen los escenarios de simulación creados para poder estudiar el funcionamiento y desempeño del protocolo RPL en WSN. Para la realización de las simulaciones se utilizó una adaptación de la aplicación “rpl-collect”, una aplicación incluida en el simulador Cooja, desarrollada por el equipo de desarrolladores de la comunidad Contiki,

El equipo de cómputo utilizado para realizar las simulaciones consta de 1 computador con las siguientes especificaciones:

- Disco duro: 1 TB
- Procesador: Intel Core i7-7500U CPU @2.70 GHz 2.90 GHz
- Memoria RAM: 8 GB
- Tipo de sistema: 64 bits, procesador x64
- Virtualizador VMWare 12
- Contiki OS versión 2.7

Para el desarrollo del presente estudio se realizaron pruebas de simulación en dos simuladores, OMNET++ y Cooja de Contiki OS. Se seleccionó el simulador Cooja debido a que tiene mejor soporte para redes RPL mientras que OMNET++ acepta solamente topologías de árbol y anillo. Además de esto, Cooja contiene aplicaciones estándares incluidas que se pueden utilizar para el desarrollo de la simulación y cuenta con más herramientas e interfaces de recolección y visualización de datos generados a partir de las simulaciones diseñadas.

Para las simulaciones fue necesario utilizar las siguientes herramientas de recolección de datos:

Mote Output: se utiliza para depurar el funcionamiento de un programa, muestra la información que los nodos imprimen a través del comando printf() permitiendo visualizar las variables de código que afectan la comunicación entre los nodos. La figura 9 muestra la interfaz del Mote Output.

```

Mote output
File Edit View
Time Mote Message
00... ID:7 Starting 'UDP client process'
00... ID:7 UDP client process started
00... ID:7 Client IPv6 addresses: aaaa::207:7:7:7
00... ID:7 fe80::207:7:7:7
00... ID:7 Created a connection with the server :: local/remote port 8765/5678
00... ID:10 Contiki-2.6-900-ga6227e1 started. Node id is set to 10.
00... ID:10 Rime started with address 0.10.0.10.0.10.0.10
00... ID:10 MAC 00:0a:00:0a:00:0a:00:0a:00:0a sicslowpan/CSMA/nullrdc, channel check rate 1000 Hz
00... ID:10 Tentative link-local IPv6 address fe80:0000:0000:0000:020a:000a:000a:000a
00... ID:10 Tentative global IPv6 address aaaa:0000:0000:0000:020a:000a:000a:000a
00... ID:10 Starting 'UDP client process'
00... ID:10 UDP client process started
00... ID:10 Client IPv6 addresses: aaaa::20a:a:a:a
00... ID:10 fe80::20a:a:a:a
00... ID:10 Created a connection with the server :: local/remote port 8765/5678
00... ID:9 Contiki-2.6-900-ga6227e1 started. Node id is set to 9.
00... ID:9 Rime started with address 0.9.0.9.0.9.0.9
00... ID:9 MAC 00:09:00:09:00:09:00:09 sicslowpan/CSMA/nullrdc, channel check rate 1000 Hz
00... ID:9 Tentative link-local IPv6 address fe80:0000:0000:0000:0209:0009:0009:0009
00... ID:9 Tentative global IPv6 address aaaa:0000:0000:0000:0209:0009:0009:0009
00... ID:9 Starting 'UDP client process'
00... ID:9 UDP client process started
00... ID:9 Client IPv6 addresses: aaaa::209:9:9:9
00... ID:9 fe80::209:9:9:9
00... ID:9 Created a connection with the server :: local/remote port 8765/5678
00... ID:5 Contiki-2.6-900-ga6227e1 started. Node id is set to 5.
00... ID:5 Rime started with address 0.5.0.5.0.5.0.5
00... ID:5 MAC 00:05:00:05:00:05:00:05 sicslowpan/CSMA/nullrdc, channel check rate 1000 Hz
00... ID:5 Tentative link-local IPv6 address fe80:0000:0000:0000:0205:0005:0005:0005
00... ID:5 Tentative global IPv6 address aaaa:0000:0000:0000:0205:0005:0005:0005
00... ID:5 Starting 'UDP client process'
00... ID:5 UDP client process started
00... ID:5 Client IPv6 addresses: aaaa::205:5:5:5
00... ID:5 fe80::205:5:5:5

```

Figura 9: Interfaz Mote Output

Radio Messages: dispone de la información vinculada a la interfaz IEEE 802.15.4. Permite visualizar el tiempo de simulación en milisegundos (ms), el ID del nodo transmisor y receptor, y los datos que transmiten. La figura 10 muestra la interfaz del Radio Messages.

Network: En esta ventana se muestra la disposición de los nodos y la comunicación entre ellos, emulada por el Modelo Gráfico de Disco Unitario (UDGM). Es posible configurar parámetros del canal y de visualización, entre otros. La interfaz de esta ventana se muestra en la figura 11.

