

*Tesis de Maestría*

**FUNCIÓN OBJETIVO PARA EL PROTOCOLO  
DE ENRUTAMIENTO RPL**

Ing. LUIS FERNANDEZ FERNANDEZ

Ing. ALDO ROJAS CHARRIS

Tesis presentada como requisito parcial para optar el título de Magister en  
Ingeniería de Sistemas y Computación

Director: Paul Sanmartin Mendoza, PhD.

Director: José Rafael García González, PhD.



**UNIVERSIDAD  
SIMÓN BOLÍVAR**

UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR

Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación

Barranquilla, 2018

---

## **RESUMEN.**

En este documento, se presentan los resultados del proceso investigativo en función del análisis detallado de los diferentes inconvenientes que presentan los procesos enrutamiento en las redes de sensores inalámbricos (WSN). Se realiza el análisis del protocolo de enrutamiento RPL, que fue diseñado para mejorar el encaminamiento en redes con baja potencia y pérdida de paquetes (LLN), Como alternativa de solución aplicable a los problemas asociados con el enrutamiento que presentan las redes LLN, se propone la Función Objetivo (F.O) MEDIA, basada en una nueva métrica específica para el protocolo RPL. Donde la métrica del número mínimo de saltos y ETX se combinan diseñando una nueva métrica de enrutamiento llamada MEDIA-ETX. La cual calcula la mejor ruta, utilizando la media aritmética de los valores. ETX entre cada nodo, en lugar de trabajar con el promedio ETX a lo largo de la ruta. La métrica propuesta fue comparada con otras métricas, dando mejores resultados en términos de menor Latencia de red, con mayor rendimiento en entrega de paquetes, Tiempo de vida de la red, potencia y consumo de energía en una red con gran cantidad de nodos. La F.O MEDIA permite que los nodos presenten mayor sensibilidad en los cambios que requiere el entorno, mejorando el rendimiento y el tiempo de vida de la red, y a los ingenieros de redes, la opción de desarrollar soluciones de enrutamiento más efectivas para las IoT.

**PALABRAS CLAVES:** IoT, redes LLN, protocolos RPL, Objective Function, Routing metric

---

## **ABSTRACT**

In this document, the results of the investigative process are presented according to the detailed analysis of the different problems that the routing processes present in wireless sensor networks (WSN). The RPL routing protocol analysis, which was designed to improve routing in low power and packet loss (LLN) networks, is performed. As an alternative solution applicable to the problems associated with routing presented by LLN networks, it is proposed The MEDIA-ETX based Objective Function (FO), in a new metric specific to the RPL protocol. Where the metric of the minimum number of jumps and ETX are combined designing a new routing metric called MEDIA-ETX. Which calculates the best route, using the standard deviation of the ETX values between each node, instead of working with the average ETX along the route. The MEDIA-ETX FO allows the nodes to show greater sensitivity in the changes required by the environment, improving the performance and life time of the network, and network engineers, the option to develop more effective routing solutions for the IoT.

**KEYWORDS:** IoT, LLN, RPL, Objective Function, Routing metric, MRHOF

---

---

## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. TÓPICO PRINCIPAL Y MOTIVACIÓN .....	3
1.2. MAPA DEL DOCUMENTO .....	5
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.3.1. Problemas de Enrutamiento en la Métrica ETX .....	7
1.3.2. Pregunta Problema .....	9
1.4. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN .....	10
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	12
1.5.1. Objetivo General .....	12
1.5.2. Objetivos Específicos.....	12
1.6. MARCO METODOLÓGICO .....	13
1.6.1. Tipo De Investigación .....	13
1.6.2. Diseño de la Investigación .....	13
1.6.3. Definición del Objeto de Estudio.....	14
1.6.4. Los Sistemas de Variables .....	14
1.6.5. Etapas de la Investigación y Metodológica.....	15
1.7. ESTADO DEL ARTE .....	16
1.7.1. Métricas de Enrutamiento .....	17
1.7.2. Hop Count (HC) [19] .....	18
1.7.3. Expected Transmission Count (ETX) [15]: .....	18
1.7.4. Residual Energy (RE) [13]:.....	19
1.7.5. Per Hop ETX [23]: .....	20
1.7.6. Sigma ETX.....	21
1.7.7. Expected Transmission Time (ETT) [13]: .....	21
1.7.8. Weighted Cumulative Ett (WCETT): .....	22
1.7.9. Energy Related Metrics (BAMER):.....	22
1.7.10. Metric of Interference and Channel-Switching (MIC).....	23
1.8. Bases teóricas. ....	24
1.8.1. Análisis de la Estructura de RPL sobre Redes LLN .....	24
1.9. LAS redes DE SENSORES INALÁMBRICOS .....	25

---

---

1.10. EL ESTANDAR 6LowPAN. ....	27
1.10.1. Dispositivos en una red 6lowpan .....	27
1.11. REDES LLN.....	28
1.12. Protocolo RPL .....	29
1.12.1. RPL en una Red 6lowpan Network.....	34
1.12.2. Tipos de Uso de RPL .....	36
1.13. Función Objetivo y rango.....	36
1.13.1. LA FUNCIÓN OBJETIVO HISTÉRESIS (MRHOF) .....	37
1.13.2. Función Objetivo Cero (OF0) [14] : .....	37
1.13.3. Rango .....	38
1.14. Definición de términos básicos. ....	39
CAPÍTULO 2 .....	40
2. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA DE LA F.O PROPUESTA.....	40
2.1. MEDIA-ETX.....	40
2.2. CALCULO DE LA RUTA.....	41
CAPÍTULO 3 .....	44
3. IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN .....	44
3.1. DISEÑO DE LA SIMULACIÓN.....	44
3.1.1. Dispositivo Inalámbrico “MOTE” .....	45
3.1.2. Selección del Simulador.....	47
3.1.3. Tamaño Del Área y Densidad de Nodos.....	47
3.1.4. Topología y Modelo de Despliegue. ....	47
3.2. Métricas De Evaluación .....	48
3.3. MÉTRICAS a EVALUAR.....	48
3.3.1. Tiempo de Vida del Sistema. ....	48
3.3.2. Consumo De La Energía .....	49
3.3.3. Latencia.....	50
3.4. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN .....	50
3.4.1. Simulación De La Red Inalámbrica En COOJA.....	51
3.4.2. Las Mediciones de Rendimiento. ....	51
CAPÍTULO 4 .....	53
4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS .....	53
4.1.1. Latencia de La Red.....	53

---

---

4.1.2. Relación de Entrega de Paquetes. ....	54
4.1.3. Tiempo de Vida.....	54
CAPÍTULO 5 .....	56
5. CONCLUSIONES.....	56
5.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	57
5.2. RESPUESTA A LA PREGUNTA PROBLEMA .....	58
5.3. TRABAJOS FUTUROS.....	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61

---

**LISTA DE TABLAS**

	<b>Pág.</b>
TABLA 1 : COMPARATIVA DE MÉTRICAS DE ENRUTAMIENTO .....	17
TABLA 2 : TERMINOLOGÍAS PARA GRAFOS CON RPL .....	31
TABLA 3 : DEFINICIÓN DE LOS TÉRMINOS BÁSICOS DE LA INVESTIGACIÓN	39
TABLA 4. RESULTADOS POR RUTA DE LA SUMATORIA DE SUS ETX.....	42
TABLA 5 : VALORACIÓN DE RESULTADOS EN LAS SIMULACIONES.....	57

---

---

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	<b>Pág.</b>
ILUSTRACIÓN 1: EJEMPLO DE IGUALDAD ENTRE PROMEDIOS ETX.....	8
ILUSTRACIÓN 2: LÍNEA DEL TIEMPO DE ENRUTAMIENTO EN REDES LLN.....	11
ILUSTRACIÓN 3: SELECCIÓN DE RUTA CON EL NO DE SALTOS [21].....	18
ILUSTRACIÓN 4: SELECCIÓN DE RUTAS CON ETX [21]. ....	19
ILUSTRACIÓN 5: SELECCIÓN DE RUTAS CON RE [21]. ....	20
ILUSTRACIÓN 6: CLASIFICACIÓN PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO [30]. ....	26
ILUSTRACIÓN 7: RED WSN IMPLEMENTADA CON 6LOWPAN [35].....	27
ILUSTRACIÓN 8: APLICACIONES Y MÉTRICAS CON RPL [41]. ....	29
ILUSTRACIÓN 9: FORMACIÓN DE UN GRAFO RPL.....	33
ILUSTRACIÓN 10: SELECCIÓN DE NODO PRINCIPAL EN DODAG [21]. ....	35
ILUSTRACIÓN 11: MODELO DE RED. ....	41
ILUSTRACIÓN 12: DISPOSITIVO INALÁMBRICO MOTE (NODO) [49].....	45
ILUSTRACIÓN 13: DISPOSITIVO TMOTE SKY (NODO) [51]. ....	45
ILUSTRACIÓN 14: SIMULACIÓN DE LA RED INALÁMBRICA EN COOJA.....	51
ILUSTRACIÓN 15: LATENCIA DE RED. ....	53
ILUSTRACIÓN 16: RELACIÓN DE ENTREGA DE PAQUETES. ....	54
ILUSTRACIÓN 17: TIEMPO DE VIDA DE LA RED.....	55

---

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricos (WSN), se destacan por su importancia en los diferentes escenarios en donde se dimensiona su aplicabilidad, tales como: la industria, la salud y la agricultura; a través de la utilización de dispositivos inteligentes (objetos cotidianos que se conectan a internet, a través de sensores), para captar datos en tiempo real sobre aplicaciones, mediciones y monitorización del entorno, lo cual permite el análisis de datos, que estimen tendencias y predicciones cada vez más precisas.

La tendencia actual, en este tipo de redes se orienta a los estándares libres y abiertos; La tecnología clave para la creación de redes IP en los dispositivos inalámbricos es “IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Networks” (6LoWPAN). El cual permite la conectividad entre las WSN y el internet, para que los objetos inteligentes participen en el Internet of Things (IoT). así como se documenta en: “Evolution of Wireless sensor networks towards the Internet of Things: A survey [1] . En este sentido, cobran importancia las redes de baja potencia y pérdida de paquetes LLN, como la tecnología que permite la escalabilidad del IoT y con la funcionalidad suficiente para proporcionar su integración con la arquitectura actual de internet [2] [3], con usuarios que exigen cada vez más aplicaciones, que ofrezcan Calidad del Servicio (QoS) en todo momento.

Empresas reconocidas mundialmente por su especialidad en el manejo de redes y comunicaciones como es el caso de Cisco, sugieren que para el año 2020, habría más de 50 millones de dispositivos inteligentes en todo el mundo, sin embargo estos dispositivos que conforman las redes LLNs, tienen limitantes [4], tanto internas ( de CPU y memoria ), como externas ( su capacidad de comunicación ) , con pocos recursos de energía; incluso en sus interconexiones, se presentan características de bajo ancho de banda, alta tasas de pérdida y enlaces volátiles con persistencia limitada en el tiempo, dándole poca prioridad al mantenimiento de la conectividad en los enlaces y al reenvío de datos [5]. Lo anterior se evidencia en que los protocolos y redes que hemos analizados, a través de la experiencia profesional de los autores. Lo que demuestra que realmente coincide la verdad con la teoría

en función de que las redes LLN, por ser dispositivos con restricciones en energía y recursos físicos, presentan fallas en el enrutamiento de la red, y no ofrecen QoS.

fue creado el protocolo RPL por la IETF, para realizar el enrutamiento en las redes LLN, sin embargo, este protocolo proporciona una pérdida de paquetes mucho mayor que la que pueden manejar los protocolos de enrutamiento tradicionales, y en redes LLN, con gran cantidad de nodos, el proceso de selección de rutas impacta el envío de paquetes, generando cambios dinámicos de topología y fallas de enlace, causando un cambio significativo en la fiabilidad y la estabilidad de la red, según lo describe T.Winter en el RFC 6550 “RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks”, referente al diseño y funcionamiento de RPL y las redes LLN [11], describiéndolas como una clase de red en la que, los enrutadores y sus interconexiones tienen restricciones en la potencia de procesamiento, memoria y energía (de la batería). Por esto, sus interconexiones se caracterizan por altas tasas de pérdida, baja velocidad de datos, e inestabilidad de red.

