

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones
con orientación en Telecomunicaciones**

**Evaluación de estrategias distribuidas para el despliegue de
redes LPWAN multisalto**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Javier Alejandro Cortes Ponce

Ensenada, Baja California, México
2020

Tesis defendida por
Javier Alejandro Cortes Ponce

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda
Codirector de tesis

Dr. Aldo Eleazar Pérez Ramos
Codirector de tesis

Miembros del comité

Dr. Salvador Villarreal Reyes

Dr. Raúl Rivera Rodríguez

Dr. Heriberto Márquez Becerra



Dr. Daniel Saucedo Carvajal
Coordinador del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Javier Alejandro Cortes Ponce** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

Evaluación de estrategias distribuidas para el despliegue de redes LPWAN multisalto

Resumen aprobado por:

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda
Codirector de tesis

Dr. Aldo Eleazar Pérez Ramos
Codirector de tesis

Los avances en tecnologías de sensores, sistemas embebidos, comunicaciones inalámbricas, computación en la nube, entre otras, propiciaron el surgimiento del “internet de las cosas” (*IoT*). Con este nuevo modelo de comunicación, también surgieron aplicaciones del IoT que demandan el monitoreo continuo de variables urbanas y/o ambientales dentro de áreas geográficas extensas. Tradicionalmente, este tipo de aplicaciones han sido atendidas mediante arquitecturas de redes de sensores multi-salto (WSN) empleando tecnologías inalámbricas de corto alcance. No obstante, este enfoque, requiere un número considerable de dispositivos IoT para cubrir estas áreas, lo cual incrementa la complejidad, costo y consumo de energía de la red. Las Redes Inalámbricas de Área Amplia y de Baja Potencia (LPWAN) emergen como una tecnología prometedora que busca atender las necesidades de comunicación de largo alcance, baja complejidad y bajo consumo de las aplicaciones IoT. Estas también se caracterizan por emplear en la mayoría de sus implementaciones topologías de red en estrella. Por lo regular, en estas topologías los dispositivos finales transmiten con niveles de potencia elevados para asegurar la entrega de sus datos, esto también provoca un elevado consumo de energía de la red. En los últimos años, se propuso la implementación de topologías de red multisalto en LPWAN para ahorrar energía en los dispositivos finales, no obstante, la formación de las topologías multisalto en LPWAN no es una tarea trivial, por lo que se mantiene como un tema de investigación abierto. En este trabajo se investigaron, implementaron y evaluaron estrategias de control de topología distribuidas para el despliegue de redes LPWAN multisalto. Se diseñó e implementó en OMNET++ una cama de pruebas LPWAN-LoRa multisalto, la cual fue utilizada para evaluar las estrategias de control de topología en términos de consumo de energía y eficiencia de red. Los resultados obtenidos muestran que es factible implementar dichas estrategias en redes LoRa multisalto mostrando un gasto energético menor a la topología tradicional en escenarios con pocos saltos. Sin embargo, existe un compromiso al considerar la cantidad de saltos de los paquetes en este tipo de redes, puesto que un mayor número de retransmisiones incrementa el consumo de energía.

Palabras clave: LPWAN, Multisalto, Control de topología, red inalámbrica de sensores (WSN), OMNeT++

Abstract of the thesis presented by **Javier Alejandro Cortes Ponce** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications.

Evaluation of distributed strategies for the deployment of multi-hop LPWAN networks.

Abstract approved by:

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda

Thesis Codirector

Dr. Aldo Eleazar Pérez Ramos

Thesis Codirector

Advances in sensor technologies, embedded systems, wireless communications, cloud computing, among others, led to the emergence of the “internet of things” (IoT). With this new communication model, IoT applications that demand the continuous monitoring of urban and/or environmental variables over large geographic areas are also emerged. Traditionally, these types of applications have been covered by multi-hop sensor network (WSN) architectures, which use short-range wireless technologies to establish communication links. However, this approach needs a considerable number of IoT devices to cover these areas, increasing the complexity, costs, and energy consumption of the whole network. Low Power and Wide Area Network (LPWAN) emerge as a promising technology that seeks to fulfill IoT needs such as long-range, low-complexity, and low-power communications. LPWAN are also known for using star network topologies in most of implementations. Typically, in these topologies the end devices transmit with high power levels to ensure the delivery of their data, this also causes a high energy consumption of whole network. In recent years, the implementation of multi-hop network topologies in LPWAN has been proposed to save energy on end devices. However, the topology formation in multi-hop LPWAN is not a trivial task and it remains as open research topic. In this thesis, it has been investigated, implemented, and evaluated distributed topology control strategies for the deployment of multi-hop LPWAN networks. In order to perform our evaluations, a multi-hop LPWAN-LoRa test-bed was designed and implemented in OMNET++. Topology control strategies were evaluated in terms of power consumption and network efficiency. The results obtained show that it is feasible to implement these strategies in multi-hop LoRa networks showing lower energy consumption than traditional topology with few hops. However, there is a trade-off when considering the number of packet hops in this type of network, since a higher number of retransmissions increase the power consumption.

Keywords: LPWAN, Multi-hop, Topology Control, Wireless Sensor Network(WSN), OMNeT++

Dedicatorias

A mis padres:

Gracias mamá por ser un ejemplo a seguir, motivándome y apoyándome en todos mis proyectos. Papá, aunque ya hace mucho no estas con nosotros, muchas gracias por todo lo que me has dado.

Los amo y atesoro siempre en mi corazón.

A mi novia:

Lucero, gracias por brindar equilibrio y ser una parte muy importante de este trabajo y de mi vida. Juntos podemos superar muchas cosas.

Te amo.

Agradecimientos

Doy gracias a Dios por darme la oportunidad de cumplir mis metas, brindándome el conocimiento necesario para llevarlas a cabo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por ofrecerme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y brindarme apoyo económico siendo becario con el número 914661.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por abrirme las puertas para cursar un posgrado, y brindarme la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos.

Al proyecto de ciencia básica CONACyT CB-2016-285276 por brindarme el apoyo para la realización de este trabajo de investigación.

A mis codirectores de tesis, el Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda y el Dr. Aldo Eleazar Pérez Ramos, quienes fueron guía y parte fundamental en mi desarrollo profesional y personal. Gracias por su amistad, orientación, apoyo, consejos, tiempo y paciencia, me llevo muchas cosas buenas de ustedes.

A los miembros de mi comité de tesis: Dr. Salvador Villarreal Reyes, Dr. Raúl Rivera Rodríguez, Dr. Heriberto Márquez Becerra, por su tiempo y consejos brindados durante el proceso de este trabajo de investigación.

A mis profesores quienes me apoyaron y facilitaron las herramientas y el conocimiento necesario para completar la maestría, en especial, a los Doctores David Covarrubias, Salvador Reyes, Alejandro Galaviz, Aldo Pérez y Jorge Preciado, que me brindaron un apoyo más directo.

A los integrantes del grupo ARTS, por sus recomendaciones, ayuda y consejos durante toda la etapa de la maestría, con los cuales el trabajo de tesis se pudo facilitar.

A todos mis compañeros y amigos que conocí en la maestría, con quienes el tiempo durante mi estancia en Ensenada fue grato, en especial a Sidón, Eduardo, Mario, Alexander, Manuel, Kleiver y Rodolfo que me brindaron su apoyo, amistad y con quienes las risas nunca faltaron.

A la Unidad Foránea Monterrey del CICESE que me abrió sus puertas para realizar una estancia académica. Le agradezco a los Doctores que la integran y mis compañeros de laboratorio que me brindaron su apoyo haciendo más grata mi estancia y apoyándome en la realización de mi proyecto.

A mi mamá, que siempre estuvo al pendiente y me brindo todo el apoyo que necesite durante todo el proceso.

A mi novia Lucero, por darme apoyo, tiempo y amor en los momentos más cruciales de la maestría y ofrecerme serenidad para aclarar mis dudas.

A mi familia, que siempre estuvo ahí. Gracias a su apoyo durante todos estos años, en especial a mi mamá Andrea y a mi Madrina.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de Figuras.....	x
Lista de tablas.....	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	6
1.3 Justificación	9
1.4 Objetivos.....	9
1.4.1 Objetivo general.....	9
1.4.2 Objetivos específicos.....	10
1.5 Metodología.....	10
1.6 Organización de la tesis.....	13
Capítulo 2.	14
2.1 Introducción	14
2.2 Redes inalámbricas de sensores.....	16
2.2.1 Tecnologías inalámbricas para redes de sensores.....	16
2.3 Control de topología.....	21
2.4 Enrutamiento.....	27
Capítulo 3.	29
3.1 Introducción.....	29

3.2 Control de topología basado en grafos de proximidad.....	29
3.2.1 Implementación de las técnicas de control de topología utilizando “Grafos Gabriel” (GG) y “Grafos de Vecindad Relativa” (RNG).	30
3.3 OMNeT++.....	33
3.3.1 Framework INET.....	35
3.4 Habilitación de una WSN LPWAN multisalto en OMNeT++.....	36
3.4.1 Implementación del módulo de capa física.....	36
3.4.1.1 Análisis del modelo matemático de pérdidas por propagación de dos rayos.....	37
3.4.1.2 Implementación experimental de un transmisor y receptor LoRa.....	39
3.4.1.3 Validación del módulo de capa física implementado en OMNeT++.....	42
3.4.2 Implementación del módulo de capa de acceso al medio.....	43
3.5 ProRouting 2.0.....	46
Capítulo 4. Escenarios y configuraciones de evaluación.....	48
4.1 Escenario 1: Topología de red multisalto.....	48
4.2 Escenario 2: Topología de red en estrella-multisalto con baja, media y alta densidad de nodos.....	50
4.3 Escenario 3: Topologías de red generadas con los Grafos Gabriel y Grafos de Vecindad Relativa.....	51
4.4 Escenario 4: Topologías de red tipo estrella.....	55
4.5 Configuraciones del ciclo de trabajo.....	56
4.6 Métricas de evaluación.....	58
4.6.1 Consumo de corriente promedio de la red.....	58
4.6.2 Packet Delivery Ratio (PDR)	59
4.6.3 End to End Delay.....	60
Capítulo 5. Evaluación del control de topología en una LPWAN multisalto.....	62
5.1 Introducción.....	62
5.2 Análisis de resultados del escenario 1: Topología de red multisalto.....	62

5.3 Análisis de resultados del escenario 2: Topología de red en estrella-multisalto con baja, media y alta densidad de nodos.....	67
5.4 Análisis de resultados del escenario 3: Topologías de red generadas con los Grafos Gabriel y Grafos de Vecindad Relativa.....	72
5.5 Análisis de resultados del escenario 4: Topologías de red tipo estrella.....	76
Capítulo 6. Conclusiones y trabajo a futuro.....	82
6.1 Introducción.....	82
6.2 Conclusiones sobre los objetivos de este trabajo.....	82
6.3 Conclusiones sobre las herramientas de simulación.....	83
6.4 Conclusiones sobre los resultados de escenarios evaluados.....	84
6.5 Trabajo a futuro.....	85
Literatura Citada.....	87

Lista de Figuras

Figura		Página
1	Principales áreas de aplicación del Internet de las Cosas.....	3
2	Topologías típicas de una red de sensores.....	4
3	Topología en estrella de una LPWAN.....	7
4	Topología de una LPWAN multisalto.....	8
5	Metodología seguida para el desarrollo del trabajo.....	11
6	Clasificación de las redes inalámbricas según su alcance.....	15
7	Aplicaciones típicas de las Redes de Sensores (WSN)	17
8	Topología típica de una red LoRa.....	19
9	Arquitectura de una red de sensores.....	21
10	Topologías comunes en WSN.....	22
11	Topologías formadas por el control de topología.....	24
12	Control de topología utilizando GG.....	25
13	Control de topología utilizando RNG.....	26
14	Área de interferencia.....	26
15	Pseudocódigo de “GG”	30
16	Proceso de podado de enlace “GG”	31
17	Técnicas de podado de enlaces utilizando “GG”	31
18	Pseudocódigo de “RNG”	32
19	Proceso de podado de enlaces “RNG”	32
20	Técnicas de podado de enlaces utilizando “RNG”	32
21	Proceso del control de topología utilizando “GG” o “RNG”	33
22	IDE de OMNeT++.....	34
23	GUI de OMNeT++.....	35
24	Capas desarrolladas y adaptadas para el desarrollo de este trabajo.....	36
25	Modelo de propagación de dos rayos.....	37
26	Gráfica obtenida con el modelo de dos rayos.....	38
27	Transceptor LoRa y placa base.....	40
28	Metodología para la obtención de resultados.....	40
29	Gráfica de resultados experimentales RSSI.....	41
30	Campo de pruebas LoRa.....	42

31	Diagrama de estados del protocolo BMAC.....	43
32	Diagrama del proceso de transmisión de un paquete con ciclo de trabajo.....	45
33	Diagrama del proceso de transmisión de un paquete con interferencia con ciclo de trabajo.....	46
34	Entorno grafico de ProRouting 2.0.....	47
35	Topologías de red evaluadas en el escenario multisalto de 1 a 5 saltos.....	49
36	Topologías de red evaluadas en el escenario multisalto de 5 a 50 nodos.....	50
37	Distribución de nodos para las topologías de GG y RNG.....	52
38	Técnicas de control de topología GG y RNG.....	53
39	Topología generada por las técnicas de GG. Rutas generadas por algoritmo Dijkstra.....	53
40	Topología generada por las técnicas de RNG. Rutas generadas por algoritmo Dijkstra.....	54
41	Escenario topología estrella de 5 a 50 nodos.....	56
42	Configuraciones de ventanas de SLEEP (azul) y CCA (amarillo).....	57
43	PDR expresado en porcentaje de cada topología evaluada en el escenario 1 conforme aumenta la ventana de CCA.....	63
44	Porcentaje promedio de batería consumida para cada topología evaluada en el escenario 1 conforme aumenta la ventana de CCA.....	64
45	PDR expresado en porcentaje de cada topología evaluada en el escenario 2 conforme aumenta la ventana de CCA.....	67
46	Problema del Nodo oculto.....	68
47	Porcentaje promedio de batería consumida para cada topología evaluada en el escenario 2 conforme aumenta la ventana de CCA.....	69
48	PDR expresado en porcentaje de cada topología evaluada en el escenario 3 conforme aumenta la ventana de CCA.....	72
49	Porcentaje promedio de batería consumida para cada topología evaluada en el escenario 3 conforme aumenta la ventana de CCA.....	74
50	PDR expresado en porcentaje de cada topología evaluada en el escenario 4 conforme aumenta la ventana de CCA.....	77
51	Porcentaje promedio de batería consumida para cada topología evaluada en el escenario 4 conforme aumenta la ventana de CCA.....	78
52	End-to-End Delay expresado en segundos para cada topología evaluada en el escenario 4 conforme aumenta la ventana de CCA.....	80

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Tecnologías de comunicaciones para IoT.....	5
2	Tecnologías LPWAN.....	18
3	Configuraciones de velocidad de datos de la tecnología LoRa.....	20
4	Resultados obtenidos de las pruebas de campo.....	41
5	Parámetros de simulación utilizados en los escenarios 1, 2 y 3.....	49
6	Parámetros de simulación utilizados en el escenario 4.....	56
7	Configuraciones de las simulaciones realizadas.....	58
8	End-to-End Delay expresado en segundos para cada topología evaluada en el escenario 1 conforme aumenta la ventana de CCA.....	66
9	End-to-End Delay expresado en segundos para cada topología evaluada en el escenario 2 conforme aumenta la ventana de CCA.....	71
10	End-to-End Delay expresado en segundos para cada topología evaluada en el escenario 3 conforme aumenta la ventana de CCA.....	75
11	End-to-End Delay expresado en segundos para cada topología evaluada en el escenario 4 conforme aumenta la ventana de CCA.....	79

Capítulo 1. Introducción

El avance sostenido en el área de las telecomunicaciones, sensores, microelectrónica, herramientas de análisis informático y la necesidad de las personas por mantenerse conectados con su entorno, han propiciado el surgimiento de un nuevo paradigma de comunicación conocido como “El internet de las cosas” (*IoT*, por sus siglas en inglés). El IoT hace referencia a la interconexión de objetos físicos cotidianos, o entidades identificadas de forma única, fácilmente integrables en hogares, entornos de trabajo o lugares públicos y provistos con la capacidad de transferir datos (Barrachina et al, 2017). El IoT tiene como objetivo proveer numerosos servicios y/o aplicaciones, algunas enfocadas a la agricultura, ciudades inteligentes, industria, cuidado de la salud, monitoreo ambiental, entre otras (Ray et al, 2018). Interactuar con un entorno mediante la interconexión de objetos de uso común, es considerado como la siguiente revolución de las comunicaciones, como consecuencia Ericsson pronostica que para 2025 más de 23 mil millones de dispositivos IoT conectados a la red sirviendo a la población mundial (Ericsson, 2020).

La investigación y desarrollo tanto de hardware, como de software, de nuevas soluciones enfocadas a las telecomunicaciones, es una tarea que se mantiene en crecimiento constante. A medida que esto sucede, el IoT evoluciona y se encuentran nuevos usos o aplicaciones. Dichas áreas de aplicación poseen características particulares y demandan requisitos específicos para poder ser atendidas, por lo que el desarrollo de estas nuevas soluciones debe estar orientado hacia el cumplimiento de estos requisitos.

Para que todos estos servicios y aplicaciones dentro del ecosistema IoT puedan ser funcionales se requiere, entre otros factores, una conectividad ubicua, confiable, escalable y rentable (Palattella et al, 2016). Además, es importante mencionar que establecer dicha conectividad no es una tarea trivial, puesto que es necesario emplear técnicas y protocolos que se encarguen del descubrimiento de topología y del enrutamiento de los datos en la red, por lo que este tema es un reto que está siendo abordado por varios grupos de investigación a nivel mundial enfocados a las comunicaciones.

Teniendo en cuenta la tendencia de crecimiento tecnológico que sigue el IoT, se desarrollan tecnologías para soportar aplicaciones con requisitos específicos, por ejemplo, mayor área de cobertura, bajo costo de implementación, y eficiencia energética (Boulogerogos et al, 2016). Esta

tendencia impulsa el surgimiento de nuevas tecnologías inalámbricas de área amplia y baja potencia (LPWA, por sus siglas en inglés) con las que se habilitan “Redes de área amplia de baja potencia” (LPWAN, por sus siglas en inglés). Las LPWAN se definen como redes inalámbricas concebidas para proporcionar comunicaciones de área amplia, con bajo consumo energético de los dispositivos y con bajo o nulo costo operativo con respecto a las redes celulares (Barrachina et al, 2018).

Las LPWAN ofrecen las características técnicas adecuadas para aplicaciones IoT, que solo necesitan transmitir pequeñas cantidades de datos a distancias muy grandes (Sinha et al, 2017). Sin embargo, las LPWAN son relativamente nuevas, por lo que algunas técnicas de descubrimiento de red utilizadas en redes del IoT que utilizan tecnologías inalámbricas de corto alcance, aún no han sido probadas sobre LPWAN. A pesar de que se ha demostrado el uso de dichas técnicas en otras tecnologías del IoT, por ejemplo, el control de topología basado en grafos de proximidad, no es directo saber si para las LPWAN son adecuadas, esto se debe a que las LPWAN cuentan con características muy diferentes a las tecnologías en donde se ha evidenciado un uso favorable de ellas. Uno de los grandes retos que presenta las LPWAN es que la mayoría de las soluciones que se presentan dependen de redes con una topología en particular, en dicha topología los nodos transmiten directamente a un nodo central resumidero, el cual se encarga de procesar la información, este tipo de topología se le conoce como en estrella.

En este trabajo de investigación se evaluará el uso de las técnicas de control de topología basadas en grafos de proximidad en una LPWAN Multisalto, teniendo como uno de sus objetivos evaluar el uso de estas técnicas para desplegar redes basadas en tecnología LPWAN.

1.1 Antecedentes

Se prevé que el “Internet de las Cosas” sea una red mundial de dispositivos electrónicos únicos habilitados para internet, interconectados y basados en protocolos de comunicación estandarizados (Giri et al, 2017). El IoT es un paradigma novedoso que cada día gana más terreno, la idea básica del concepto IoT, es la presencia generalizada de una variedad de cosas u objetos inteligentes que nos rodean, por ejemplo: etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID), sensores, actuadores, teléfonos móviles, entre otros, los cuales al estar dotados de interfaces de comunicación puedan

cooperar con sus vecinos mediante una conexión ubicua, con el fin de alcanzar objetivos comunes (Atzori et al, 2010). Dichos objetos están pensados para aplicaciones donde la tasa de datos puede llegar a ser baja, siendo esta una característica para desplegar redes IoT enfocadas en ayudar a superar los retos de la vida diaria, intentando facilitar y mejorar la calidad de vida del ser humano.



Figura 1. Principales áreas de aplicación del Internet de las Cosas. (Mahmoud y Mohamad, 2016)

Las potencialidades que ofrece el IoT hacen posible el desarrollo de numerosas aplicaciones basadas en esta arquitectura. Por ejemplo, los dispositivos vestibles conectados a redes del IoT como relojes, pulseras, bandas, lentes, todos ellos inteligentes y dotados de sensores, ofrecen nuevas oportunidades para interactuar con el entorno y también para monitorizar de forma remota el estado de salud de las personas que los portan. En la Industria y manufactura, la incorporación de sensores conectados, inteligencia artificial y dispositivos vestibles permiten la disminución significativa de tiempos de proceso, mejora en la seguridad de empleados y desplazamiento en la resolución de incidencias. En las ciudades inteligentes los sensores instalados en toda la ciudad son utilizados para registrar la calidad de aire, el tráfico vehicular, el consumo de energía eléctrica,

seguridad de las personas, etc., lo cual permite gestionar de manera eficaz los recursos de la ciudad al tiempo que brinda servicios a los ciudadanos de manera satisfactoria (ESIC, 2018).

Para cumplir con su objetivo, los sensores utilizados en las aplicaciones antes mencionadas, forman “Redes de Sensores Inalámbricos” (WSN, por sus siglas en inglés), para transmitir su información hacia una entidad central, que se encarga de recopilar la información y de enviarla hacia los usuarios interesados (Dudla et al, 2013). Las WSN pueden tener diferentes topologías como se muestra en la Figura 2.

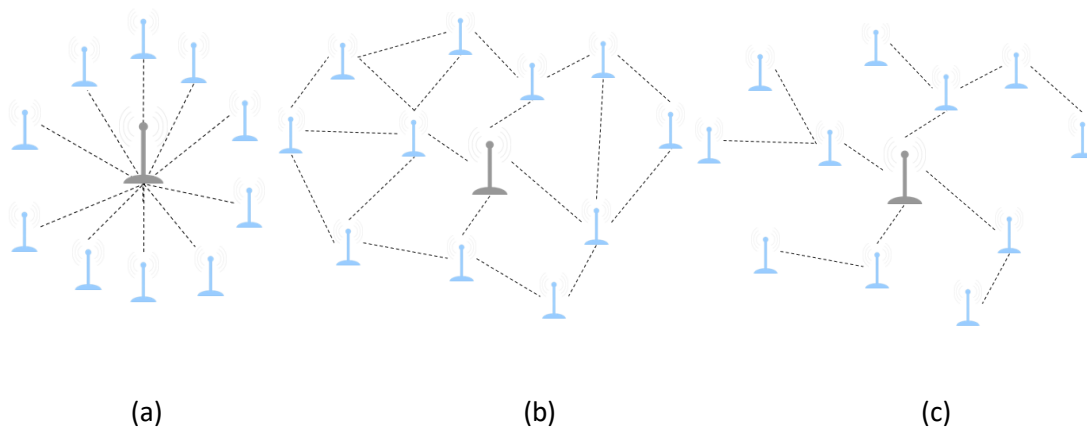


Figura 2. Topologías típicas de una red de sensores inalámbricos (WSN). a) Topología en estrella, b) Topología en malla, y c) Topología en árbol.

Una forma para desplegar una red utilizando estas topologías, es aplicar técnicas y protocolos que faciliten el proceso de formación de la red. Dentro de éstas, se tienen las técnicas de control de topología, las cuales son unas de las más utilizadas en las redes inalámbricas, teniendo como objetivo principal reducir el consumo de energía al implementar un control de los enlaces de comunicación entre los nodos de la red. (Santi, 2005).

Como se observa en la Figura 1, las aplicaciones IoT son muy diversas, por lo tanto, parámetros como el tipo de sensor, el número de dispositivos utilizados, el tamaño del área de monitoreo, la frecuencia de recolección de los datos, la cantidad de información transmitida, etc., no suelen ser los mismos. De la misma forma, las tecnologías inalámbricas reportadas a la fecha ofrecen diferentes características técnicas en términos de consumo de energía, velocidad de transmisión, bandas de

frecuencia, etc. Por lo tanto, en la habilitación de estas aplicaciones se debe realizar una selección minuciosa de la tecnología inalámbrica, para obtener el mejor desempeño posible de los sistemas de comunicaciones implementados. Estas tecnologías brindan diferentes características como área de cobertura, velocidad de datos, entre otras (ver Tabla 1) (Ray et al, 2016).

Tabla 1. Tecnologías de comunicación para el IoT. Comparación técnica entre las principales tecnologías inalámbricas utilizadas para el IoT. (Ray et al, 2016; Barrachina et al, 2018)

Parámetros (por dispositivo)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	LR-WPAN (IEEE 802.15.4)	Wi-Fi (IEEE 802.11 a/c/b/d/g/n)	WiMAX (IEEE 802.16)	Comunicación móvil (2G/3G/4G -LTE)	LPWAN (LoRa, NB-IoT, SIGFOX)
Banda de frecuencia	2.4 GHz	868/915 MHz 2.4GHz	2.4-5 GHz	2-66GHz	865 MHz 2.4GHz	868-915 MHz LTE
Velocidad de datos	1-50 Mbps	250 Kbps	1-600 Mbps	1-1000 Mbps	50 Kbps - 1 Gbps	100 bps- 624 kbps
Alcance de cobertura	8-10 m	10-20 m	20-100 m	<50 Km	Área celular	<30 Km
Consumo de energía	Medio	Bajo	Alto	Alto	Medio	Bajo
Costo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Medio	Bajo

En este contexto, las tecnologías LPWAN han sido desarrolladas para soportar aplicaciones IoT de baja tasa de datos, pues el limitado ancho de banda no es suficiente para transmitir señales de audio y video. Por ello, las redes LPWA (LPWAN) se emplean casi exclusivamente para atender las necesidades de aquellas aplicaciones que requieren transferir de forma inalámbrica pequeñas cantidades de datos, pocas veces al día y a través de largas distancias, esto es, redes de sensores y dispositivos distanciados geográficamente, que solo requieren o pueden transmitir poca información sobre su estado. Las LPWAN han sido implementadas y evaluadas en aplicaciones como monitoreo marino (Parri et al, 2019), agricultura (Civelek et al, 2017), redes para la monitorización remota de pacientes y la gestión inteligente de la energía (Parri et al, 2019), por mencionar algunas. Los autores en (Yonghua et al, 2017) realizan un análisis comparativo entre las principales tecnologías LPWAN y otras existentes como lo son ZigBee y WI-Fi para una aplicación de IoT enfocada a las energías renovables. Los resultados reportados en este trabajo demostraron que, las

LPWAN pueden ser una mejor opción para desplegar redes enfocadas a esta área por su bajo consumo de energía y por permitir conexiones masivas que cubren largas distancias.

La topología de red de las LPWAN se caracteriza por el establecimiento de enlaces directos de los nodos finales hacia estaciones base, es decir, se forman topologías del tipo estrella. Aunque esta topología simplifica el diseño de la red y proporciona un control centralizado, puede tener algunos desafíos y desventajas en términos de escalabilidad y confiabilidad. Además, los dispositivos más alejados de la estación base requieren transmitir con niveles de potencia elevados, afectando directamente el tiempo de vida del dispositivo (Vázquez et al, 2017).