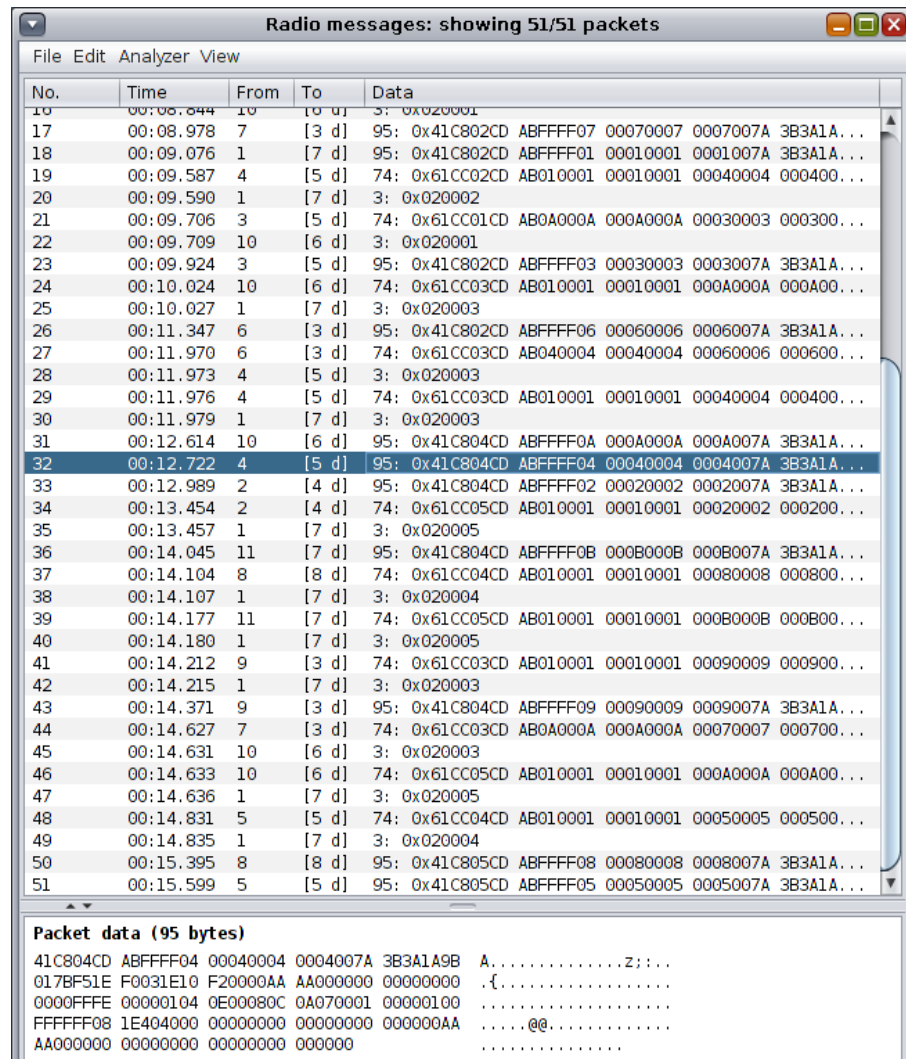


Figura 10: Interfaz de Radio Messages

En esta ventana fue necesario configurar el radio de interferencia de los nodos utilizando dos parámetros diferentes, uno para la transmisión (verde) y otro para interferencia (gris) como se muestra en la figura 11.

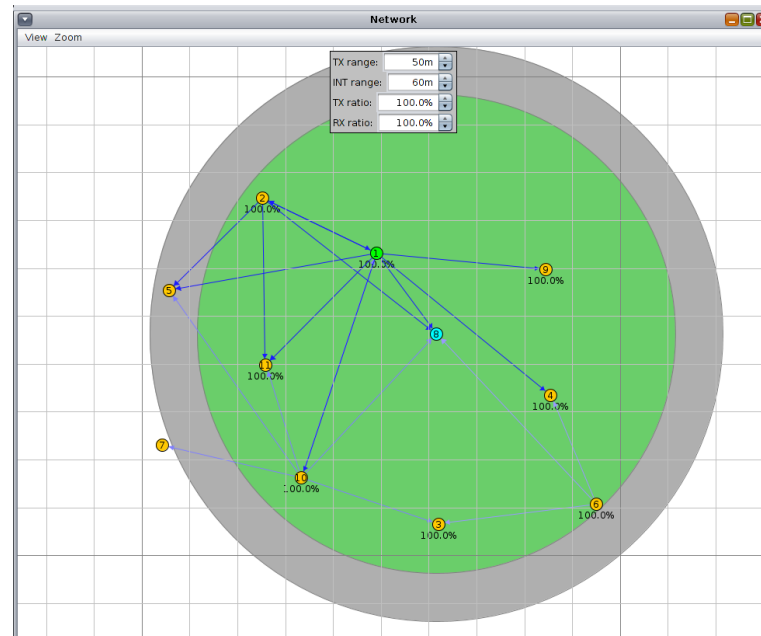


Figura 11: Interfaz Network

La mayoría de los datos a recolectar de las simulaciones se recogieron en un software implementado en java por los creadores de Contiki llamado *Collect-View*, en la herramienta *Mote Output* y en la herramienta *Network*.

Los factores más significativos a evaluar del funcionamiento del protocolo RPL en WSN son la cantidad de nodos conectados en la red, el control de paquetes recibidos y perdidos, el consumo de energía, las métricas de latencia y ETX, la cantidad de saltos y el tiempo de entrega entre un paquete y el siguiente en cada nodo.

Para la evaluación de desempeño del protocolo RPL en WSN, se diseñaron 18 escenarios con nodos estáticos para realizar las simulaciones. 15 de estos tomados como escenarios urbanos en los cuales se evalúan cinco variaciones de cantidades de nodos en escenarios de tres dimensiones diferentes, que van desde 2.500 m² el escenario más pequeño hasta 250.000 m² el escenario más grande, el cual es 10 veces mayor en tamaño que el escenario pequeño (ver tabla 3) y tres tomados como escenarios rurales en los cuales se evalúan tres variaciones de cantidades de nodos en un

escenario de 17.5 km² (ver tabla 4). Las dimensiones de estos escenarios fueron escogidas tomando en cuenta áreas aproximadas de urbanizaciones hasta áreas aproximadas de barrios pequeños de la ciudad de Bucaramanga para los escenarios urbanos, y para los escenarios rurales se tuvo en cuenta el área rural de un pequeño pueblo llamado “Busbanzá” ubicado en el departamento de Cundinamarca, Colombia que cuenta con una extensión rural de 17.5 km² y aproximadamente 750 habitantes en su zona rural.

Tabla 3: Escenarios Urbanos de Simulación

Cantidad de nodos	Dimensiones del escenario		
5	50x50 m	260x260 m	500x500 m
25	50x50 m	260x260 m	500x500 m
50	50x50 m	260x260 m	500x500 m
75	50x50 m	260x260 m	500x500 m
100	50x50 m	260x260 m	500x500 m

Tabla 4: Escenarios Rurales de Simulación

Cantidad de nodos	Dimensiones del escenario
50	3500 x 5000 m
100	3500 x 5000 m
250	3500 x 5000 m

Los parámetros generales utilizados para las simulaciones en escenarios urbanos se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Parámetros utilizados para escenarios urbanos de simulación

Parámetro	Valor
Retraso inicial	1 s
OF	ETX
DIO Min	12
DIO Doublings	8
TX radio	100%
Radio de transmisión	100 m
Radio de interferencia	120 m
Tiempo de simulación	30 min

Tabla 6: Parámetros utilizados para escenarios rurales de simulación

Parámetro	Valor
Retraso inicial	1 s
OF	ETX
DIO Min	12
DIO Doublings	8
TX radio	100%
Radio de transmisión	500 m
Radio de interferencia	520 m
Tiempo de simulación	13 min

Se configuró el modo de operación RPL como “No Downward” para que el tráfico utilizado sea multipunto a punto. Los valores de DIO_Min y DIO_Doublings, que define la demora máxima entre dos DIO (Deru, 2016), fueron configurados bajo los valores por defecto establecidos en ContikiRPL. El radio de transmisión (TX) fue configurado con un valor de 100% porque no se introdujeron pérdidas en el extremo receptor.