En este trabajo de investigación, se propuso una alternativa de solución aplicable los problemas asociados con el enrutamiento que presentan las redes LLN, donde los dispositivos embebidos, siempre están restringidos en términos de potencia disponible y estructura de red [9], causando fallas de enrutamiento e inestabilidad. Investigadores como X. Liu, Z. Sheng, C. Yin, F. Ali, and D. Roggen, [6] [7], conscientes de la problemática de enrutamiento en las redes LLN, realizaron estudios y comparaciones referentes a el rendimiento de los protocolos de enrutamiento en este tipo de redes con gran cantidad de nodos. La Función Objetivo propuesta, está basada en una nueva métrica, que ofrece un mejor rendimiento frente a la Calidad de Servicio (QoS), permitiéndoles a los nodos, sensibilidad en los cambios que requiere el entorno de la red, y a los ingenieros de redes, la posibilidad de desarrollar e implementar soluciones de enrutamiento más efectivas para las IoT. Al comparar su implementación con los desempeños de enrutamiento de las Funciones Objetivo estandarizadas OF0, MRHOF, PER HOP-ETX, se obtuvieron mejores resultados en términos de: una menor latencia de red del 44%, entrega de paquetes del 77%, tiempo de vida del 98% y potencia y consumo de energía del 53%.

---

Como resultado, se generó la F.O MEDIA basada en la nueva métrica MEDIA-ETX, que optimizara el desempeño, y la vida útil, en las redes de baja potencia con pérdida de paquetes, alcanzado sus mejores métricas en cuanto a calidad de servicio. En los trabajos futuros se plantea realizar investigaciones acerca de la relación entre este tipo de métricas de calidad de servicio y la Función Objetivo MEDIA, propuesta basada en la nueva métrica MEDIA-ETX. Y descubrir de qué manera es posible optimizar la eficiencia de las otras métricas de enrutamiento, en comparación con la F.O propuesta. Y así mejorar la contribución de QoS en cada una de ellas, y su relación con la vida útil de la red.

Otro de los desafíos de RPL, en LLN es incuestionablemente el de la seguridad informática, debido a que muchas de las vulnerabilidades de las redes de sensores sin duda harán la transición a IoT, particularmente con ataques RPL como, Sinkhole, HELLO Flood, Wormhole y Clone ID, que se producen utilizando nodos intrusos. Por esto se debe tener cuidado, ya que muchos dispositivos IoT (nodos) pueden tener sistemas operativos vulnerables a otros tipos de ataques, como los Android.

A partir de lo anterior, se plantea la siguiente pregunta que sirve como guía en esta investigación: ¿De qué manera se puede optimizar la eficiencia en términos de QoS del protocolo de enrutamiento RPL, en redes de baja potencia con pérdida de paquetes?

### **1.1. TÓPICO PRINCIPAL Y MOTIVACIÓN**

La problemática de enrutamiento que enfrentan actualmente las LLN, propicia la realización de una detallada investigación, donde se analizara la estructura del protocolo de enrutamiento RPL sobre redes LLN, sus métricas de enrutamiento y Funciones Objetivo (F.O), teniendo presente artículos científicos, proyectos de investigación, simulaciones y trabajos relacionados.

Una gran cantidad de investigaciones se han llevado a cabo, con respecto al desarrollo y la implementación de nuevas métricas de enrutamiento para RPL [18], [24], [26], [51], han hecho evaluaciones comparativas de métodos para Ofrecer QoS, análisis estadísticos, y nuevas F.O; con el fin de mejorar la situación actual de QoS en este tipo de redes. Esto

---

demuestra que realmente coincide la verdad con la teoría, en función de que las redes LLN, por ser dispositivos con restricciones en sus recursos e interconexiones, presentan fallas en el enrutamiento de la red, y no ofrecen Calidad de Servicio en todo momento.

El objetivo principal de esta investigación, consistió en proponer una Función Objetivo para el protocolo RPL, basado en una nueva métrica; con el propósito de optimizar el desempeño y el enrutamiento con QoS en las redes LLN; la F.O propuesta, presenta características de flexibilidad, rendimiento, fácilmente modificable y muy útil, permitiendo a los ingenieros de redes y fabricantes de dispositivos, la posibilidad de desarrollar e implementar soluciones de enrutamiento más efectivas para las IoT, en este tipo de redes que enrutan poca o gran cantidad de nodos, y que exigen demanda de QoS, con poco consumo de energía y recursos limitados; y en diferentes áreas como; la domótica, las redes eléctricas, la industria en general y en el campo de la salud.

Las contribuciones de esta investigación son las siguientes:

- La F.O MEDIA fue diseñada e implementada para permitir a RPL probar la calidad del enlace a través de tráfico bidireccional, realizando solo algunas modificaciones, sin alterar de gran manera su diseño, verificando y mejorando su rendimiento a través de pruebas de simulación
  - Durante el estudio del problema de “la estimación del enlace en redes LLN”, surgieron algunos problemas de implementación del protocolo RPL, en el sistema operativo Contiki. Estos problemas de implementación afectaron el rendimiento en las pruebas de la investigación, lo que nos obligó a realizar diferentes estudios y experimentos para dar solución a estos inconvenientes. Finalmente, la F.O, basada en la nueva métrica MEDIA- ETX, se implementó en el simulador Open Source, “Cooja”, para el protocolo de enrutamiento RPL, estandarizado para los dispositivos “motas” que se emplean en redes con baja potencia y pérdida.
-

La calidad de servicio en LLN, es un campo poco estudiado en la actualidad, las diferentes investigaciones se centran en campos como la calidad de servicio ofrecida a los usuarios, la seguridad en este tipo de redes, la autonomía o duración de los dispositivos que proveen energía a los terminales y la calidad de servicio en los enlaces, entre otros. [8] [9]

## **1.2. MAPA DEL DOCUMENTO**

Este documento resultado de la investigación se estructura en seis capítulos, que de manera breve son descritos a continuación:

**El Capítulo uno:** Contiene la introducción, que describe el tópico principal del objeto de estudio, la problemática, el alcance, el objetivo general, los objetivos específicos y la metodología de la investigación.

**El Capítulo dos:** Contiene un análisis de la estructura del protocolo RPL, la tecnología 6LowPAN, las Redes LLN, las F.O Estandarizadas, y una revisión detallada de la literatura acerca de las métricas de enrutamiento.

**El Capítulo tres:** Este capítulo, contiene la descripción final de la Función Objetivo propuesta MEDIA, donde se explica su métrica MEDIA-ETX y la manera como se realiza el cálculo de una ruta específica.

**El Capítulo Cuatro:** En este capítulo, se presentan las métricas que se evaluaron, los distintos escenarios de experimentación realizados y los resultados de los mismos.

**El Capítulo Quinto:** En este capítulo, se realizó una validación de los resultados obtenidos con diferentes métricas, propuestas en distintas investigaciones.

**El Capítulo sexto:** En este capítulo, se describe como se concretaron en la práctica y se cumplieron los objetivos específicos de esta investigación, para llegar al objetivo general. Validando el aporte que esta implementación hace a la comunidad científica y a futuras

---

investigaciones. Además, se enuncian los posibles trabajos futuros que puedan generarse de este ámbito de investigación.

El documento finaliza con un listado de cada una las referencias bibliográficas consultadas.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los dispositivos embebidos, entendidos como aquellos dispositivos integrados en objetos, que no tienen interfaz de usuario (pantalla), y mucho menos interacción con los usuarios, ya que funcionan de manera autónoma y automática, diseñados para realizar una o pocas funciones, y que se usan en aplicaciones de redes LLN, siempre están restringidos en términos de potencia disponible y estructura de red [10]; esto debido a sus características limitadas en hardware (con poca CPU y memoria). Por lo tanto, el enrutamiento de datos con eficiencia energética se vuelve crítico para cualquier solución sostenible a largo plazo. Para atender esta situación la IETF, con el grupo de trabajo ROLL, diseñó el protocolo RPL, que introduce varias métricas de enrutamiento, durante la fase de construcción de la topología de red, en redes de bajo poder y pérdida (LLN) como lo evidencia T. Winter, en "RPL: IPv6 Routing Protocol for low-power and lossy networks," donde se describe y especifica el funcionamiento del protocolo [11]. Estas métricas se implementan con una función objetivo (F.O), con el propósito de mejorar el rendimiento de las redes LLN, durante la etapa de enrutamiento de los nodos, y así satisfacer los requisitos de la aplicación de destino. O. Gnawali [13], describe en "The minimum rank with hysteresis objective function," el funcionamiento e implementación de la F.O estandarizada MHROF.

El principal objetivo de cualquier protocolo de enrutamiento, es soportar las comunicaciones efectivas [12], Por esta razón y con el fin de hacer un aporte significativo en el enrutamiento de las redes LLN, la IETF estandarizó dos F.O, MHROF [13] y OF0 [14]; la primera (por sus siglas en inglés Minimum Rank with Hysteresis Objective Function), que utiliza la métrica de enrutamiento (ETX), la cual se basa en la transmisión esperada de paquetes a su destino [15]; y la segunda (por sus siglas en inglés Objective Function Zero), que utiliza la métrica de enrutamiento (Hop Count), para el recuento de saltos de los nodos en la red.

---

El protocolo RPL, permite la comunicación bidireccional IPv6 de extremo a extremo en la red, y utiliza tráfico de transmisión Multisalto, para la selección de rutas en los dispositivos LLN, sin embargo, proporciona una pérdida de paquetes, mucho mayor que la que pueden manejar los protocolos de enrutamiento tradicionales y en redes con gran cantidad de nodos, el proceso de selección de rutas impacta el envío de paquetes, generando una problemática de enrutamiento, que según Liu [6], es debido a los cambios dinámicos de topología y fallas de enlace que se presentan en la red, causando un incluso un cambio significativo en la fiabilidad y la estabilidad de esta, el RFC 6550 “RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks”, se refiere al diseño y funcionamiento de RPL y las redes LLN [11] , describiéndolas como una clase de red en la que ambos, los enrutadores y sus enlaces tienen restricciones en la potencia de procesamiento, memoria y energía (de la batería). Y Sus interconexiones se caracterizan por altas tasas de pérdida, baja velocidad de datos e inestabilidad de red.

Estas fallas que se presentan en el enrutamiento de las LLN [7], deben tenerse en cuenta al momento de implementar la función Objetivo (FO) y las métricas de enrutamiento, ya que el diseño de esta, se debe ajustar a los cambios que se puedan dar en la red, y a los distintos escenarios que se presenten. Esto debido a que en el diseño del protocolo RPL, creado por el grupo de trabajo de la IETF [16], no fue contemplada la calidad de servicio como característica principal, afectando así, la selección de rutas en redes este tipo de redes [6].

### **1.3.1. Problemas de Enrutamiento en la Métrica ETX**

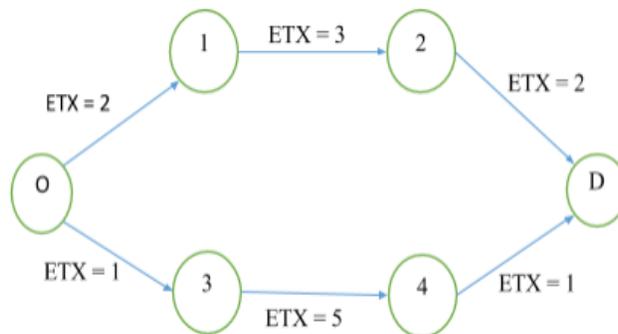
La métrica usada por defecto en el protocolo RPL, es ETX (por sus siglas en inglés Expected Transmisión Count) y está propuesta para ayudar al nodo de origen, a elegir el mejor enlace inalámbrico para la transmisión de datos. Sin embargo, debido a que el costo total de elegir una ruta es la suma de los valores ETX entre cada nodo a lo largo de dicha ruta, los costos de cada salto de una ruta tienen un fuerte impacto en el desempeño de la transmisión, incluso más importantes que la calidad de la transmisión. Debido a que el protocolo busca la ruta de menor número de nodos, y el valor ETX acumulado tiende a ser más bajo. Por lo que el valor de ETX, en una ruta con muchos nodos tiende a ser más alto. El problema de investigación emerge, a partir de las irregularidades presentadas al momento de aumentar el número de nodos de una red, dado que una ruta puede tener más nodos y el valor ETX de todo el camino,

---

será mayor que el de un camino con un solo salto. Un salto de este tipo se convertirá en una causa de restricción, generando un cuello de botella y limitando toda la red. [24].

Para dar solución a esta problemática se planteó la F.O MEDIA, basada en la métrica MEDIA-ETX, la cual combina la métrica Minimum Hop Count Metric y ETX, calculando la mejor ruta, a través de la desviación estándar de los valores ETX entre cada nodo.