Como una solución a lo anteriormente mencionado, en (Barrachina et al, 2018) se propone habilitar una LPWAN multisalto para enfrentar los retos de la topología estrella. El resultado de este trabajo demuestra la viabilidad del establecimiento de enlaces entre dispositivos formando comunicaciones multisalto, con lo cual este tipo de topología muestra un ahorro en términos de energía en comparación a la topología en estrella. Además, se han propuesto protocolos de enrutamiento multisalto que permiten la comunicación segura de dispositivos IoT (Chze et al, 2014; Hasseb et al, 2019), lo que abre un panorama a otros trabajos de investigación.

1.2 Planteamiento del problema

El crecimiento sostenido de las aplicaciones que requieren monitorización de áreas geográficas extensas bajo un enfoque IoT, propició el surgimiento de las tecnologías de comunicación inalámbrica de área amplia y bajo consumo (LPWAN). Dichas tecnologías ofrecen características muy atractivas para el despliegue de LPWAN sobre áreas extensas, por ejemplo, en zonas urbanas, semi-urbanas, rurales e inclusive en el mar (Aloÿs et al, 2016; Liando et al, 2018; Tyagi y Jain, 2019). Las características principales de este tipo de redes son las comunicaciones de largo alcance entre los dispositivos (en el orden de kilómetros), las bajas tasas de transmisión de datos (en el orden de las decenas de bytes) y el bajo consumo de energía de los transceptores utilizados (en el orden de los mW).

Las redes de área amplia y bajo consumo de energía en la mayoría de las soluciones que se reportan manejan, tienen o utilizan topologías de red particulares (Hernández et al, 2017). En estas topologías los nodos transmiten directamente a un nodo central (resumidero o nodo concentrador de información), el cual se encarga de procesar, almacenar y redirigir la información hacia los servicios de la nube, las topologías empleadas son del tipo estrella (ver Figura 2).

Sin embargo, los trabajos reportados en Sneha (2013) han demostrado que una red con topología estrella puede no ser eficiente en términos de consumo de energía. Esto se debe a que, por lo regular, los nodos en la red transmiten a su máxima potencia para asegurar la conectividad hacia el nodo concentrador de información, esto lleva a una rápida descarga de la batería que alimenta al dispositivo.

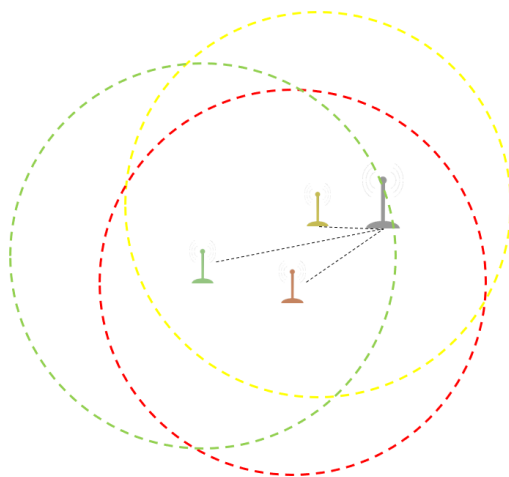


Figura 3. Topología en estrella de una LPWAN. Ejemplo de LPWAN mostrando su área de cobertura.

Barranchina et al. (2016) ha propuesto una solución para mejorar la eficiencia de energía, implementando una red con topología multsalto. También en Sneha et al. (2013) demuestran que conforme aumentan los saltos, disminuye la energía consumida de extremo a extremo. En la topología multsalto los nodos se pueden comunicar con sus nodos vecinos, creando una ruta hacia el resumidero, utilizando a esos nodos vecinos como retransmisores (ver Figura 4). Sin embargo, para habilitar este tipo de redes, los autores proponen hacer un descubrimiento de topología manual, lo cual puede generar problemas de eficiencia al momento de querer generar la topología en el despliegue de la red.

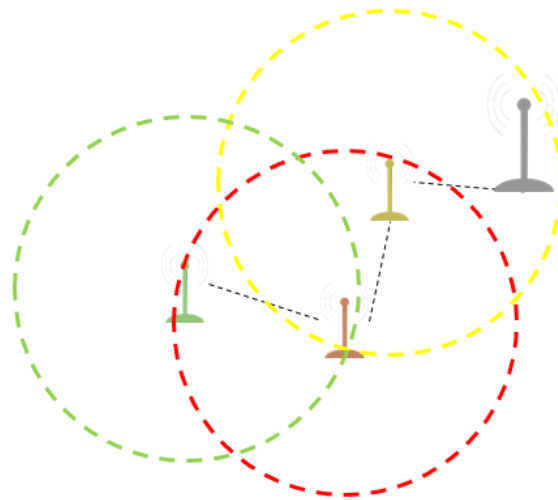


Figura 4. Topología de una LPWAN Multisalto. Ejemplo de una LPWAN multisalto mostrando su área de cobertura

Teniendo como premisa que una LPWAN ya presenta una eficiencia de energía utilizando la topología multisalto, existe el reto en poder hacer más eficiente el descubrimiento de topología. Una manera de lograr esa eficiencia la reporta Santi (2005), donde propone utilizar técnicas denominadas control de topología basado en grafos de proximidad. Las técnicas de control de topología mencionadas ya se han implementado satisfactoriamente en redes de sensores. Sin embargo, estas técnicas de descubrimiento de topología no han sido evaluadas en una LPWAN multisalto. Sin considerar otros aspectos, estas técnicas prometen ahorros, pero, al considerar aspectos relacionados a las redes de comunicación, como la recepción y el bajo consumo de datos, estos no necesariamente pueden suceder con las LPWAN para el IoT.

Por lo que este trabajo de investigación evaluó el uso de las técnicas de control de topología basadas en grafos de proximidad en una LPWAN Multisalto, evaluando diferentes escenarios con diferentes cantidades de saltos, nodos y dos técnicas de grafos de proximidad, utilizando un simulador de redes para implementar las redes LPWAN con ayuda de mediciones realizadas en campo.

1.3 Justificación

Como se mencionó anteriormente, las tecnologías LPWAN han emergido como respuesta al crecimiento sostenido de las aplicaciones que requieren monitorización de áreas geográficas extensas bajo un enfoque IoT, y al ser tecnologías relativamente nuevas existen muchas áreas de oportunidad para realizar investigación y aportar mayor conocimiento sobre ellas a la comunidad académica (Chaudari et al, 2020).

El despliegue de una LPWAN multisalto plantea un reto importante, como ya se mencionó este tipo de topología es viable en términos de consumo de energía. No obstante, el plantear un descubrimiento de topología manual de la red como los propuestos en la literatura (Barrachina et al, 2016), puede ser poco eficiente configurar dispositivo por dispositivo en el despliegue de la red, por lo que abre la posibilidad de generar trabajos de investigación como el que se presenta en esta tesis.

Por tal motivo, el propósito de este trabajo está orientado a contribuir en la investigación del impacto de la aplicación de técnicas de control de topología investigadas y evaluadas en redes de sensores de corto alcance. Después de una búsqueda en la literatura científica se observó que actualmente las técnicas de control de topología basadas en grafos de proximidad no han sido reportadas o aplicadas para este tipo de redes.

Por ende, una de las motivaciones de este trabajo es el aporte de conocimiento contestando la incógnita sobre qué tan viable es aplicar técnicas de control de topología en LPWAN multisalto, todo esto con el fin de hacer más eficiente el proceso de descubrimiento de topología, observar si existen beneficios y generar nuevas preguntas para proponer trabajos a futuro, siendo un paso más hacia el despliegue de estas redes dentro del ecosistema IoT.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Evaluar el costo en términos de consumo de energía y de eficiencia de red de un control de topología distribuido en el despliegue de una LPWAN multisalto.

1.4.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un marco de simulación validado para el control de topología en LPWAN multisalto.
- Diseñar e implementar una estrategia distribuida basada en grafos de proximidad para el control de topología en LPWAN multisalto.
- Definir las métricas para evaluar el costo en términos de consumo de energía y de eficiencia de red de un control de topología distribuido en el despliegue de una LPWAN multisalto.
- Realizar una implementación inicial reducida de la propuesta a manera de prueba de concepto.

1.5 Metodología

A continuación, se enlistan los procedimientos que se siguieron para el desarrollo de este trabajo acompañado de una breve descripción.

1. **Investigación del estado del arte del control de topología y la tecnología LPWAN.** Se realizó una investigación sobre qué es y cómo funciona el control de topología, así como el estado del arte sobre las LPWAN, y cuales han sido las soluciones que se han desarrollado para soportar este tipo de redes y aplicaciones en donde ya han sido evaluadas.
2. **Estudio de las herramientas, módulos y bibliotecas principales del simulador de redes OMNeT++.** Se buscaron y analizaron artículos, notas de aplicación y manuales que explican el modo de funcionamiento, las herramientas, módulos y bibliotecas principales del simulador de redes OMNeT++. Este estudio se reafirmó de forma práctica al implementar un protocolo de enrutamiento conocido sobre una implementación de red inalámbrica

convencional. El desarrollo de esta actividad dejó varias enseñanzas de la forma en la que funciona el simulador, las cuales fueron aplicadas a lo largo del trabajo de tesis

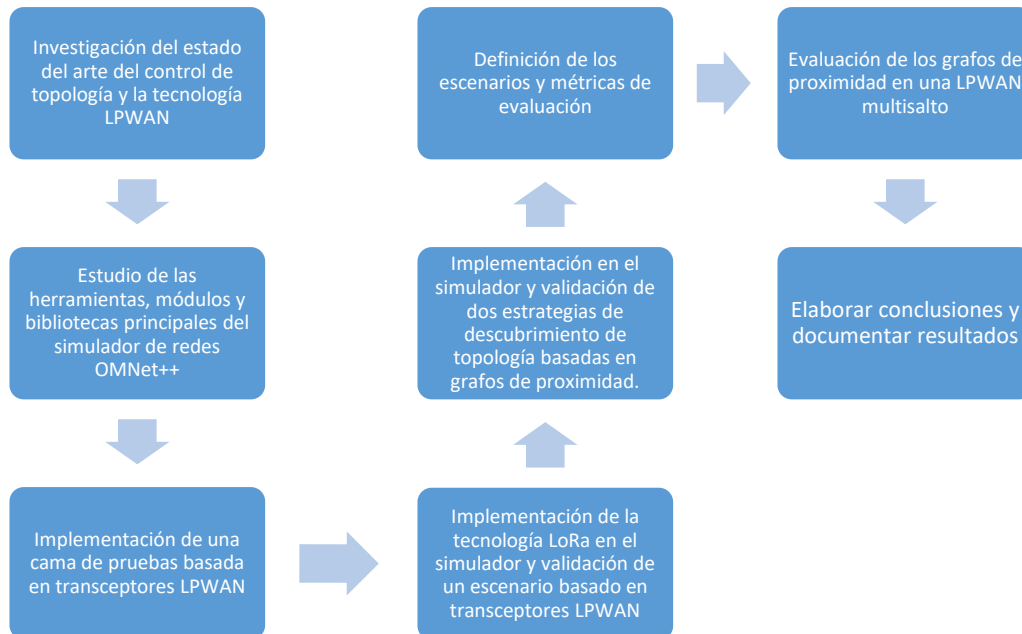


Figura 5. Metodología seguida para el desarrollo del trabajo.

- 3. Implementación de una cama de pruebas LPWAN-LoRa basada en transceptores comerciales.** Para implementar, y simular posteriormente en OMNeT++ una LPWAN-LoRa basada en transceptores comerciales, en primer lugar, fue necesario obtener los valores teóricos de la potencia recibida versus distancia considerando un modelo de pérdidas por propagación tradicional. Esta información fue utilizada como referencia al momento de realizar las pruebas experimentales. Después, se habilitó un transmisor y un receptor LoRa para obtener experimentalmente los valores del indicador de intensidad de señal recibida (RSSI, por sus siglas en inglés) con respecto al incremento de la separación entre nodos y el impacto de esta separación en la tasa de entrega de paquetes (“PDR” por sus siglas en inglés). Es importante mencionar que los valores experimentales fueron obtenidos considerando diferentes configuraciones de capa física LoRa (ancho de banda y factor de esparcimiento) y de potencia de transmisión.

- 4. Implementación de la LPWAN-LoRa basada en transceptores en OMNeT++.** Una vez obtenidos los resultados de las pruebas de campo, se procedió a realizar la implementación de la LPWAN en el simulador de redes, en donde primero se configuraron las especificaciones utilizadas en la cama de pruebas basadas en tecnología LoRa como ancho de banda, velocidad de transmisión, frecuencia de operación, y potencia de transmisión, seguido de la implementación del modelo matemático obtenido de las pruebas de campo mediante el uso de MATLAB. Se realizaron pruebas de transmisiones LoRa en el simulador de redes, con el fin de replicar los resultados obtenidos en la cama de pruebas y que estos sean fidedignos a la tecnología utilizada y del mismo modo al modelo matemático utilizado como referencia.
- 5. Implementación en el simulador y validación de dos estrategias de descubrimiento de topología basadas en grafos de proximidad.** Para cumplir con el objetivo principal de este trabajo de tesis fue necesario implementar 2 técnicas de control de topología basadas en grafos de proximidad dentro de la herramienta OMNet++, los grafos elegidos fueron el Grafo Gabriel (GG) y el Grafo de vecindad relativa (RNG).
- 6. Definición de los escenarios y métricas de evaluación.** Con la implementación en OMNeT++ de la LPWAN-LoRa y las técnicas de grafos de proximidad, se definieron los escenarios que permitieron llevar a cabo el análisis y evaluación del impacto de las técnicas de control de topología GG y RNG en una LPWAN multisalto. Dichos escenarios toman en cuenta las características evaluadas en las pruebas de campo para un análisis más cercano a la realidad, así mismo se definieron las métricas necesarias para realizar esta evaluación.
- 7. Evaluación del control de topología basado en los grafos de proximidad en una LPWAN multisalto.** Se realizaron las simulaciones pertinentes para observar el comportamiento del control de topología y del multisalto en una LPWAN, posteriormente se reunieron los resultados necesarios para la elaboración de tablas y gráficas con las cuales se pudo realizar un análisis apoyado en estas y observar el impacto que tiene el aplicar las técnicas de control de topología.

8. **Elaboración del análisis, discusión y documentación de los resultados.** Una vez evaluados los escenarios de las simulaciones, se generaron las conclusiones resultantes de este trabajo de investigación, así como algunas recomendaciones sobre el uso de las técnicas utilizadas.

1.6 Organización de la tesis

En el capítulo 2 se presenta una introducción de las tecnologías inalámbricas utilizadas para redes de sensores y técnicas de control de topología utilizadas en este trabajo, así como una descripción de los aspectos técnicos de las LPWAN, en particular de la tecnología LoRa la cual se utilizó como la capa física de los nodos sensores de la LPWAN.

En el capítulo 3 se describen las herramientas de simulación utilizadas para el desarrollo de este trabajo, también se describe la implementación de la capa física LoRa, las técnicas de control de topología y del ciclo de trabajo, en donde se describen detalladamente los procesos que se siguieron para lograr la implementación de los escenarios.

En el capítulo 4 se describen las características de los escenarios de evaluación que se utilizaron en este trabajo de investigación, la metodología utilizada en cada uno de los escenarios y las métricas para realizar el análisis de los resultados.

En el capítulo 5 se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las métricas evaluadas en las simulaciones realizadas.

Por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del análisis y discusión de los resultados obtenidos del trabajo de investigación. De igual manera se enlista el trabajo a futuro que surge de esta tesis.

Capítulo 2. Redes inalámbricas de corto y largo alcance

2.1 Introducción

Como se mencionó en el capítulo anterior, las tecnologías de comunicación se encuentran en evolución constante, mostrando una clara tendencia hacia el uso de comunicaciones inalámbricas. Actualmente la mayoría de las personas ha adoptado el uso de las tecnologías inalámbricas para realizar sus actividades cotidianas (Hytnen y García, 2006), además, un gran número de usuarios, en su mayoría jóvenes, empiezan a desconocer los cables para conectar sus dispositivos hacia redes con acceso a internet (Lenhart, 2015).

Es importante mencionar que la evolución de las comunicaciones también se ha presentado en los sistemas de comunicaciones confinadas, por ejemplo, aquellos basados en fibra óptica (Farman et al, 2020). No obstante, los usuarios han preferido la tecnología inalámbrica debido a la conectividad ubicua, movilidad, costo, entre otros beneficios que esta ofrece. Además, las tecnologías inalámbricas juegan un rol importante en el ecosistema del Internet de las Cosas debido a que con éstas se recolectan los datos provenientes de sensores de distintos tipos, por ejemplo, sensores de temperatura, humedad, posición, de calidad de aire, inerciales, entre otros utilizados en las diversas aplicaciones del IoT. Como se mencionó en el capítulo anterior, el IoT se refiere a la interconexión de las cosas como objetos físicos equipados con interfaces inalámbricas con las que transmiten sus datos hacia nodos concentradores de información que almacenan y redirigen hacia los servicios en la nube (Atzori et al, 2010).

Lo que se busca con el IoT es formar una red de comunicación a nivel mundial de una gran cantidad de “objetos inteligentes” capaces de comunicarse entre ellos (Cama et al, 2012). Esta red global estará formada por redes más pequeñas en donde los dispositivos que la conforman estarán diseñados para cumplir con propósitos específicos en las aplicaciones o soluciones IoT (Naveed et al, 2017).

Una clasificación de las redes inalámbricas ampliamente aceptada en la literatura considera el radio de cobertura o alcance de las transmisiones. Esta clasificación brinda información relevante a los diseñadores de soluciones IoT para seleccionar la tecnología inalámbrica que mejor se ajuste a sus

necesidades de comunicación dentro de áreas de cobertura específicas. También es importante mencionar que existen otro tipo de clasificaciones, por ejemplo, en la literatura también se les ha clasificado por su velocidad de transmisión. En la Figura 6 se muestra la clasificación de las redes inalámbricas considerando su radio de cobertura, de igual manera se muestran las tecnologías y estándares más representativos que se utilizan en las redes para el IoT.

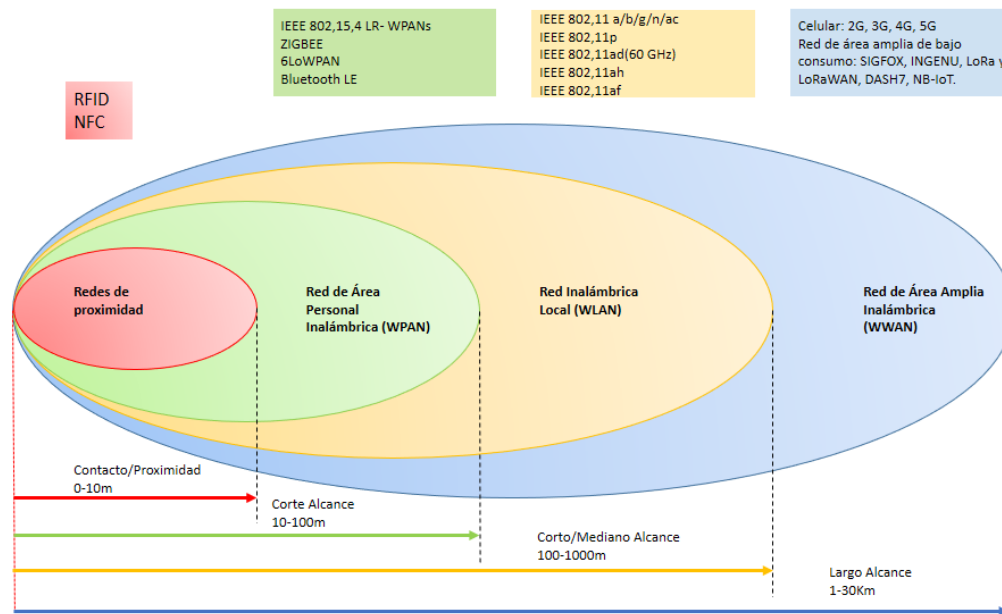


Figura 6. Clasificación de las redes inalámbricas según su alcance.

En esta Figura se puede observar que las redes móviles celulares y las redes de área amplia y bajo consumo (LPWAN) son clasificadas como redes de largo alcance, sin embargo, manejan diferentes velocidades de transmisión, consumo de energía, frecuencias de operación, entre otras, por lo que su área de aplicación es distinta. Lo anterior muestra la necesidad de diferentes tipos de clasificaciones.

2.2 Redes inalámbricas de sensores

Las redes inalámbricas de sensores (“Wireless Sensor Networks”, WSN por sus siglas en inglés) se pueden definir como redes inalámbricas ad-hoc de baja tasa de datos utilizadas para monitorizar variables físicas de su entorno como temperatura, humedad, sonido, vibración, nivel de pH, entre otras, (Matin e Islam, 2012). Los nodos en las WSN transmiten sus datos de manera cooperativa por medio de comunicaciones multisalto, esto es, los nodos sensores que no están dentro del área de cobertura del nodo concentrador de información (resumidero), transmiten su información hacia los nodos intermedios (nodos vecinos) los cuales se encargan de retransmitir estos mensajes de datos hasta que llegan al nodo resumidero.

Es bien conocido que las WSN utilizan tecnologías inalámbricas de corto alcance para establecer sus comunicaciones, lo que conlleva al uso de una gran cantidad de dispositivos para recolectar información en áreas geográficas extensas. No obstante, como se mencionó en el Capítulo 1, recientemente han emergido tecnologías de largo alcance y bajo consumo (LP-WA) con las que se pueden habilitar redes inalámbricas de sensores de área amplia, con separaciones entre nodos en el orden de kilómetros.

2.2.1 Tecnologías inalámbricas para redes de sensores

Existen diferentes tecnologías y estándares propuestos para el diseño e implementación de redes de sensores, entre los más utilizados están las tecnologías de corto alcance como ZigBee, 6LoWPAN, “Bluetooth Low Energy” (BLE, por sus siglas en inglés), Ultra Wideband y LoRaWAN, SigFox, NB-IoT como soluciones de largo alcance. Todos estos poseen diferencias importantes en los protocolos y esquemas de señalización utilizados para la transmisión de información hacia los receptores o estaciones base, consumo de energía, velocidad de transmisión, robustez en los enlaces de comunicación, entre otras (Barboni y Valle, 2008; Suciú et al, 2013; Petric et al, 2016)

Como se mencionó anteriormente las tecnologías utilizadas para desplegar redes inalámbricas de sensores (WSN) se pueden clasificar principalmente como de corto y largo alcance. Las redes

inalámbricas de corto alcance han sido utilizadas en una gran variedad de aplicaciones, por ejemplo, existen soluciones orientadas hacia el cuidado de la salud, las redes eléctricas inteligentes, la agricultura y seguridad (Kawamoto et al, 2014) (ver Figura 7).

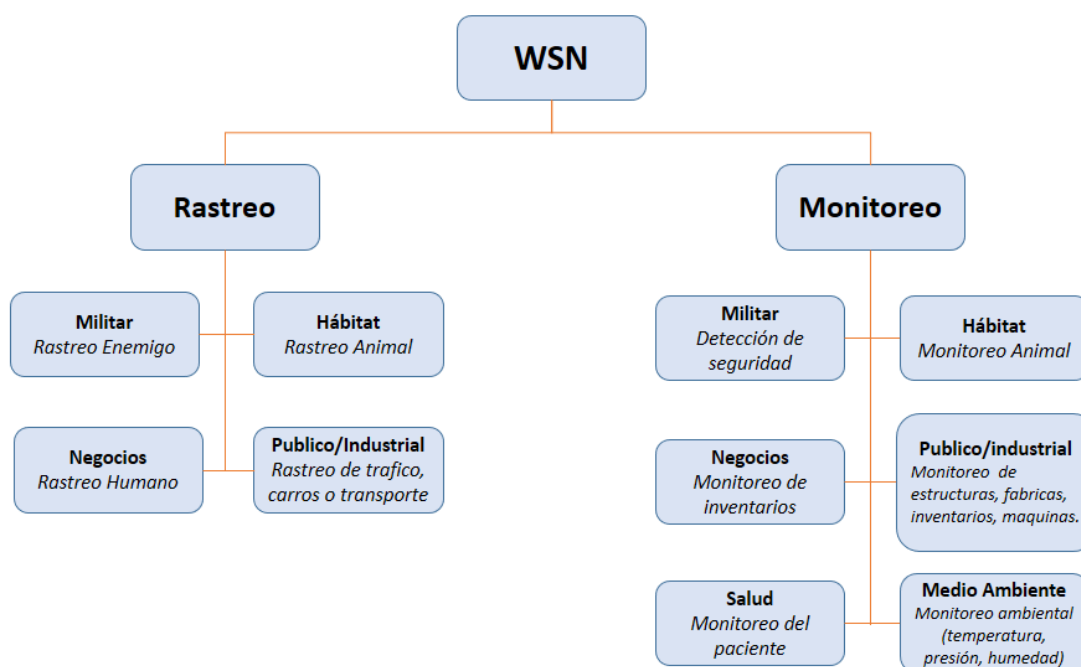


Figura 7. Aplicaciones típicas de las Redes de Sensores (WSN).

Por otro lado, las redes inalámbricas de largo alcance, también pueden tener aplicaciones enfocadas a redes de sensores orientadas a satisfacer necesidades de recolección de información en ciudades inteligentes, redes eléctricas inteligentes, agricultura, entre otras, (Mekki et al, 2017). En el caso de las redes de largo alcance las distancias son conseguidas por una combinación de diversos factores, por ejemplo, las frecuencias utilizadas en las comunicaciones son SubGHz (experimentan menores pérdidas por propagación que las señales de 2.4 GHz), transmiten con potencias mayores a 500 mW (aplicando regulaciones en el tiempo de transmisión), utilizan esquemas de modulación de espectro esparcido y ultra narrowband, los receptores tienen niveles de sensibilidad en el orden de los -130 dBm, entre otros. En la Tabla 2 se presentan las características técnicas más relevantes de las principales tecnologías utilizadas para el despliegue de LPWAN.

Tabla 2. Tecnologías LPWAN. Comparación técnica entre diferentes tecnologías LPWAN

Solución	SIGFOX™	LoRaWAN™	NB-IoT	Ingenu	D7AP	HARE
Frecuencia de operación	868 MHz 902 MHz	433 MHz 780 MHz 800 MHz 900 MHz	Frecuencias LTE 700 MHz 800 MHz 900 MHz	2.4 GHz	433 MHz 868 MHz 915 MHz	868 MHz 2.4GHz
Alcance de transmisión	10 Km	15 Km	10 Km	1 a 3 Km	10 Km	Hasta varios Km
Velocidad de transmisión del enlace ascendente	100bps	0.3 a 50 kbps	200 kbps	624 kbps por sector	9.6 kbps 55.55 kbps	50 kbps 250 kbps
Tamaño de carga útil	12 bytes	Definido por el usuario (242 bytes máximo)	1600 bytes	6 bytes a 10 kbytes	≤256 bytes	≤127 bytes
Potencia de Transmisión	≤ 20 dBm	≤ 14 dBm (EU) ≤ 27 dBm (US)	≤ 20 dBm	≤ 20 dBm	FCC/ETSI regulaciones	≤ 14 dBm
Topología	Estrella	Estrella de estrellas	Estrella	Árbol estrella	Árbol estrella	Árbol estrella

Como se puede observar en la tabla 2, se confirma que estas tecnologías trabajan en su mayoría en las bandas SubGHz de uso libre, y la topología más utilizada es del tipo estrella. También se puede observar que cada una de ellas ofrece características específicas como lo son el tamaño del paquete, la velocidad de transmisión y la potencia de transmisión. Estas características específicas se dan gracias a las diferentes técnicas de modulación que utilizan, a las regulaciones permitidas del canal inalámbrico y al tipo de tecnología utilizada (Barrachina et al, 2017).

Una de las tecnologías LP-WA que ha generado más interés en el desarrollo de soluciones de LPWAN es LoRa (“Long Range”). Los beneficios que ofrece esta tecnología se pueden resumir en los siguientes: 1) transmisiones de largo alcance mayores a 10 km cuando existe línea de visión; 2) baja complejidad y bajo costo en el despliegue de los nodos y puertas de enlace (Gateways) debido al bajo costo de los dispositivos LoRa; 3) posee características de capa física que combinadas ofrece comunicaciones robustas lo cual aumenta la confiabilidad del sistema ante diferentes condiciones del entorno; 4) bajo consumo de energía; y 5) transmisión de paquetes ortogonales utilizando diferentes factores de esparcimiento sin comprometer la confiabilidad de la transmisión.