Los siguientes son un ejemplo de los datos más relevantes recolectados a partir de las simulaciones realizadas. En la figura 12 se muestra el mapa de rutas que se crea para una topología en donde las líneas rojas muestran la ruta preferida y las líneas azules muestran las demás posibles rutas que busca un nodo. En la figura 13 se muestran el ID de los nodos, la cantidad de paquetes

recibidos, duplicados y perdidos, la cantidad de saltos que debe tomar un nodo para llegar al nodo raíz, el ETX, el beacon Interval, la energía consumida, y el tiempo transcurrido entre la llegada de un paquete y el siguiente. En la figura 14 se muestra un ejemplo del tráfico de mensajes de los nodos, necesario para calcular la latencia.

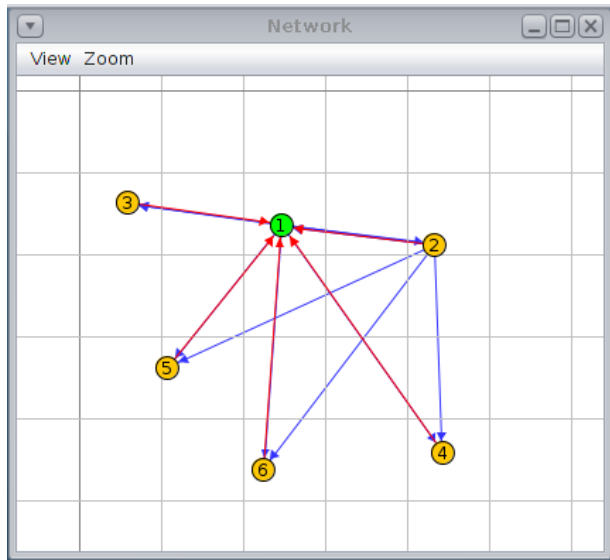


Figura 12: Mapa de rutas de la topología

Sensor Data Collect with Contiki (connected to <stdin>)																
File Tools																
Nodes	Node Control	Sensor Map	Network Graph	Sensors	Network	Power	Node Info	Serial Console								
<All>	Node	Received	Dups	Lost	Hops	Rtmetric	ETX	Beacon Interval	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power	Avg Inter-packet Time	Min Inter-packet Time	Max Inter-packet Time
1.1	1.1	0	0	0	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
2.2	2.2	6	0	0	1.000	617.167	16.000	5 min, 27 sec	0.378	0.152	0.423	0.103	1.056	0 min, 51 sec	0 min, 05 sec	1 min, 58 sec
3.3	3.3	6	0	0	1.000	617.167	16.000	5 min, 27 sec	0.368	0.152	0.400	0.068	0.988	0 min, 49 sec	0 min, 14 sec	1 min, 21 sec
4.4	4.4	7	0	0	1.000	601.000	16.000	6 min, 33 sec	0.367	0.152	0.414	0.075	1.008	0 min, 51 sec	0 min, 37 sec	1 min, 40 sec
5.5	5.5	7	0	0	1.000	601.000	16.000	5 min, 55 sec	0.362	0.153	0.398	0.068	0.981	0 min, 50 sec	0 min, 26 sec	1 min, 36 sec
6.6	6.6	6	0	0	1.000	613.500	16.000	5 min, 27 sec	0.365	0.152	0.399	0.068	0.984	0 min, 48 sec	0 min, 26 sec	1 min, 31 sec
	Avg	6.400	0.000	0.000	1.000	609.967	16.000	5 min, 46 sec	0.368	0.152	0.407	0.076	1.003	0 min, 49 sec	0 min, 21 sec	1 min, 37 sec

Figura 13: Datos recolectados a partir de la herramienta Collect View de Contiki

Time	Mote	Message
02:13.344	ID:5	DATA send to 1 'Hello 2'
02:13.421	ID:1	DATA rcv 'Hello 2 from the client' from 5
02:29.246	ID:6	DATA send to 1 'Hello 2'
02:29.471	ID:1	DATA rcv 'Hello 2 from the client' from 6
02:38.022	ID:4	DATA send to 1 'Hello 2'
02:38.059	ID:1	DATA rcv 'Hello 2 from the client' from 4
03:04.892	ID:3	DATA send to 1 'Hello 2'
03:05.024	ID:1	DATA rcv 'Hello 2 from the client' from 3
03:12.544	ID:4	DATA send to 1 'Hello 3'
03:12.674	ID:1	DATA rcv 'Hello 3 from the client' from 4
03:21.391	ID:5	DATA send to 1 'Hello 3'
03:21.536	ID:1	DATA rcv 'Hello 3 from the client' from 5
03:43.856	ID:6	DATA send to 1 'Hello 3'
03:44.202	ID:1	DATA rcv 'Hello 3 from the client' from 6
03:45.977	ID:2	DATA send to 1 'Hello 3'
03:46.123	ID:1	DATA rcv 'Hello 3 from the client' from 2
03:55.315	ID:3	DATA send to 1 'Hello 3'
03:55.379	ID:1	DATA rcv 'Hello 3 from the client' from 3
04:09.610	ID:3	DATA send to 1 'Hello 4'
04:09.745	ID:1	DATA rcv 'Hello 4 from the client' from 3
04:14.098	ID:6	DATA send to 1 'Hello 4'
04:14.192	ID:1	DATA rcv 'Hello 4 from the client' from 6
04:22.314	ID:5	DATA send to 1 'Hello 4'
04:22.392	ID:1	DATA rcv 'Hello 4 from the client' from 5
04:23.528	ID:4	DATA send to 1 'Hello 4'
04:23.655	ID:1	DATA rcv 'Hello 4 from the client' from 4
04:49.274	ID:2	DATA send to 1 'Hello 4'
04:49.361	ID:1	DATA rcv 'Hello 4 from the client' from 2
05:04.888	ID:4	DATA send to 1 'Hello 5'
05:05.021	ID:1	DATA rcv 'Hello 5 from the client' from 4
05:07.446	ID:2	DATA send to 1 'Hello 5'
05:07.477	ID:1	DATA rcv 'Hello 5 from the client' from 2
05:35.109	ID:5	DATA send to 1 'Hello 5'
05:35.132	ID:1	DATA rcv 'Hello 5 from the client' from 5
05:45.270	ID:6	DATA send to 1 'Hello 5'

Filter: Hello

Figura 14: Mote Output de una simulación.