En la siguiente ilustración, se presenta una situación de igualdad entre los promedios de ETX, con 2 posibles rutas accesibles:



**Ilustración 1:** Ejemplo de igualdad entre promedios ETX.

Desde el nodo de origen O al nodo de destino D, existen 2 posibles rutas accesibles:

- Ruta 1 = el cálculo de los valores de ETX para la Ruta 1 (O-1-2-D) es el siguiente:  
 $ETX_{O-D} = ETX_1 + ETX_2 + ETX_3 = 2 + 3 + 2 = 7$
- Ruta 2 = el cálculo de los valores de ETX para la ruta 2 (O-3-4-D) es el siguiente:  
 $ETX_{O-D} = ETX_1 + ETX_2 + ETX_3 = 1 + 5 + 1 = 7$

Si se aplica la fórmula acumulativa de ETX, se obtendría:

$$\sum (R1 - ETX) = 2 + 3 + 2 = 7$$

$$\sum (R2 - ETX) = 1 + 5 + 1 = 7$$

En este caso, la sumatoria de ambas rutas está en igualdad de resultados, así la función objetivo recurre al número de saltos que también es el mismo, sin embargo la ruta 2 posee un salto muy largo ( el valor 5 ) que puede convertirse en cuello de botella.

Siendo las sumatorias de ETX y los números de saltos iguales, en la estrategia del promedio, no se distingue el salto largo, al ser ambos promedios iguales, tal como se muestra a continuación:

$$Prom (r1) = \frac{7}{3} = 2.3$$

$$Prom (r2) = \frac{7}{3} = 2.3$$

En redes densas con un alto número de nodos desplegados, el cálculo del promedio no satisface todas las situaciones posibles para evitar los saltos largos. Como en el ejemplo anterior, donde el promedio del valor de las métricas ETX es cercano, cuando esto ocurre la función objetivo MRHOF, por sus siglas en inglés "The minimum rank with Hysteresis objective function," [13], aplica el camino más corto o cualquiera de los caminos con el mismo costo, para elegir la ruta apropiada, lo que puede volverse un ciclo repetitivo, devolviéndonos a caminos con saltos más largos o un cuello de botella que afecte el rendimiento de la red.

### **1.3.2. Pregunta Problema**

Las limitaciones de calidad de servicio, que se presentan en el enrutamiento del protocolo RPL, son características necesarias de estudio para contribuir a la temática, y se genera el siguiente interrogante:

¿De qué manera se puede optimizar la eficiencia en términos de QoS del protocolo de enrutamiento RPL, para redes de baja potencia con pérdida de paquetes?

---

#### **1.4. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

Las LLN con calidad de servicio (QoS), son un campo donde todavía hay muchos temas por estudiar y en constante evolución. Hoy en día los estudios se centran en campos como la QoS ofrecida a los usuarios, la seguridad en este tipo de redes, la autonomía o duración de los dispositivos que proveen energía a los terminales y QoS en los enlaces, entre otros. Aunque en la sociedad actual, hay una gran necesidad de acceder rápidamente a la diversa información ofrecida por Internet, se requiere del uso de redes LLN, que garanticen QoS en el estado de enlace. [8] [14].

Esta investigación pretende optimizar el desempeño de las LLN, para aumentar la calidad de servicio del enrutamiento de paquetes, en este tipo de redes. Para esto se analizará la estructura del protocolo de enrutamiento RPL sobre redes LLN, con el propósito diagnosticar su funcionamiento; posteriormente se describe y define una Función Objetivo F.O basada en una nueva métrica para mejorar la QoS del enrutamiento en el protocolo RPL. Y finalmente se valida el rendimiento de la F.O propuesta, mediante la simulación con las F.O, estandarizadas OF0 y MRHOF. Comparando el rendimiento de esta, con las F.O estandarizadas.

Con base a la problemática de enrutamiento que enfrentan las LLN, se analizara la estructura del protocolo de enrutamiento RPL sobre redes LLN, teniendo presente artículos científicos, proyectos de investigación, simulaciones y trabajos relacionados.

Hasta la fecha, una gran cantidad de estudios se han llevado a cabo, en relación al desarrollo y la implementación de métricas de enrutamiento para RPL, entre ellas evaluaciones comparativas de métodos para Ofrecer QoS, y nuevas F.O propuestas por distintos investigadores; con el propósito de analizar las métricas existentes, y mejorar el enrutamiento con QoS en este tipo de redes. Lo anterior se evidencia en los protocolos y redes que se han analizado, a través de la experiencia profesional de los autores, lo que demuestra que realmente coincide la verdad con la teoría en función de que las redes LLN, por ser dispositivos con restricciones recursos d red, presentan fallas en su enrutamiento.

---

La siguiente ilustración, relaciona algunas de las investigaciones, realizadas frente a este tipo de redes, las diferentes F.O propuestas, los análisis comparativos, y los estudios de rendimiento, con el propósito de mejorar el enrutamiento con QoS en las LLNs:



**Ilustración 2:** línea del tiempo de enrutamiento en redes LLN.

El objetivo principal de investigación, es proponer una Función Objetivo, basada en una métrica de enrutamiento para el protocolo RPL en términos enlace, para optimizar el desempeño de las LLN, alcanzado sus mejores métricas de enrutamiento con calidad de servicio.

Luego de implementar y simular la nueva métrica, este proyecto ofrecerá una F.O, que permita garantizar su funcionamiento al comparar su implementación con los desempeños de las F.O, estandarizadas OF0 y MRHOF.

Como resultado, la F.O propuesta permitirá que los nodos presenten mayor sensibilidad en los cambios que requiere el entorno, mejorando el rendimiento y el tiempo de vida de la red, y a los ingenieros de redes, la opción de desarrollar soluciones de enrutamiento más efectivas para las IoT. Con la posibilidad de realizar simulaciones de nuevas redes, a través de la F.O, Implementada y disponible en el simulador de código abierto Cooja.

Esta investigación realizara un importante aporte al encaminamiento de redes LLN, beneficiando a todos los usuarios de Redes WSN e Internet de las Cosas (IoT); que requieren

captar y analizar datos en tiempo real, permitiéndoles a los nodos, sensibilidad en los cambios que requiere el entorno de la red, y a las distintas aplicaciones enviar información a mayor velocidades, con alta definición y Calidad de Servicio (QoS).

## **1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. Objetivo General**

El objetivo principal de esta investigación, fue proponer una Función Objetivo para el protocolo RPL, basado en una nueva métrica; con el propósito de optimizar el desempeño y el enrutamiento con QoS en las redes LLN

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Diagnosticar el funcionamiento de las redes LLN, y las F.O estandarizadas OF0 y MRHOF.
  - Definir una métrica para mejorar la calidad de servicio del enrutamiento en el protocolo RPL
  - Comparar el rendimiento de la Función Objetivo propuesta, mediante la simulación con las F.O estandarizadas OF0 y MRHOF.
-

## **1.6. MARCO METODOLÓGICO**

### **1.6.1. Tipo De Investigación**

Este proyecto se basa en una investigación de tipo proyectiva- descriptiva, que según la autora Jacqueline Hurtado [17], en su documento Metodología de la Investigación Holística, 2016, se fundamenta en la realización de una propuesta o modelo, para dar solución a un problema o necesidad; a partir de un diagnóstico preciso de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y las tendencias futuras.

En nuestro caso, se analizará el entorno de las redes LLN, para proponer una Función Objetivo basada en una nueva métrica, en medio de la problemática de enrutamiento que enfrenta el Protocolo RPL, a través de un análisis, simulaciones, y muestra de resultados al aplicar la función Objetivo propuesta, para dar la solución del problema a través de la demostración de resultados con el modelo propuesto.

Posteriormente, se analizan los resultados generados mediante simulaciones y muestreos de redes, se plantea y se propone la función objetivo basada en la nueva métrica, cumpliendo así con la finalidad del proyecto.

### **1.6.2. Diseño de la Investigación**

Diferentes investigaciones se han realizado en el campo de las redes inalámbricas, a través de la metodología cuantitativa como Hurtado, J (2016), donde se realiza la recolección, prueba de teorías y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente, se confía en la medición numérica, el conteo y el análisis estadísticos para establecer patrones de comportamiento en una población.

Por esta razón, el proyecto se enmarca dentro de una investigación cualitativa que se apoya en algunas técnicas de tipo cuantitativo, Donde se recopila información y datos de distintas métricas y F.O en las redes LLN; a través del análisis estadístico se establecen patrones de comportamiento y prueba de teorías, con un enfoque probatorio, mediante el diseño y las simulaciones de red.

---

La presentación de los resultados cuantitativos se sustenta en tablas estadísticas, graficas comparativas y un análisis de porcentajes de eficiencia del modelo propuesto.

### **1.6.3. Definición del Objeto de Estudio**

El contexto de investigación se encuentra se circunscribe en las redes de sensores inalámbricas con baja potencia y perdida de paquetes, relacionado a sus problemas de enrutamiento con Calidad de Servicio (QoS).

Con base a esto, se pretende desarrollar una metodología de acuerdo al propósito expuesto en la investigación, que mejore el enrutamiento con QoS en las aplicaciones del internet de las cosas (IoT) y la experiencia de los usuarios finales.

### **1.6.4. Los Sistemas de Variables**

#### **A. Calidad de servicio:**

La calidad de servicio consiste en la capacidad de la red para reservar algunos de los recursos disponibles para un tráfico concreto con la intención de proporcionar un determinado servicio [18]

#### **B. Redes de baja potencia y pérdida de paquetes:**

Las redes de baja potencia y perdida de paquetes LLN (por sus siglas en inglés Routing Over Low Power And Lossy Networks (Roll)) [36] son una clase de red, formadas por muchos dispositivos integrados con energía, memoria y recursos de procesamiento limitados. Sus interconexiones se caracterizan por altas tasas de pérdida, baja velocidad de datos e inestabilidad.

#### **C. Métricas de enrutamiento:**

Una métrica es el valor cuantitativo que se le asigna a un protocolo para evaluar el costo de esta y poder elegir “la mejor ruta”. Por esta razón las métricas de cada protocolo realizan un papel importante en la distribución de paquetes en la red y cada protocolo utiliza diferentes métricas para realizar el enrutamiento en una red.

---

### 1.6.5. Etapas de la Investigación y Metodológica

Las siguientes fases muestran cómo se logra el objetivo general del proyecto:

- **Revisión Teórica:**

Durante esta fase la investigación se realizó con una detallada revisión de la información de fuentes literarias, investigaciones anteriores, revistas indexadas y proyectos relacionados con estudios descriptivos de las redes de sensores (WSN) y redes LLN, que permitieron conocer el funcionamiento, la problemática de enrutamiento y las características del protocolo RPL y las redes LLN, dando como resultado el estado del arte de esta investigación.

*Actividades:* Consulta de fuentes literarias, revistas indexadas investigaciones bibliográficas y digitales.

- **Delimitación del problema de estudio:**

Con la información de la literatura revisada, se analizaron las necesidades de cambio y se realizó una descripción de la situación problemática hallada en el enrutamiento del protocolo RPL, al momento de la densidad de los nodos, que afectan la red generando cambios dinámicos de topología y fallas de enlace.

En base a esto la importancia de la adecuación de un modelo para el protocolo de enrutamiento que aporte un valioso aporte a la calidad de servicio en redes LLN.

*Actividades:* Revisión de investigaciones anteriores

- **Elaboración de la Función Objetivo:**

Con base a la problemática de estudio, y con criterios organizados, se analizó un modelo existente, adaptándolo a las necesidades del contexto, para implementar una F.O basada en una nueva métrica de enrutamiento, para el protocolo RPL.

Finalmente, por medio de la configuración de distintos escenarios de red, y simuladores adecuados para el análisis de la información, con diferentes parámetros, se realizaron los diferentes eventos que enfrentan las redes LLN y los posibles procesos causales, con el fin de comparar las F.O estandarizadas con la F. O propuesta.

---

*Actividad:* Elaboración y Diseño final de la función objetivo propuesta basada en la nueva métrica

- **Análisis de resultados**

Se agrupan los resultados y se analizan mediante tablas comparativas y estadísticas, que permiten valorar el modelo propuesto, comparado con las F.O estandarizadas, e inferir conclusiones reales a la investigación.

*Actividades:* graficas con valores, tablas estadísticas e informes finales

- **Redacción de conclusiones y elaboración del informe:**

Finalmente se Extraen los resultados obtenidos de la investigación, para ordenarlos de una manera eficiente, y se propone una F.O, basada en una nueva métrica, para aumentar la QoS del enrutamiento en redes LLN, como aporte y referencia útil en el campo de la ingeniería y el desarrollo de soluciones de enrutamiento efectivo para el internet de las cosas (IoT).