LoRaWAN es una especificación de la capa de Control de Acceso al Medio (“Medium Access Control”, MAC por sus siglas en inglés) desarrollada por la Alianza LoRa (LoRa Alliance en inglés), la cual permite que muchos dispositivos finales se comuniquen con una puerta de enlace (LoRa Alliance, 2017). LoRa es una técnica de modulación de espectro ensanchado y es la encargada de permitir las comunicaciones de largo alcance con un bajo consumo de energía y baja tasa de datos, como se puede ver en la Tabla (2) opera en las bandas ISM de 433, 868 o 915 MHz dependiendo de la región donde se implemente y puede alcanzar velocidades de hasta 50 kbps. Esta técnica de modulación utiliza “Chirp Spread Spectrum” (CSS, por sus siglas en inglés) en donde se usan técnicas de ensanchamiento de espectro esparcido. Su topología típica es la conocida como topología Estrella o Estrella de estrellas como se puede observar en la Figura 8.

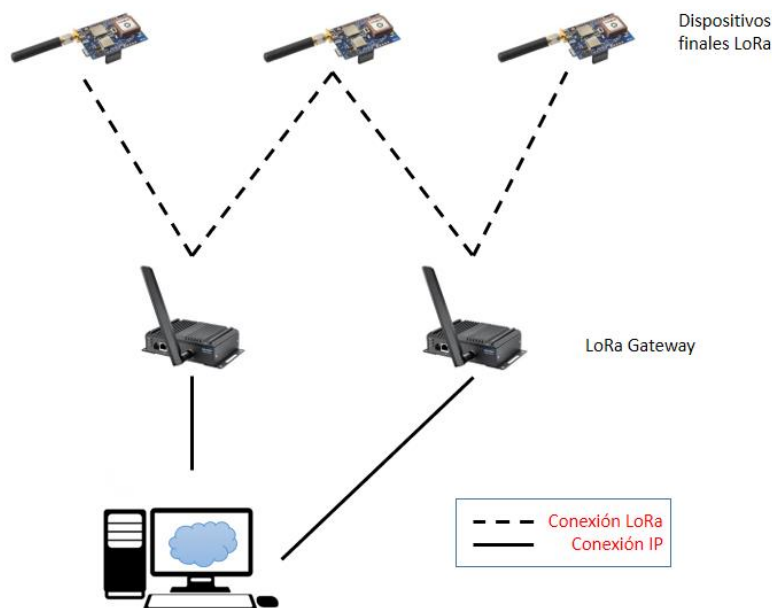


Figura 8. Topología típica de red LoRa.

También es importante mencionar que LoRaWAN cuenta con diversas configuraciones como se presenta en la Tabla 3, en donde se pueden observar los parámetros más importantes de esta tecnología. En LoRa, CSS tiene diferentes factores de esparcimiento (“Spreading Factors”, SFs por sus siglas en inglés) con los que es posible modificar las tasas de modulación de chirp. Los SF más

bajos, como SF7, permiten velocidades de datos más altas pero un alcance de transmisión reducido, mientras que los SF más altos, como SF12, proporcionan mayor alcance a velocidades de datos más bajas. Por lo tanto, la selección del número de SF es una solución de compromiso entre el área que se desea cubrir, la tasa de datos y el tamaño del paquete que sale del radio. Tradicionalmente, las transmisiones LoRa tienen anchos de banda (BW) de 125 KHz, 250 KHz, y 500 KHz, se tiene una carga útil de hasta 250 bytes por mensaje, tasas de datos de hasta 37.5 kbps y muy bajos consumos de energía. Otro factor de relevancia en la capa física LoRa es la tasa de codificación (“Coding Rate”, CR por sus siglas en inglés) la cual es utilizada para aumentar la redundancia en la carga útil transmitida. Considerando el parámetro CR, la tasa de bit final es multiplicada por un factor $4/(4+CR)$ donde CR toma un valor entre 1 a 4. Adicionalmente, la tecnología LoRa ofrece una alta sensibilidad en la recepción. Es importante mencionar que los parámetros BW, SF y CR tienen el mayor impacto en la confiabilidad de la transmisión y la recepción (Sinha et al, 2017).

Como se puede observar en la Tabla 3 existen configuraciones establecidas que nos indican la velocidad de datos alcanzable (“Data Rate”, DR por sus siglas en inglés), en donde cada uno de los parámetros mencionados son modificados para cumplir con una tasa de envío.

Tabla 3. Configuraciones y velocidad de datos de la tecnología LoRa.

DataRate (DR)	Configuración	Bit/segundo
0	LoRa: SF10 / 125kHz	980
1	LoRa: SF9 / 125kHz	1760
2	LoRa: SF8 / 125kHz	3125
3	LoRa: SF7 / 125kHz	5470
4	LoRa: SF8 / 500kHz	12500
5:7	Reservado	
8	LoRa: SF12 / 500kHz	980
9	LoRa: SF11 / 500kHz	1760
10	LoRa: SF10 / 500kHz	3900
11	LoRa: SF9 / 500kHz	7000
12	LoRa: SF8 / 500kHz	12500
13	LoRa: SF7 / 500kHz	21900
14...15	Reservado	

2.3 Control de topología

El análisis de los mecanismos de control de topología aplicados en redes de sensores, conlleva el estudio previo de conceptos fundamentales de redes de comunicaciones, como, por ejemplo, los tipos de topologías de red, el propósito y funcionamiento de los protocolos de control de acceso al medio y protocolos de enrutamiento, aspectos de diseño de las WSN, entre otros. Con respecto al diseño e implementación de las WSN se deben tener en cuenta diferentes factores, por ejemplo, el tipo de aplicación y el entorno en donde será desplegada dicha red, esto para seleccionar la tecnología que cubra los requisitos de velocidad de transmisión y alcance, las estrategias y/o protocolos de comunicación que permitan el establecimiento de enlaces confiables, los mecanismos o estrategias para reducir el consumo de energía de la red, etc.

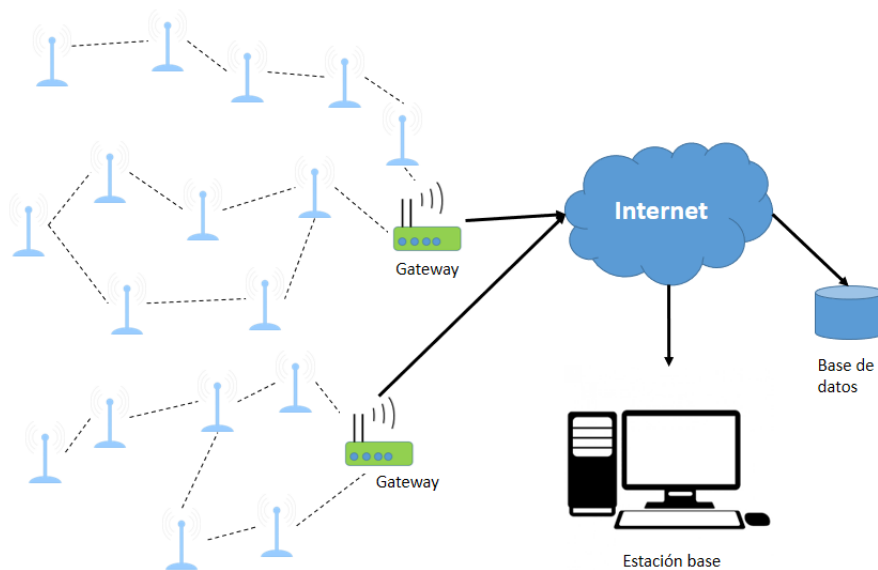


Figura 9. Arquitectura de una red de sensores.

Como se puede apreciar en la Figura 9, los nodos sensores de una WSN se encontrarán distribuidos de una forma aleatoria o determinista, dependiendo de la aplicación. En dicha red cada nodo tiene la capacidad de obtener información de su entorno y transmitirla hacia el nodo resumidero (“SINK”)

empleando comunicación directa o multisalto (Urdaneta et al, 2014). Dentro de los factores más relevantes en este tipo de redes se encuentran:

- Tolerancia a fallos: El fallo de un nodo sensor se puede presentar por diferentes circunstancias, por ejemplo, la descarga de la batería que alimenta al nodo sensor, es algo que provocará eventualmente la desconexión del nodo de la red. En una WSN este factor no debería comprometer el funcionamiento de toda la red, debido a que se podrían implementar diferentes algoritmos para actualizar y reestablecer rutas de comunicación para que los paquetes transmitidos lleguen a su destino.
- Escalabilidad: Una WSN deberá ser diseñada para que sea capaz de trabajar con una gran cantidad de nodos en la red, adaptándose y reaccionando al aumento de dispositivos, en algunos casos siendo cientos o miles de ellos. Cabe mencionar que en este factor la tecnología utilizada para la WSN juega un papel muy importante.
- Costo de implementación: mantener un bajo costo de implementación es un punto clave para que la WSN sea rentable.

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes factores que se deben tener en cuenta para implementar una WSN, no obstante, un factor importante en el desarrollo de esta propuesta es la topología de red.

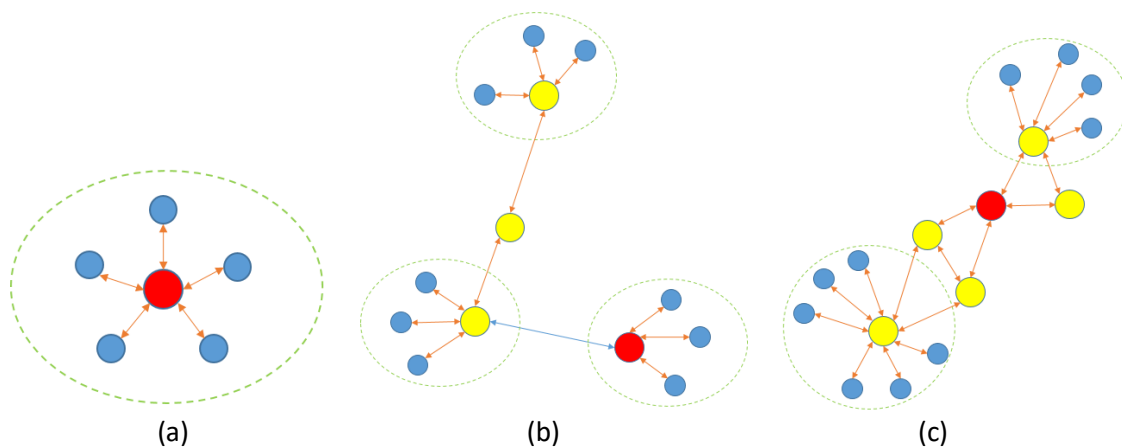


Figura 10. Topologías comunes en WSN. a) Topología tipo estrella, b) Topología tipo árbol y c) Topología tipo malla.

Recordando lo mencionado en el capítulo anterior, una topología de red define la forma en la que los dispositivos se comunican entre sí para enviar la información hacia el nodo concentrador de información. Hay varias topologías de comunicación para implementar en una WSN, las más utilizadas son las topologías en estrella, árbol y malla. Las características de estas topologías son las siguientes:

Topología en estrella: su funcionamiento se basa en que el paquete transmitido por un nodo fuente se enviará de forma directa (esto es, "dará un salto") hacia su destino utilizando una potencia de transmisión previamente establecida por el diseñador de la red, dicha potencia de transmisión deberá ser mayor en aquellos dispositivos que se encuentren más alejados de los nodos resumideros, esto para incrementar el número de paquetes de información entregados correctamente.

Topología Árbol: el paquete transmitido por el nodo fuente deberá dar más de un salto para llegar al destino, esto por medio de sus nodos vecinos los cuales funcionaran como nodos retransmisores de paquetes. Las potencias de transmisión bajo este esquema de comunicación serán mucho más bajas que en el caso anterior, esto por la aplicación del concepto de red multisalto. Además, como se puede apreciar en la Figura 10 existen comunicaciones multisalto entre los nodos que forman las ramas del árbol y comunicaciones directas de los nodos que forman las hojas de este árbol.

Topología Malla: al igual que el caso anterior se considera una red multisalto con la característica de que existe una mayor cantidad de enlaces teniendo la posibilidad de transmitir un mensaje por diferentes caminos.

Para formar las topologías antes mencionadas, los dispositivos en la red deberán utilizar algoritmos de descubrimiento de topología. Para realizar el descubrimiento de topología es necesario que los dispositivos tengan pre programada la topología a desplegar, por ejemplo, para una topología del tipo estrella, el algoritmo de descubrimiento dicta que todos los nodos en la red deberán comunicarse con el nodo recolector por lo que no podrán tener enlaces directos con los demás dispositivos. Por otro lado, en una red multisalto los nodos de la red al realizar el descubrimiento de topología tomaran en cuentas características o condiciones como la distancia entre dispositivos para que un enlace pueda ser establecido, por lo que en este tipo de topologías normalmente los nodos

solo conocen a sus vecinos directos. Es importante mencionar que, durante la ejecución del proceso de descubrimiento de vecinos, se ejecute un mecanismo para ubicarlos dentro de la red, el cual puede llevarse a cabo con un módulo de “GPS” o por medio de mensajes de control.

El control de topología es una de las técnicas más utilizadas en WSN, la cual es capaz de reducir el consumo de energía y el área de interferencia en la red ajustando la potencia de transmisión a un nivel adecuado para llegar a su vecino a un salto y definiendo cuales de los enlaces formados se conservan.

Antes de describir puntualmente el control de topología es necesario determinar que una topología de red se puede definir como un grafo, pues comparten una similitud en sus definiciones. Un grafo es un espacio topológico que se arma a partir de un conjunto de nodos llamados vértices y un conjunto de enlaces llamadas aristas (Galaviz, 2019; Guo et al, 2018).

El control de topología basado en grafos de proximidad utiliza las propiedades que definen estos para elegir los enlaces existentes. Como se puede ver en la Figura 11, se muestran 2 técnicas de control de topología basadas en Grafos Gabriel y en Grafos de Vecindad Relativa. Se puede observar que el control de topología ignora los enlaces que no cumplan con la propiedad que dictan los grafos, obteniendo dos topologías diferentes resultantes de un mismo grafo original.

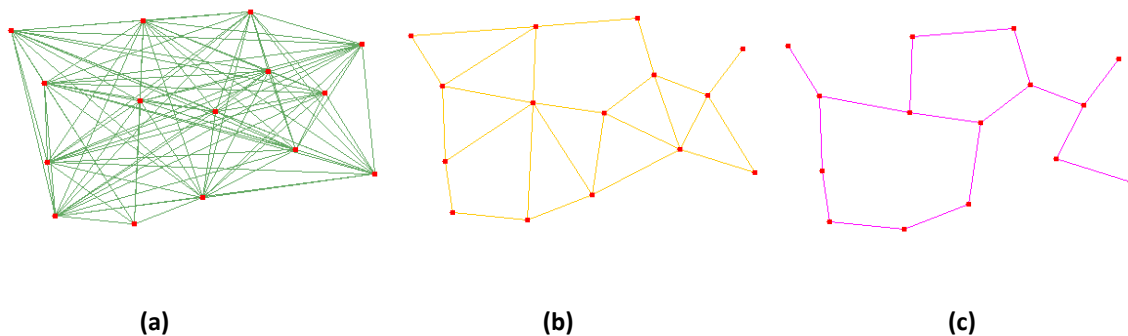


Figura 11. Topologías formadas por el control de topología. a) Topología original, b) Topología GG y c) Topología RNG.

El control de topología basado en Grafos Gabriel (GG, por sus siglas en inglés), funciona como se puede observar en la Ecuación 1 donde u_i y u_j son los nodos que se están considerando al aplicar GG, u_k es el nodo testigo el cual determina si un enlace se conserva o se elimina y δ es la distancia entre los nodos considerados, en la Figura 12 se puede ver el funcionamiento de manera gráfica. En ella se observa un ejemplo en donde si un nodo existe dentro del área del círculo que se forma entre dos dispositivos o nodos, el enlace será ignorado pues no cumple con la propiedad de GG, en caso contrario en donde no existe la interferencia de un tercer nodo dentro del círculo que se forma entre dos dispositivos el enlace cumple con GG (Karp y Kung, 2000).

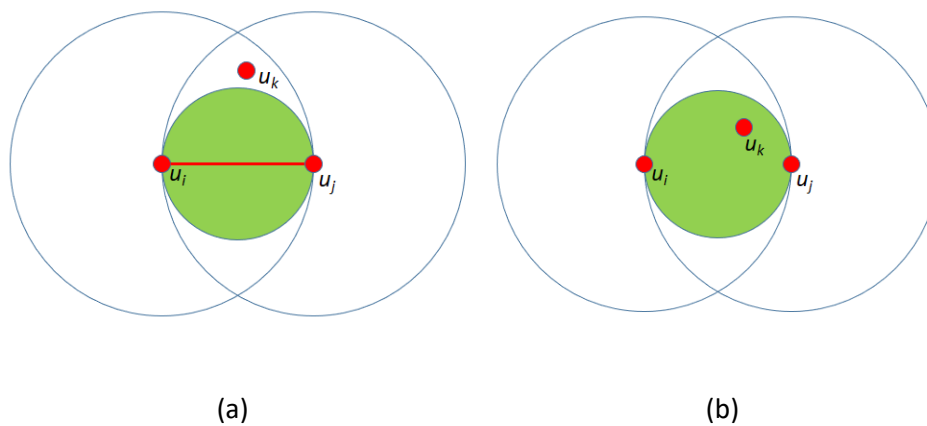


Figura 12. Control de topología utilizando GG. a) Enlace existente y b) Enlace no existente.

$$GG = \delta_{u_i, u_k}^2 + \delta_{u_j, u_k}^2 \leq \delta_{u_i, u_j}^2 \quad (1)$$

El Control de topología basado en Grafos de Vecindad Relativa (RNG, por sus siglas en inglés), funciona cumpliendo con la Ecuación 2, en donde igual en el caso anterior u_i y u_j son los nodos que se están considerando al aplicar RNG, u_k es el nodo testigo que determina si un enlace se conserva o se elimina y δ es la distancia entre los nodos considerados. Esta técnica se puede apreciar de manera gráfica en la Figura 13, pues si un nodo existe dentro del área con forma de luna entre dos nodos como se puede observar en la Figura 13b, el enlace no se encontrará disponible pues no cumple con la Ecuación 2, para el caso donde un tercer nodo se encuentra fuera del área mencionada como en la Figura 13a el enlace cumple con la ecuación y queda registrado como un enlace existente en la nueva topología (Karp y Kung, 2000).

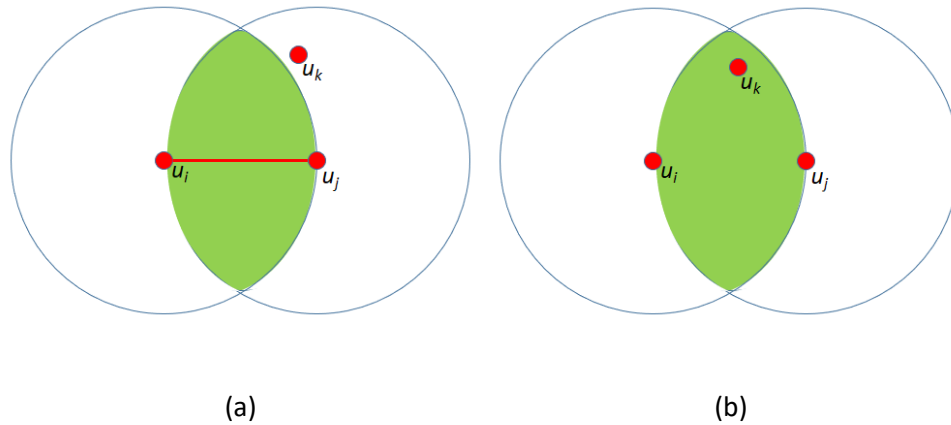


Figura 13. Control de topología utilizando RNG. a) Enlace existente y b) Enlace no existente.

$$RNG = \max \{ \delta_{u_i, u_k}, \delta_{u_j, u_k} \} \leq \delta_{u_i, u_j} \quad (2)$$

Después de haber determinado los enlaces existentes en la topología, el control de topología procede a definir la potencia de transmisión mínima necesaria para poder transmitir un paquete de información a sus nodos vecinos. Por ejemplo, en la Figura 14 se puede observar como el control de topología redujo el área de interferencia al ajustar la potencia de transmisión a la mínima necesaria, teniendo un beneficio en el ahorro de energía (Santi, 2005).

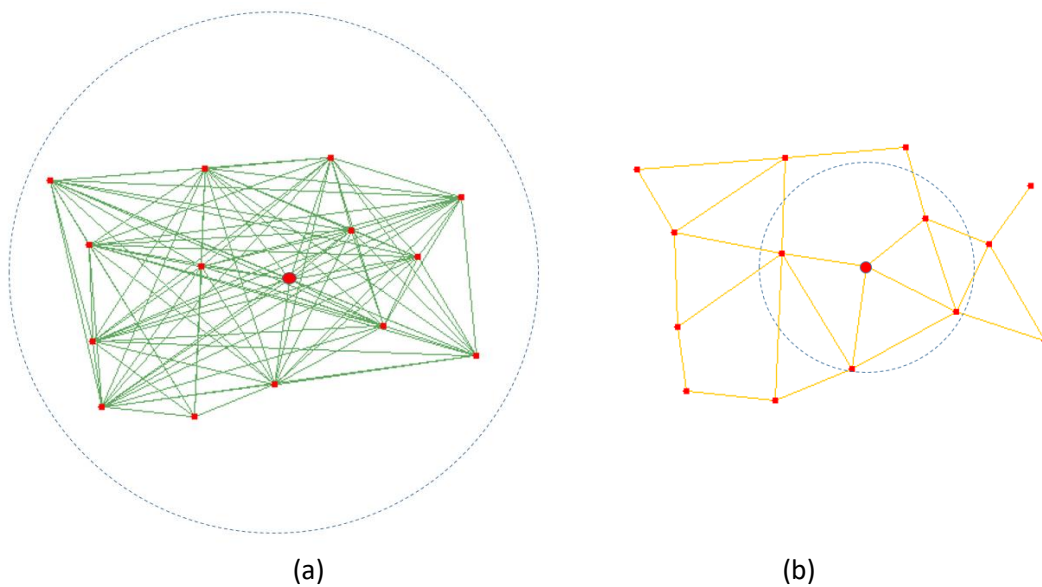


Figura 14. Área de interferencia. a) Topología original utilizando su máxima potencia de transmisión y b) Topología GG después de ajustar la potencia de transmisión con el Control de topología.

2.4 Enrutamiento

Para lograr que un paquete pueda llegar a su destino existen una variedad de algoritmos de enrutamiento los cuales se pueden definir como protocolos de capa de red que guían a los paquetes a través de la red de comunicación hasta su destino correcto. Estos se encargan de lograr una coordinación entre los nodos de la red, hacer frente a fallas de enlaces y nodos, y buscar lograr un alto rendimiento redireccionando el tráfico, actualizando sus bases de datos y modificando las rutas congestionadas.

El enrutamiento se puede calificar de diferentes maneras, una de ellas es dividirlos en centralizados y distribuidos:

- Centralizado: todas las decisiones de rutas y enlaces disponibles las realiza un único nodo central que se encarga de administrar toda la red.
- Distribuido: todos los nodos comparten las decisiones de enlaces y rutas disponibles, por tal motivo no existe un nodo central.

Otra manera de clasificar los algoritmos de enrutamiento se define como estático y adaptativo o dinámico. El algoritmo de enrutamiento estático es fijo, por lo que las rutas no se pueden modificar y no toma en consideración el tráfico de la red; por otro lado, los algoritmos dinámicos son capaces de enrutar el tráfico por diferentes caminos en respuesta a la congestión de la red.

Para poder lograr implementar un algoritmo de enrutamiento, es necesario compartir la información de los nodos en la red a través de mensajes, esta información será utilizada para determinar la cantidad de dispositivos, ubicación, el rol desempeñado, etc.

Dentro de este mismo contexto se pueden mencionar los protocolos de enrutamiento los cuales pueden ser combinaciones de diferentes técnicas y algoritmos de enrutamiento, se pueden dividir en dos, los protocolos reactivos como AODV y DSR, en donde buscan una ruta cada vez que se quiere transmitir un paquete de información por el canal, utilizando paquetes de solicitud de rutas para definir una ruta al destino, en una red muy densa este proceso puede ser muy tardado; y los proactivos como DSDV, OLSR, GPSR entre otros, los cuales están actualizando sus tablas de rutas

disponibles constantemente por lo cual cuando se quiere transmitir un paquete de información solo es necesario revisar si el canal se encuentra disponible.

Los protocolos de enrutamiento son una manera muy meticulosa de definir las rutas al destino, pues constan de diferentes instrucciones para definir la ruta, sin embargo, estos están basados en algoritmos de enrutamiento los cuales basan su funcionamiento el buscar la ruta óptima al destino utilizando diferentes métricas como el costo en términos de energía o en calidad.

Un ejemplo de lo mencionado anteriormente es el algoritmo de Dijkstra, en donde su funcionamiento se basa en encontrar el camino más corto o de menor costo hacia el nodo destino (Pedraza et al, 2012). Este algoritmo forma parte de un grupo de algoritmos especializados en encontrar la ruta más corta, sin embargo, el algoritmo de Dijkstra en términos de implementación es el más sencillo dentro de este grupo, pues su capacidad de computo facilita la implementación de rutas en redes de comunicación

El algoritmo de Dijkstra al ser de los más conocidos, da pauta a ser de los más utilizados en el desarrollo de trabajos de investigación, utilizándolo como base para el desarrollo de nuevos protocolos de enrutamiento o por su facilidad de implementación en investigaciones donde el enrutamiento no es el tema de principal de interés.

Capítulo 3. Herramientas de simulación para la evaluación de control de topología en redes de área amplia y bajo consumo (LPWAN) multisalto.

3.1 Introducción

En este capítulo se describe a detalle las herramientas de simulación y su validación, así como la habilitación e implementación de una WSN basada en tecnología “LoRa” (“LPWAN”) utilizando las técnicas de control de topología basadas en GG y RNG, además se explica el funcionamiento del ciclo de trabajo implementado en la WSN.

Una simulación, según Shannon (1975) “es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con este modelo con el propósito de comprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema”. Hoy en día existen diversas herramientas de simulación enfocadas en el uso de redes de telecomunicaciones. Para el desarrollo de este trabajo de tesis fue necesario conocer la herramienta de simulación OMNet++, con la cual se realizaron diferentes simulaciones con el fin de cumplir con los objetivos mencionados dentro del capítulo 1.

3.2 Control de topología basado en grafos de proximidad.

Las técnicas de control de topología han mostrado un impacto significativo en la reducción del consumo de energía de una red inalámbrica de sensores (Santi, 2005; Deshpande et al, 2014). Por tal motivo, estas estrategias forman parte fundamental en este trabajo, el cual busca evaluar el impacto de estas técnicas en LPWAN, además la reducción del consumo de energía es una de las características de las “WSN” que se enfocan en el “IoT”.

3.2.1 Implementación de las técnicas de control de topología utilizando “Grafos Gabriel” (GG) y “Grafos de Vecindad Relativa” (RNG).

Los “GG y los “RNG”, como se explicó en el capítulo anterior, son técnicas que ayudan a elegir que enlaces existen con respecto a la propiedad que define cada una de estas estrategias. Para implementar este tipo de técnicas fue necesario hacer un análisis del funcionamiento de estas mismas, como han sido implementadas en “WSN” ya existentes y su grado de complejidad a la hora de desplegarlas.