5. Resultados.

Para los escenarios tomados como urbanos fue posible observar que entre más pequeño es el escenario, mayor es la tasa de conexión de los nodos clientes al nodo raíz. Tanto para los escenarios urbanos, como para los rurales es posible observar que se presenta mayor tasa de conexión cuando existe mayor cantidad de nodos en el escenario, como se muestra en la figura 15 para escenarios urbanos y rurales. En el escenario de 250.000 m² que se muestra en la figura 15, en donde se presentan menos nodos conectados es posible apreciar que la cantidad de nodos conectados es aproximadamente el 80% de los nodos totales. En el escenario rural que es más grande aún, se observa que aproximadamente el 50% de los nodos se conectaron a la red.

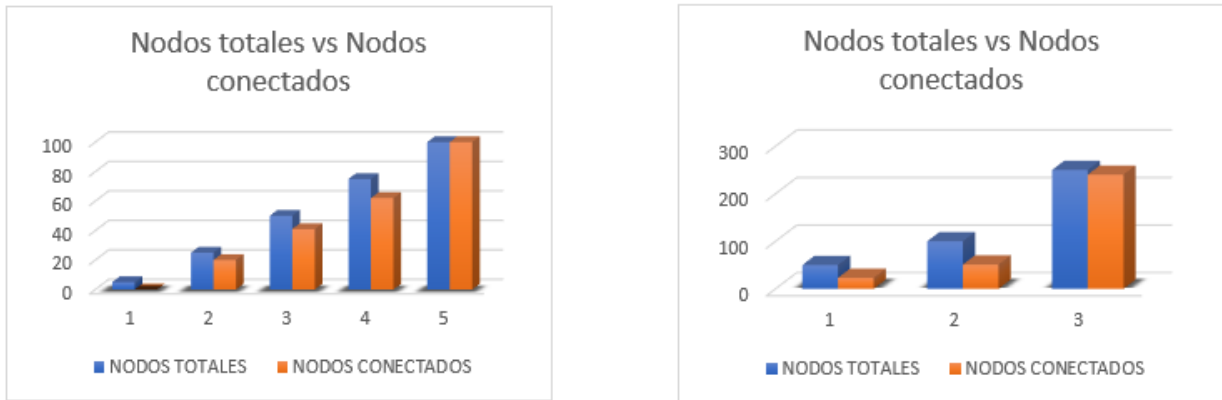


Figura 15: Nodos totales vs Nodos conectados en escenarios urbanos y rurales

La cantidad de paquetes recibidos y paquetes perdidos presentan una relación inversamente proporcional en donde independientemente del tamaño del escenario, cuando existe mayor cantidad de nodos, la cantidad de paquetes recibidos disminuye, pero la cantidad de paquetes perdidos aumenta tanto para escenarios urbanos como rurales, esto se puede observar en la figura 16 en el escenario urbano y rural, respectivamente. Sin embargo, en los escenarios rurales se observa que la cantidad de paquetes recibidos fue mucho menor que la cantidad de paquetes recibidos en los escenarios urbanos. En los escenarios urbanos además, es posible apreciar un crecimiento inicial en la curva de paquetes recibidos el cual se debe a que en la simulación realizada con cinco nodos solo uno se conectó, por lo que solo hubo un paquete recibido. En todas

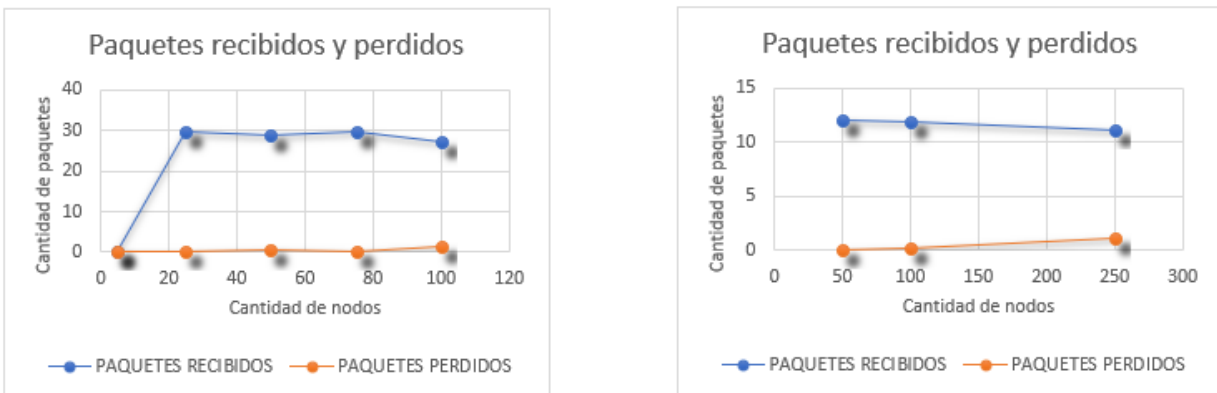


Figura 16: Paquetes recibidos y perdidos en escenarios urbanos y rurales

las simulaciones realizadas fue posible observar que la cantidad de paquetes recibidos por los nodos de la red se mantiene en un promedio estándar como se puede observar en la figura 17.

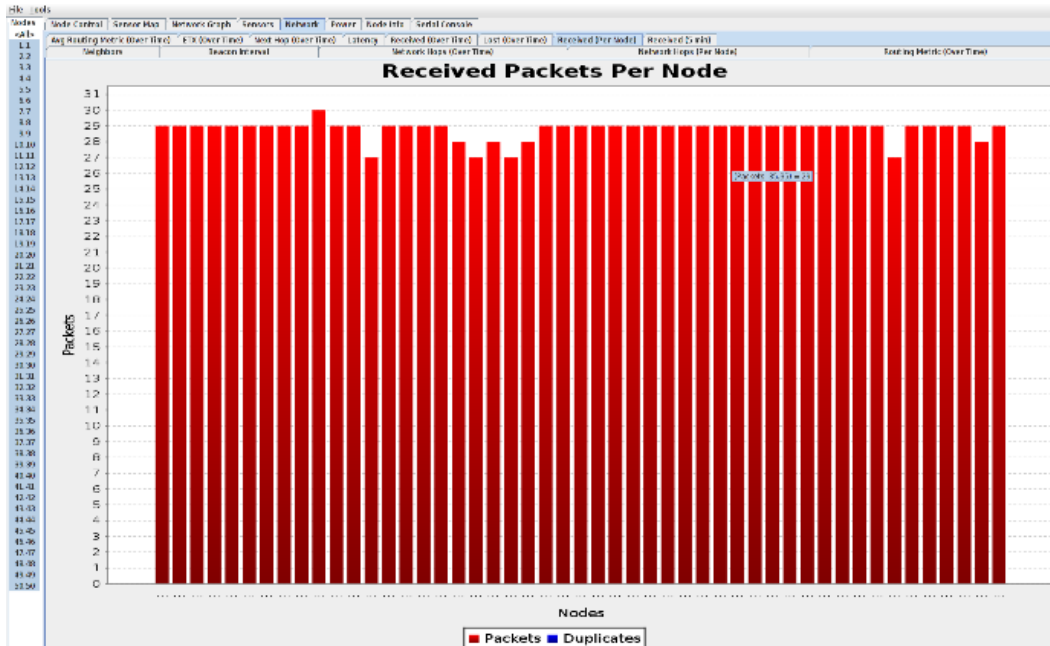


Figura 17: Cantidad de paquetes recibidos por nodo

La cantidad de saltos realizados por cada nodo para poder conectarse con el nodo raíz depende de la disposición de los nodos en la red. Sin embargo, existe una relación entre la cantidad de nodos y el promedio de saltos realizados por nodo. Es posible evidenciar que cuando más nodos existen en la red, mayor cantidad de saltos se realizan por los nodos más lejanos del nodo raíz,