*Actividad:* Elaboración y compaginación del informe final.

## **1.7. ESTADO DEL ARTE**

En el capítulo actual se hará un recorrido minucioso, que permita tener un análisis detallado de la estructura del protocolo RPL, cumpliendo así, con el primer objetivo específico, para de esta forma conocer cómo funciona el enrutamiento para redes de baja potencia y pérdidas en redes LLN, que precisamente son conformadas por dispositivos que se interconectan para operar con bajas potencias y pérdidas. Adicionalmente serán objeto de estudio las funciones objetivas estandarizadas OF0 y MRHOF.

A continuación, se relacionan algunas de las principales métricas que son utilizadas para el enrutamiento y restricciones en el protocolo RPL, las cuales son referenciadas y expuestas por sus autores en diferentes investigaciones:

---

DOCUMENTO	AUTOR (ES)	FECHA/ ANO
Performance study of ETX based wireless routing metrics," pp. 1-7: IEEE En este documento los autores realizan un estudio de métricas de enrutamiento comparando el rendimiento de ETX, donde muestra como resultado una tabla comparativa , con distintas métricas relacionadas a ETX, midiendo el rendimiento, distintas plataformas inalámbricas y los requerimientos de diseño	C A. Javaid, I. A. Khan, and K. Djouani	2011
RFC 6550: RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks,» marzo 2012.	Grupo ROLL-IETF Cisco, Sigma Designs, Arch Rock Corp, Ember Corp, Stanford University, Dust Networks, Struik Security Consultancy	2012
IETF, «RFC 6551: Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks,»	IETF	2012
RFC 6552: Objective Function zero (OF0)	P. Thubert	2012
RFC 6719: The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function (MHROF)	O. Gnawali ( IETF)	2012
Evaluating routing metric composition approaches for QoS differentiation in low power and lossy networks," Wireless networks, vol. 19, no. 6, pp. 1269-1284,	P. Karkazis, P. Trakadas, H. C. Leligou, L. Sarakis, I. Papaeftathiou, and T. Zahariadis	2013
, "An optimization of the object function for routing protocol of low-power and lossy networks," pp. 515-519: IEEE	W. Xiao, J. Liu, N. Jiang, and H. Shi	2014
On Design and Deployment of Fuzzy-Based Metric for Routing in Low-Power and Lossy Networks  Propone una función objetivo para ofrecer QoS , con algoritmos Fuzzy comparándola con ETX , el cual es capaz de combinar varias métricas, para equilibrar la carga de tráfico multidifusión, y así aliviar la carga de red y prolongar la vida útil de la red	Patrick Olivier Kamgueu	2015
Performance Analysis of Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL) in Large Scale Networks  Revisión en profundidad de investigaciones recientes, Específicamente, el desarrollo de simulación a gran escala y evaluación del bajo desempeño de varias funciones objetivas Y las métricas de enrutamiento. Para aportar las soluciones de enrutamiento efectivas y casos de uso, para aplicaciones de IoT a gran escala.	Xiyuan Liu, Zhengguo Sheng, Changchuan Yin, Senior Member, IEEE, Falah Ali, Senior Member, IEEE, and Daniel Roggen	2017

**Tabla 1 :** Comparativa de métricas de enrutamiento

### 1.7.1. Métricas de Enrutamiento

Una métrica es el valor cuantitativo que se le asigna a un protocolo para evaluar el costo de esta y poder elegir “la mejor ruta”. Por esta razón las métricas de cada protocolo realizan un papel importante en la distribución de paquetes en la red y cada protocolo utiliza diferentes métricas.

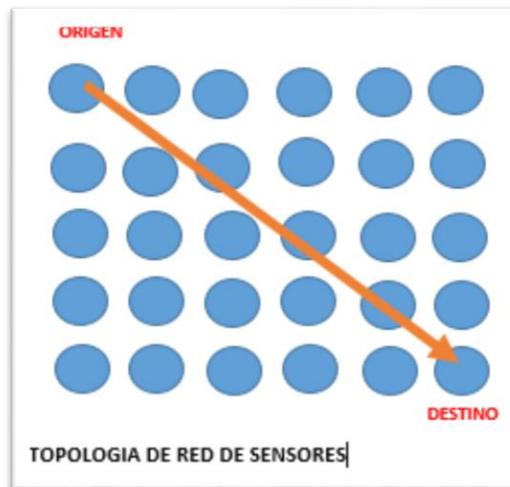
RPL, es un protocolo de vector de distancia que define una Función Objetivo (F.O) , la cual se compone por una combinación de métricas y restricciones que permiten elegir el mejor camino de una ruta, un ejemplo, es el nivel de energía o potencia de un nodo, el número de saltos y ETX entre otras, a continuación relacionamos las siguientes métricas:

### 1.7.2. Hop Count (HC) [19]

Con esta métrica, se selecciona la ruta con menos número de saltos. La métrica de HC se calcula como en la siguiente ecuación [20].

$$\text{HopCount}_{i,j}$$

Donde se calcula el número de saltos si el nodo  $i$  selecciona el nodo  $j$  como su nodo padre hacia la raíz. En la ilustración 3, se muestra la instantánea de una ruta seleccionada, de acuerdo a la métrica HC.



**Ilustración 3:** Selección de ruta con el No de saltos [21].

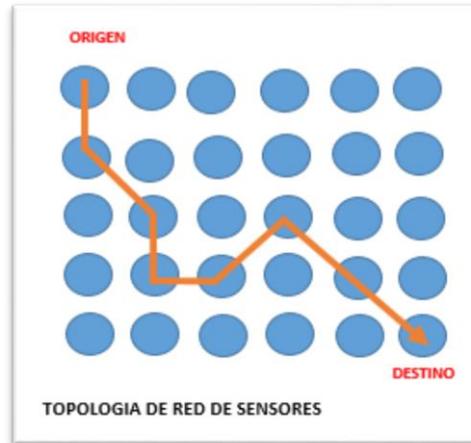
### 1.7.3. Expected Transmission Count (ETX) [15]:

Esta métrica se utiliza para indicar la estabilidad de un camino. ETX se calcula como en la siguiente expresión.

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

donde,  $s$  es el número de paquetes entregados con éxito, mientras que  $f$  es el número de paquetes enviados a cabo sin éxito [20]. Se puede calcular el valor ETX si el nodo  $i$  selecciona el nodo  $j$  como su nodo padre hacia la raíz. en la ilustración 4, se muestra la instantánea de una ruta seleccionada de acuerdo a la métrica ETX [22].





**Ilustración 5:** Selección de rutas con RE [21].

#### 1.7.5. Per Hop ETX [23]:

La métrica ETX fue propuesta originalmente para ayudar al nodo de destino a elegir el mejor enlace inalámbrico para transmisión de datos, sin embargo, debido a que el parámetro es la suma de los valores ETX entre cada nodo a lo largo de una ruta de enrutamiento, los saltos de un camino en lugar de la calidad de transmisión tendrán un mayor impacto en el resultado.

PER-HOP ETX. Calcula la mejor ruta de encaminamiento con el método propuesto, la suma de los valores de ETX entre cada nodo y recuento de los nodos se utiliza para obtener el valor medio ETX, para evitar con éxito el problema de salto de longitud.

Sin embargo, en redes densas con alto número de nodos, el cálculo del promedio no satisface todas las situaciones posibles, como en las que el promedio sea el mismo, para evitar pérdidas por rutas con agotamiento de nodos y en consecuencia los cuellos de botella. [24]

$$PHETX = \sum_{i=1}^n \frac{ETX_i}{n}$$

### 1.7.6. Sigma ETX

La métrica Sigma-ETX fue propuesta en [18], y se describe como una combinación de la métrica HC y ETX, donde la mejor ruta para el enrutamiento se calcula con la desviación estándar de los valores de ETX entre cada nodo.

$$\sigma = f(ETX_i, n) = \begin{cases} 0, & n = 1; \\ \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) * \sum_{i=1}^n \left(ETX_i - \frac{\sum_{i=1}^n ETX_i}{n}\right)^2}, & n > 1; \end{cases}$$

Sigma intenta resolver el problema de la métrica ETX que surge al elegir el mejor enlace inalámbrico para la transmisión de datos. donde la suma de los valores de ETX entre cada nodo a lo largo de una ruta se utiliza para elegir el mejor camino, el número de saltos de una ruta es más importante que la calidad de transmisión en el momento de tomar la decisión. De esta manera, la ruta elegida con una suma de ETX más baja tiende a ser la que tiene el menor número de saltos, pero esto puede causar cuellos de botella en la red, siendo más evidente cuando la red se torna más densa.

### 1.7.7. Expected Transmission Time (ETT) [13]:

Esta métrica puede calcularse mediante el ajuste de la métrica ETX de acuerdo con el tamaño del paquete y la capacidad de transmisión del enlace. Por lo tanto:

$$ETT = ETX \times S / B$$

Donde S es el tamaño de paquete y B es la capacidad del enlace. Para estimar B, los nodos utilizan la técnica de paquetes de par. En esta técnica, dos sondas de regreso a la espalda, una pequeña seguido de una grande, se envían a cada vecino. Cada vecino, luego, mide el tiempo entre llegadas entre los dos paquetes e informes de vuelta al remitente de las sondas. Tras la recepción de un número predefinido de muestras de retardo, el emisor calcula la capacidad del enlace dividiendo el tamaño de la sonda mayor por la muestra de retardo más pequeño obtenido.

### 1.7.8. Weighted Cumulative Ett (WCETT):

La métrica WCETT, se centra en nodos fijos de redes locales, donde el objetivo es seleccionar camino de alto rendimiento para evitar información entre el origen y el destino [25].

La métrica asigna pesos a los vínculos individuales, los cuales se llaman Expected Transmission Time (ETT), esta es una función de la tasa de pérdida y el ancho de banda del enlace, la métrica de interés es Weighted Cumulative ETT (WCETT), este es un valor que aumenta dependiendo del número de enlaces que tenga la red y ETT es una estimación del retardo de extremo a extremo, que experimenta un paquete que viaja por un camino entre dos nodos X Y en un enlace  $i$ .

Para calcular WCETT existen varias expresiones, pero la que mejor describe el método se resume a continuación:

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

Donde  $\beta$  es un parámetro autoajutable y debe estar entre  $0 \leq \beta \leq 1$ , esta ecuación es un equilibrio entre el bien global y el egoísmo, lo que representa un nivel de cooperación entre los nodos de la red. El primer término es la suma de tiempo de transmisión a lo largo de todos los saltos en la red, esto refleja el consumo total de recursos a lo largo de este camino[25]; el segundo término refleja el conjunto de saltos que tendrá el mayor impacto en el rendimiento de este camino. Este promedio ponderado puede ser visto como un intento de equilibrar los dos términos. De todos los caminos se selecciona el mejor WCETT y por esta ruta se envía la información.

### 1.7.9. Energy Related Metrics (BAMER):

Es una estructura de peso ruta propuesta para capturar el consumo de energía para comunicaciones fiables más enlaces inalámbricos con pérdida. En BAMER, el peso de un camino  $p$  entre los nodos  $s$  y  $v$  se define de forma recursiva como:

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

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

La estructura Bamer peso es el camino correcto e isotónica monótona pero no es de izquierda isotónica. Por ejemplo, si suponemos que  $E(a) = 0,5$ ,  $N(a) = 3$ ,  $E(b) = 1$ ,  $N(b) = 2$ ,  $E(c) = 1$ ,  $N(c) = 2$ . Es fácil verificar que  $w(a) < w(b)$  pero  $w(c \oplus b) < w(c \oplus a)$ . Por lo tanto, no se deja BAMER-isotónica.

Bamer es un ajuste para los protocolos de enrutamiento de origen combinados con el descubrimiento de ruta basada en las inundaciones (por ejemplo, DSR) o de Dijkstra algoritmo. Si se utiliza Bamer con protocolos de enrutamiento basado en el algoritmo de Bellman-Ford (por ejemplo, DSDV), el protocolo de enrutamiento no es óptimo, pero el protocolo de enrutamiento es todavía coherente y libre de bucles. Por lo tanto, proyector es aún utilizable, aunque su el rendimiento puede degradarse. [12, 26].

#### 1.7.10. Metric of Interference and Channel-Switching (MIC)

WCETT, selecciona caminos más cortos y de alto rendimiento, lo que puede conducir a esta métrica a seleccionar rutas más congestionadas.