Se eligieron estas dos técnicas por ser representativas y altamente utilizadas en la literatura (Santi, 2005; Aranov et al, 2011; Dimitriadis et al, 2018), además su implementación consta de pasos muy similares que ayudaron a facilitar su comprensión y aplicación. Ambas técnicas de control de topología fueron implementadas en el simulador de redes “OMNeT++”, donde se utilizó el protocolo de enrutamiento “Greedy Perimeter Stateless Routing” o “GPSR” (Karp y Kung, 2000) como base, ya que este cuenta con un módulo existente dentro del simulador de redes.

El funcionamiento de estas técnicas se basa en los algoritmos mostrados en las Figuras 15 y 18, en la Figura 15 se muestra el algoritmo de funcionamiento para “GG”, en el cual cumple con la ecuación 1 mostrada en el capítulo 2. Este algoritmo fue de gran utilidad pues fue el encargado de eliminar los enlaces que no cumplieran con la propiedad de “GG”

```

m = midpoint of  $\overline{uv}$ 
for all  $v \in N$  do
  for all  $w \in N$  do
    if  $w == v$  then
      continue
    else if  $d(m, v) < d(u, m)$  then
      eliminate edge (u, v)
      break
    end if
  end for
end for

```

Figura 15. Pseudocódigo de “GG”.

En la Figura 16 se puede observar el proceso de podado de una distribución simple de nodos utilizando “GG” y en la Figura 19 se puede observar la misma distribución, pero utilizando “RNG”, como se puede apreciar a pesar de tener la misma distribución, las topologías obtenidas son diferentes.

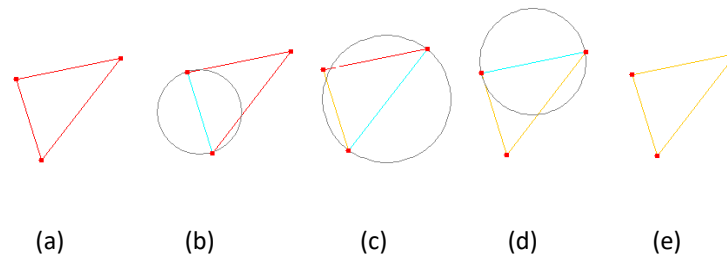


Figura 16. Proceso de podado de enlaces “GG”. a) Topología original, b), c), d) Proceso de GG para podar enlaces y e) Topología final todos los enlaces cumplen con GG.

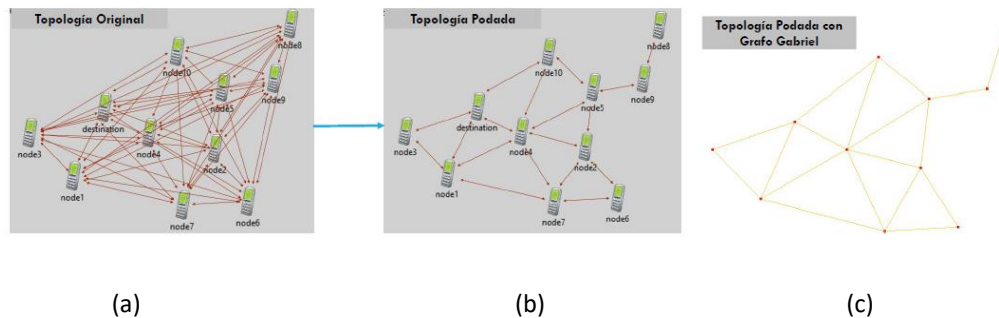


Figura 17. Técnicas de podado de enlaces utilizando “GG” a) Topología original en OMNeT++, b), Topología después del podado de enlaces utilizando “GG” y c) Topología “GG” en ProRouting 2.0.

En la Figura 18 se presenta el algoritmo que utilizan las técnicas de “RNG”, en donde se puede observar la similitud con el utilizado en “GG”, sin embargo, utiliza la ecuación 2 mostrada en el capítulo 2, con la cual elimina los enlaces a sus vecinos que no cumplan con la propiedad de “RNG”.

```

for all  $v \in N$  do
  for all  $w \in N$  do
    if  $w == v$  then
      continue
    else if  $d(u, v) > \max[d(u, w), d(v, w)]$  then
      eliminate edge (u, v)
      break
    end if
  end for
end for

```

Figura 18. Pseudocódigo de “RNG”.

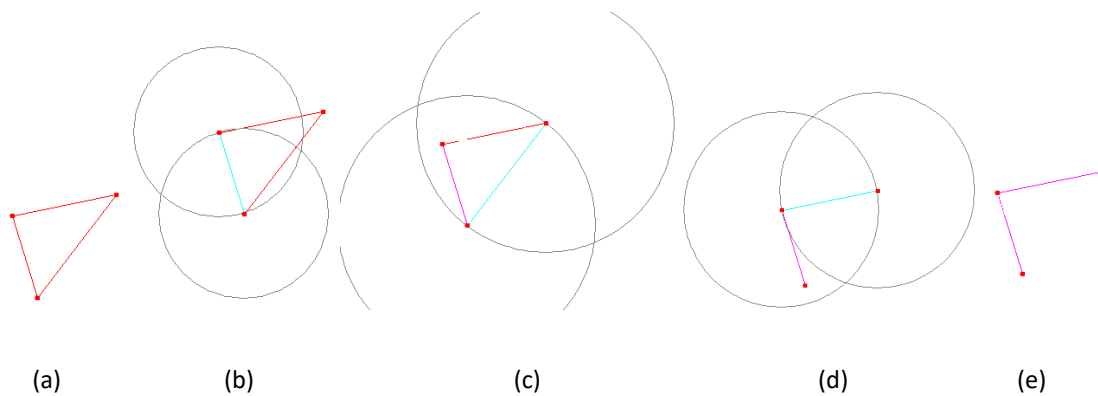


Figura 19. Proceso de podado de enlaces “RNG”. a) Topología original, b), c), d) Proceso de RNG para podado de enlaces y e) Topología final con enlaces podados.

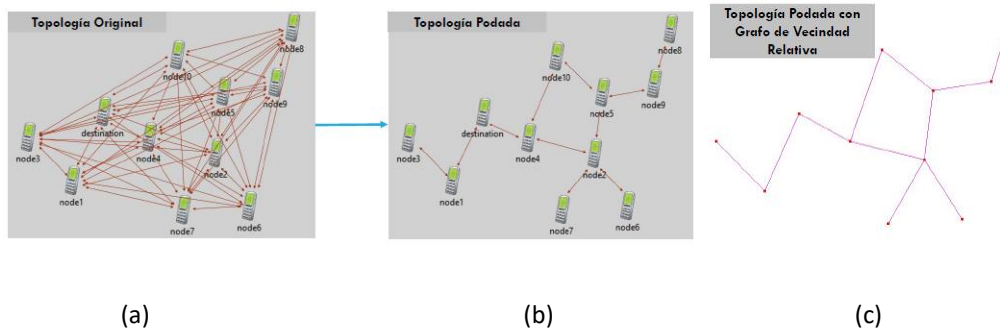


Figura 20. Técnicas de podado de enlaces utilizando “RNG” a) Topología original en OMNeT++, b) Topología después del podado de enlaces utilizando “RNG” y c) Topología “RNG” en ProRouting 2.0.

Para validar que las topologías definidas por “GG” y “RNG” fueran las correctas se utilizó la herramienta ProRouting 2.0 en donde se hizo una comparación de las topologías formadas en “OMNeT++” por cada una de las técnicas, en las Figuras 17 y 20 se pueden la misma distribución de nodos con su topología original y las topologías obtenidas después del podado de enlaces utilizando las técnicas antes mencionadas.

A manera de ejemplo se puede observar en la Figura 21 la metodología de cómo se aplica el control de topología utilizando las técnicas de grafos de proximidad antes mencionadas.

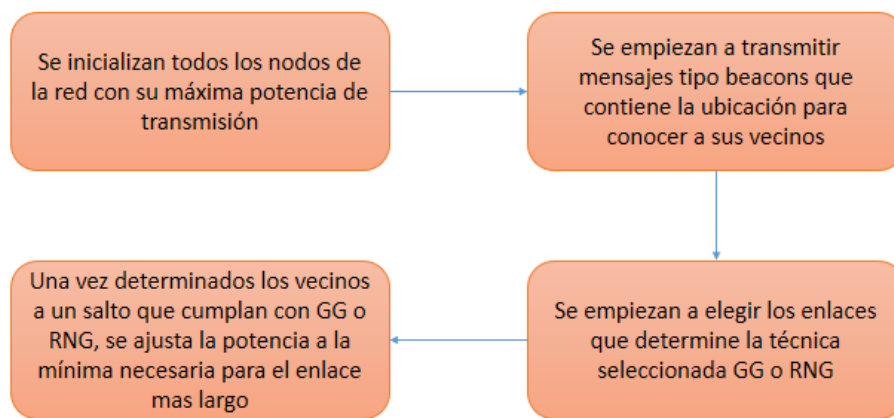


Figura 21. Proceso del control de topología utilizando “GG” o “RNG”

3.3 OMNeT++

OMNeT++ es un simulador de eventos discretos el cual ofrece diferentes herramientas con las que se puede diseñar, implementar y evaluar sistemas de comunicaciones tanto confinadas como inalámbricas. Este simulador cuenta con un entorno de desarrollo integrado (“Integrated Development Enviroment”, IDE por sus siglas en inglés) como se puede apreciar en la Figura 22, el cual es versátil, de fácil manejo pues se puede aprender rápidamente el modelo de simulación requiriendo conocimientos básicos de “C++”, además, cuenta con una gran comunidad de usuarios y con mucha información gratuita en internet. OMNeT++ se caracteriza por tener un marco de simulación modular basado en el lenguaje “C++”, lo cual ha llamado la atención de diversos grupos de investigación alrededor del mundo quienes lo utilizan para desarrollar investigación en las áreas

de telecomunicaciones. Actualmente existen una gran cantidad publicaciones científicas que utilizan este simulador para el estudio y desarrollo de redes de internet, celulares, satelitales, redes Ad-hoc, WSN, entre otras (Omnest, 2020).

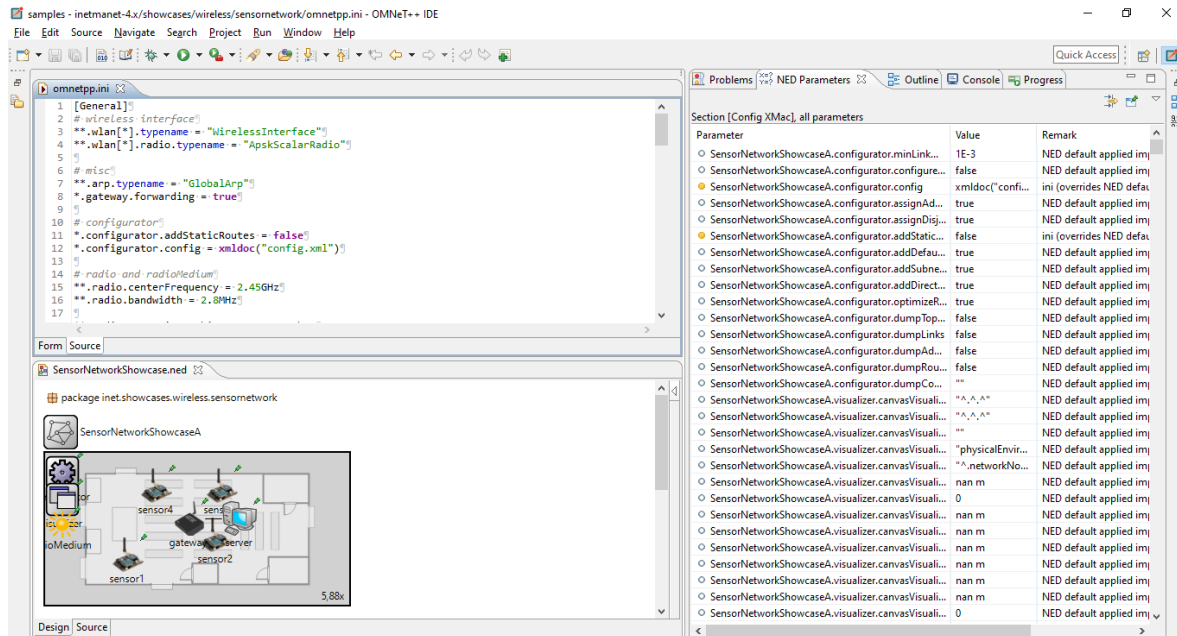


Figura 22. IDE de OMNeT++.

Como se mencionó, OMNeT++ simula eventos discretos, con esto se refiere a la modelación computacional de sistemas que evolucionan en el tiempo mediante cambios instantáneos en las variables de estado, teniendo un tiempo de inicio y un tiempo final (Ignalls, 2008). Además, su "IDE", provee las herramientas para configurar los archivos principales (*.NED y *.ini) con los cuales se puede tener un control sobre los parámetros y configuraciones de simulación. En el archivo "*.NED" se declaran los módulos que se utilizarán en el sistema de comunicaciones y en el archivo "*.ini" se configuran los parámetros de simulación de los módulos declarados. También es importante mencionar que OMNeT++ ofrece una interfaz gráfica de usuario ("Graphical User Interface", GUI por sus siglas en inglés) como se puede apreciar en la Figura 23, conocida como Qtenv, con la cual se pueden visualizar las redes y/o sistemas de comunicaciones de forma gráfica, facilitando la visualización de los eventos generales o por módulo.

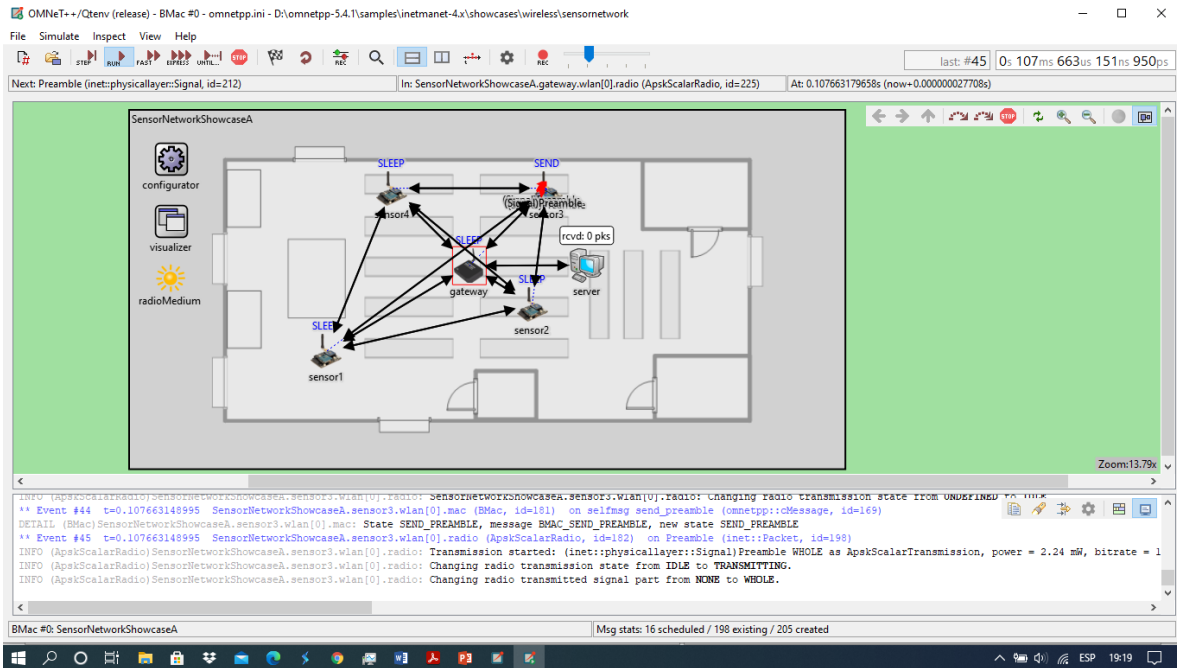


Figura 23. GUI de OMNeT++.

3.3.1 Framework INET

En OMNeT++ se tiene un número considerable de bibliotecas que fueron desarrolladas por académicos durante el desarrollo de sus proyectos de investigación. La Framework “INET”, ofrece una extensa gama de protocolos que simulan las diferentes capas de un sistema de comunicaciones siguiendo el modelo de interconexión de sistemas abiertos (“Open System Interconnection”, OSI por sus siglas en inglés). El modelo OSI, cuenta con 7 capas de las cuales las primeras tres son de particular interés en este trabajo de tesis. En la primera se encuentra la capa física, la cual se relaciona con la transmisión de bits puros a través de un canal de transmisión, los esquemas de modulación, señalización y codificación; la segunda es capa de enlace de datos o acceso al medio, donde su tarea principal lograr el uso compartido de canal para que la transmisión se encuentre libre de errores; y la tercera se conoce como la capa de red o direccionamiento, se encarga de controlar la operación de la subred y protocolos de enrutamiento. Esta división en capas es la encargada de vincular “OMNeT++” e “INET” con el modelo “OSI”, las bibliotecas dentro del

simulador de redes se encuentran divididas por módulos en las cuales cada uno de ellos tiene una funcionalidad en particular.

3.4 Habilitación de una WSN LPWAN multisalto en OMNeT++

La implementación de una red inalámbrica de sensores de largo alcance y baja potencia en “OMNeT++”, implicó el desarrollo y adecuación de módulos INET para implementar nodos sensores, el nodo resumidero, así como un modelo de propagación validado experimentalmente. En la Figura 24 se pueden observar un modelo de transmisión considerando las capas desarrolladas y/o modificadas dentro del simulador de redes para lograr una transmisión en una LPWAN. Esta actividad representó un reto importante debido a los pocos desarrollos de “INET” reportados para LPWAN.

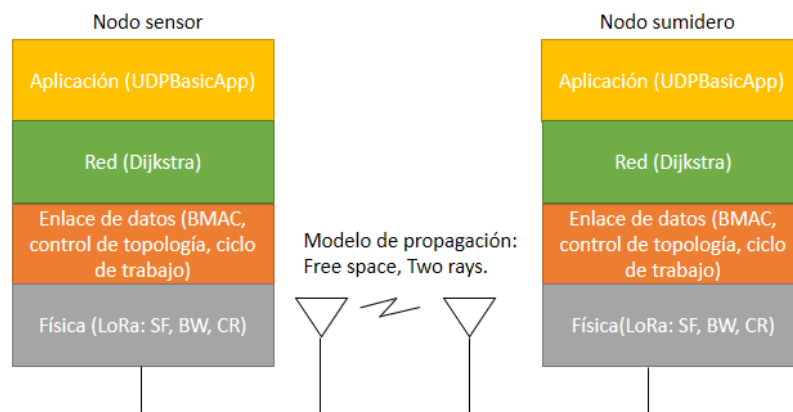


Figura 24. Capas desarrolladas y adaptadas para el desarrollo de este trabajo.

3.4.1 Implementación del módulo de capa física.

Con el fin de habilitar la cama de pruebas sobre la cual se evaluarán, en primer lugar, se habilitó el módulo de capa física de “LoRa” utilizando datos experimentales obtenidos de un conjunto de pruebas llevadas a cabo con transceptores LoRa instalados en un ambiente de exteriores con baja

densidad de edificios y terreno plano. La implementación de este módulo implicó el desarrollo de las siguientes etapas:

- Análisis teórico-experimental de la propagación de señales LoRa en un ambiente de exteriores con baja densidad de edificios.
- Implementación del módulo INET en OMNeT++ y su validación.

3.4.1.1 Análisis del modelo matemático de pérdidas por propagación de dos rayos

Una de las primeras actividades para implementar la capa física en el simulador de redes fue realizar un análisis del modelo matemático de pérdida por propagación de dos rayos, este modelo ayuda a predecir el comportamiento de la señal de radio en cuestión de las pérdidas por propagación que sufre. El “modelo de dos rayos”, ha sido utilizado eficientemente dentro de la literatura puesto que se basa en óptica geométrica y considera tanto la trayectoria directa como una trayectoria de propagación reflejada en tierra entre el transmisor y el receptor, además los resultados obtenidos en las pruebas de campo fueron muy similares a las obtenidas con este modelo de propagación (Rappaport, 1996).

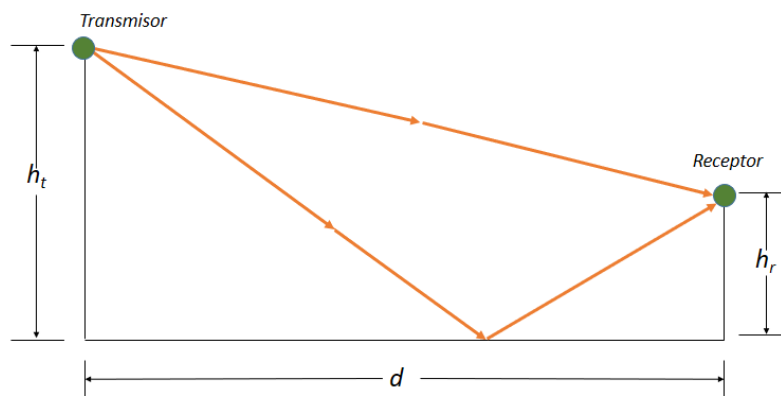


Figura 25. Modelo de propagación de dos rayos.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \\ P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \end{array} \right. \quad (3)$$

El modelo de propagación de 2 rayos considera 2 ecuaciones, la primera es utilizada en el modelo de propagación de espacio libre, donde P_t es la potencia de transmisión, $P_r(d)$ es la potencia recibida en función de la distancia entre el transmisor y receptor, G_t y G_r son las ganancias de las antenas transmisora y receptora, d es la separación entre el transmisor y el receptor en metros, L son las pérdidas del sistema no relacionadas a la propagación y λ es la longitud de onda de la señal electromagnética en metros. La primera ecuación solo es considerada hasta la distancia de "Crossover", el modelo de propagación de dos rayos como tal, que se utiliza para obtener los resultados después de la distancia de "Crossover", en donde se anexan variables que representan la altura de las antenas receptora y transmisora. La distancia de "Crossover" es un punto en el cual se empezará a considerar el modelo de dos rayos, esta distancia se obtiene utilizando la ecuación 4.

$$d_{Cross} = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (4)$$

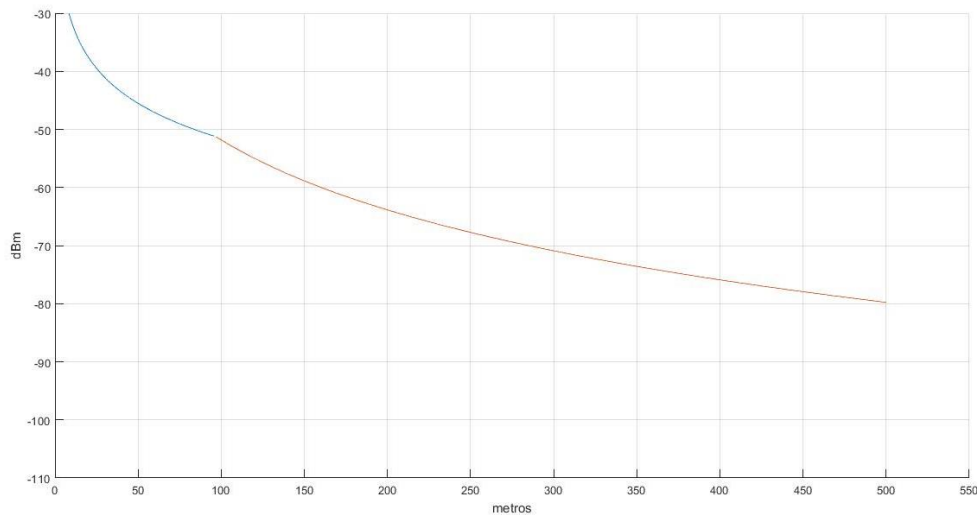


Figura 26. Gráfica obtenida con el modelo de dos rayos.

Los modelos teóricos de propagación de señales de radiofrecuencia descritos en la ecuación 3, nos permiten predecir la potencia de señal recibida en un enlace de comunicaciones, el parámetro más utilizado para representar esta potencia es el indicador de intensidad de señal recibida (“Received Signal Strength Indicator”, RSSI por sus siglas en inglés), expresado en dBm, aplicando estas ecuaciones se pueden obtener gráficas como las mostradas en la Figura 26, la cual muestra el comportamiento esperado de la señal utilizando el modelo de dos rayos considerando un barrido de las distancias desde un metro hasta 500 metros.

3.4.1.2 Implementación experimental de un transmisor y receptor LoRa

Una de las actividades llevadas a cabo para implementar el módulo de capa física LoRa en OMNeT++ fue habilitar un transmisor y receptor LoRa para obtener datos experimentales de la potencia recibida versus distancia y la tasa de entrega de paquetes considerando diferentes configuraciones de capa física LoRa. Los resultados de estas pruebas permitieron validar el módulo de capa física en OMNeT++.

Las tarjetas de desarrollo de los componentes electrónicos utilizados para desarrollar esta actividad se muestran en la Figura 27. La tarjeta “SX1276MBLAS” (Semtech, 2016) contiene el chipset SX1276 el cual genera señales LoRa en la banda de frecuencia de 400 MHz y 900 MHz. Una de las características de este transceptor es su potencia de transmisión configurable que va desde los +2 dBm hasta los +20 dBm y la posibilidad de configurar parámetros de capa física como el ancho de banda, factor de esparcimiento y tasa de codificación. La tarjeta de desarrollo “Núcleo STM32L152RE” (STMicroelectronics, 2017) contiene un microcontrolador ARM CORTEX M0+ en donde se cargó el código fuente de un transmisor completamente configurable (BW, SF, CR y Ptx) por medio de una consola y también las funciones de un receptor LoRa donde se almacenaron los valores de RSSI y paquetes recibidos correctamente y con error. Esta tarjeta posee interfaces de comunicación que fueron utilizadas para comunicarse con la tarjeta de desarrollo SX1276MBLAS y una computadora personal.

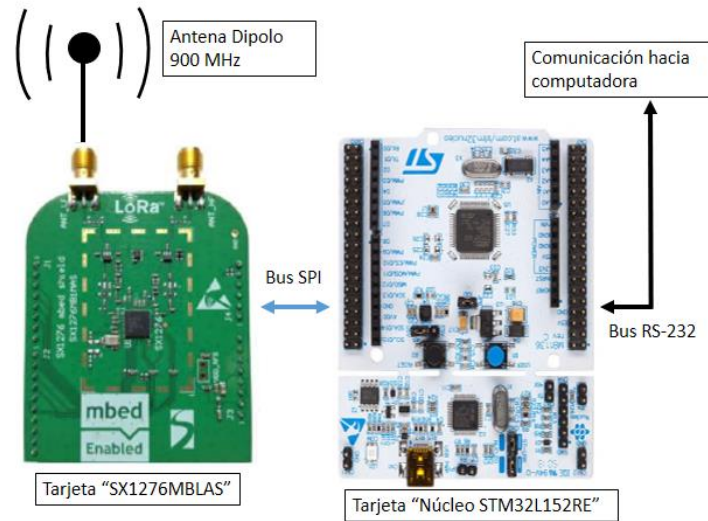


Figura 27. Transceptor LoRa y placa base.

El objetivo de las pruebas de campo fue obtener mediciones de la intensidad de señal recibida (RSSI) de 100 paquetes considerando distancias entre nodos desde los 20 m hasta los 500 m, para compararlas con el modelo matemático. La metodología para la obtención de resultados se muestra en la Figura 28.