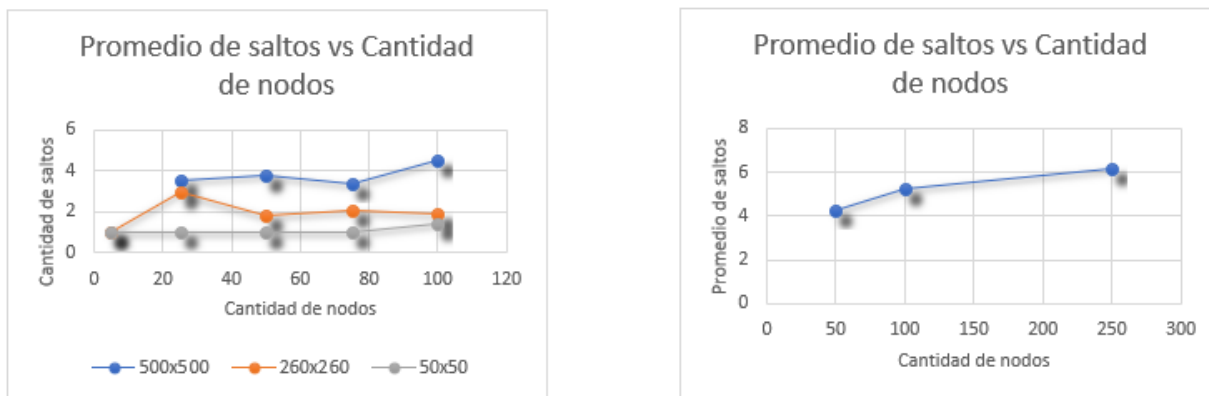


Figura 18: Promedio de saltos vs Cantidad de nodos en escenarios urbanos y rurales

aumentando la cantidad de saltos promedio por nodo tanto para los escenarios urbanos como para los escenarios rurales. Ver figura 18.

Para la métrica ETX se presentan variaciones en el comportamiento de esta debido a que tiene en cuenta más factores aparte del conteo de saltos, como se puede apreciar en la figura 19 para escenarios urbanos y rurales.

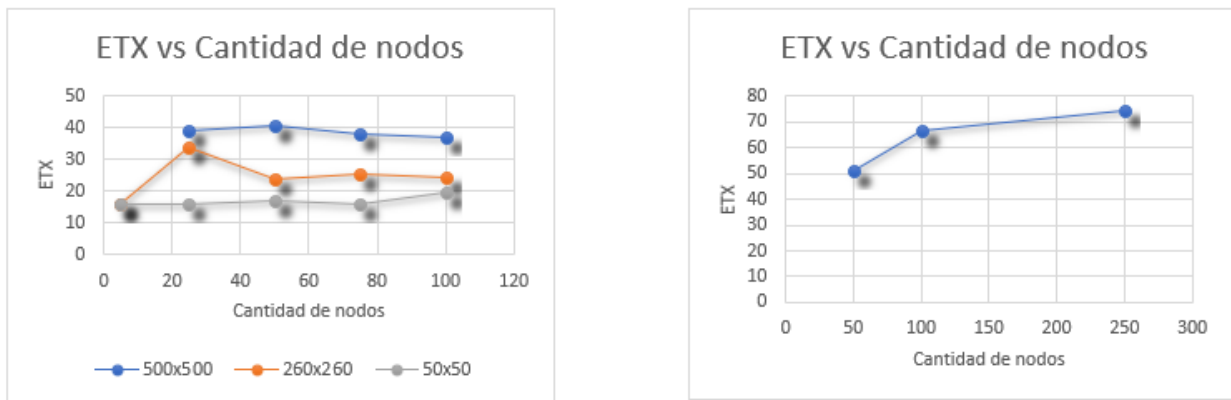


Figura 19: ETX vs Cantidad de nodos en escenarios urbanos y rurales

El tiempo entre paquetes representa el tiempo que toma la entrega entre un paquete y su anterior o siguiente paquete. En este caso es posible apreciar en la figura 20 que, a mayor cantidad de nodos, mayor es el tiempo entre paquetes de cada nodo. Sin embargo, en el escenario urbano tomado como mediano se puede observar que el tiempo entre paquetes fue estándar para las diferentes cantidades de nodos.

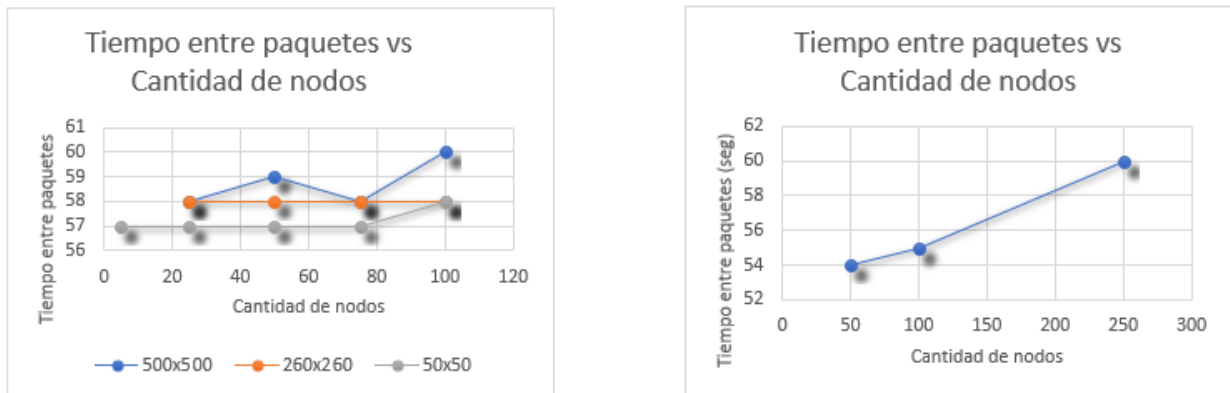


Figura 20: Tiempo entre paquetes vs Cantidad de nodos en escenarios urbanos y rurales.