En cambio la métrica MIC por sus siglas en inglés Metric of Interference and Channel-Switching, según [26] [27], proporciona características como: (1) que cada nodo calcula la interferencia entre el flujo contando el número de nodos que interfieren en el barrio. (2) los nodos virtuales MIC garantizan rutas coste mínimo de cálculo. (3) MIC calcula por sí mismo la métrica ETT. MIC para hallar un camino  $p$ , emplea la fórmula:

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

Donde  $WCETT$   $N$  es el número total de nodos de la red y  $\min(ETT)$  es el más pequeño de la  $ETT$  en la red. Los dos componentes del MIC, IRU (interference Aware Resource Usage) es  $IRU_l = ETT_l * N_l$  y CSC (Channel Switching Cost) se define como:

$$CSC_i = w_1; \text{if } CH(prev(i)) \neq CH(i) \text{ y } CSC_i = w_2; \text{if } CH(prev(i)) = CH(i).$$

Donde  $0 < w_1 < w_2$ , y  $n$  es el conjunto de vecinos que interfieren con las transmisiones en el enlace  $i$ .  $CH(i)$  Representa el canal asignado para la transmisión de los nodos  $i$  y  $prev(i)$  representa el salto anterior del nodo  $i$  largo de la trayectoria  $p$ . MIC toma la interferencia entre el flujo en cuenta. Su desventaja incluye: (1) el componente, CSC capta interferencia entre el flujo sólo en dos enlaces consecutivos. (2) MIC considera la interferencia de un enlace causado por cada nodo de interferir en el barrio, cuenta la cantidad de interferencia en un enlace sólo por la posición de los nodos interferentes sin importar si están involucrados en cualquier transmisión simultánea con ese enlace. MIC, por lo tanto, utiliza la medición de la potencia de la señal para capturar entre el flujo y la interferencia de flujo.

## 1.8. BASES TEÓRICAS.

### 1.8.1. Análisis de la Estructura de RPL sobre Redes LLN

Las entidades y dispositivos involucrados en una solución de IoT, habilitada para enrutamiento no pueden mantener la información de estado de la red, debido a restricciones de memoria y almacenamiento. Tampoco pueden mantener optimizaciones y gastos generales en la transmisión de información de control, debido a la energía y otras restricciones relacionadas con el enrutamiento.

Las soluciones de IoT también tienden a crecer considerablemente en gran escala[28]. Por lo tanto, los protocolos encargados del enrutamiento deben proporcionar la escalabilidad a las tablas de enrutamiento y dar respuesta a la pérdida de paquetes. Los protocolos de enrutamiento tradicionales como Open Shortest Path First (OSPF), Optimized Link State

Routing (OLSR) y Ad-Hoc On Demand Vector (AODV) no pudieron cumplir los requisitos de rendimiento para una solución de IoT con tales características.

En este capítulo se hace una revisión general acerca de las redes de sensores (WSN), la tecnología 6lowPAN, y finalmente se realizara una descripción más detallada sobre las redes LLN y el protocolo de enrutamiento RPL, sus problemas y limitaciones vigentes

### **1.9. LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS**

El objetivo principal de Los protocolos de enrutamiento en las redes de sensores WSN (Wireless Sensor Networks) [29], es adaptarse lo más rápido a los cambios generados por la red de forma ágil y eficiente, siendo lo más transparente posible. A diferencia de las redes móviles ad-hoc, Las Redes WSN no necesitan gran requerimiento de movilidad, así como tampoco, una fuente de energía constante como las redes WLAN.

Las WSN presentan varias restricciones, como la limitada capacidad de procesamiento, suministro de energía limitado, poco ancho de banda para los enlaces inalámbricos entre nodos.

A pesar de esto, una de las finalidades de los protocolos de enrutamiento, es realizar la comunicación de datos mientras se intentar extender la vida útil de la red, evitando la perdida de la conectividad, y utilizando técnicas efectivas de gestión de energía.

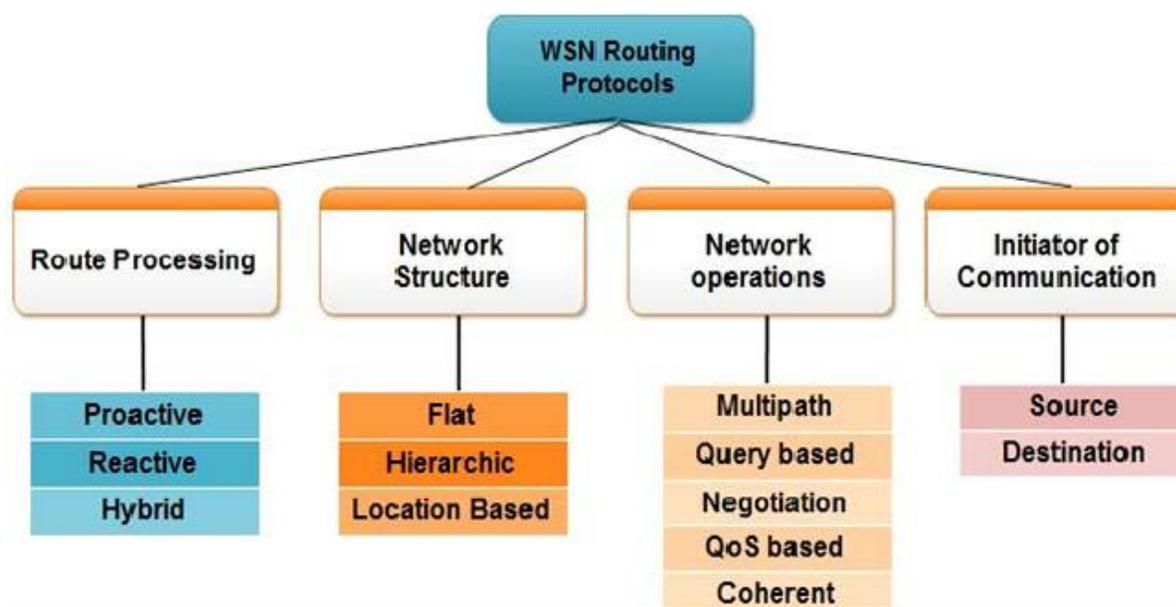
Elegir el protocolo de enrutamiento en las WSN, afecta el comportamiento de los nodos en la red, debido a que su objetivo general es dirigir el tráfico desde un nodo origen a su destino, intentando maximizar el rendimiento y evitando que haya una gran pérdida de energía por parte de los dispositivos que conforman la red.

Además, la pérdida de energía de los nodos como principal problema para la elección del protocolo de enrutamiento, condiciones de condiciones como tráfico, movilidad y escalabilidad de los nodos se deben tener en cuenta la estructura de red, incluso los fallos que pueden producirse durante el despliegue de una red WSN. Ya que este tipo de redes los

---

protocolos de enrutamiento Proactivos (como lo demostramos en la siguiente tabla de clasificación), se adaptan mejor a las condiciones impuestas por estas redes. El resto de protocolos que no son dinámicos terminan reduciendo considerablemente el rendimiento de la red.

### Estructura de Clasificación de los Protocolos de Enrutamiento en WSN



**Ilustración 6:** Clasificación protocolos de enrutamiento [30].

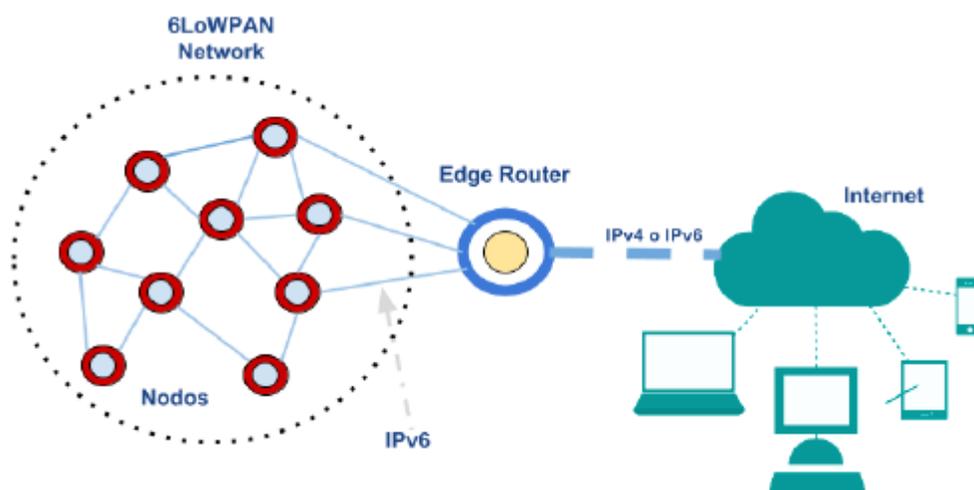
Para nuestra investigación se analizará, de entre todos los protocolos de enrutamiento existentes, el Protocolo RPL ya que este pertenece a la categoría de proactivo y dinámico, el cual se adapta mejor a el protocolo de comunicación 6LoWPAN y a la arquitectura TCP/IP, además implementa el sistema operativo Contiki, donde se realizarán las simulaciones en distintos escenarios de prueba.

## 1.10. EL ESTANDAR 6LOWPAN.

6LowPAN por sus siglas IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Network, es un estándar desarrollado por la IETF, [31],[32], [33], [34], cuyo propósito es hallar solución al transporte de paquetes IPv6 sobre tramas IEEE 802.15.4. (Estándar para redes WSN)

6LowPAN en lugar del direccionamiento IPv4, implementa IPV6, ya que este direccionamiento tiene más ventajas como la escalabilidad, espacio direccionamiento, autoconfiguración sin estado entre otras, ideal para el internet de las cosas IoT.

El protocolo 6LowPAN presenta mecanismo de compresión y encapsulación de cabeceras para la transmisión de paquetes, así puede adaptarse a las restricciones del protocolo 802.15.4 (con un máximo 127 bytes) hasta lograr un tamaño de 4 bytes.



**Ilustración 7:** Red WSN implementada con 6LoWPAN [35].

### 1.10.1. Dispositivos en una red 6lowpan

Los Routers son nodos con capacidad de enrutar, ideales para el encaminamiento de los paquetes 6LowPAN hasta los otros nodos que estén a su alcance.

El Router de Borde o Router border tiene como rol enrutar el tráfico entre la red IPv6 y la red LoWPAN, por esto se encarga de la interacción entre los protocolos IPv6 y 6LowPAN, ´por medio de la compresión y descompresión de las cabeceras, además del proceso de descubrimiento de vecinos ND.

Los hosts o nodos sensores de la red WSN, estos para no malgastar la energía de sus baterías, no deberían estar activos siempre.

### **1.11. REDES LLN**

Las redes de baja potencia y pérdida de paquetes LLN (por sus siglas en inglés Routing Over Low Power And Lossy Networks (Roll) ) [36] son una clase de red , formadas por muchos dispositivos integrados con energía, memoria y recursos de procesamiento limitados. Estos se encuentran interconectados por una variedad de enlaces, tales como IEEE 802.15.4, Bluetooth, Low Power WiFi, Enlaces por cable o de otro tipo de PLC de bajo consumo (Powerline Communication).

El grupo de trabajo ROLL en el RFC 7102 [19] se ha centrado en las soluciones de enrutamiento para las áreas: hogar c, edificio y redes de sensores urbanos. Ha desarrollado un Framework que toma en consideración varios aspectos, incluyendo una alta confiabilidad en presencia de características de pérdida y conectividad que varían en el tiempo y que permiten el funcionamiento dispositivo de baja potencia con una memoria muy modesta y una presión de la CPU en redes que potencialmente comprenden un número muy grande (varios miles) nodos.

Con la creación de Grupo de Trabajo llamado ROLL [37] en el 2005 y con los trabajos relativos a los protocolos de enrutamiento basadas en IPv6, adaptado para LLNS y específicamente para esta gestión. Este grupo de trabajo elaboró un protocolo de enrutamiento con baja potencia y pérdida (IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) (RPL) [38]. RPL usa una función objetivo y métricas, lo que le permite combinar métricas y restricciones para calcular “la mejor ruta”. Las F.O estandarizadas a la fecha por la IETF son

---

OF0 (Objective Function 0) [39] y MRHOF (The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function) [13] , pero no proveen calidad de servicio por defecto al protocolo RPL.

Las LLNs cuentan con RPL para que proporcione un mecanismo que permita a dispositivos de tráfico multipunto a punto dentro de la LLN hacia un punto central de control, así como el tráfico de punto a multipunto desde el punto de control central a los dispositivos dentro de la LLN que son compatibles.