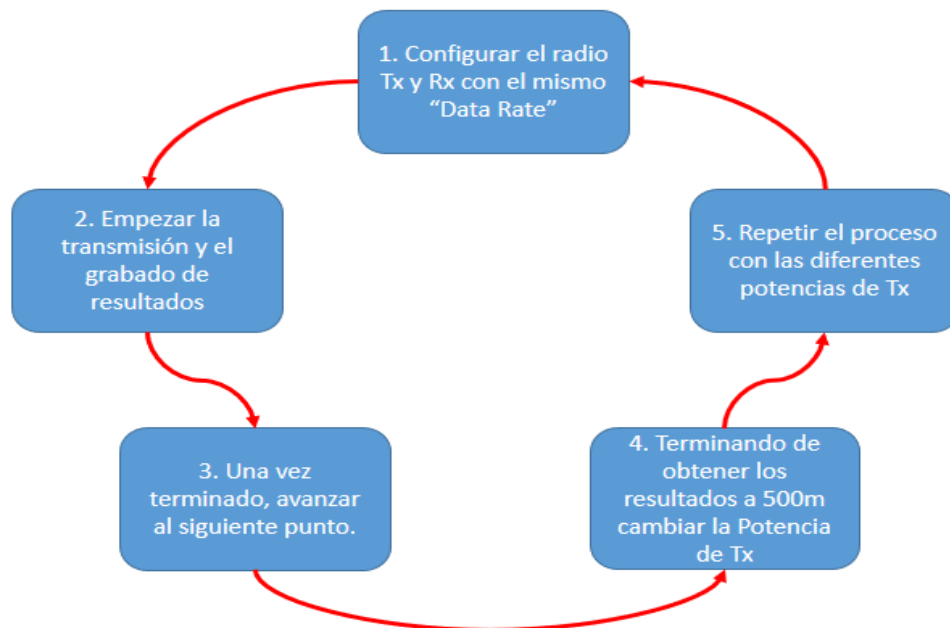


Figura 28. Metodología para la obtención de resultados.

En la tabla 4 se pueden observar resultados obtenidos de experimentos realizados, así como el RSSI promedio.

Tabla 4. Resultados obtenidos de las pruebas de campo.

Metros	DR4/14dBm	DR4/10dBm	DR4/7dBm	DR4/2dBm
60	-49	-55	-58	-61
100	-56	-59	-58	-74
150	-61	-68	-71	-76
200	-69	-71	-76	-84
250	-69	-72	-78	-85
300	-73	-78	-79	-89
400	-73	-78	-81	-90
500	-86	-87	-91	-98

Una vez terminado el proceso de las pruebas de campo se pudo realizar una gráfica como la que se muestra en la Figura 29 en donde para obtener una línea de tendencia se realizó una regresión logarítmica, se realizó esto con el fin de obtener una línea que reflejara el comportamiento de los resultados, ya que al ser resultados reales pueden existir una gran cantidad de factores que pueden modificar el resultado el RSSI, como estructuras cercanas que afecten la señal.

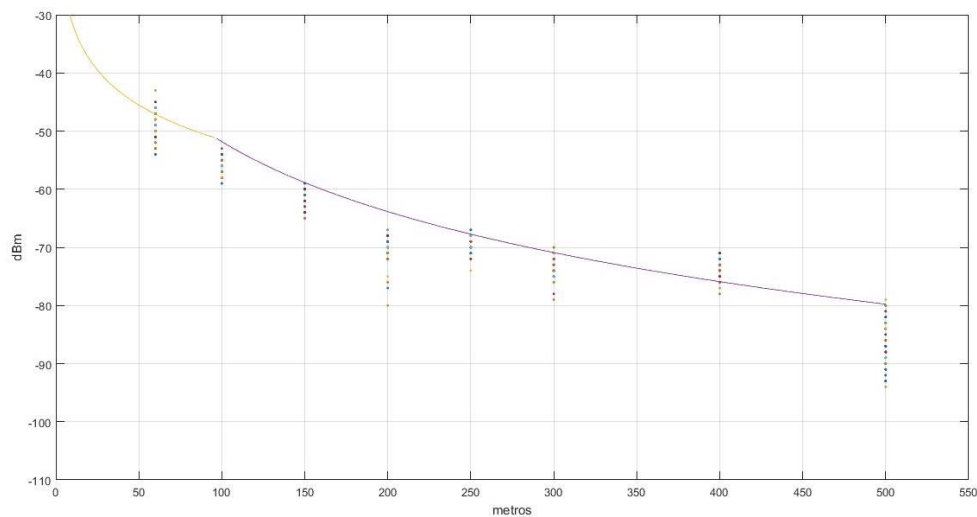


Figura 29. Gráfica de resultados experimentales RSSI.

Es importante mencionar que estas pruebas se realizaron en el “Parque de Investigación e Innovación Tecnológica” o PIIT (por sus siglas), debido a que en su interior se tienen las características de baja densidad de edificios, terreno plano, condiciones de seguridad para realizar pruebas durante periodos extendidos y bajo tráfico de vehículos. En la Figura 30 se puede apreciar una toma aérea del PIIT y una línea recta la cual se utilizó como base para realizar dichas pruebas de campo.



Figura 30. Campo de pruebas LoRa. (Goggle Earth, 2020)

3.4.1.3 Validación del módulo de capa física implementado en OMNeT++

El siguiente paso fue implementar el módulo de capa física LoRa y el modelo de propagación adaptado en OMNeT++ y validar las transmisiones en el simulador con los valores de RSSI obtenidos del sistema LoRa experimental.

Para realizar esto fue necesario realizar una configuración del módulo de capa física en donde se utilizó un módulo simple en cual se puede configurar el nivel de “RSSI” necesario para que las señales recibidas se consideren correctas.

Dentro del simulador también fue necesario implementar el modelo de dos rayos utilizando las ecuaciones mostradas anteriormente, con este el modulo utiliza como base la distancia a la que se encuentra el nodo transmisor del nodo receptor, si esta ecuación da como resultado un valor por debajo del “RSSI” configurado, el cual va de la mano con la distancia a la que se encuentran los transceptores, la transmisión del paquete se considera incorrecta.

Una vez implementado el modelo de dos rayos y configurada la capa física simulada de “LoRa”, se definió utilizar los resultados de la configuración DR4, en la cual se configura una velocidad de 12500 bps, con 500KHz de ancho de banda, y con una frecuencia central en 903 MHz. Se decidió utilizar DR4 para las siguientes simulaciones pues fueron los resultados que tuvieron más similitud a lo calculado y a las pruebas de campo.

3.4.2 Implementación del módulo de capa de acceso al medio

Para implementar la capa de acceso al medio en OMNeT++, fue necesario implementar un protocolo MAC el cual ya ha sido utilizado en el despliegue de redes de sensores (WSN) de corto alcance. El protocolo de control de acceso al medio BMAC implementa el uso del ciclo de trabajo con el fin de minimizar el consumo de energía (Polastre et al, 2004). Este protocolo utiliza 2 ventanas de tiempo conocidas como ventana de SLEEP y ventana de CCA, las cuales pueden ser configuradas a beneficio del usuario, además dentro del simulador de redes ofrece la capacidad de controlar los estados del transceptor y medir su consumo de corriente. Este protocolo funciona como se muestra en la Figura 31.

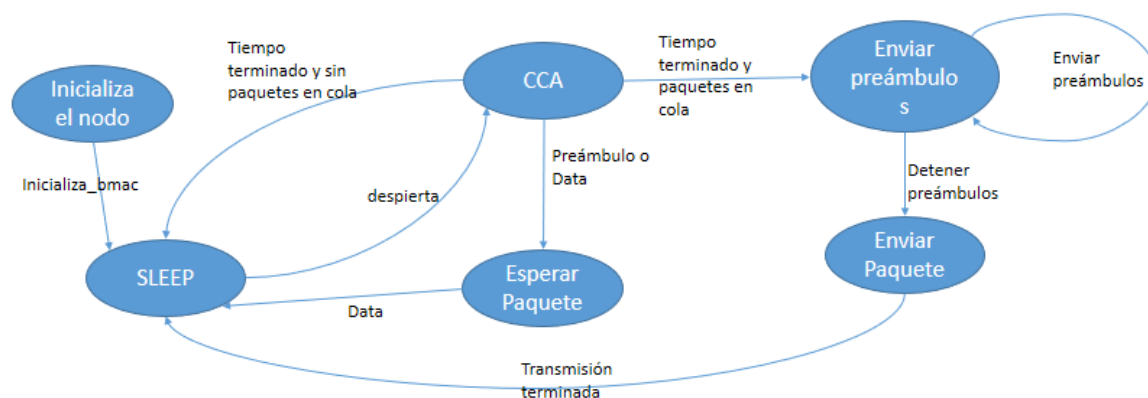


Figura 31. Diagrama de estados del protocolo BMAC.

El protocolo BMAC tiene 3 fases, las cuales se describen en los siguientes párrafos:

Fase 1: Inicialización del nodo. Durante esta fase se lleva a cabo la configuración de parámetros del protocolo como el tiempo de las ventanas de SLEEP y CCA. Una vez terminada esta fase el nodo pasa a un estado de SLEEP manteniéndose en este estado el tiempo programado por el usuario.

Fase 2: Transmisión de datos. En el caso de que el nodo desee transmitir o retransmitir datos hacia otro nodo, se llevan a cabo las siguientes acciones, cabe mencionar que pueden existir diferentes casos:

Caso 1: el paquete se generó durante la ventana de SLEEP y el canal se encuentra libre.

1. Si durante su tiempo de "SLEEP" se generó un paquete en la capa de aplicación que llegó a la capa MAC, esta elegirá un tiempo aleatorio entre 0 y 100ms para despertarse.
2. Una vez despierto enciende su transceptor en modo receptor y verifica si el canal se encuentra libre o algún otro nodo lo tiene ocupado. El periodo de "Clear Channel Assessment" o "CCA" (por sus siglas en inglés), puede ser configurado por el usuario dentro del archivo ".ini".
3. Una vez terminado el periodo de "CCA", y si el canal se encuentra libre, se procede a mandar preámbulos que alerten a los nodos vecinos que se quiere ocupar el canal con el fin de evitar una colisión. La cantidad de preámbulos que se transmiten va de la mano con el periodo de "CCA" y con el periodo de "SLEEP", pues con el propósito de aumentar la probabilidad de que los nodos vecinos escuchen, se transmite un preámbulo cada t_p , cuyo valor se obtiene al dividir el periodo de "CCA" por la mitad. Con este proceso BMAC intenta asegurar que el canal se encuentre libre solo para el nodo que quiere transmitir.
4. Cuando termina de transmitir los preámbulos, se procede a mandar el paquete de información, una vez terminado, vuelve a su estado de "SLEEP" durante el tiempo definido por el usuario.

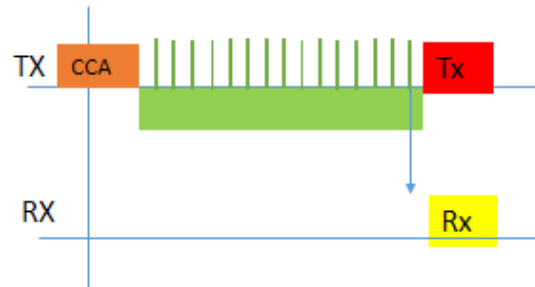


Figura 32. Diagrama del proceso de transmisión de un paquete con ciclo de trabajo.

Caso 2: el paquete se generó durante el periodo de CCA y el canal se encuentra libre.

1. Si el paquete se generó durante el periodo de CCA, espera a que termine dicho periodo y repite los pasos 3 y 4 del proceso anterior

Caso 3: El paquete se generó durante el periodo de SLEEP y el canal se encuentra ocupado:

1. Si durante su tiempo de "SLEEP" se generó un paquete en la capa de aplicación que llegó a la capa MAC, esta elegirá un tiempo aleatorio entre 0 y 100ms para despertarse.
2. Una vez despierto enciende su transceptor en modo receptor y verifica si el canal se encuentra libre o algún otro nodo lo tiene ocupado durante el periodo de "CCA".
3. Si el canal se encuentra ocupado, el nodo se quedará en modo receptor esperando el paquete de información.
4. Una vez recibido, verifica si el paquete es para él, de no ser así lo elimina; o si es un enrutador para el paquete, si este es el caso lo agrega a su buffer esperando para empezar la transmisión.

5. Una vez recibido regresa a su estado de "SLEEP", BMAC elige un tiempo aleatorio entre 0 y su tiempo de periodo de "CCA" con el fin de forzar el despertar del dispositivo para mejorar la eficiencia de la red.
6. Una vez despierto, repite los pasos del 2,3 y 4 del caso 1.

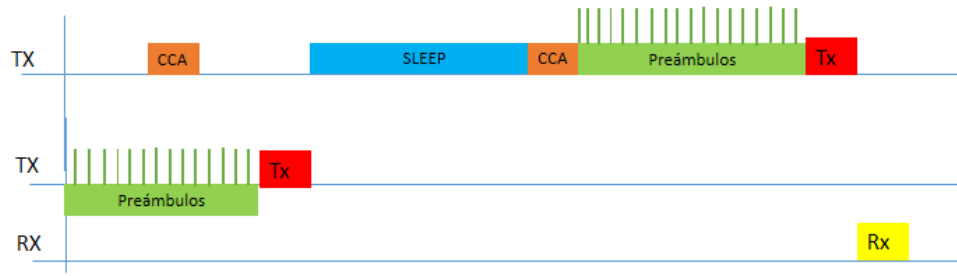


Figura 33. Diagrama del proceso de transmisión de un paquete con interferencia con ciclo de trabajo.

Caso 4: el nodo no genera ningún paquete de información, pero cumple con todo su ciclo de trabajo.

1. Si no se genera ningún paquete de información durante su periodo de "SLEEP" el nodo respetará los tiempos configurados por el usuario para despertarse.
2. Una vez despierto realizará un CCA para evaluar el canal si se encuentra ocupado realizará los pasos 4 y 5 del caso 3. Si este se encuentra libre, una vez terminado el tiempo de CCA regresará a su estado de SLEEP.

3.5 ProRouting 2.0

Para cumplir con el objetivo principal de este trabajo de tesis el cual es implementar técnicas de control de topología basadas en grafos de proximidad para evaluar el consumo de energía y la eficiencia de red fue necesario el uso de la herramienta ProRouting 2.0. Las técnicas de grafos de proximidad implementadas y evaluadas en "OMNeT++", fueron primero analizadas teóricamente y comprobadas con la herramienta ProRouting 2.0, la cual también facilitó el proceso de validación

de las técnicas implementadas. La herramienta ProRouting 2.0 dispone de un software que ofrece la capacidad de visualizar los grafos o topologías obtenidas después de aplicar los “GG” y “RNG” en un mismo grafo original como se puede ver en la Figura 34. Este software facilita el análisis de las técnicas de control de topología basadas en grafos de proximidad, pero es importante aclarar ProRouting 2.0 solo trabaja con grafos no considera potencia de transmisión, ni área de cobertura.

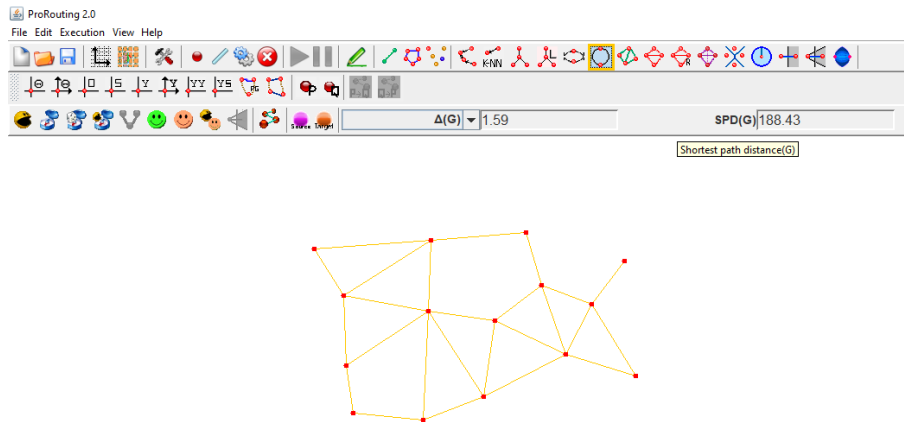


Figura 34. Entorno gráfico de ProRouting 2.0.

Capítulo 4. Escenarios y configuraciones de evaluación

En este capítulo se hará una descripción de los escenarios de evaluación, así como de las configuraciones del ciclo de trabajo que fueron utilizadas para realizar el análisis de las estrategias distribuidas del control de topología.

4.1 Escenario 1: Topología de red multisalto

Como se describió en el capítulo 2 la comunicación multisalto en una LPWAN no es un esquema de transmisión convencional, debido a que se prefiere el uso de comunicaciones directas hacia el nodo resumidero estableciendo una topología de red tipo estrella, esto debido a la simplicidad de transmisión punto a punto, la cual permite que dan una gran cantidad de nodos a la res, además de ser rápidas y confiables. No obstante, recientemente han emergido aplicaciones que requieren el establecimiento de LPWAN con comunicación multisalto para monitorizar diversas variables. Por tal motivo la evaluación de este tipo de esquemas de comunicación proporcionaría información relevante del impacto que tendría sobre la tasa de entrega de paquetes, retardo extremo a extremo y consumo de energía, métricas de desempeño que son de interés en este trabajo.

En este contexto, se realizaron evaluaciones de la transmisión de paquetes entre un par de nodos de una LPWAN, desde un nodo sensor hacia el nodo resumidero considerando 1, 2, 3, 4 y 5 saltos entre de ellos. La topología de red implementada y evaluada se muestra en la Figura 35 y en la Tabla 5 se muestran los parámetros de capa física, acceso al medio, canal y duración de la prueba. Es importante mencionar que, en este escenario todos los dispositivos transmiten paquetes de información en intervalos de 10 segundos con el fin de cumplir las regulaciones de la "FCC" utilizadas en estas bandas de frecuencia.

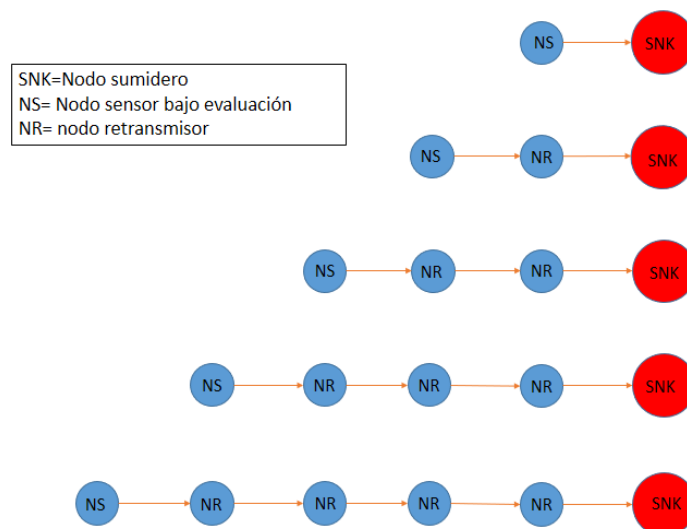


Figura 35. Topologías de red evaluadas en el escenario multisalto de 1 a 5 saltos.

Tabla 5. Parámetros de simulación utilizados en los escenarios 1, 2 y 3.

Parámetros de simulación	Valor
PHY	LoRa(obtenida de las pruebas de campo)
MAC	BMAC
Canal	903 MHz
Tasa de transmisión	1 paquete c/10s
Total de paquetes enviados por nodo	86400
Tiempo de simulación	10 días.
Cantidad de semillas simuladas	10
Tamaño carga útil	43 Bytes
Potencia de Tx	2dBm
Capacidad nominal de batería	2000mAh
Modelo de propagación	Modelo de dos rayos
Ventana de CCA	25ms, 50ms, 75ms, 100ms, 125ms

La metodología utilizada para evaluar las topologías de red implementadas en este escenario fue la siguiente:

1. Se configuró un nodo sensor como transmisor y un nodo resumidero con los parámetros de capa PHY (obtenidos de los resultados de las pruebas de campo) y MAC mostrados en la Tabla 5.
2. Se realizaron 10 simulaciones con semillas diferentes, teniendo un total de 860 400 paquetes transmitidos hacia el nodo resumidero, este es el resultado esperado al sumar todos los paquetes transmitidos en todas las simulaciones.
3. Se calcularon las métricas correspondientes las cuales se explican más adelante dentro de este mismo capítulo.
4. Se añade un nodo sensor a la red y se repiten los pasos 2 y 3. Este proceso continuo hasta que se agregan 5 nodos sensores.

4.2 Escenario 2: Topología de red en estrella-multisalto con baja, media y alta densidad de nodos.

En este escenario se evalúan topologías de red en estrella con 5, 10, 20 y 50 nodos tal y como se presenta en la Figura 36. La configuración utilizada en simulaciones de este escenario se muestra en la tabla 5.

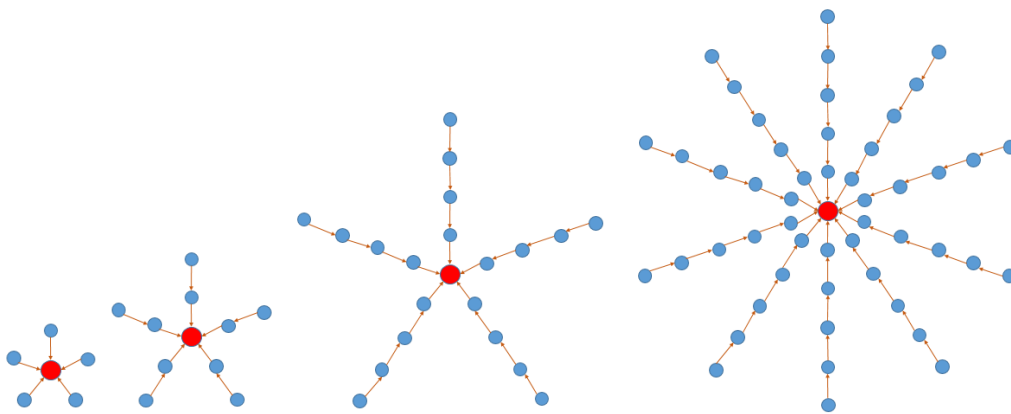


Figura 36. Topologías de red evaluadas en el escenario multisalto de 5 a 50 nodos.

La metodología aplicada para evaluar el desempeño de las comunicaciones multisalto en redes con topología estrella considerando una baja, media y alta densidad de nodos fue la siguiente:

1. Se configuraron 5 nodos sensores como transmisores y un nodo resumidero con los parámetros de capa PHY y capa MAC mostrados en la tabla 5.
2. Se realizaron 10 simulaciones con semillas diferentes, en cada simulación los nodos sensores transmitieron 86,400 paquetes cada uno hacia el nodo resumidero, este es el resultado esperado al dividir el tiempo total de simulación entre la tasa de transmisión.
3. Se calcularon las métricas correspondientes las cuales se explican más adelante dentro de este mismo capítulo.
4. Se añaden la cantidad de necesaria de nodos para tener 10 nodos sensores a la red y se repiten los pasos 2 y 3. Este proceso continuo hasta que se agregan 20 y 50 nodos sensores.

4.3 Escenario 3: Topologías de red generadas con los Grafos Gabriel y Grafos de Vecindad Relativa

En los escenarios anteriores las topologías y las rutas que siguen los paquetes de datos desde los nodos sensores hacia el nodo resumidero son definidas por el usuario, puesto que son escenarios totalmente controlados. En el escenario 3 no se tuvo el mismo control que en los anteriores pues lo que se buscó principalmente fue obtener diferentes topologías formadas por las técnicas de control de topología estudiadas en este trabajo de tesis. Con el fin de cumplir lo antes mencionado, para ambas técnicas se utilizó la misma distribución de nodos, en el cual se utilizó la misma configuración que se describe en la tabla 5.

Para obtener la distribución de los nodos se utilizó el modelo de distribución uniforme de Manhattan (Guerreiro et al., 2012) el cual nos ofrece una distribución en cuadrícula manteniendo distancias similares entre nodo y nodo. Para definir dicha distribución se consideró una red con una aplicación

de monitoreo ambiental (p. ej. calidad del aire, temperatura, etc.), la cual se encontraría ubicada a los alrededores de la Unidad Foránea Monterrey (UFM) del CICESE pues se cuenta con un área en donde existen puntos de interés para este tipo de aplicación ya que contempla zonas residenciales, escolares, aeroportuarias así como parques de investigación o industriales, teniendo un área de cobertura de aproximadamente 17.5 Km² con total de 48 dispositivos transmisores y un dispositivo concentrador ubicado en la UFM a una distancia aproximada de 600 m entre cada dispositivo como se puede observar en la Figura 37.

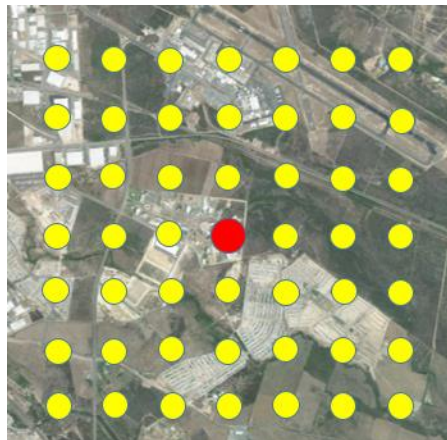


Figura 37. Distribución de nodos para las topologías de GG y RNG.

Recordando lo mencionado en el capítulo 2, el control de topología basado en GG y RNG podrá generar diferentes topologías, por ejemplo, en la Figura 38 se puede observar los enlaces existentes que se generan al utilizar estas técnicas de control de topología en una distribución como la mostrada en la Figura 37. Cabe mencionar que las técnicas de control de topología reportadas en la literatura (Santi, 2005), también consideran como parte del algoritmo la reducción de la potencia de transmisión de los nodos para ahorrar energía y aumentar el tiempo de vida de la red. Por tal motivo, este proceso se implementó en las redes generadas con los controles de topología basados en GG y RNG evaluados en este escenario. La potencia de transmisión de los nodos sensores se redujo manualmente hasta la potencia mínima necesaria para establecer comunicaciones estables con los vecinos seleccionados por el algoritmo de control de topología.

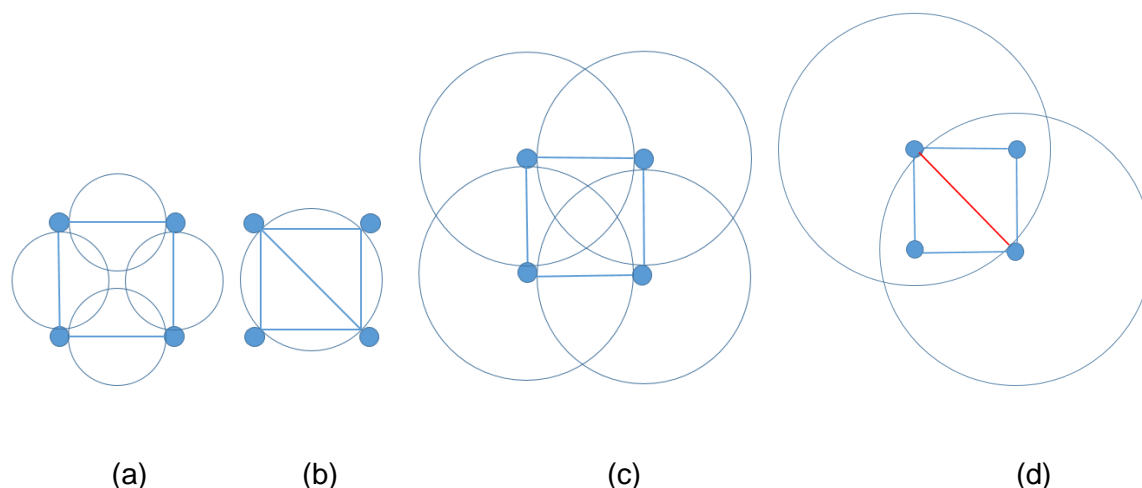


Figura 38. Técnicas de control de topología de GG y RNG. a), b) Enlaces disponibles al utilizar GG como técnicas de control de topología, c) Enlaces disponibles al utilizar RNG como técnicas de control de topología y d) Enlace no disponible ya que no cumple con los RNG.

En la Figura 39 se puede observar el escenario resultante de utilizar las técnicas de control de topología de grafos de Gabriel, el cual proporciona todos los enlaces dentro de la red. Una vez obtenida la topología se procedió a utilizar el algoritmo de Dijkstra para establecer la tabla de enrutamiento, la cual se presenta en la Figura 39. Como se puede observar al utilizar los grafos Gabriel (GG) existen una cantidad de enlaces disponibles mayor a los obtenidos con lo grafos de Vecindad Relativa (RNG) como se podrá ver en la Figura 40, por lo cual el dispositivo más alejado solo consta de dar 3 saltos para que su paquete llegue al destino.