La energía consumida por los nodos muestra un aumento de consumo cuando hay mayor cantidad de nodos tanto para las simulaciones urbanas como rurales, en los diferentes escenarios. La energía total consumida se obtiene de la sumatoria de la energía consumida en unitario por CPU+LPM+Radio Listen+Radio Transmit. Ver figura 21.

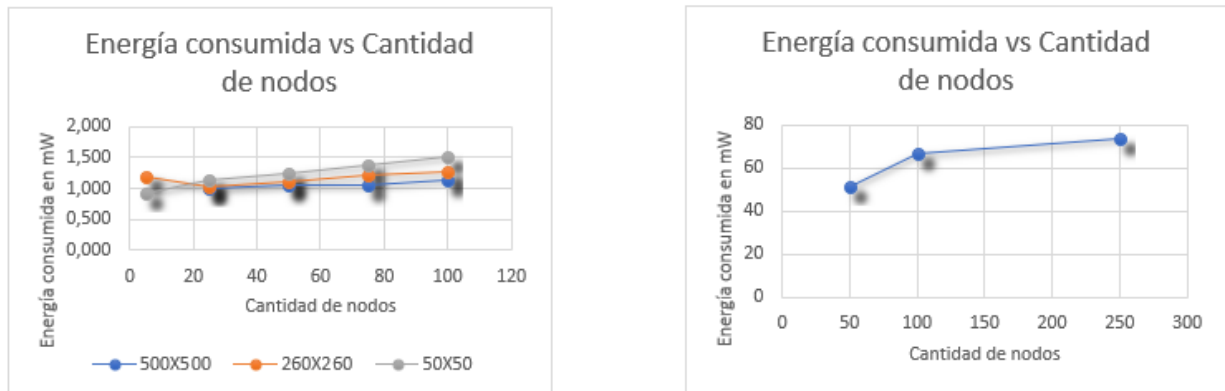


Figura 21: Energía consumida vs Cantidad de nodos en escenarios urbanos y rurales

Los niveles de energía en *Modo de Bajo Consumo (LPM)* se mantienen estables en todas las simulaciones. La energía de CPU consumida presenta niveles de consumo muy similares a los valores de energía consumida cuando el nodo está en *modo escucha* o *radio listen*. El nivel más bajo de energía consumida se identifica en el *radio transmit*, cuando el nodo transmite el paquete que desea enviar. En la figura 22 se pueden apreciar los consumos de energía por cada nodo separados por factores, en donde el color rojo representa la energía consumida en LPM, el color azul la energía consumida por CPU, el color verde la energía consumida en modo escucha y el color amarillo la energía consumida al transmitir.

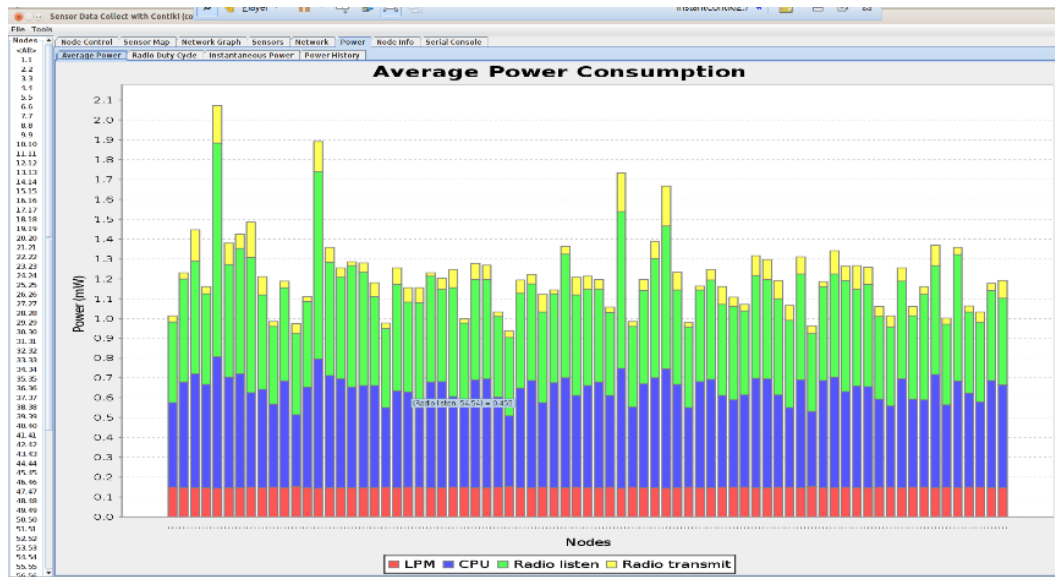


Figura 22: Consumo de energía por los nodos durante una simulación.

En el análisis de la latencia promedio es posible observar que la curva tiene un comportamiento similar al de la curva de comportamiento de saltos y la curva de comportamiento de la métrica de enrutamiento por lo que nos es posible deducir que la latencia depende de la configuración física de los nodos en la red. En la figura 23 es posible observar que los escenarios rurales presentan mayor latencia que los escenarios urbanos.

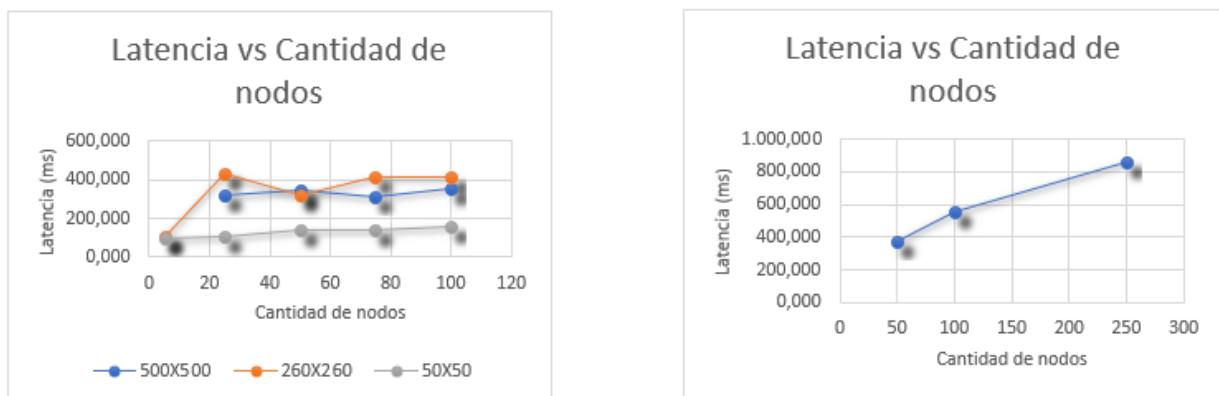


Figura 23: Latencia promedio vs Cantidad de nodos en escenarios urbanos y rurales