### 1.12. PROTOCOLO RPL

El Protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia y pérdida de paquetes RPL (por sus siglas en inglés ROUTING PROTOCOL FOR Low Power and Lossy Networks) [40] [11], se ha implementado y probado en simulaciones, para grandes y pequeñas redes de sensores (WSNs). RPL [10] es un protocolo de enrutamiento desarrollado con el fin de cumplir con las necesidades de enrutamiento en Redes de baja potencia y pérdida de paquetes, desplegadas en casas y edificios inteligentes, así como en ciudades e industrias. [41], [42]. La siguiente imagen relaciona algunas de las aplicaciones en las que se utiliza el protocolo RPL, sus Métricas de Enrutamiento y F.O, donde investigadores como [7] Liu y Sheng, evalúan la efectividad de las soluciones de enrutamiento redes RPL a gran escala.

Application Scenarios	Topology Features	Metric/Objective Function Characteristics
Smart Grid [44], [45]	Large-scale and dense distribution	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parents switching autonomously</li> <li>• Appropriate duty cycling</li> </ul>
M2M (General Scope) [46]	Heterogeneous sensor system and involves a large number of devices	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Multiple next hops</li> <li>• Best forward selection</li> </ul>
Agriculture Greenhouse [47]	Heterogeneous information system	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Multipath</li> <li>• Hop count and residual Energy</li> </ul>
Medical Applications [48]	Mobile nodes; Dynamic and hybrid topology	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mobile nodes work as leaf node without broadcasting DIO</li> </ul>

**Ilustración 8:** Aplicaciones y Métricas con RPL [41].

El objetivo principal de Routing over LLN (RoLL). Fue el diseño de RPL. La idea era crear un protocolo proactivo basado en vector de distancia, que defina con antelación las rutas y se las comunique a los nodos de la red, diferente a los protocolos reactivos que buscan las rutas para transmitir “al momento de ser necesaria la transmisión” y utilizando demasiados recursos de energía, como DSR, FCP, AODC, entre otros.

RPL [11] facilita la creación de las redes multipunto, multihop y de reconstrucción automática, con el objetivo de tener un diseño más flexible y escalable dependiendo del uso final que se le asigne. Utiliza mensajes de control, que intercambian entre los nodos de manera periódica, con el objetivo de encontrar rutas y propagar información de la topología entre los nodos de la red.

### **Topología usada**

El protocolo RPL utiliza la topología de Grafo Acíclico Dirigido (DAG, por sus siglas en inglés - Direct Acyclic Graph) [32], es decir un grafo dirigido que no tiene ciclo. Este tipo de grafo tiene uno o varios nodos conocidos como “root nodes” o nodo raíz (de ahora en adelante llamaremos a los “root nodes” **nodos raíz**), los cuales cumplen la función de nodos sumideros o “sink nodes”, ya que se encargan de recibir los datos de todos los nodos de la red, luego el grafo se divide en nodos hijos o “leaf nodes”, los cuales se comunican con los otros nodos o con el nodo raíz, utilizando mensajes de control DODAG (Destination Oriented DAGs). Cuando el DAG tiene varios nodos raíz, estos se agrupan formando una federación.

La siguiente sección es bastante técnica, por este motivo a continuación definimos los principales conceptos:

---

<b>DAG</b>	<b>Grafo Acíclico Dirigido (DAG, por sus siglas en inglés - Direct Acyclic Graph,</b> Es un Gráfico que no contiene ningún ciclo
<b>Nodo raíz o root</b>	Este nodo se encarga de recibir los datos de todos los nodos sensores de la red, realizar un proceso y reenviarlos hacia el sistema de información
<b>DODAG</b>	Mensajes de control Orientados al destino (Destination Oriented DA
<b>Mensajes (DIS):</b>	el DIS solicita un objeto de información de DODAG
<b>Mensajes de DIO</b>	Mensajes de información DODAG (DODAG Information Object),
<b>Mensajes (DAO)</b>	Mensajes de destino el DAO se usa para propagar información mensajes de destino DODAG

**Tabla 2 :** Terminologías para Grafos con RPL

Para formar grafos RPL, se realiza un procedimiento de construcción de un DODAG, así como lo detalla el autor Canalejo [29], en su investigación de la “evaluación del rendimiento en el nivel de red RPL en redes de sensores” realizando un análisis de la formación de grafos, utilizando el siguiente procedimiento :

- 1) Seleccionar los nodos que serán configurados como DODAG raíz y tendrán la configuración del DODAG.

2) a través de la difusión de mensajes DIO (DODAG Information Object), los nodos deberán anunciar su configuración, su coste de encaminamiento y su afiliación con un DODAG.

Un mensaje DIO básicamente debe contener esta información: Un identificador único para una instancia RPL o RPLInstanceID, cuya función es identificar a uno o más DODAGs. Las redes WSN están conformadas por varias instancias, cada una de ellas identifica a un DODAG y con su propia Función Objetivo (F.O). [29]

RPL Instance, es un conjunto de DODAGs conocidos por un RPLInstanceID y los DODAGs de la misma instancia RPL tendrán la misma Función Objetivo. El número de versión DODAG: es un parámetro usado por el nodo raíz para reconstruir el DODAG.

Un DODAGID será una instancia RPL, donde se combina RPLInstanceID y el DODAGID para identificar de forma unívoca a un DODAG dentro de la red. Una instancia RPL podrá contener múltiples DODAGs, en el que cada uno tendrá su propio ID.

El Rank es el campo da la posición de cada nodo con respecto al nodo raíz o DODAG root, ya que su valor se incrementará al moverse desde el nodo raíz hasta los nodos hijos. Este Rank se calcula a partir de una Función Objetivo (F.O), calculando una métrica donde elige la conveniencia del nodo, por ejemplo, para determinar el siguiente mejor salto para poder llegar al nodo raíz y minimizar su gasto energético.

El nodo raíz enviara a los nodos vecinos mensajes DIOs, de tipo Broadcast para comenzar la formación del DODAG, ya que es el único nodo capaz de realizar este proceso. Solo el campo Rank se verá afectado cuando un mensaje DIO atraviese la red. El nodo raíz tomara un valor Rank de 0, pues la distancia a sí mismo es cero, y los nodos que están recibiendo el mensaje de difusión DIO, hallaran su valor de Rank con base a la Función Objetivo (FO), a partir de 1 y calculando la distancia o número de saltos hasta el nodo raíz. Los otros nodos estarán escuchando los mensajes DIOG y los usarán para unirse al nuevo DODAG entonces comenzara el proceso de elección para hallar al mejor nodo padre o continuar perteneciendo al DODAG anteriormente seleccionado. Las decisiones tomadas por cada nodo dependerán de cómo hayan definido su Función Objetivo, su Rank y los de sus vecinos.

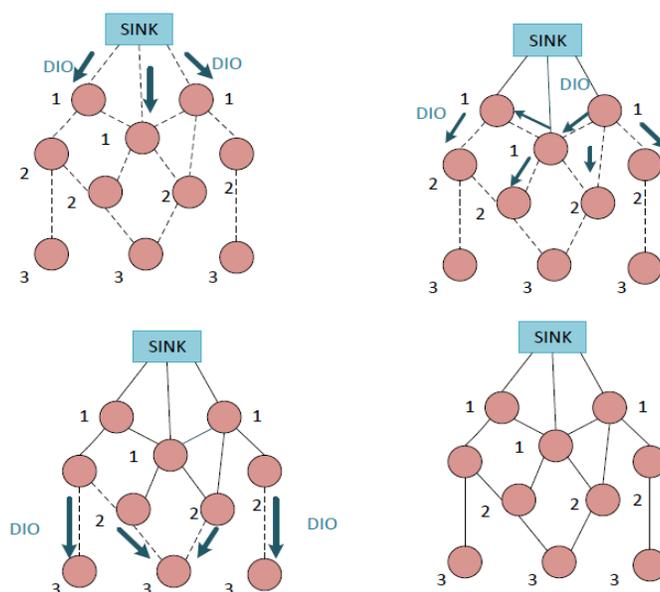
---

Al momento en que un nodo de la red reciba el mensaje DIO, éste mantendrá a un conjunto de nodos vecinos candidatos eligiendo aquellos que tengan un valor de rank igual o inferior al suyo propio, para que se conviertan en “nodos padres”. Si existe más de un “nodo padre”, se elegirá a uno de entre todos ellos basándose en la Función Objetivo permitiendo asignar el siguiente salto para encaminar los datos hacia el nodo raíz.

Las entradas de la tabla de encaminamiento de los nodos registrarán los destinos especificados según el mensaje DIO, así como el DODAG parent del DODAG Version. Los nodos que decidan unirse a este DODAG deben elegir uno o más DODAG parents como siguientes saltos para la ruta por defecto de esa instancia.

Cuando se halla calculado el Rank de un nodo, éste propagará el mensaje DIO actualizado al resto de sus vecinos (dicho mensaje será descartado por el nodo raíz, debido a que es el que contiene el valor del Rank más pequeño de toda la red), los cuales repetirán el mismo proceso para calcular el Rank en función de la F.O y reenviando el mensaje DIO actualizado al resto de nodos vecinos.

La siguiente ilustración muestra el procedimiento de construcción de un DODAG, para formar un Grafo RPL. [29]



**Ilustración 9:** Formación de un grafo RPL.

Cada nodo de la red WSN que esté implementado con el protocolo RPL, tiene que venir definido por una Función Objetivo (F.O) que permite seleccionar y optimizar las rutas dentro de una instancia RPL. La F.O viene identificada por el Objective Code Point (OCP), el cual forma parte de la configuración de un mensaje DIO y permite calcular qué rutas son más ventajosas para un nodo cuando tenga que enviar un paquete o reenviarlo porque él no sea el nodo destino.

Para definir una Función Objetivo hay que basarse en un conjunto de métricas como, por ejemplo, el nivel de energía o potencia de un nodo, el cual puede ser usado por la F.O para calcular el rank, de manera que cuando un nodo seleccione a un parent node elegirá al vecino con el valor del rank más bajo y a la vez con el nivel de energía y potencia más bajo también. Esto quiere decir que la F.O tendrá en cuenta el número de saltos como una de sus métricas.

### **1.12.1. RPL en una Red 6lowpan Network**

Cuando un nodo trabaja con RPL, obtiene primero una dirección global IPv6 (por ejemplo vía DHCPv6), e intenta unirse a una DODAG por medio de intercambio de solicitud de información DODAG (DIS) o mensajes de información de objetos DODAG (DIO).

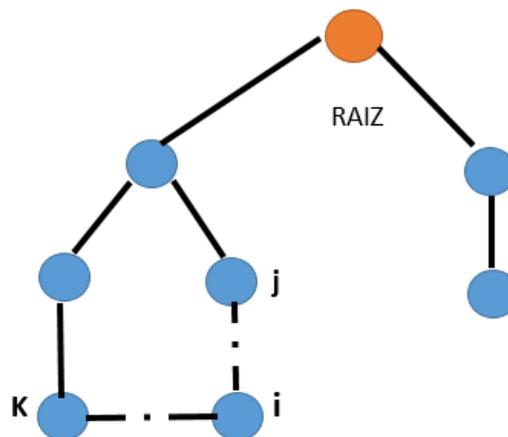
Empleando estos mensajes de control un nodo raíz de un RPL DODAG se presenta como padre ante los otros nodos en su vecindad. Por otro lado, una vez que un nodo RPL selecciona a su padre, propaga su propio DIO hacia las ramificaciones contrarias o inferiores de jerarquía en toda la red para formar un sub-DODAG. Cuando un DIO es recibido y un nodo intenta conectarse a un RPL DODAG, el nodo inicia el cómputo de su propio rango o “rank” que es una representación escalar del nodo dentro de la DODAG visto desde el nodo raíz.

En el caso del patrón de tráfico multipunto a punto, el tráfico puede ser soportado con un pequeño enrutamiento de estado, por lo que cada nodo almacena su siguiente salto que lo conduce a su destino (el nodo raíz de la DODAG). Este estado puede ser mantenido por un DODAG apropiadamente confeccionada a través del intercambio de mensajes DIO. En los otros dos tipos de patrones de tráfico, punto a multipunto y punto a punto, RPL suministra

---

rutas separadas “hacia abajo” usando mensajes DAO (Destination Advertisement Object) que anuncian rutas y prefijos dentro de una red RPL. Al recibir un mensaje DAO, dependiendo de cómo se encuentre la red configurada, los nodos pueden localmente reenviar la ruta (nonstoring mode) hasta la raíz de la DODAG o almacenarla localmente (storing mode). Al recoger la información de las rutas de la red un paquete puede viajar hasta su último destino por las ramificaciones de la red dado que tiene el conocimiento (lo anteriormente descrito está documentado en [43] [37] y [44] [39]).