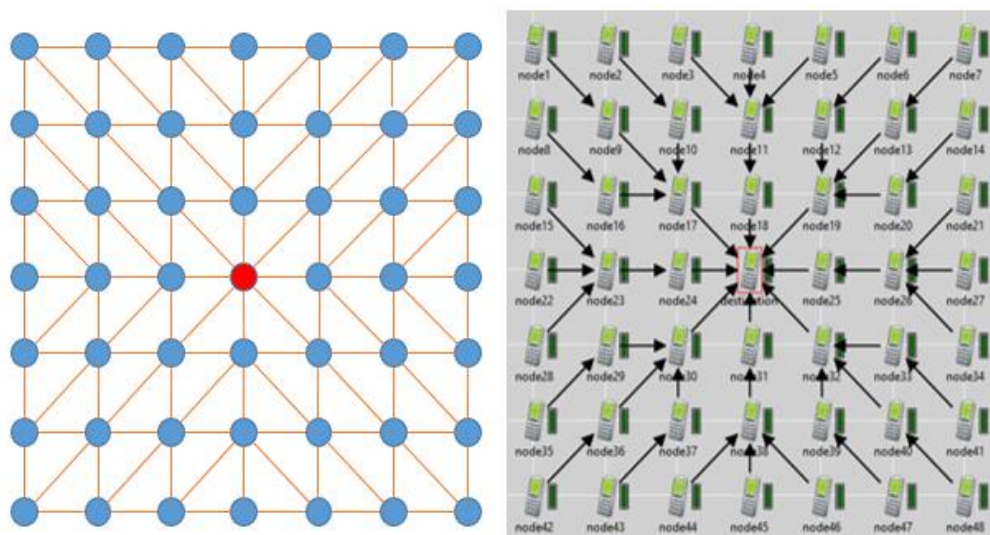


Figura 39. Topología generada por las técnicas de GG. Rutas generadas por algoritmo Dijkstra.

En el caso donde se usan los grafos de Vecindad Relativa, se puede observar la topología generada en la Figura 40. Al igual que en el caso anterior se utilizó el algoritmo de Dijkstra para establecer las rutas de los paquetes hacia el nodo resumidero, la topología de red generada se muestra en la Figura 40. Como se puede observar en esta topología existe una menor cantidad de enlaces disponibles en comparativa con los obtenidos con grafos Gabriel, esto da pauta a que exista una mayor cantidad de saltos para que el dispositivo más alejado pueda transmitir su paquete al destino.

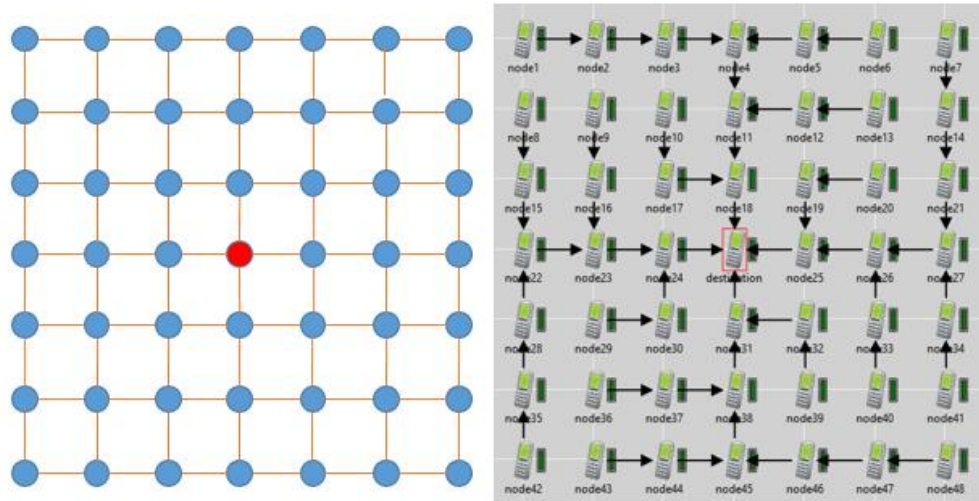


Figura 40. Topología generada por las técnicas de RNG. Rutas generadas por algoritmo Dijkstra.

Para realizar la evaluación de ambos escenarios se utilizó con la configuración mostrada en la Tabla 5, siguiendo la metodología mostrada a continuación:

1. Se configuraron 48 nodos sensores como transmisores y un nodo resumidero con los parámetros de capa PHY y capa MAC mostrados en la tabla 5.
2. Se realizaron 10 simulaciones con semillas diferentes utilizando la misma técnica de control de topología (GG), en cada simulación los nodos sensores transmitieron 86,400 paquetes cada uno hacia el nodo resumidero, por tal motivo la cantidad de paquetes generados total por simulación fue de 4 147 200.

3. Se calcularon las métricas correspondientes las cuales se explican más adelante dentro de este mismo capítulo.
4. Se repiten los pasos 1, 2 y 3 utilizando la técnica de control de topología de Grafos de Vecindad Relativa (RNG).

4.4 Escenario 4: Topologías de red tipo estrella

Con este escenario se pretende demostrar el comportamiento de la red LWPAN con diferentes cantidades de dispositivos a un salto, esto con el fin tener una comparativa directa entre una red con topología estrella y una con topología multisalto. Las características de este escenario se describen en la tabla 6. Es importante recordar que una topología del tipo estrella requiere una potencia de transmisión mayor para transmitir un paquete hacia el destino, ya que al utilizar un solo salto los nodos más alejados del destino requieren una potencia mayor, además, al tener una mayor área de interferencia se beneficia el uso compartido del canal inalámbrico. En la evaluación de las topologías de red en este escenario se utilizaron las mismas distribuciones que en el escenario de densidad con la diferencia que el enrutamiento se encuentra directamente al destino como se puede observar en la Figura 41. La metodología para evaluar este escenario fue la siguiente:

1. Se configuraron 5 nodos sensores como transmisores y un nodo resumidero con los parámetros de capa PHY y capa MAC mostrados en la tabla 6.
2. Se realizaron 10 simulaciones con semillas diferentes, en cada simulación los nodos sensores transmitieron 86,400 paquetes cada uno hacia el nodo resumidero, este es el resultado esperado al dividir el tiempo total de simulación entre la tasa de transmisión.
3. Se calcularon las métricas correspondientes las cuales se explican más adelante dentro de este mismo capítulo.
4. Se añaden la cantidad necesaria de nodos para tener 10 nodos sensores a la red y se repiten los pasos 2 y 3. Este proceso continuo se agregando 20 y 50 nodos sensores.

La generación de paquetes queda de la misma manera que se ha estado utilizando, teniendo un total de 432 000 paquetes generados en el escenario de 5 nodos y 4 320 000 paquetes generados en el escenario de 50 nodos, esto con el fin de simular una red en donde todos los transmisores quieren ocupar el canal.

Tabla 6. Parámetros de simulación utilizados en el escenario 4.

Parámetros de simulación	Valor
PHY	LoRa (obtenida de las pruebas de campo)
MAC	BMAC
Canal	903 MHz
Tasa de transmisión	1 paquete c/10s
Total de paquetes enviados por nodo	86400
Tiempo de simulación	10 días.
Cantidad de semillas simuladas	10
Tamaño carga útil	43 Bytes
Potencia de Tx	7 dBm
Capacidad nominal de batería	2000mAh
Modelo de propagación	Modelo de dos rayos
Ventana de CCA	25ms, 50ms, 75ms, 100ms, 125ms

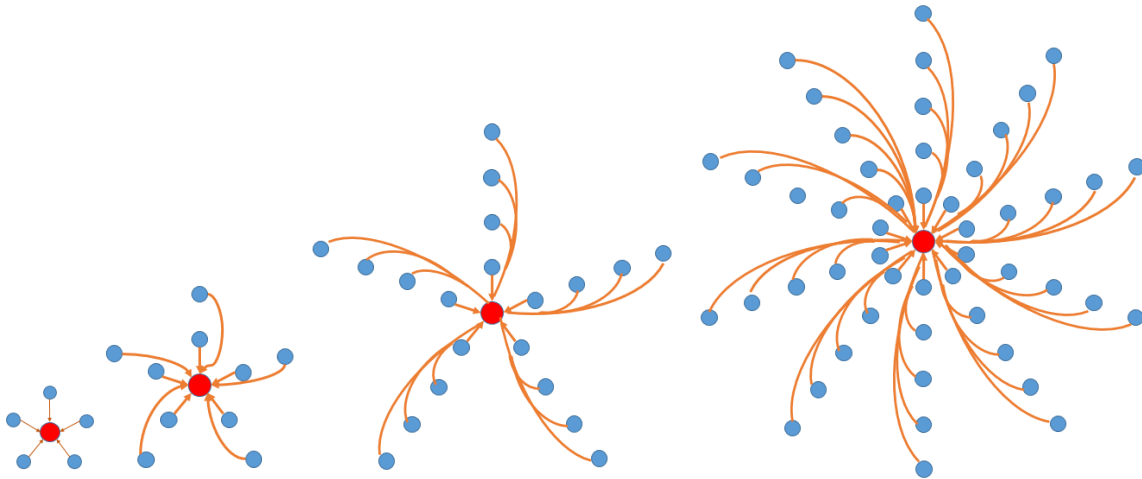


Figura 41. Escenario topología estrella de 5 a 50 nodos.

4.5 Configuraciones del ciclo de trabajo

Una configuración importante fue la implementación de un ciclo de trabajo en los dispositivos el cual ya fue explicado a detalle en el capítulo anterior. Con el fin de obtener una mayor variedad de resultados que nos servirían para un análisis más profundo de cómo puede afectar o beneficiar

utilizar diferentes valores de ventana de CCA y de sleep el desempeño de la red, se optó por manejar diferentes configuraciones del ciclo de trabajo. En la Figura 42 se pueden observar las configuraciones utilizadas.

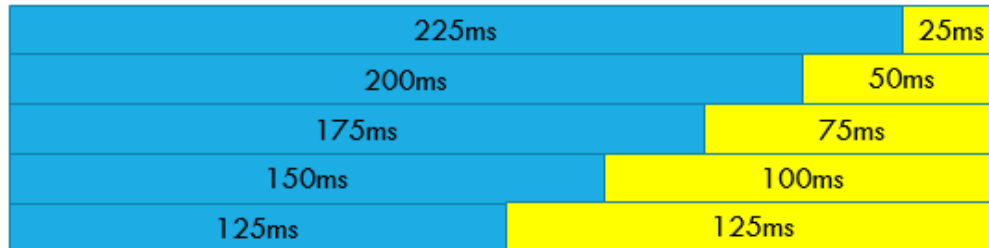


Figura 42. Configuraciones de ventanas de SLEEP (azul) y CCA(amarillo).

Como se mencionó en el capítulo anterior, el ciclo de trabajo que utiliza BMAC cuenta con dos ventanas que pueden ser configuradas por el usuario, la ventana de CCA en la cual el dispositivo transmisor verifica si el canal inalámbrico se encuentra disponible para realizar una transmisión o detectar una recepción de paquete, y la ventana de sleep en la cual el dispositivo deshabilita su transceptor entrando en un estado de reposo en cual su consumo de corriente es mínimo.

Como se puede observar en la Figura 42, se evaluaron 5 configuraciones del ciclo de trabajo. En cada una de ellas el ciclo de trabajo fue de 250 milisegundos definiendo las ventanas de CCA desde los 25 a los 125 milisegundos. Estas ventanas fueron elegidas después de realizar un análisis del funcionamiento del algoritmo BMAC con cada una de las ventanas de CCA elegidas. Cabe mencionar que el elegir una ventana de CCA mayor al 50% del ciclo de trabajo, pierde el principal objetivo de implementar un ciclo de trabajo el cual es que los dispositivos estén la mayor cantidad del tiempo dormidos para un mayor ahorro de energía.

Es importante mencionar que las 5 configuraciones del ciclo de trabajo fueron implementadas en cada uno de los escenarios a evaluar que fueron mencionados en este capítulo. En la Tabla 7 se pueden apreciar el total de configuraciones simuladas en OMNeT++ recordando que en cada una

de ellas se obtuvieron 10 semillas diferentes de resultados en donde se tomaron en cuenta las métricas que a continuación se presentan.

Tabla 7. Configuraciones de las simulaciones realizadas. En esta tabla se muestran todas las simulaciones realizadas para este trabajo de tesis considerando los escenarios y las configuraciones de ciclo de trabajo.

Ventanas de CCA	Escenario 1 (cantidad de saltos)					Escenario 2 (Densidad de nodos)				Escenario 3 (Control de topología)		Escenario 4 (Densidad de nodos)			
	1	2	3	4	5	5	10	20	50	Grafos Gabriel	Grafos de vecindad Relativa	5	10	20	50
25 ms	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
50 ms	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
75 ms	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
100 ms	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
125 ms	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

4.6 Métricas de evaluación

Para llevar a cabo el análisis fue necesario utilizar métricas que sean capaces de mostrar cómo se comporta la red. Para realizar el análisis en términos de consumo de energía se definió la métrica de consumo de corriente promedio de la red, con la cual se obtiene resultados generales de la red y de eficiencia de red. Para el caso del análisis de la eficiencia de red se definieron un conjunto de métricas las cuales son la tasa de entrega de paquetes (“Packet Delivery Ratio”, PDR por sus siglas en inglés) y el retardo extremo a extremo (“End to End Delay”, E2E por sus siglas en inglés), las cuales proporcionan información con respecto a que tan eficiente es la red.

4.6.1 Consumo de corriente promedio de la red

El consumo promedio de la red es una métrica que nos indica el comportamiento general en términos de corriente consumida de los dispositivos. Para esta métrica no se consideró el nodo resumidero, dado que se asume que no tiene restricciones de energía. Para evaluar el consumo de corriente fue necesario implementar en el simulador un módulo de batería el cual es capaz de registrar el consumo de cada dispositivo durante todo el tiempo de simulación, en el capítulo anterior se menciona su funcionamiento a profundidad.

$$\%Bat_{Promedio} = \frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Bateria consumida } X_i\right) * 100}{C_{Batt}} \quad (5)$$

Se tomó en cuenta una batería de 2000mAh para la evaluación, una vez terminado el proceso de simulación, se obtuvieron los datos resultantes. Para una mejor evaluación se tomaron en cuenta resultados de 10 semillas de simulación (en el capítulo anterior se explica a profundidad el funcionamiento de éstas) por lo que se obtenían 10 resultados diferentes de cada dispositivo donde se obtenía su promedio para después calcular la métrica con la ecuación 5, donde:

- *n es la cantidad de dispositivos transmisores en la red*
- *X_i es el dispositivo del cual se están obteniendo los datos*
- *C_{Batt} es la capacidad nominal de la batería*

4.6.2 Packet Delivery Ratio (PDR)

El PDR es una métrica que define el porcentaje de paquetes recibidos correctamente en el destino con respecto al total de paquetes generados en la red, el cual se obtiene utilizando la ecuación 6. Cabe mencionar que no se contabilizan las transmisiones ni retransmisiones si no los paquetes que se generan.

$$PDR = \frac{\text{Paquetes Recibidos } X_0}{\sum_{i=1}^n \text{Paquetes Generados } X_i} \quad (6)$$

Donde:

- *X₀ es el dispositivo destino o el nodo concentrador*
- *X_i es cada uno de los nodos que genera paquetes en la red.*

Para una mejor aproximación para esta métrica, se tomaron en cuenta el total de paquetes generados y el total de paquetes recibidos en las 10 semillas de simulación.

4.6.3 End-to-End Delay (E2E)

Por último, el E2E es una métrica que permite conocer el tiempo de entrega de paquete desde que fue generado hasta que llegó a su destino. En esta métrica se registra todo el tiempo que tardó un paquete en atravesar la red para llegar al dispositivo destino, y toma en cuenta los tiempos que tarda en ser retransmitido pues el canal se puede encontrar ocupado aumentando el valor de esta. Para obtener los resultados se utiliza la ecuación 7, en donde se toman en cuenta todos los paquetes generados en cada una de las 10 semillas de simulación.

$$E2E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TX_0 \quad \text{desde } X_s \quad (7)$$

Donde:

- *n es la cantidad de paquetes que llegaron correctamente al destino del nodo a evaluar.*
- *TX₀ es el tiempo de arribo de paquete que llegó al dispositivo destino correctamente.*
- *X_s es el dispositivo del cual se tomaron en cuenta los paquetes que se generaron.*

Como nota importante para esta métrica en el escenario multisalto, solo se consideran los paquetes que se generan en el nodo del salto que se está evaluando. Para el escenario de densidad se toman en cuenta los paquetes generados por todos los dispositivos transmisores que se encuentran en el último anillo de la red. En la topología del tipo estrella como todos los dispositivos se encuentran a un salto del destino se toman en consideración todos los paquetes que se generan en cada dispositivo. Y por último para el escenario donde se obtienen 2 topologías diferentes generadas por los grafos Gabriel y de vecindad relativa, se consideran todos los paquetes que se generaron en

todos los dispositivos, clasificándolos por la cantidad de saltos que dieron para llegar al destino y obteniendo la métrica siguiendo esta clasificación.

Capítulo 5. Evaluación del control de topología en una LPWAN multisalto.

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados y gráficas obtenidas de las métricas de evaluación sobre los 4 escenarios evaluados en este trabajo de investigación, como se explicó en el capítulo anterior las métricas utilizadas son el PDR, la Batería consumida en promedio y el End-to-End Delay, además, se presenta un análisis de cada uno de estos. Para las gráficas de resultados presentadas en este capítulo en eje “x” se encuentran las diferentes ventanas de “CCA” utilizadas para el ciclo de trabajo las cuales igualmente se explicaron en el capítulo anterior, y sobre el eje “y” se encuentra las unidades de la métrica evaluada.

Las métricas son descritas con mayor detalle en la sección 4. Para facilitar la lectura de este capítulo las métricas se describen brevemente a continuación: en los resultados de PDR hay que recordar que este está expresado en porcentaje, con referencia a los paquetes entregados exitosamente en el resumidero con respecto a los paquetes generados por cada nodo transmisor. Los resultados de Batería consumida promedio también se encuentran expresados en porcentaje tomando como referencia una batería de 2000mAh, siendo el 0% la batería completamente cargada y el 100% completamente descargada. Por último, los resultados de End-to-End Delay se encuentran expresados en segundos, siendo este el tiempo de retardo extremo a extremo.

5.2 Análisis de resultados del escenario 1: Topología de red multisalto

En esta parte del capítulo se realiza un análisis de las 3 métricas evaluadas de este escenario. Hay que recordar que este escenario cuenta con 5 topologías diferentes en donde se pueden apreciar la topología multisalto desde 1 hasta 5 saltos (ver subsección 4.1).

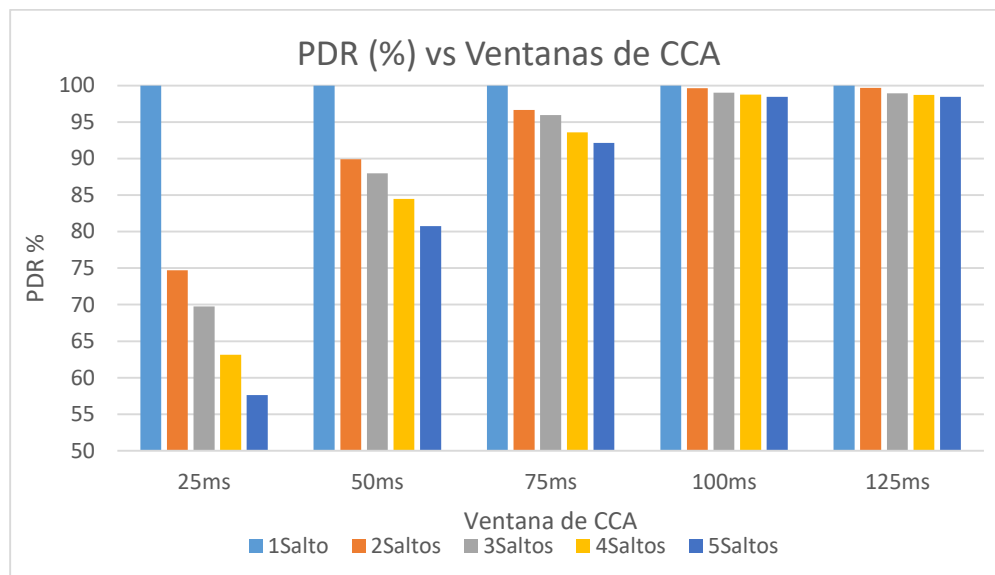


Figura 43. PDR expresado en porcentaje de cada topología evaluada en el escenario 1 conforme aumenta la ventana de CCA.

En la Figura 43 se observa el PDR (expresado en porcentaje) obtenido para cada topología evaluada de este escenario, conforme se aumenta la ventana de CCA desde 25 ms hasta 125 ms de los 250ms que dura el ciclo. Como se observa en esta Figura el PDR disminuye en todas las ventanas de CCA evaluadas conforme aumenta el número de saltos. Esto es lo esperado considerando que al aumentar el número de saltos aumenta el número de transmisiones necesarias para llegar al resumidero. Por lo que es más probable que un paquete pueda perderse. También se puede observar que conforme se aumenta el tiempo de la ventana de CCA, el PDR tiene un aumento en todas las topologías evaluadas, teniendo mejores resultados en las topologías de menor cantidad de saltos. Esto nos muestra que aumentar el tiempo de sensado del canal antes de transmitir tiene un efecto positivo en el PDR.

Otro factor importante que se puede notar son los valores de las ventanas de CCA, este efecto se logra ver de mejor manera en la ventana de 25ms. En esta ventana el tiempo en que los nodos revisaran si el canal se encuentra ocupado o libre para hacer una transmisión es de solo 25ms, esto disminuye la probabilidad de que el nodo retransmisor escuche el paquete. Como no existe una sincronización perfecta, algunos de los nodos retransmisores en donde existe más de un salto, se pueden encontrar dormidos o en su ventana de "SLEEP" donde su valor es de 225ms. Con lo

mencionado anteriormente los nodos retransmisores se encontrarán dormidos una mayor cantidad de tiempo, con lo cual se aumentan las probabilidades de no escuchar el paquete y este no sea entregado.

Como ya se mencionó en este escenario los factores que hacen que disminuya el PDR son la cantidad de saltos de la topología y la ventana de CCA. Como se puede observar en las ventanas de 50ms y 75ms existe una mejora considerable para el PDR aun notándose valores más bajos de este conforme existen más saltos en la topología.

Para todas las ventanas de CCA evaluadas en donde la topología solo cuenta con un nodo a un salto se tiene un 100% de PDR, esto se debe a que el enlace se encuentra directamente al nodo resumidero. Cabe mencionar que el nodo resumidero no cuenta con la configuración del ciclo de trabajo, pues siempre se tiene que encontrar despierto para recibir un paquete del canal.

Por ultimo podemos notar que en las ventanas de CCA de 100ms y 125ms los resultados de PDR están por encima del 95%. Esto sucede debido a que en estas configuraciones los dispositivos retransmisores se encuentran un mayor tiempo despiertos y un menor tiempo dormidos. Esto aumenta la probabilidad de entrega de paquete. Hay que recordar que para cada valor de la ventana de CCA, el valor de la ventana de SLEEP será el complemento para 250ms, por lo que al aumentar la ventana de CCA, el tiempo que permanecen dormidos disminuye.

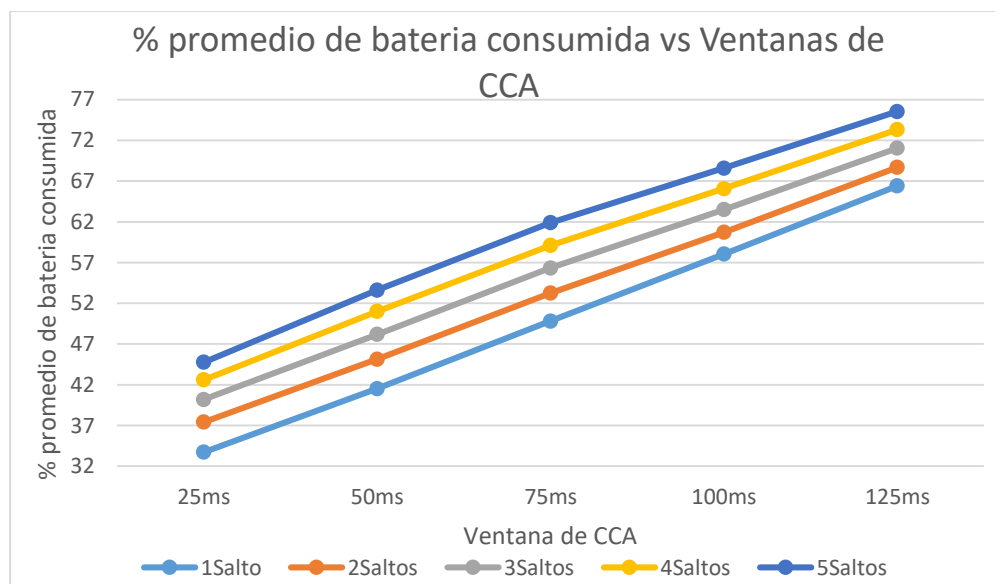


Figura 44. Porcentaje promedio de batería consumida para cada topología evaluada en el escenario 1 conforme aumenta la ventana de CCA.

En la Figura 44 se observan los resultados obtenidos de la Batería consumida en promedio (expresada en porcentaje) para cada una de las topologías de este escenario conforme se aumenta el valor de las ventanas de CCA. Como era de esperarse en esta Figura se observa que el valor de la ventana de CCA afecta directamente al consumo de batería. Como ya fue mencionado anteriormente mientras más grande sea la ventana de CCA mayor tiempo se encontrarán despiertos los nodos, esto conlleva un mayor consumo de corriente. Además, se puede observar que número de saltos también es un factor de importancia, pues al tener la topología una mayor cantidad de saltos se tiene un mayor consumo de corriente.

Como podemos observar el consumo mínimo se da en la ventana de 25ms, al ser el valor de ventana más pequeño evaluado existe un gran ahorro de batería. Esto quiere decir que la mayor parte del tiempo el nodo se encuentra “dormido”, por lo que su consumo de corriente en ese estado es mínimo. Además, se puede notar que el consumo de batería promedio fue en aumento para todas las topologías conforme se aumentó la ventana a 50ms, 75ms, 100ms y 125ms.

Para todas las topologías de este escenario se observa un aumento en el consumo de corriente conforme se aumenta la ventana de CCA. El mayor consumo de batería para este escenario se da con la ventana de 125ms de CCA. Como ya fue mencionado mientras más grande sea la ventana de CCA los dispositivos permanecerán más tiempo despiertos, consumiendo más corriente durante ese proceso.

Otro factor que aumenta el consumo de batería fue aumentar el número de saltos. Como se puede observar en esta figura, en todas las ventanas de CCA evaluadas el aumento de número de saltos aumentó el consumo de batería promedio. Esto se debe ya que, al ir aumentando el número de saltos, aumenta el número de transmisiones y principalmente retransmisiones, causando que todos los dispositivos en la red aumenten su tiempo despiertos. Con este proceso se mantienen encendidos durante más tiempo, pues consumen corriente durante la ventana de CCA, durante el periodo de transmisión de preámbulos y de paquetes, aumentando esta métrica en todos los nodos involucrados para que un paquete llegue al nodo resumidero.

Tabla 8. End-to-End Delay expresado en segundos para cada topología evaluada en el escenario 1 conforme aumenta la ventana de CCA.

Salto	25ms	50ms	75ms	100ms	125ms
1	0.35	0.32	0.32	0.30	0.29
2	0.69	0.69	0.70	0.64	0.63
3	1.05	1.02	1.04	1.00	0.98
4	1.38	1.37	1.40	1.35	1.33
5	1.74	1.71	1.76	1.69	1.68

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos del End-to-End Delay (expresado en segundos) para cada una de las topologías de este escenario conforme se fue aumentando la ventana de CCA. Se puede observar en esta tabla que el retardo fue en aumento conforme se aumentó el número de saltos para todas las ventanas de CCA. Además, se puede observar una ligera disminución de aproximadamente 0.06s de la ventana de 25ms hacia la ventana de 125ms de CCA.