5.1 Análisis Comparativo

En los artículos “A survey on the communication architectures in smart grid” y “Current challenges and future trends in the field of communication architectures for microgrids” se definen los requisitos de retardo de diferentes tipos de mensaje para diferentes funciones de una micro red (tabla 7). (Wang, Xu, & Khanna, 2011), (Marzal, Salas, Gonzáles Medina, Garcerá, & Figueres, 2017)

Tabla 7: Mensajes en las micro redes y requisitos de latencia. Tomada de (Marzal, Salas, Gonzáles Medina, Garcerá, & Figueres, 2017)

Mensajes de micro red	Latencia
Respuesta de demanda	500 ms – varios minutos
Recursos de energía distribuida y almacenamiento	20 ms – 15 s
Gestión distribuida	100 ms – 2 s

En la tabla 7 se puede observar que el tiempo máximo de latencia permitido para el envío de diferentes tipos de mensajes. En las pruebas realizadas en el presente estudio, en escenarios urbanos pequeños el tiempo de retraso estuvo en un intervalo aproximado de entre 98 y 156 ms, en escenarios urbanos medianos el tiempo de retraso estuvo en un intervalo aproximado de entre 105 y 435 ms, en escenarios urbanos grandes el tiempo de retraso estuvo en un intervalo aproximado de entre 313 y 352 ms y finalmente, en los escenarios rurales, el tiempo de retraso estuvo en un intervalo aproximado de entre 371 y 857 ms. Por lo tanto, es posible deducir que los tiempos de retraso obtenidos de las pruebas realizadas se encuentra dentro del tiempo máximo permitido para el envío de mensajes en una micro red.

En el artículo “Resilient communication for smart grid ubiquitous sensor network: state of the art and prospects for next generation” realizado por (Tsado, Lund, & Gamage, 2015) y en el informe “Communication requirements of Smart grid technologies” desarrollado (Department of

Energy United States of America, 2010) , se definen datos aproximados de latencia y ancho de banda medidos en aplicaciones Smart Grid (tabla 8). El factor prioritario de análisis en este estudio es la aplicación AMI, para la cual los requisitos de red se cumplen ya que las redes IEEE 802.15.4 trabajan con una velocidad de transmisión de datos de hasta 250 kbps, con una fiabilidad del 99 al 99.99% y alta seguridad. Además, los valores de latencia son mucho más bajos que los valores usualmente trabajados por lo que la implementación de RPL puede ser óptimo para las microrredes.

Tabla 8: Latencia y ancho de banda en aplicaciones Smart Grid. Tomada de (Tsado, Lund, & Gamage, 2015)

Aplicación Smart Grid	Requisitos de red	Tipo de tráfico	Latencia
AMI (facturación, medición)	10 – 100 kbps/nodo	Periódico	2 – 15 s
DSM (fijación dinámica de precios y control de carga)	14 – 100 kbps/nodo	Periódico/Aleatorio	500 ms – varios minutos
WASA	600 – 1500 kbps	Aleatorio	20 – 200 ms
Monitoreo EV	9.6 – 56 kbps	Aleatorio	2 s – 5 min
DGM	9.6 – 100 kbps	Peiódico/Aleatorio	0.1 – 2 s

Es posible comparar con el artículo “Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN”, realizado por (Kuzlu, Pipattanasomporn, & Rahman, 2014), el área de cobertura concluyendo que tanto en el artículo como en el estudio se ve reflejado que el protocolo funciona mejor en redes IEEE 802.15.4 que tengan un alcance de cobertura de máximo 100m.

Según el artículo “Current challenges and future trends in the field of communication architectures for microgrids” (Marzal, Salas, Gonzáles Medina, Garcerá, & Figueres, 2017), estudios técnicos divulgados en la literatura indican que un nuevo enfoque del sistema de comunicación peer-to-peer es necesario para apoyar la transición de los actuales sistemas de

comunicación, a la próxima generación de las microrredes. Por lo cual es posible deducir que la topología construida P2P de RPL es adecuada para simular microrredes inalámbricas.

6. Conclusiones

Este proyecto ha sido útil para obtener una primera aproximación al tema de Redes de Sensores Inalámbricos y el protocolo de encaminamiento RPL, sus características, generalidades y funcionamiento necesarios para que las WSN sean eficaces. Las conclusiones generadas a partir de los estudios realizados se resumen en los siguientes ítems:

- El comportamiento del protocolo presenta mayor eficiencia en redes de dimensiones pequeñas con cantidades de nodos suficientes, preferiblemente de diez en adelante, para que cada uno de estos se encuentre dentro del alcance de otro y no en el límite del alcance ya que existe la probabilidad de que no se puedan conectar.
- La adecuación de la topología física de la red es un factor muy influyente para el encaminamiento del protocolo ya que el comportamiento de la cantidad de saltos, el ETX, la latencia, la cantidad de nodos conectados, la energía y el tiempo de envío entre paquetes dependen de qué tan bien constituida se encuentre ésta.
- Las redes inalámbricas tienen varias limitaciones que hacen que el enrutamiento en estos dispositivos sea más complejo. RPL propone un conjunto de parámetros que hacen más eficiente el enrutamiento y evaluación del mismo en extensas áreas de aplicaciones de redes de baja potencia y con pérdidas (LLNs).
- Teniendo en cuenta los artículos e informes de referencia estudiados acerca de los requerimientos de comunicación para las microrredes eléctricas, es posible concluir que

RPL es adecuado para la comunicación de datos en micro redes eléctricas ya que cumple con los estándares y requerimientos que estas presentan para su funcionamiento adecuado, mejorando el tráfico de información entre los nodos existentes en la red y disminuyendo los valores comunes de latencia.

7. Recomendaciones

En este capítulo se presentan varias direcciones de trabajos futuros que se pueden derivar de la investigación realizada en este documento.

- El enrutamiento en LLNs es más difícil de tratar cuando los nodos son móviles ya que la eficiencia energética, la conectividad y la latencia se vuelven más difíciles de optimizar. Por lo cual, se proporciona la sugerencia de desarrollar la evaluación del protocolo en redes inalámbricas móviles para implementar posibles mejoras.
- Implementar un algoritmo que permita acondicionar físicamente la posición adecuada de los nodos en la topología de la red permitiendo que todos estén dentro del alcance apropiado evitando generar saltos innecesarios para que exista una conexión total de cada nodo dentro de la WSN y así accedan a un mejor provecho del enrutamiento.