RPL puede ser usado con los sistemas operativos de redes de sensores inalámbricos más difundidos, como TinyOS y ContikiOS, con los nombres de TinyRPL y ContikiRPL, respectivamente, como lo describen varios de los autores [45] [46], en investigaciones referentes al análisis de redes de sensores inalámbricos. La siguiente ilustración, muestra cómo se realiza la selección de nodo principal en un DODAG.



**Ilustración 10:** selección de nodo principal en DODAG [21].

El enrutamiento de RPL es proactivo, ya tiene las rutas antes de que sean necesarias por los datos o nodos. Su funcionamiento se basa en que cada nodo guarda lista nodos vecinos con un costo asociado, elige un nodo padre para llegar al nodo raíz con menor costo a través del intercambio de mensajes de control (periódicos) para encontrar y propagar rutas en la red y el envío de mensajes para compartir: local (nivel de enlace): información de vecinos, global (toda la red): información de topología entre todos los nodos.

### **1.12.2. Tipos de Uso de RPL**

Por la variedad de aplicaciones que pueden tener las LLN, existe la necesidad de desarrollar protocolos específicos del tipo de aplicación, con el riesgo de desarrollar un protocolo diferente para cada aplicación [47]. Por ello es importante poder clasificar las aplicaciones, para diseñar soluciones de clase. Una clasificación no será exhaustiva, puesto que puede haber superposición de clases en algún aspecto, sin embargo, lo más importante es que permite organizar el diseño.

Los tipos de uso se pueden clasificar por dimensiones taxonómicas así [48]:

- **Vida útil:** Si bien existe una variedad de Métricas relacionadas al consumo de energía, se propone que la medida fundamental debe estar relacionada con el concepto de vida útil de la red, es decir el tiempo que dura funcionando de manera operativa. Puede ser simple o de duración fija, compleja o de fases múltiples.
- **Latencia:** La latencia es el tiempo que tarda en recibirse un paquete, es un requerimiento temporal cuantificable en las redes inalámbricas de sensores. Puede ser despreciable, moderada o estricta.
- **Ancho de banda** Abarca dos aspectos del patrón de tráfico. Se refiere al volumen de datos requerido y a la frecuencia de las transmisiones. Puede ser episódico bajo, episódico alto, continuo bajo o continuo alto.

### **1.13. FUNCIÓN OBJETIVO Y RANGO**

La función objetivo (F.O) hace parte fundamental en el enrutamiento de la redes LLN, ya que es utilizada por el protocolo RPL, para especificar cómo la métricas y las restricciones que presentan los nodos, eligen la “Mejor Ruta” [14]. Una F.O es el resultado del proceso utilizado por un nodo de RPL para seleccionar y optimizar las rutas dentro de una Instancia RPL basado en los objetos de información disponible.

---

Un Rango o Rank define la posición del nodo en relación con otros nodos con respecto a una raíz DODAG. La asignación aumenta en la dirección hacia abajo y disminuye estrictamente en la dirección ascendente. La forma exacta en que se calcula el rango del nodo RPL depende de la función objetivo (F.O) del DAG. La F.O define cómo se usan las métricas de ruteo, los objetivos de optimización y las funciones relacionadas para calcular el rango.

### 1.13.1. LA FUNCIÓN OBJETIVO HISTÉRESIS (MRHOF)

La Función Objetivo del rango mínimo con histéresis (MRHOF) [13]. Como su nombre lo indica escoge el camino que minimice una métrica con el menor rango, a través del uso de histéresis, disminuye la rotación debido a pequeños cambios de las métricas. Esta función utiliza métricas acumulativas durante toda una ruta. Su métrica es ETX (por sus siglas en inglés Expected Transmission Count) algo así como “El Contador de trasmisión esperado”. El ETX en un enlace inalámbrico, es el número promedio estimado de las transmisiones de tramas de datos y ACK, necesarias para la transmisión exitosa de un paquete [15] [11]. Como predeterminado, la transferencia de datos en dos direcciones. Desde el nodo de origen al nodo de destino se define como la dirección de avance, y la tasa de transmisión de datos es  $d_f$  que representa la probabilidad de transmisión con éxito en la dirección positiva. Por el contrario, desde el nodo destino al nodo de origen se define como la dirección inversa, y la velocidad de transmisión de datos es  $d_r$ . Entonces, el valor de ETX se define como sigue:

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r} \quad (\text{Ec. 8})$$

Debido a las características especiales de LLNS, la estabilidad de la ruta es necesaria. Esta métrica ETX [19] se utiliza para indicar la estabilidad de una ruta.

### 1.13.2. Función Objetivo Cero (OF0) [14] :

La Función Objetivo Cero fue diseñada para hallar el camino más corto a la raíz. Toda vez si el rango de un nodo está muy cerca de una función abstracta de su distancia a la raíz. Esta necesidad es equilibrada con la otra necesidad de mantener cierta diversidad de trayectoria,

que puede ser logrado por el aumento de la Rank. En ausencia de una raíz a tierra, la conectividad interna dentro de la LLN sigue siendo deseable y flotantes. El DAG se formará, arraigado en los nodos de la más alta administrativa preferencia.

Esta función se encarga de hallar una matriz y una copia de la ruta, donde Todo el tráfico se encamina hacia arriba, normalmente a través de los nodos padres, sin ningún intento de realizar una carga equilibrada. Cuando las condiciones del enlace no permiten que un paquete se envíe hacia arriba a través de los nodos padres, el paquete se pasa a la copia de seguridad. Un nodo RPL monitoriza los enlaces a un número de nodos vecinos y puede utilizar Of0 para asignar un rango incremental a cada enlace de la red.

### **1.13.3. Rango**

Un rango define la posición del nodo en relación con otros nodos con respecto a una raíz DODAG. La clasificación estrictamente aumenta en la dirección hacia abajo y disminuye estrictamente en la dirección ascendente. La forma exacta en que se calcula el Rank depende de la Función Objetivo del DAG.

---

### 1.14. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.

IoT	Es el <b>conjunto de tecnologías modernas</b> , tales como las redes de sensores, GPS, RFID, comunicaciones inalámbricas, localización en tiempo real, entre otros, interconectados a través del internet, para formar una enorme red, con el objetivo de que todas las cosas conectadas con esta red, puedan servir dentro de un sistema automatizado para, por ejemplo, la identificación de objetos en tiempo real, la localización, seguimiento, monitoreo y activación de eventos de diversa índole, incluso yendo hacia lo que se ha denominado como <b>Planeta Inteligente</b> .
Redes LLN	Las redes de baja potencia y pérdida de paquetes LLN (por sus siglas en inglés Routing Over Low Power And Lossy Networks (Roll)) [35], son una clase de red, formadas por muchos dispositivos integrados con energía, memoria y recursos de procesamiento limitados. Estos se encuentran interconectados por una variedad de enlaces, tales como IEEE 802.15.4, Bluetooth, Low Power WiFi, Enlaces por cable o de otro tipo de PLC de bajo consumo (Powerline Communication).
Protocolo RPL	El Protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia y pérdida de paquetes RPL (por sus siglas en inglés ROUTING PROTOCOL FOR Low Power and Lossy Networks) [40] [11], RPL [10] es un protocolo de enrutamiento desarrollado con el fin de cumplir con las necesidades de enrutamiento en Redes de baja potencia y pérdida de paquetes, desplegadas en casas y edificios inteligentes, así como en ciudades e industrias.[41], [42].
Objective Function	La función objetivo (F.O) hace parte fundamental en el enrutamiento de la redes LLN, ya que es utilizada por el protocolo RPL, para especificar cómo la métricas y las restricciones que presentan los nodos, eligen la “Mejor Ruta” [14]. una F.O es el resultado del proceso utilizado por un nodo de RPL para seleccionar y optimizar las rutas dentro de una Instancia RPL basado en los objetos de información disponible
Routing Metric	Las métricas de enrutamiento son aquellas utilizadas por un <b>protocolo</b> para estimar el costo de selección de una ruta. donde la mejor ruta, será aquella que satisfaga todas las restricciones suministradas y con el costo más bajo con respecto a alguna métrica especificada Ejemplo Hop Count, ETX, PER HOP ETX, entre otras

Tabla 3 : Definición de los términos básicos de la investigación

## CAPÍTULO 2

### 2. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA DE LA F.O PROPUESTA

En este capítulo se presenta la F.O propuesta, denominada F.O MEDIA, que está basada en una nueva métrica llamada MEDIA-ETX. Para lo anterior es necesario efectuar una descripción completa de la métrica MEDIA-ETX, que nos permita contar con los detalles necesarios que aumenten la calidad del servicio, en el proceso de enrutamiento al momento de utilizar el protocolo RPL, Cumpliendo así, con el segundo objetivo específico propuesto.

Es preciso resaltar que ETX, es una métrica propuesta para la transmisión de datos, eligiendo el mejor enlace inalámbrico. No obstante, para elegir la “mejor ruta”, se emplea la suma de los valores ETX entre nodos a lo largo de la ruta, dando más importancia los saltos de un camino, en lugar de la calidad de transmisión, al momento de seleccionar una ruta. De esta manera se elige la ruta con menor sumatoria ETX, y por lo tanto con menor número de saltos. El problema de este proceso, es que en redes con mayor número de nodos especialmente en un escenario denso, el valor ETX de todo el camino, será mayor que el de un largo y único salto. Analizando lo anterior un solo salto largo, se convertirá en un cuello de botella limitando así toda la red.

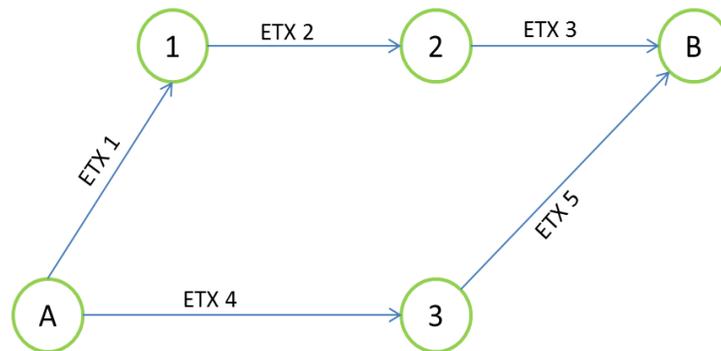
#### 2.1. MEDIA-ETX

Por defecto no se distinguen las rutas que ofrecen mejor calidad de servicio en las funciones objetivo del protocolo RPL; MEDIA-ETX calcula la mejor ruta de encaminamiento utilizando la desviación media de los valores de ETX entre cada nodo, para evitar los caminos con más inestabilidad en términos del estado del enlace. Se diseña esta nueva métrica de enrutamiento teniendo en cuenta que puede existir el caso donde el nodo tenga contacto directo con el nodo raíz, es decir que solo exista un nodo en la ruta, la nueva métrica MEDIA-ETX se prepara para el caso tomando el valor de 0 indicando el costo de llegar a la raíz nulo como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = f(ETX_i, n) = \begin{cases} 0, & n = 1 ; \\ \left(\frac{1}{n}\right) * \sum_{i=1}^n \left| ETX_i - \frac{\sum_{i=1}^n ETX_i}{n} \right|, & n > 1 ; \end{cases} \quad (1)$$

Donde  $n$  es el número de nodos (saltos) y  $\overline{ETX}$  el promedio de los ETX por ruta.

## 2.2. CALCULO DE LA RUTA



**Ilustración 11:** Modelo de red.

En la anterior ilustración, se realiza un cálculo de 2 posibles rutas del nodo de origen A, al nodo de destino B a las que llamaremos AB1 y AB2. De esta manera supongamos que los valores entre cada ETX son los siguientes:

$$ETX1 = 2.2, ETX2 = 2.1, ETX3 = 2.1 \quad \text{Ruta (AB1)}$$

$$ETX4 = 4, ETX5 = 2 \quad \text{Ruta (AB2)}$$

Por defecto para el protocolo RPL, para la mejor ruta se calcula con la métrica ETX, lo que para el ejemplo de la ilustración 11 nos daría los resultados como se observan en la siguiente tabla.

Ruta	Sumatoria por ruta ETX	Resultado
AB1	$ETX_{AB1} = \sum_{i=1}^3 ETX_i = ETX_1 + ETX_2 + ETX_3$	$ETX_{AB1} = 2.2 + 2.1 + 2.1 = 6.4$
AB2	$ETX_{AB2} = \sum_{i=4}^5 ETX_i = ETX_4 + ETX_5$	$ETX_{AB2} = 4 + 2 = 6$

Tabla 4. Resultados por ruta de la sumatoria de sus ETX

Los resultados en la tabla anterior indican, que el mejor camino es la ruta 2 según la métrica habitual ETX. Sin embargo, si analizamos los valores ETX entre el nodo A, y el nodo 3, y el nodo 3, y el nodo B, es demasiado grande, esto es muy probable que se convierta en un cuello de botella para toda la red.