El aumento que se presenta en cada una de las topologías era esperado pues al ir aumentando el número de saltos, cada vez que un paquete tenga que ser retransmitido tiene que pasar por el proceso de BMAC para llegar al nodo resumidero. Esto quiere decir que cada salto que de un paquete para llegar al nodo resumidero aumenta el tiempo que tardara en llegar.

Como ya fue mencionado estos resultados van de la mano con el proceso del protocolo de acceso al medio BMAC. Este protocolo es el que determina cuando se transmitirá un paquete, y toma en cuenta todos los tiempos que transcurren para este proceso, empezando por el periodo de la ventana de CCA, los preámbulos a mandar, y el tiempo de transmisión.

Para la ventana de CCA de 75ms se observa un valor ligeramente más alto que el comportamiento descendente que se muestra conforme aumenta la ventana de CCA. Esto se debe principalmente a que el proceso de BMAC en todas las ventanas de CCA se envía un determinado número de preámbulos. Estos afectan el tiempo promedio de retardo, pues la cantidad de estos es determinada por el valor de la ventana de CCA entre 2, una vez obtenido se divide la ventana de SLEEP correspondiente entre el resultado. Si el número de preámbulos a transmitir no es entero, el protocolo aumenta ligeramente el tiempo de retardo como se puede observar en la tabla. Esto se debe a que el protocolo procedió a mandar un preámbulo más, lo que hace que aumente un poco su tiempo de transmisión en promedio.

5.3 Análisis de resultados del escenario 2: Topología de red en estrella-multisalto con baja, media y alta densidad de nodos.

Para los resultados de este escenario mostrados en esta sección del capítulo, hay que recordar que todas las topologías evaluadas son redes multisalto en donde se varió la cantidad de nodos transmisores en la red desde 5 hasta 50 (ver subsección 4.2).

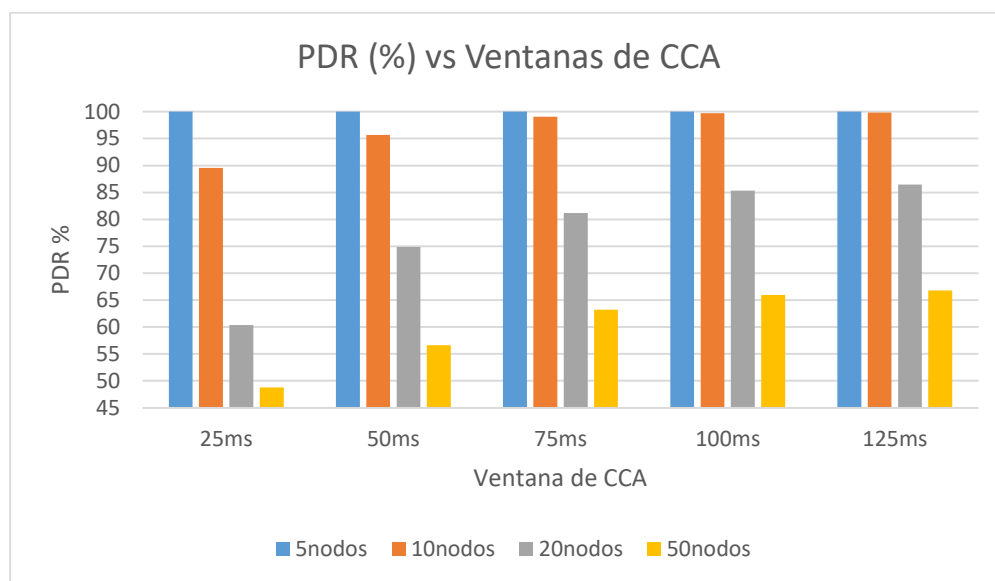


Figura 45. PDR expresado en porcentaje de cada topología evaluada en el escenario 2 conforme aumenta la ventana de CCA.

En la Figura 45 se puede observar los resultados obtenidos de PDR (expresado en porcentaje) para las diferentes topologías evaluadas de este escenario conforme aumenta la ventana de CCA de 25ms a 125 ms. Se puede observar en esta Figura que para todas las ventanas de CCA evaluadas existe una disminución del PDR conforme se fue aumentando el número de nodos en la red. También se puede observar que, al aumentar la ventana de CCA en cada una de las topologías de este escenario se presentó un aumento del PDR. Los resultados más altos se dieron con las ventanas más grandes, pero aun así la densidad de la red afecta al PDR pues en las topologías más densas sigue existiendo un PDR bajo.

Como era esperado para las topologías que tienen una densidad de 5 nodos en donde todos tienen un enlace directo al nodo resumidero, todas las ventanas de CCA evaluadas presentan un 100% de PDR. Esto se debe a que al ser una cantidad baja de nodos existe una convivencia con poca interferencia en el canal. Sin embargo, al ir aumentando el número de dispositivos en la red se empezaron a notar PDR más bajos. Al ser una mayor cantidad de dispositivos el canal se ve ocupado más tiempo, además, hay que recordar que las topologías presentadas en el escenario 2 son topologías multisalto, lo que también afecta a la entrega de paquetes como se pudo ver en el escenario 1.

Como se puede observar en los resultados de todas las ventanas de CCA evaluadas la densidad de la topología afecta al PDR, para la ventana de CCA de 25ms se hacen notar los valores más bajos de PDR. Esto era esperado pues al tener una ventana más pequeña de CCA se reducen las posibilidades de entrega exitosa pues los dispositivos duermen una mayor cantidad de tiempo. Además, en cada topología evaluada existe el aumento del número de dispositivos transmisores por lo tanto aumenta la contención del canal, pues habrá un mayor número de transmisiones y retransmisiones que afectan la entrega exitosa de paquetes.

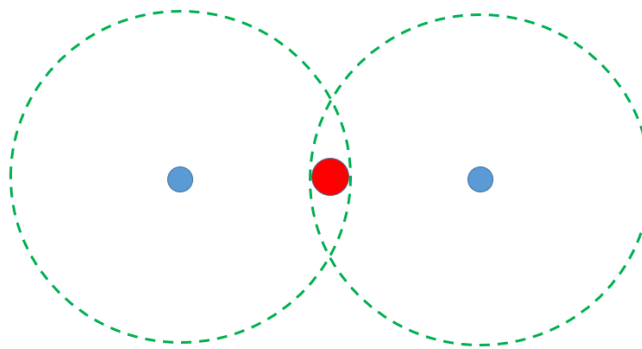


Figura 46. Problema del Nodo oculto.

En este escenario al considerar topologías estrella multisalto, se empezó a presentar el problema conocido como nodo oculto como se puede ver en la Figura 46. Este se presenta cuando el área de cobertura no alcanza a cubrir a algún otro nodo transmisor, presentando problemas para la entrega exitosa de paquetes. Al no poder escuchar a los nodos que no se encuentran dentro de su área de

cobertura no sabrán si los dispositivos quieren o están ocupando en canal. Teniendo esto como base se puede dar una colisión de paquetes afectando directamente al PDR, pues el nodo resumidero se puede encontrar ocupado recibiendo el paquete de otro nodo. Cabe recordar que este escenario utiliza la potencia mínima necesaria para alcanzar a su vecino lo que da como resultado su corta área de cobertura.

Los comportamientos antes mencionados se vieron reflejados en todos los resultados de este escenario. Los resultados de PDR más bajos se encuentran en las ventanas más pequeñas de CCA con topologías muy densas. Los resultados más altos se obtuvieron con las ventanas de CCA de 125ms y 100ms como era esperado. Esto sucede ya que, al ser las ventanas más grandes para escuchar el canal, las probabilidades de retransmitir y entregar el paquete aumentan considerablemente. Sin embargo, aún se puede apreciar que el PDR se ve afectado cuando se consideran una topología de red más densa.

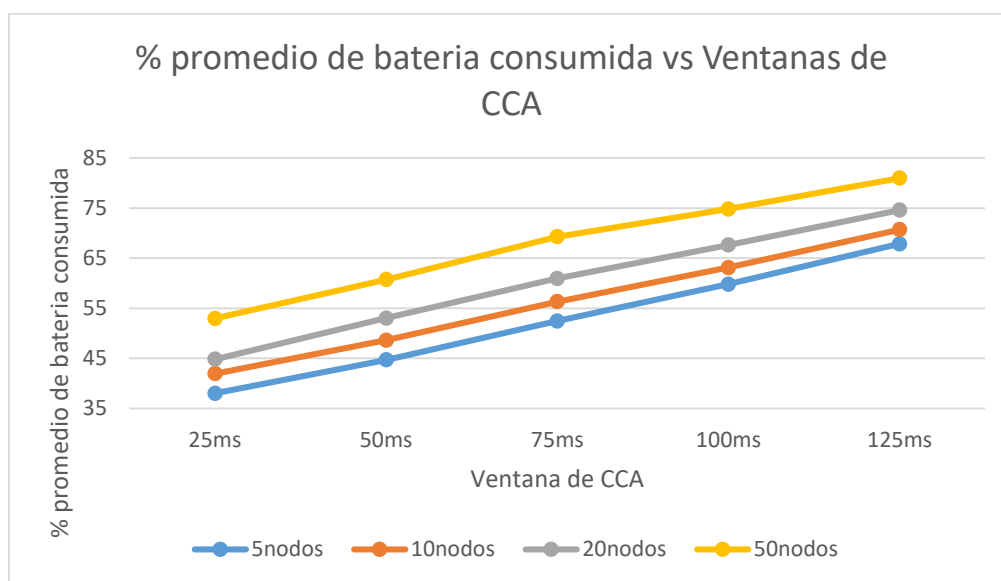


Figura 47. Porcentaje promedio de batería consumida para cada topología evaluada en el escenario 2 conforme aumenta la ventana de CCA.

En la Figura 47 se puede apreciar los resultados de la Batería consumida en promedio (expresada en porcentaje) por la red de este escenario conforme se aumentó la ventana de CCA. Como se puede observar en esta Figura al aumentar los tiempos de la ventana de CCA se presenta un aumento en

el consumo de batería para todas las topologías evaluadas. También se observa que aumentar la densidad de la red hace que aumente el consumo promedio de batería. Este comportamiento ya era esperado pues al existir un mayor número de nodos transmisores, existen un mayor número de retransmisiones y por lo tanto un mayor consumo de batería.

Se observa que para todas las ventanas de CCA existe un consumo de batería más bajo para redes con pocos nodos por lo mencionado anteriormente. Además, como era de esperarse, la configuración que tiene el menor consumo de batería es la red formada por 5 nodos con la ventana de CCA de 25ms. Como se ha ido mencionando esta ventana favorece el ahorro de energía pues se incrementa el tiempo en que los dispositivos se encuentran dormidos.

Un resultado interesante se obtiene en la ventana de CCA de 75 ms, pues, aunque sea ligero como en el caso de 5 nodos o muy notorio como en el caso de 50 nodos se puede empezar a notar un fenómeno interesante. En esta configuración se puede observar una cresta que rompe con el comportamiento ascendente de esta métrica, esto ocurre por la siguiente razón:

- En el ciclo de trabajo que se utiliza, el protocolo BMAC cuenta con el proceso de empezar transmitir preámbulos cuando se quiere ocupar el canal. Como se explicó anteriormente para esta ventana en específico el número de preámbulos a transmitir se obtiene dividiendo la ventana de CCA entre 2 y luego la ventana de SLEEP entre el resultado. Al no ser un número entero, esto hace que el periodo de preámbulos dure más tiempo, lo que hace que aumente el tiempo despierto de los dispositivos aumentando el consumo de batería en toda la red.
- Este factor antes mencionado no afecta a las ventanas de 25ms, 50ms, 100 ms y 125 ms. BMAC al definir la cantidad de preámbulos en estas ventanas se obtienen resultados de números enteros. Los periodos de preámbulos duran lo que dura la ventana de SLEEP, por lo que el tiempo que se mantienen despiertos cuando se quiere realizar una transmisión de paquetes no aumenta el consumo de corriente.

Tabla 9. End-to-End Delay expresado en segundos para cada topología evaluada en el escenario 2 conforme aumenta la ventana de CCA.

Nodos	25ms	50ms	75ms	100ms	125ms
5	0.35	0.32	0.32	0.30	0.29
10	0.69	0.69	0.70	0.64	0.63
20	1.39	1.38	1.40	1.35	1.33
50	2.18	2.16	2.18	2.12	2.13

En la tabla 9 se muestran los resultados de End-to-End Delay (expresado en segundos) de este escenario conforme la ventana de CCA fue en aumento. Como se puede observar en esta tabla los resultados mantienen un cierto parecido a los mostrados en la tabla 7. Sin embargo, se puede notar que aumentar la densidad de la red puede ser un factor muy importante.

Como puede observar el aumento de la densidad de red afecta al retardo extremo a extremo. Sin embargo, el factor principal del aumento del retardo en los resultados mostrados es la cantidad de saltos que dio un paquete para llegar a su destino. Hay que recordar que en este escenario se evalúan diferentes topologías estrella multisalto. Además, donde la densidad de la de la red es de 50 nodos se tomaron en cuenta todos los nodos a 5 saltos, en comparación con los resultados obtenidos en la tabla 7 para 5 saltos se tienen resultados mayores. El número de saltos que da un paquete para llegar al destino influye, pero también se ve afectado por la cantidad de dispositivos que se encuentren en la red. Al existir más dispositivos la contención del canal aumenta y por lo tanto aumenta el tiempo de retardo, ya que se tiene que esperar a encontrar el canal libre para transmitir un paquete.

También se puede seguir notando el aumento en el End-to-End Delay en la ventana de CCA de 75ms como era esperado, este fenómeno ya fue explicado anteriormente. Cabe mencionar que en este tipo de topología el área de cobertura en la mayoría de los dispositivos cubre solo 2 nodos, esto cambia conforme se acercan a el nodo resumidero. Con lo mencionado anteriormente se puede decir que este factor afecta el tiempo de entrega, ya que, si un nodo se encuentra dentro del área de cobertura de otro nodo que está transmitiendo un paquete, tendrá que esperar a que este termine para poder realizar un intento de transmisión. Esto conlleva que aumente el tiempo del End-to-End Delay.

5.4 Análisis de resultados del escenario 3: Topologías de red generadas con los Grafos Gabriel y Grafos de Vecindad Relativa

Este escenario muestra los resultados obtenidos al aplicar ambas técnicas de control de topología evaluadas en este trabajo de tesis, recordando lo mencionado en el capítulo 4, las topologías generadas por las técnicas de control de topología no están controladas, y el resultado de estas técnicas da 2 topologías diferentes con diferente cantidad de saltos hacia el nodo resumidero (ver subsección 4.3).

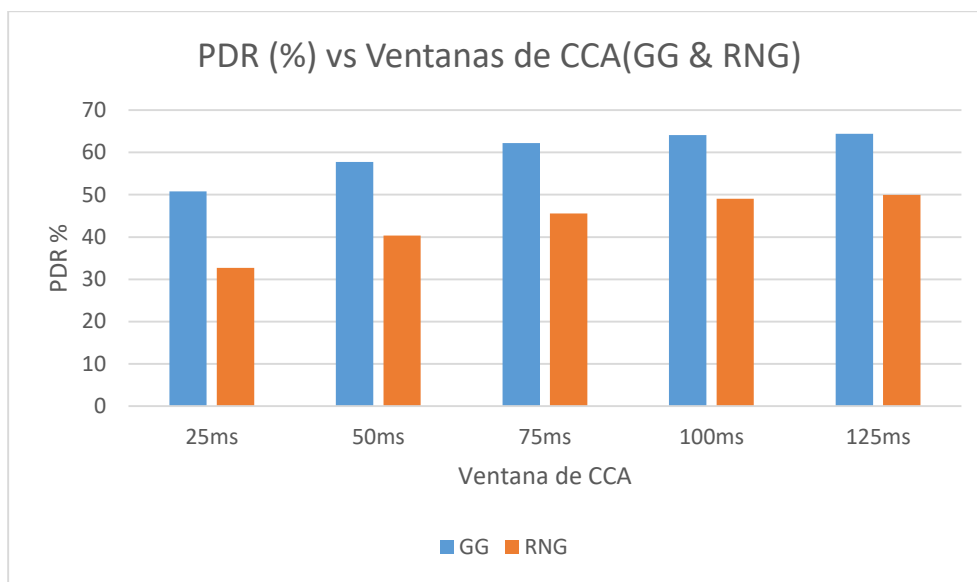


Figura 48. PDR expresado en porcentaje de cada topología evaluada en el escenario 3 conforme aumenta la ventana de CCA.

En la Figura 48 se pueden observar los resultados obtenidos de la métrica de PDR (expresado en porcentaje) de las diferentes topologías de este escenario conforme aumentó la ventana de CCA. Cabe recordar que en este escenario se obtuvieron dos topologías diferentes obtenidas con las técnicas de control de topología basadas en “GG” y “RNG”, teniendo esto como premisa los resultados de este escenario toman mucha relevancia para el objetivo de esta tesis.

Como se observa en esta Figura el PDR para ambas topologías se ve en aumento conforme la ventana de CCA es más grande. Como ya se ha estado viendo en los resultados de los escenarios anteriores esto era esperado, pues al ser una ventana de mayor tamaño, la probabilidad de entregar el paquete al nodo resumidero aumenta. Sin embargo, la densidad de la red es un factor que afecta al PDR como se vio en el escenario 2. Este escenario evaluado cuenta con 48 nodos transmisores, por lo tanto, se puede considerar un escenario con alta densidad de nodos y los resultados de PDR se pueden ver afectados por esta densidad. Sin embargo, hay que recordar que el número de saltos también es un factor importante que puede afectar el PDR.

También, se puede observar que se obtienen resultados de PDR más altos para cada una de las ventanas de CCA con la topología obtenida con GG a comparación de la topología obtenida con RNG. Hace mucho sentido que la topología obtenida con GG tenga resultados más altos de PDR, pues el nodo más alejado del nodo resumidero se encuentra a 3 saltos del destino. En comparación con la topología obtenida de RNG en donde el nodo más alejado se encuentra a 6 saltos del nodo resumidero. La cantidad de saltos obtenidos como se puede observar es un factor importante que puede afectar el PDR.

Además, como era de esperarse los resultados mostrados en la ventana de 25ms, son los más bajos como se ha estado observando en los resultados de PDR de los escenarios anteriores. El ir aumentando el valor de esta ventana se nota una mejoría en los resultados para ambas técnicas de control de topología. Sin embargo, aun con la ventana de 125ms de CCA, el porcentaje de paquetes entregados exitosamente en el resumidero no sobrepasa el 70% para ambas topologías. Esto se debe principalmente a que las topologías en realidad cuentan con 48 nodos sensores que se encuentran a diferentes saltos del nodo resumidero, que como se ha estado mencionando este factor afecta en la entrega exitosa de paquetes.

Otro factor que vuelve a tomar relevancia en este escenario es el problema del nodo oculto. Como ya se mencionó este afecta a la entrega exitosa de paquetes, pues existen numerosos nodos que no se encuentran bajo el área de cobertura de los nodos transmisores afectando en gran medida el PDR al momento de intentar una transmisión exitosa.

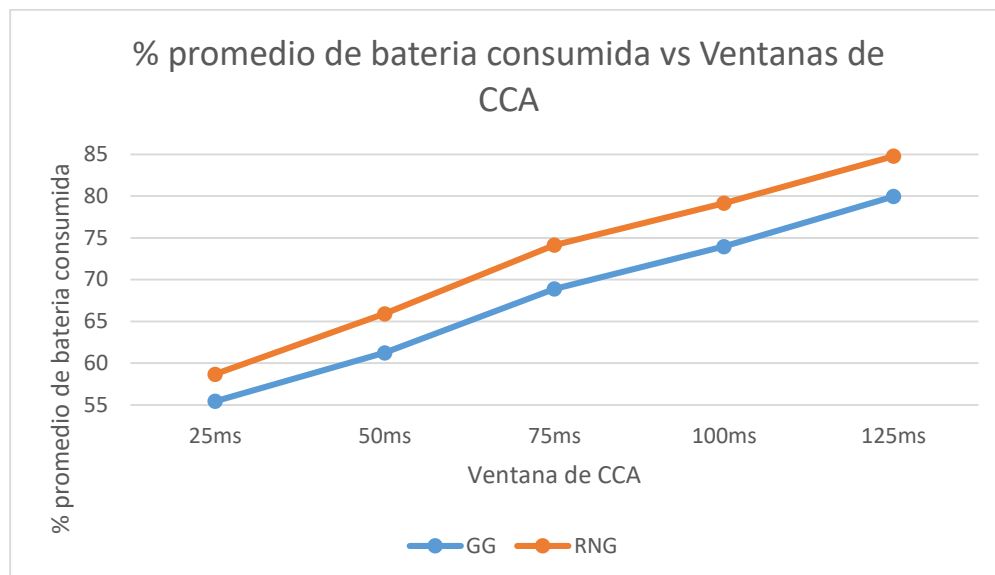


Figura 49. Porcentaje promedio de batería consumida para cada topología evaluada en el escenario 3 conforme aumenta la ventana de CCA.

En la Figura 49 se pueden observar los resultados de la Batería consumida en promedio (expresado en porcentaje) para cada topología obtenida con las técnicas de control de topología de este escenario conforme la ventana de CCA fue en aumento. Como se puede observar en esta figura, los resultados para esta métrica en ambas topologías van en aumento conforme la ventana de CCA es más grande. Además, se puede ver que la topología de GG tiene un menor consumo de batería a comparación del obtenido con RNG.

Como ya se mencionó se puede observar que existe un menor consumo de corriente en la topología generada con los “GG”. Este se debe a que esta técnica de control de topología genera una mayor cantidad de enlaces para disponer en el enrutamiento, lo que dio como resultado un menor número de saltos hacia el nodo resumidero. Como se pudo observar en los resultados del escenario 1 una menor cantidad de saltos da como resultado un menor consumo de corriente. Para el caso de la topología formada por la técnica de control de topología con “RNG”, se puede observar como el tener 6 saltos hacia el nodo resumidero aumenta su consumo en cualquiera de las ventanas de CCA.

Como se ha estado observando las ventanas de CCA más pequeñas tienen un mayor ahorro de energía, pues para ambas topologías los nodos transmisores se encuentran un mayor tiempo dormidos lo que se ve reflejado en un mayor ahorro de batería. También se puede apreciar en la Figura 49 las crestas que se obtiene en ambas topologías en la ventana de CCA de 75 ms que se explicó en el caso anterior. Como se ya se mencionó este fenómeno se da por el protocolo de acceso al medio, el cual hace que exista un mayor consumo de batería para ventanas de CCA en donde el número de preámbulos es mayor que el valor de ventana se SLEEP.

También se puede observar que las ventanas de CCA mayores obtienen un consumo promedio mucho mayor casi un 30% más de batería consumida en comparación con sus ventanas más pequeñas. El factor principal es el tiempo que se encuentran despiertos los nodos en la red y está dado por las ventanas de CCA.

Tabla 10. End-to-End Delay expresado en segundos para cada topología evaluada en el escenario 3 conforme aumenta la ventana de CCA.

Técnica de CT	Salto	25ms	50ms	75ms	100ms	125ms
GG	1	0.56	0.64	0.82	0.80	0.80
	2	0.95	1.04	1.20	1.15	1.15
	3	1.30	1.36	1.49	1.39	1.37
RNG	1	0.69	1.04	1.41	1.42	1.43
	2	1.74	2.16	2.61	2.60	2.59
	3	1.91	2.36	2.94	2.97	3.03
	4	2.14	2.50	2.91	2.82	2.80
	5	2.06	2.47	3.06	2.87	2.86
	6	2.12	2.12	2.24	2.15	2.16

En la tabla 10 se presentan los resultados obtenidos de End-to-End Delay para las dos topologías obtenidas con las técnicas de control de topología de este escenario conforme la ventana de CCA fue en aumento. Para esta evaluación al ser un escenario no controlado se obtuvieron redes en donde los nodos cuentan con diferentes cantidades de saltos en ambas topologías. Se decidió clasificar los resultados como se muestra en esta tabla, se pueden observar los diferentes resultados obtenidos para cada uno de los saltos que se obtuvieron en cada topología. Para GG la cantidad de

saltos máxima fue de 3 y para RNG fue de 6, por lo que para obtener esta métrica se consideraron todos los nodos de la red que se encontraran a la cantidad de saltos evaluada.

Para ambas topologías se pueden observar que el End-to-End Delay va en aumento teniendo su valor más bajo en la ventana de CCA de 25ms y el más alto en la ventana de CCA de 75 ms. En la ventana de 100ms se puede observar una ligera disminución con resultados muy similares que la ventana de CCA de 125ms.

Para ambos casos se puede observar que a mayor cantidad de saltos mayor es el retardo de los paquetes, este resultado se ha estado viendo en los escenarios anteriores. Sin embargo, ocurre un aumento que no se había dado anteriormente. Este se da principalmente porque en este escenario los nodos cuentan con área de cobertura que alcanza a cubrir cantidad de nodos mayor que en los escenarios anteriores. Además, existe la probabilidad de que los nodos al encontrarse más tiempo dormidos en las ventanas de CCA más bajas causan menos interferencias logrando que se agilice el tiempo de entrega. Esto da como resultado que el retardo se vea mejorado conforme se más baja sea la ventana de CCA.

Para los resultados de la topología "GG" se pueden observar que tuvo un máximo de 3 saltos. Como se ha ido mencionando el tener una menor cantidad de saltos beneficia el tiempo de entrega de paquetes. También se puede observar que se tienen resultados más altos en la ventana de CCA de 75ms, esto debido a la configuración de la capa de acceso al medio.

5.5 Análisis de resultados del escenario 4: Topologías de red tipo estrella

Por último, se muestran los resultados obtenidos en este escenario. Las topologías presentadas en este escenario son del tipo Estrella, por lo que hay que recordar que existe solo un salto hacia el nodo resumidero, y además la potencia de transmisión es mayor que en los escenarios anteriores lo cual puede verse reflejado en las siguientes métricas (ver subsección 4.4).

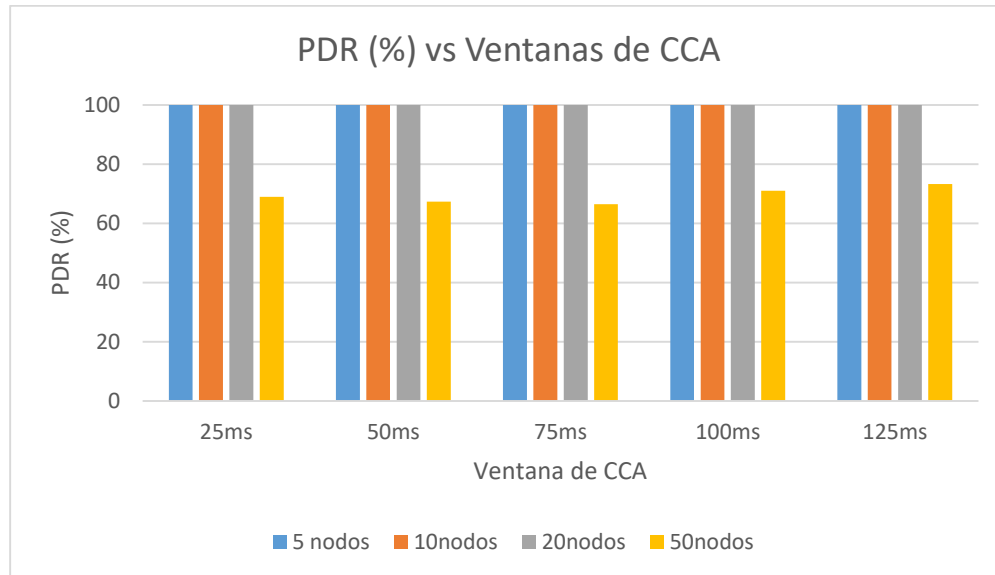


Figura 50. PDR expresado en porcentaje de cada topología evaluada en el escenario 4 conforme aumenta la ventana de CCA.