Referencias Bibliográficas

- Ali, H. (2012). *A Performance Evaluation of RPL in Contiki. Master's Thesis*. Karlskrona, Suecia: Swedish Institute of Computer Science. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/d319/4d5f43f1cd3995ba7c9e99776ac8f150d445.pdf>
- Autonomus Networks Research Group (ANRG)*. (s.f.). Obtenido de http://anrg.usc.edu/contiki/index.php/Cooja_Simulator
- Borman, C., Ersue, M., & Keranen, A. (Mayo de 2014). Terminology for Constrained-Node Networks. Internet Engineering Task Force (IETF).
- Canalejo, A. M., & Estepa Alonso, R. M. (2017). *Evaluación del rendimiento en el nivel de red RPL en WSN*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Cisco Systems Inc. (08 de Julio de 2015). *Routing Protocol for LLN (RPL) Configuration Guide, Cisco IOS Release 15M&T*. Obtenido de <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios-xml/ios/rpl/configuration/15-mt/rpl-15-mt-book.html>
- Contiki. (s.f.). *Contiki: The Open Source OS for the Internet of Things*. Recuperado el 10 de 2017, de www.contiki-os.org
- Department of Energy United States of America. (05 de Octubre de 2010). Communication requirements os smart grid technologies. Obtenido de https://www.energy.gov/sites/prod/files/gcprod/documents/Smart_Grid_Communications_Requirements_Report_10-05-2010.pdf
- Deru, L. (04 de Mayo de 2016). RPL Configuration. *RPL*. Obtenido de <https://github.com/cetic/6lbr/wiki/RPL>

- GitHub*. (19 de Abril de 2016). Obtenido de <https://github.com/contiki-os/contiki/wiki/introduction-to-cooja>
- IETF working group. (s.f.). IPv6 over Low power WPAN (6lowpan). Charter. Recuperado el Septiembre de 2017, de <https://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/about/>
- Kermajani, H., & Gómez Montenegro, C. (2014). *Contributions to the Performance Evaluation and Improvement of the IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (Tesis)*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (05 de Abril de 2014). Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN. Survey Paper. *ELSEVIER*, págs. 74-88.
- Lagos, P. A. (2017). *Modelo del Sistema de Comunicaciones para una Microrred Eléctrica Aislada, Basado en una Red de Sensores Inalámbricos, para la Transferencia de Datos de Control*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
- Lasseter, R. H. (16 de Mayo de 2011). Smart Distribution: Cupled Microgrids. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Levis, P., Clausen, T., Hui, J., Gnawali, O., & Ko, J. (Marzo de 2011). The Trickle Algorithm. Internet Engineering Task Force (IETF). Obtenido de <https://tools.ietf.org/html/rfc6206#page-5>
- Li, Y., & Nejabatkhah, F. (Septiembre de 2014). Overview of Control, Integration and Energy Management of Microgrids. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, págs. 212-222.

- Liu, X., Sheng, Z., Yin, C., Ali, F., & Roggen, D. (22 de Septiembre de 2017). Performance Analysis of Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL) in Large Scale Networks. *IEEE Internet of Things Journal*.
- Lobato Fernández, F. (2013). Soporte del Tipo de Mota AVRZIGBIT en el Simulador Cooja. En D. d. Telemática (Ed.). Sevilla, España: Universidad de Sevilla. .
- Malik, B. (2015). *WIRELESS SENSOR NETWORKS (WSN) & APPLICATIONS*. Obtenido de Microcontrollers Lab: http://microcontrollerslab.com/wireless-sensor-networks-wsn-applications/#APPLICATIONS_OF_WIRELESS_SENSOR_NETWORKS
- Marzal, S., Salas, R., Gonzáles Medina, R., Garcerá, G., & Figueres, E. (02 de Noviembre de 2017). Current challenges and future trends in the field of communication architectures for microgrids. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Moallem, A., Bakhshai, A., & Jain, P. (Octubre de 2011). Local Smart Micro-Grids. (I. o. (IEEE), Ed.) Amsterdam, Países Bajos: Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Nayyar, A., & Singh, R. (2015). *Scientific & Academic Publishing*. Obtenido de A Comprehensive Review of Simulation Tools for Wireless Sensor Networks (WSNs): <http://article.sapub.org/10.5923.j.jwnc.20150501.03.html#Sec4>
- Papacetzzi, F. M. (2003). *Wireless Personal Area Network (WPAN) & Home Networking (Tesis)*. Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.
- Rojas, M. O. (2012). *Simulación de redes de sensores inalámbricos: un modelo energético a nivel de nodo-sensor bajo las especificaciones IEEE 802.15.4 y ZIGBEE*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.

- Saad, L. B., Chauvenet, C., & Tourancheau, B. (Septiembre de 2011). Simulation of the RPL Routing Protocol for IPv6 Sensor Networks: two cases studies. *International Conferencen Sensor Tchnologies and Applications SENSORCOMM 2011*. Francia.
- Singh, N., Lal Dua, R., & Mathur, V. (Mayo de 2012). Wireless Sensor Networks: Architecture, Protocols, Simulator Tool. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2(5), 229–233.
- Tsado, Y., Lund, D., & Gamage, K. (03 de Junio de 2015). Resilient Communication for Smart Grid Ubiquitous Sensor Network: State of the Art and Prospects for Next Generation. *ELSEVIER*, págs. 34-49.
- Vasseur, J. (Enero de 2014). Terms Used in Routing for Low-Power and Lossy Networks. Internet Engineering Task Force (IETF).
- Wang, W., Xu, Y., & Khanna, M. (27 de Julio de 2011). A survey on the communication architectures in smart grid. Carolina del Norte, Estados Unidos: ELSEVIER.
- Wikipedia*. (25 de 10 de 2016). Obtenido de Sensor node: https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor_node
- Winter, T. (Marzo de 2012). *RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*. Obtenido de <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6550.txt>
- Working Group of IEEE 802.15.4 Standards Association. (05 de Diciembre de 2015). IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. New York, USA.
- Yasaroglu, P., Abduljabbar, Z., Alotaibi , H., Akcam , R., Kadavarthi , S., & Abuzaghle , O. (2016). *Wireless Sensor Networks (WSNs)*. Bridgeport: Universidad de Bridgeport. Obtenido de <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2272/document/7494144/>
- Zheng, J., & Lee, M. (2004). *A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4*.