En la Figura 50 se muestran los resultados del PDR (expresado en porcentaje) de las diferentes topologías evaluadas en este escenario conforme aumenta la ventana de CCA de 25ms a 125ms. Como se puede observar en esta Figura los resultados para las topologías de 5, 10 y 20 nodos se puede observar un PDR del 100% de paquetes. Esto quiere decir que al existir un solo salto hacia el nodo resumidero mejora la fiabilidad de entrega con topologías no muy densas pues existe una convivencia del canal inalámbrico estable.

Se puede observar que el valor de la ventana de CCA no perjudica la entrega de paquetes para las densidades antes mencionadas como en los resultados anteriores, donde se consideraba una topología multisalto. Esto se debe principalmente porque al tener una mayor área de cobertura dada por una mayor potencia de transmisión, se pueden cubrir una mayor cantidad de nodos obteniendo un mejor resultado al momento de compartir el canal inalámbrico.

Al aumentar la densidad a 50 nodos, en todas las ventanas de CCA evaluadas se notan resultados de PDR más bajos, dados por el problema del nodo oculto que ya se ha explicado con anterioridad, pero también dados por la densidad de la red. En este escenario a pesar de tener una mayor potencia de transmisión, lo cual ayuda a la convivencia dentro del canal inalámbrico, al tener una

mayor densidad de nodos no se alcanzan a cubrir algunos de dispositivos, teniendo los problemas del nodo oculto ya mencionados.

También se puede observar un ligero incremento en los resultados del escenario de 50 nodos con la ventana de 50ms y 25ms. Después de un análisis se pudo notar que para escenarios con topologías densas del tipo estrella en donde existe una mayor área de cobertura de los nodos transmisores las ventanas de CCA más bajas pueden beneficiar el uso compartido del canal inalámbrico. Esto sucede ya que al encontrarse los nodos más tiempo dormidos se tiene una mayor probabilidad de entregar los paquetes al nodo resumidero.

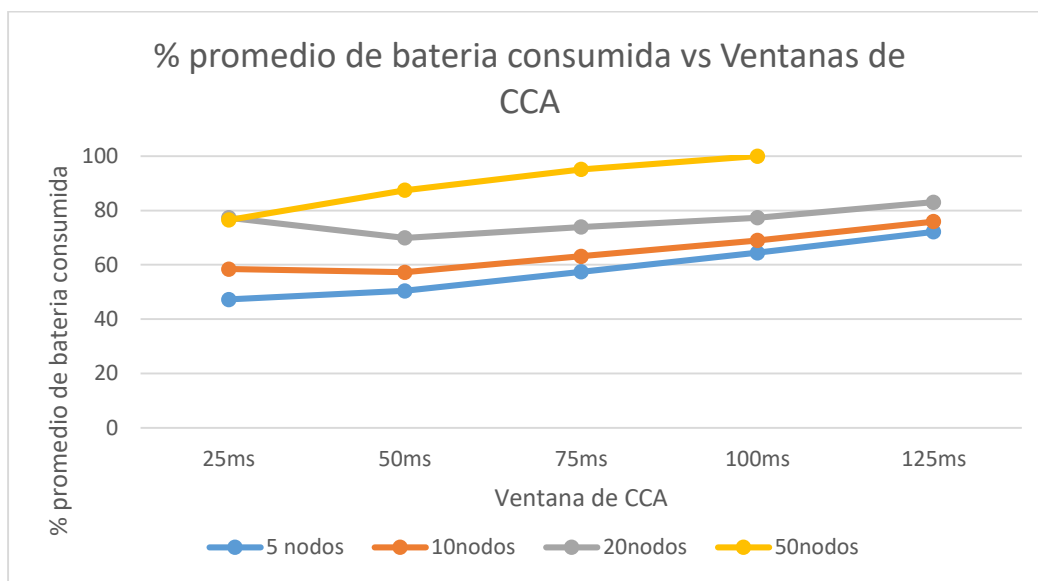


Figura 51. Porcentaje promedio de batería consumida para cada topología evaluada en el escenario 4 conforme aumenta la ventana de CCA.

En la Figura 51 se presentan los resultados obtenidos del Consumo de batería promedio (expresado en porcentaje) para cada una de las topologías de este escenario conforme la ventana de CCA aumenta. Como se observa en esta Figura el aumento de batería consumida en promedio sigue presente para todas las topologías evaluadas conforme la ventana de CCA es más grande. Este comportamiento ya era esperado, pues como se ha ido mencionando mientras más grande la ventana de CCA mayor tiempo se encuentran despiertos los nodos y mayor es su consumo de batería.

Además, se puede destacar que, en los resultados obtenidos con las densidades de 5, 10 y 20 nodos en la ventana de 125ms se puede observar consumo de corriente por encima del 60 % de la capacidad nominal de la batería. Esto era esperado, pues como se comentó al utilizar una mayor potencia de transmisión se requiere de una mayor corriente para lograr una transmisión que alcance distancias más alejadas. Cabe mencionar que, para la configuración de 50 nodos transmisores con esta configuración de ciclo de trabajo, la capacidad de la batería no fue suficiente para concluir con el tiempo de simulación. En este caso la mayoría de los nodos transmisores ocuparon su 100 % de batería, considerándose la red muerta.

También se puede observar como al ir disminuyendo la ventana de CCA en promedio los dispositivos utilizan una menor cantidad de batería. Teniendo esto como premisa, en la ventana evaluada de 25 ms tenemos 2 comportamientos diferentes:

- Para la densidad de 50 nodos los dispositivos al ser una red muy densa, la tendencia del promedio va en caída, por lo que se puede definir que la mayoría de los despóticos tienen un comportamiento muy parecido en su consumo de corriente.
- Para las densidades de 5, 10 y 20 nodos se observa un comportamiento diferente, pues al utilizar esta ventana con lo cual se esperaría un consumo menor, presentan un consumo igual o mayor que la ventana de 50 ms. Esto se da principalmente por su mayor consumo de corriente al utilizar una mayor potencia de transmisión. Al tener más dispositivos dentro de su área de cobertura estos pueden escuchar y afectar el consumo de los demás nodos transmisores. Por lo que la densidad en este tipo de redes es un factor muy importante que ayudaría a tener un consumo más equitativo de la batería.

Tabla 11. End-to-End Delay expresado en segundos para cada topología evaluada en el escenario 4 conforme aumenta la ventana de CCA.

Nodos	25ms	50ms	75ms	100ms	125ms
5	0.34	0.32	0.32	0.29	0.28
10	0.34	0.32	0.32	0.29	0.28
20	0.34	0.32	0.32	0.29	0.28
50	0.73	0.99	1.37	1.51	1.71

En la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos del End-to-End Delay para las topologías evaluadas de este escenario conforme la ventana de CCA aumenta. Como se puede observar en esta tabla para las topologías de 5, 10 y 20 nodos el promedio del End-to-End Delay es muy similar en todas las ventanas de CCA. Esto quiere decir que la mayoría de los paquetes entregados tuvieron un retardo muy parecido. Esto se da principalmente porque todos los nodos de la red se encuentran a 1 salto del nodo resumidero, lo que conlleva que esta métrica no se vea muy afectada para densidades bajas de red. Además, al tener una mayor área de cobertura existe la posibilidad de una mayor convivencia en el canal inalámbrico

Un resultado interesante se hizo notar cuando la densidad de la topología aumento a 50 nodos transmisores. Se encontró un incremento de la métrica en todas las ventanas de CCA evaluadas, teniendo los resultados más bajos en la ventana de CCA de 25 ms como se puede observar en la Figura 52. Esto se debe principalmente al aumento de densidad, ya que al ser una mayor cantidad de nodos existen más transmisiones en canal inalámbrico. Por lo tanto, el canal se puede encontrar ocupado más tiempo, dando como resultado que la mayoría de los paquetes transmitidos tengan un mayor retardo.

Sin embargo, en esta ventana de 25ms existe el menor tiempo de retardo para esta topología de 50 nodos. Esto se da principalmente porque al encontrarse un mayor tiempo dormidos los demás dispositivos transmisores, aumentan la probabilidad de transmitir paquetes en un menor tiempo.

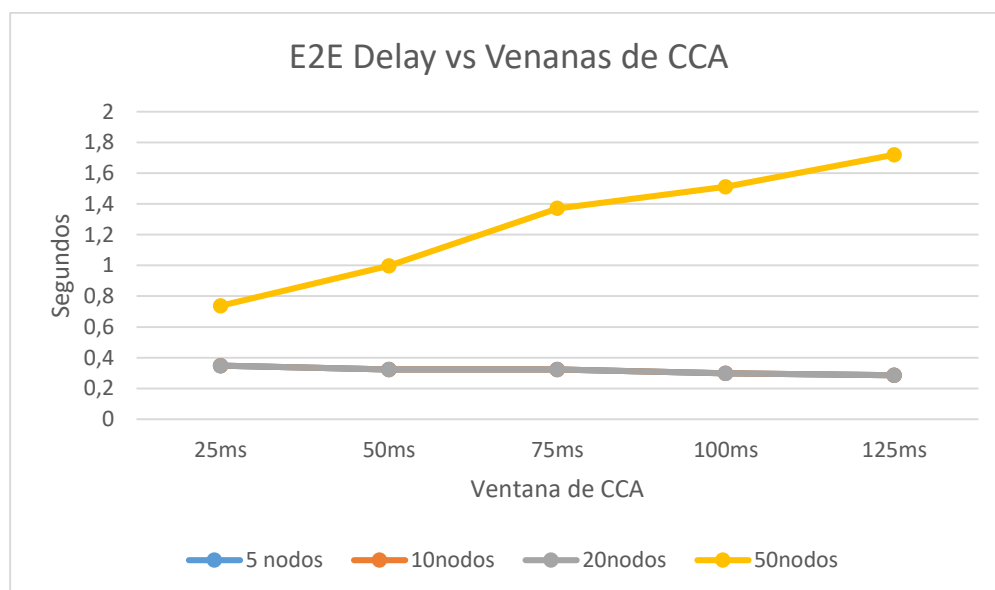


Figura 52. End-to-End Delay expresado en segundos para cada topología evaluada en el escenario 4 conforme aumenta la ventana de CCA.

Además, se vuelve a observar la cresta que se da en la ventana de 75ms, como ya fue explicado anteriormente, esta cresta se obtiene porque en esa configuración de ciclo de trabajo el periodo de preámbulos aumenta ligeramente el tiempo de entrega de paquetes.

Otro resultado que se puede notar es el aumento en la métrica conforme se aumentó la ventana de CCA en la topología de 50 nodos. Este se da principalmente porque los dispositivos se encuentran un mayor tiempo despiertos, dificultando la posibilidad de transmitir un paquete pues el canal se encontrará un mayor tiempo ocupado por los dispositivos transmisores.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo a futuro

6.1 Introducción

Como principal aportación de este trabajo de investigación, se tiene la implementación de las técnicas de control de topología basadas en grafos de proximidad para LPWAN multisalto. Se evalúa el costo de implementar estas técnicas, considerando las características de la capa física para la formación de la topología en una LPWAN multisalto en el estado de la técnica. Como fue mencionado en la sección 1.3, estas técnicas de control de topología no han sido previamente aplicadas en tecnología enfocada para LPWAN multisalto, por lo que esta investigación ofrece una aportación importante.

Otra aportación que genera este trabajo es la implementación de una herramienta validada de simulación para la evaluación de protocolos en LPWAN multisalto con ciclo de trabajo, la cual puede facilitar el desarrollo de trabajos futuros como los enlistados en la última sección de este capítulo.

6.2 Conclusiones sobre los objetivos de este trabajo.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el costo en términos de energía y de eficiencia de red un control de topología distribuido en el despliegue de una LPWAN multisalto. De acuerdo con los resultados obtenidos y que se presentaron en la sección 5 donde se realizó un análisis de ellos, este objetivo se cumplió exitosamente. Se implementaron y validaron las técnicas de control de topología en una LPWAN multisalto utilizando las herramientas mencionadas en el capítulo 4. Además, se obtuvieron resultados con los cuales se evaluó el costo en términos de energía utilizando la métrica de Batería consumida promedio, y el costo en términos eficiencia de red utilizando las métricas de tasa de entrega de paquetes y retardo extremo a extremo, las cuales ayudan a tener una visión general del costo de implementar estas técnicas en redes de largo alcance.

Con las actividades realizadas y con los resultados obtenidos de este trabajo se puede concluir que el control de topología basado en grafos de proximidad se puede considerar una opción para utilizar en el descubrimiento de topología en los escenarios que consideren una LPWAN multisalto. El ajuste

de la potencia después de que se define la topología al aplicar las técnicas de control de topología, genera un ahorro de energía con respecto a la topología estrella, hay que recordar que esta topología estrella utiliza una potencia mayor para transmitir sus paquetes lo que consume una mayor energía. Sin embargo, es importante tener en cuenta que una mayor cantidad de saltos en la red, genera una cantidad de retransmisiones lo que puede afectar el consumo de energía. Hay que tener en cuenta que la evaluación realizada fue evaluada en escenarios fijos, en donde solo se utilizó el control de topología en la formación de la red. Si se quiere evaluar desempeño del control de topología en una LPWAN multisalto en donde se considere una actualización de los nodos, es necesario extender la evaluación realizada, ya que para aplicar este tipo de técnicas se necesita de un intercambio cíclico de paquetes los cuales conllevan un mayor consumo de energía, sin embargo, esta extensión se encuentra fuera del objetivo de este trabajo.

6.3 Conclusiones sobre las herramientas de simulación

Las herramientas de simulación forman una parte fundamental en cualquier trabajo de investigación, pues el uso de estas facilita las labores de evaluación de teorías y pruebas de concepto. Sobre las herramientas de simulación utilizadas en este trabajo se obtuvo la siguiente conclusión:

- Se tomó como base el simulador de redes “OMNeT++”, el cual es ampliamente aceptado por la comunidad científica para la simulación de redes de comunicación. Este fue de gran utilidad debido a la amplia gama de bibliotecas que ofrece para la simulación de redes, las cuales fueron utilizadas para implementar una LPWAN la cual es descrita en la sección 3 y validada en la sección 4. Este simulador de redes permitió llevar a cabo la evaluación planteada en este trabajo de tesis. Además, se tomó como base el manual de “OMNeT++” que fue desarrollado por el grupo de investigación ARTS del CICESE.
- Las LPWAN son una tecnología en el estado del arte, por lo que fue necesario complementar las librerías del simulador “OMNeT++” para realizar la evaluación de la LPWAN multisalto.

Específicamente, 1) se ajustó el modelo del módulo de propagación de la capa física, utilizando los resultados de las pruebas de campo realizadas con módulos LoRa, con el fin de obtener resultados similares a los calculados con el modelo matemático; 2) se utilizó la herramienta “ProRouting 2.0” para generar las topologías basadas en grafos de proximidad.

- La planificación realizada tanto de la generación del modelo de simulación como de la ejecución de las simulaciones, fueron de especial importancia, esto debido al tiempo que fue necesario para realizar la evaluación de cada uno de los escenarios con sus diferentes realizaciones para dar validez estadística.

6.4 Conclusiones sobre los resultados de los escenarios evaluados.

Después del análisis de los escenarios de evaluación se concluyó lo siguiente:

- La utilización de algoritmos basados en grafos de proximidad, se consideró una opción viable para la formación de la topología multisalto de una LPWAN. Sin embargo, el uso de técnicas de forma periódica, puede afectar considerablemente el consumo de energía de la red.
- En una red multisalto, un mayor número de saltos afecta directamente a el retardo extremo a extremo, también se disminuye la tasa de entrega de paquetes y aumenta el consumo de batería promedio de la red, puesto que a mayor número de saltos mayor cantidad de retransmisiones y por lo tanto mayor consumo de energía.
- En una LPWAN multisalto, el aumento en la cantidad de saltos que se tiene en la red es un factor que afecta más el consumo de energía que el aumento de la densidad de nodos en esta, esto se puede notar en redes que tienen la misma densidad, pero diferente cantidad de saltos.
- Cuando se tiene un aumento en la densidad de la red multisalto, se presentan PDR más bajos conforme la densidad aumento, debido a que existen una cantidad mayor de

dispositivos que ocuparan el canal inalámbrico, dando como resultado interferencias. Esto a su vez, refleja un mayor End-to-End Delay con densidades mayores y un mayor consumo de batería por el aumento de retransmisiones necesarias para que un paquete llegue a su destino.

- Las LPWAN multisalto presentan una ventaja en términos de costo de energía cuando se utiliza un control de topología distribuido, ya que estas presentan un consumo de aproximadamente un 25% menos de batería consumida en comparación a la topología del tipo estrella, la cual es la más utilizada en esta tecnología.
- En términos de eficiencia de red, una LPWAN multisalto presenta resultados por debajo de los obtenidos con la topología del tipo estrella. El aplicar las técnicas de control de topología para una LPWAN multisalto, disminuye el consumo de energía gracias a su ajuste de potencia de transmisión, pero si es importante tener en cuenta la cantidad de saltos que los paquetes dan en la red, pues como ya fue mencionado una mayor cantidad de estos pueden afectar, aumentando el consumo de energía y su eficiencia de red.

6.5 Trabajo a futuro.

Este trabajo permitió validar que una implementación de un control de topología distribuido para una LPWAN multisalto es posible. Al mismo tiempo proporciona información para la implementación de tecnologías enfocadas a LPWAN multisalto dentro del simulador de redes OMNeT++.

Aunque los objetivos de este trabajo fueron alcanzados satisfactoriamente, se ofrecen diferentes puntos importantes que se pueden considerar para expandir, analizar y desarrollar el conocimiento sobre estas técnicas de control de topología y sobre la implementación de redes LPWAN:

- Tomando en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo es importante recordar que, aunque se realizó de una manera lo más realista posible pueden existir factores que no se

pueden lograr simular por lo que un punto importante es poder llevar esta implementación de las técnicas de control de topología a un escenario real.

- Otro punto importante es evaluar los diferentes algoritmos de enrutamiento existentes o diseñar uno que pueda beneficiar el uso de un control de topología en una LPWAN multisalto considerando.
- Las técnicas de control de topología las cuales definen los enlaces existentes en la red, resultaron ser de gran valor. Analizar el comportamiento y el costo de aplicar estas técnicas se puede llevar a mayor profundidad teniendo como punto de partida este trabajo. Por ejemplo, la implementación de otras técnicas de control topología para redes LPWAN, haciendo una comparación directa entre ellas; o el utilizar estas técnicas cuando un nodo muere en la red para una actualización de topología.

Literatura citada.

- Amondaray, L. R., Artigas, F. F., Calderón, C. A. 2020. Redes de sensores inalámbricos definidas por software: revisión del estado del arte. *EAC*, 41(2). 39–50.
- Atzori, L., Iera, A., Morabito, G. 2010. The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15). 2787–2805. doi:10.1016/j.comnet.2010.05.010
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., Townsley, W. M. 2016. A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16(9). 1466. doi:10.3390/s16091466
- Barboni, L., Valle, M. 2008. Experimental analysis of wireless sensor nodes current consumption. *Second International Conference on Sensor Technologies and Applications*. IEEE 401–406. doi:10.1109/SENSORCOMM.2008.14
- Barrachina, M. S., Bel, A., Bellalta, B., Adame, T. 2019. Towards energy efficient LPWANs through learning-based multi-hop routing. *IEEE 5th World Forum on Internet of Things*. IEEE 644-649.
- Barrachina M, S., Bellalta, B., Adame, T., Bel, A. 2017. Multi-hop communication in the uplink for LPWANs. *Computer Networks*, 123. 153–168. doi:10.1016/j.comnet.2017.05.020
- Cama, A. P., Cama, A. D., De la Hoz, E., 2012. Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas. *INGE CUC*, 8(1). 163–172.
- Casals L., Mir, B., Vidal, R., Gomez, C. 2017. Modeling the energy performance of LoRaWAN. *Sensors*, 17(10). 2364. doi:10.3390/s17102364
- Chaudhari, B. S., Zennaro, M. 2020. Introduction to low-power wide-area networks. In *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Academic Press. 1-13. doi:10.1016/B978-0-12-818880-4.00001-6
- Chaudhari, B. S., Zennaro, M. 2020. LPWAN technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations. *Future Internet*, 12(3). 43.
- Deshpande, A., Montiel, C., Mclauchlan, L. 2014. Wireless sensor networks – A comparative study for energy minimization using topology control. In *Sixth Annual IEEE Green Technologies Conference*, 44–48. doi:10.1109/GREENTECH.2014.30
- Boulogerogos, A. A. A., Diamantoulakis, P. D., Karagiannidis, G. K. 2016. Low power wide area networks (LPWANs) for internet of things (IoT) applications: Research challenges and future trends. arXiv. 1611.
- Ericsson, 2016. 5G subscriptions to reach half a billion in 2022: Ericsson mobility report. Recuperado el 15 de noviembre de 2020 de <https://ericsson.com>

- Ericsson, 2020. Ericsson Mobility Report. Recuperado el 15 de noviembre de 2020 de <https://ericsson.com>
- ESIC., 2018. El internet de las cosas y sus aplicaciones. Recuperado el 14 de noviembre de 2020 de <https://www.esic.edu/>
- Galaviz, G. A. M. 2019. Redes Ad-hoc y de sensores. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Giri, A., Dutta, S., Neogy, S., Dahal, K., Pervez, Z. 2017. Internet of things (IoT): A survey on architecture, enabling technologies, applications and challenges. Proceedings of the 1st International Conference on Internet of Things and Machine Learning - IML '17, 1–12. doi:10.1145/3109761.3109768
- Guo, H., Wang, F., James, G., Zhang, L., Luo, J. 2018. Graph theory based topology design and energy routing control of the energy internet. IET Generation, Transmission & Distribution, 12(20). 4507-4514. doi:10.1049/iet-gtd.2018.6238
- Haseeb, K., Islam, N., Almogren, A., Din, I. U., Almajed, H. N., Guizani, N. 2019. Secret sharing-based energy-aware and multi-hop routing protocol for iot based WSNs. IEEE Access, 7. 79980–79988. doi:10.1109/ACCESS.2019.2922971
- Haseeb, M., Hussain, H. I., Slusarczyk, B., Jermsittiparsert, K. 2019. Industry 4.0: A solution towards technology challenges of sustainable business performance. Social Sciences, 8(5). 154.
- Gil, J. M., Hernández, G. 2002. ProRouting: una herramienta para la visualización de grafos de proximidad y estrategias de ruteo. Universidad Politécnica de Madrid. 1–8.
- Hernandez, D. M., Peralta, G., Manero, L., Gomez, R., Bilbao, J., Zubia, C. 2017. Energy and coverage study of LPWAN schemes for Industry 4.0. In IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Applications to Mechatronics (ECMSM). IEEE, 1-6.
- Reyes C. L., Molina V. H. 2017. Manual de OMNeT ++ para simulaciones en redes inalámbricas ad-hoc-Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Mason, S. J., Hill, R. R., Mönch, L., Rose, O., Carlo, M. 2008. Proceedings of the 2008 Winter Simulation. IEEE.
- Karp, B., Kung, H. T. 2000. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking. 243-254.
- Kawamoto, Y., Nishiyama, H., Kato, N., Yoshimura, N., Yamamoto, S. 2014. Internet of things (IoT): Present State and Future Prospects. IEICE TRANSACTIONS on information and Systems, 97(10). 2568–2575.

- Li, X. Y., Wan, P. J., Wang, Y. 2001. Power efficient and sparse spanner for wireless ad hoc networks. In Proceedings - International Conference on Computer Communications and Networks, ICCCN. 564–567. doi:10.1109/ICCCN.2001.956322
- Liando, J. C., Gamage, A., Tengourtius, A. W., Li, M. 2019. Known and unknown facts of LoRa: Experiences from a large scale measurement study. Transactions on Sensor Networks (TOSN), 15(2). 1-35.
- Chze, P. L. R., Leong, K. S. 2014. A secure multi-hop routing for iot communication. In IEEE World Forum on internet of things. IEEE, 428–432.
- LoRa Alliance. 2018. LoRaWAN™ 1.0.3 Specification. Recuperado el 15 de octubre de 2020 de <https://lora-alliance.org>.
- LoRa Alliance. 2018. LoRaWAN™ 1.0.3 Regional Parameters. Recuperado el 15 de octubre de 2020 de <https://lora-alliance.org>.
- Mahmoud, M. S., Mohamad, A. A. 2016. A Study of efficient power consumption wireless communication techniques / modules for internet of things (iot) applications. Advances in Internet of things, 6(2). 19-29. doi:10.4236/ait.2016.62002
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., Meyer, F. 2019. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express, 5(1), 1–7. doi:10.1016/j.icte.2017.12.005
- Mészáros, L., Varga, A., Kirsche, M. 2019. Inet framework. In Recent Advances in Network Simulation. Springer Cham, 55-106. doi:10.1007/978-3-030-12842-5_2
- OMNeT++, Discrete Event Simulator. s/f. Recuperado el 15 de octubre de 2020, de <https://omnetpp.org/>.
- Parri, L., Parrino, S., Peruzzi, G., Pozzebon, A. 2019. Low power wide area networks (LPWAN) at sea: Performance analysis of offshore data transmission by means of LoRaWAN connectivity for marine monitoring applications. Sensors, 19(14). 3239. doi:10.3390/s19143239.
- Pedraza, L. F., López, D., & Salcedo, O. (2011). Routing based on Dijkstra's algorithm to a cognitive radio network. Tecnum, 15(30), 94-100.
- Petrić, T., Goessens, M., Nuaymi, L., Toutain, L., Pelov, A. 2016. Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN. In IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 1–7.
- Polastre, J., Hill, J., Culler, D. 2004. Versatile low power media acces for Wireless sensor networks. In Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems. 95-107

- Ramírez-Velasco, A., Pérez-Ramos, A. E., Galaviz-Mosqueda, G. A., Villarreal-Reyes, S., Jiménez-Ramos V.M. 2019. Diseño, implementación y evaluación de un oxímetro de pulso inalámbrico LP-WA para el internet de las cosas médicas (IoMT). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Rappaport, T. S. (1996). *Wireless communications: principles and practice* (Vol. 2). New Jersey: prentice hall PTR
- Ray, P. P. 2018. A survey on internet of things architectures. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 30(3), 291–319. doi:10.1016/j.jksuci.2016.10.003
- Santi, P. 2005. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Computer surveys (CSUR)*, 37(2). 164–194. doi:10.1002/0470094559
- Semtech. 2015. AN1200.22 LoRa modulation basics. Recuperado el 15 de octubre de 2020 de <https://lora-developers.semtech.com/>
- Semtech. 2016. SX1276/77/78/79 Wireless, sensing and timing, datasheet. Recuperado el 15 de Octubre de 2020 <https://www.mouser.com/>
- Sinha, R. S., Wei, Y., Hwang, S. H. 2017. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 3(1). 14–21. doi:10.1016/j.icte.2017.03.004
- Sneha, S., Varshney, U. 2013. A framework for enabling patient monitoring via mobile ad hoc network. *Decision Support Systems*, 55(1). 218–234. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dss.2013.01.024>
- Song, Y., Lin, J., Tang, M., Dong, S. 2017. An internet of energy things based on wireless LPWAN. *Engineering*, 3(4), 460–466. doi:10.1016/J.ENG.2017.04.011
- STMicroelectronics, 2017. STM32L151xE STM32L152xE. Recuperado el 15 de octubre de <https://www.st.com/>
- Suciu, G., Vulpe, A., Halunga, S., Fratu, O., Todoran, G., Suciu, V. 2013. Smart cities built on resilient cloud computing and secure internet of things. In *19th international conference on control systems and computer science*. 513-518. doi:10.1109/CSCS.2013.58
- Tanenbaum, A. S., Wetherall, D. J. 2011. *Computer Networks*, 5th ed. Prentice-Hall, New York.
- Tyagi, S. & Jain, P. C. (2019). *Internet of Things using LPWAN*.
- Vázquez, T. A., Barrachina, S. M., Bellalta, B., Bel, A. 2018. HARE: Supporting efficient uplink multi-hop communications in self-organizing LPWANs. *Sensors*, 18(1). 115. doi:10.3390/s18010115