En situaciones donde el valor de las métricas ETX de cada vecino sean cercanos, la función objetivo MRHOF aplica el camino más corto para elegir la ruta apropiada, lo que puede volverse un ciclo repetitivo devolviéndonos a caminos con saltos más largos. Por lo tanto, esta solución puede no ser la mejor en la mayoría de los casos hablando de enrutamiento al no distinguir la otra ruta con mejor calidad de servicio.

Con la F.O. MEDIA, basados en la nueva métrica MEDIA-ETX calculamos la desviación media de las rutas como lo muestra la ecuación 1. Con dicha desviación media se obtienen los siguientes resultados:

Aplicada para la ruta 1,

$$\bar{X}_{ETX}(AB1) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 |ETX_i - 2,13|$$

$$\bar{X}_{ETX}(AB1) = \frac{1}{3} [|2,2 - 2,13| + |2,1 - 2,13| + |2,1 - 2,13|]$$

$$\bar{X}_{ETX}(AB1) = \frac{1}{3} [(0,07) + (0,03) + (0,03)]$$

$$\bar{X}_{ETX}(AB1) = \frac{1}{3} (0,13)$$

$$\bar{X}_{ETX}(AB1) = \frac{13}{300} = 0,04$$

Y aplicada para la ruta 2

$$\begin{aligned}\bar{X}_{ETX}(AB1) &= \frac{1}{2} \sum_{i=4}^5 |ETX_i - 3| \\ \bar{X}_{ETX}(AB1) &= \frac{1}{2} [|4 - 3| + |2 - 3|] \\ \bar{X}_{ETX}(AB1) &= \frac{1}{2} [(1) + (1)] \\ \bar{X}_{ETX}(AB1) &= \frac{1}{2} (2) \\ \bar{X}_{ETX}(AB1) &= \frac{2}{2} = 1\end{aligned}$$

Entonces:

$\bar{X}_{ETX}(AB1) = 0,04$  es el resultado de la desviación media de la ruta 1

$\bar{X}_{ETX}(AB2) = 1$  es el resultado de la desviación media de la ruta 2

La ruta 2, posee una mayor desviación media, siendo esta una forma más completa de reconocer que la ruta 1 es más estable, al no poseer inestabilidad en términos del estado del enlace.

## CAPÍTULO 3

### 3. IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN

En el presente apartado, se reúnen los elementos necesarios que permitan validar el rendimiento de la F.O MEDIA en una red de sensores inalámbrica Multisalto, por medio de herramientas que permiten una simulación detallada, en donde se relacionan los dispositivos seleccionados, el propio simulador, sus características y la topología de la red.

En cada uno de los escenarios, se toma un área de muestra general de 20,40, 50 y 100, en una topología aleatoria de nodos, con un nodo receptor (sumidero) de color verde, ubicado en el centro del área, y los nodos emisores (amarillos) elegidos al azar. Dadas las limitaciones de energía de los nodos de las redes LLN, la métrica Tiempo de Vida de la Red es de gran importancia en el enrutamiento de este tipo de redes, también la métrica del Consumo de Energía, La latencia, y la Relación de Entrega de Paquetes (PDR).

#### 3.1. DISEÑO DE LA SIMULACIÓN.

Para el diseño de la simulación de la función objetivo propuesta, se seleccionó el sistema operativo (Contiki) y el simulador de fuente abierta (Cooja), desarrollados específicamente para plataformas con limitaciones de recursos, y simulador con interfaz amigable, completamente compatible con el protocolo RPL.

Para el análisis del funcionamiento de las redes LLNs, el protocolo de enrutamiento RPL y la F.O propuesta, se establecieron condiciones funcionales y actuales, para poder comparar la F.O con otras alternativas, en igualdad de condiciones. Por tal motivo, a continuación, detallamos las características de red, los dispositivos seleccionados y ampliamente soportadas para este propósito.

---

### 3.1.1. Dispositivo Inalámbrico “MOTE”

Este dispositivo es un modelo de "mote" fabricado por Moteiv que posee: una radio Chipcon 2420, que provee interoperabilidad con dispositivos IEEE 802.15.4; un MSP430, de 8Mhz, 10Kb de RAM y 48Kb de memoria flash



**Ilustración 12:** Dispositivo Inalámbrico Mote (Nodo) [49].

Tmote Sky, es un módulo inalámbrico de muy bajo consumo de energía, para uso en redes de sensores, aplicaciones de monitoreo y creación rápida de prototipos de aplicaciones. Tmote Sky aprovecha los estándares de la industria como USB y IEEE 802.15.4 para inter operar sin problemas con otros dispositivos. Mediante el uso de estándares de la industria, la integración de la humedad, la temperatura, y sensores de luz, y que proporciona la interconexión flexible con los periféricos, Tmote Sky permite una amplia gama de aplicaciones de red de malla [50].



**Ilustración 13:** Dispositivo Tmote SKY (Nodo) [51].

Tmote Sky incluye un aumento de rendimiento, funcionalidad. Tmote Sky aprovecha los protocolos inalámbricos emergentes y el movimiento de software de código abierto. Tmote

Sky es parte de una línea de módulos que ofrecen los sensores para aumentar la robustez y disminuir el costo y el tamaño del paquete.

Sus características principales son:

- 250Kbps 2,4 GHz IEEE 802.15.4 con chip transmisor y receptor inalámbrico.
- Interoperabilidad con otros dispositivos IEEE 802.15.4
- 8MHz Texas Instruments MSP430 microcontrolador (10k RAM, 48k Flash).
- ADC integrado, DAC, supervisor del voltaje de alimentación, y el controlador de DMA.
- Integrado a bordo de la antena con la gama 50m rango en interiores / exteriores 125m.
- Integrado de humedad, sensores de temperatura y la luz.
- Ultra bajo consumo de corriente.
- De activación rápida del sueño ( $<6\mu\text{s}$ ).
- El cifrado de hardware de capa de enlace y la autenticación.
- Programación y recopilación de datos a través de USB.
- Soporte de expansión de 16 pines y el conector de antena SMA opcional.
- Cumple con FCC Parte 15 y los reglamentos IC.

Tmote SKY se alimenta de dos pilas AA. El módulo ha sido diseñado para encajar el factor de forma de batería de dos AA. células de AA pueden ser usados en el rango de operación de 2,1 a 3,6 V DC, sin embargo, la tensión debe ser de al menos 2,7 V cuando se programa el flash microcontrolador o flash externo.

---

### **3.1.2. Selección del Simulador**

En nuestra revisión, encontramos varias herramientas de simulación, para evaluar el rendimiento de RPL. En esta investigación, consideramos utilizar el simulador Cooja, por su interfaz amigable, el soporte con RPL y la simulación de gran cantidad de nodos.

Cooja 1, que es un simulador de red de código abierto, basado en la construcción y realización del módulo. Es capaz de implementar la simulación de RPL en redes con gran cantidad de nodos, para diferentes escenarios de red, y con una API configurable que obtiene una serie de datos específicos, que permiten ser graficados y analizados fácilmente.

Cooja viene embebido dentro del sistema operativo Contiki, Este S.O es open source, multi-tarea, fue desarrollado para plataformas con recursos limitados de procesamiento, energía y memoria. Implementado por un grupo de académicos del “Swedish Institute of Computer Science” liderado por Adam Dunkels. Sus creadores lo desarrollaron pensando en “Internet of Things”, teniendo como idea que en un futuro los objetos tengan la capacidad de comunicarse de forma inalámbrica y controlada remotamente.

El sistema operativo Contiki, se adapta mejor a las motas SKY, soporta una gran variedad de protocolos de enrutamiento incluido el RPL, y está escrito en el lenguaje de programación C, el cual nos facilita debido a nuestra experiencia, la programación en el simulador.

### **3.1.3. Tamaño Del Área y Densidad de Nodos.**

Se toma como área de prueba una zona de 100m\*100m. En los simuladores de red es posible especificar las dimensiones en metros de un espacio bidimensional con forma de cuadrado, en la configuración de la simulación. Para buscar cubrir el espectro de posibilidades en redes LLN se trabaja con diferentes densidades de nodos desde una baja densidad hasta una bastante alta de acuerdo al radio de transmisión de los nodos: 20, 40, 50 y 100 nodos.

### **3.1.4. Topología y Modelo de Despliegue.**

Las aplicaciones de RPL utilizan sensores inalámbricos se dispersan en unas áreas específicas de interés con el fin de recabar datos de ese entorno. Para las simulaciones de este trabajo, hemos utilizado topología aleatoria en nuestros experimentos, es decir, una distribución de

---

nodos en forma aleatoria incluyendo el nodo sumidero que permiten a los nodos llegar al sumidero directamente o en contacto entre sí a fin de alcanzar el nodo fregadero.

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

### **3.2. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN**

Dadas las limitaciones de energía de los nodos de las LLN, se busca optimizar los protocolos para extender el tiempo que dura la red en operación, es decir, que puede proveer información del terreno censado, por ello la métrica Tiempo de Vida de la Red es muy importante para estimar la QoS ofrecida durante las pruebas de simulación. De igual manera, otras métricas como Latencia y Relación de Entrega de Paquetes (PDR).

### **3.3. MÉTRICAS A EVALUAR.**

#### **3.3.1. Tiempo de Vida del Sistema.**

Dadas las limitaciones de energía de los nodos de las LLN, se busca optimizar los protocolos, para extender el tiempo que dura la red en operación, es decir, que puedan proveer información del terreno censado: [52] [53] [54] [14].

Para esto tomamos algunas de las siguientes medidas genéricas:

- a. Tiempo hasta que se agota la energía del nodo

$$T_1 \quad [\text{Segundos}]$$

- b. Tiempo hasta que se agota la energía de la mitad de los nodos
-

$$T \frac{n}{2} \quad [\text{Segundos}]$$

- c. Tiempo hasta que algún nodo queda aislado
- d. Tiempo hasta que algún nodo queda sin ruta del sumidero
- e. Tiempo hasta que se particiona la red

$$T_{\text{partición}} \quad [\text{Segundos}]$$

O alguna medida específica de la aplicación:

- f. Tiempo hasta que algún requerimiento de calidad de servicio ya no puede garantizarse. Esta métrica se define basada en otra; es el tiempo hasta que una métrica de calidad de servicio supera o cae debajo de un umbral. En [11] se menciona que la cobertura puede utilizarse un parámetro para medir la calidad de servicio en aplicaciones de detección de eventos. Entonces, la vida útil podría también definirse, por ejemplo, como el tiempo hasta que la cobertura cae al 80 %.

$$TCov80 \quad [\text{Segundos}]$$

### 3.3.2. Consumo De La Energía

- a. Costo por paquete

La cantidad promedio de paquetes que pueden ser exitosamente entregados por unidad de energía.

$$eApp_{avg} = App_r / E \quad [1/mW_s]$$

$E$  = Consumo total de energía [mWs]

$App_r$  = Total de paquetes de aplicación entregados

- b. Energía disipada

La cantidad promedio de energía que se utiliza al detectar un evento. Es una medida más general, que incluirá otras actividades además del enrutamiento.

$$eEv_{avg} = E/E_v \quad [mWs]$$

E = Consumo total de energía [mWs]

$E_v$  = Total de eventos detectados

c. Energía total

Energía disipada total, suma del consumo total de cada nodo.

E = Consumo total de energía [mWs]

d. Distribución de la energía

Uniformidad de los niveles de energía de los nodos.

$E_\sigma$  = Desviación de la energía residual

### 3.3.3. Latencia

Retardo promedio entre la transmisión de un evento y la recepción en el sumidero.

$Lat_\sigma$  = Desviación de latencia

$Lat_{min}$  = Latencia mínima

$Lat_{max}$  = Latencia máxima

$Lat_{med}$  = Latencia media

## 3.4. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Los escenarios planteados en esta sesión, se han diseñado para satisfacer cada uno de las pruebas experimentales que se han realizado con en el simulador Cooja, y poder evaluar la red de sensores inalámbrica Multisalto, teniendo en cuenta los escenarios planteados en [18]. Primero describimos las pruebas realizadas donde evaluamos la pérdida de paquetes ocasionadas en la transmisión, la latencia y posteriormente el consumo de energía experimentada por los envíos de paquetes dentro de la red.

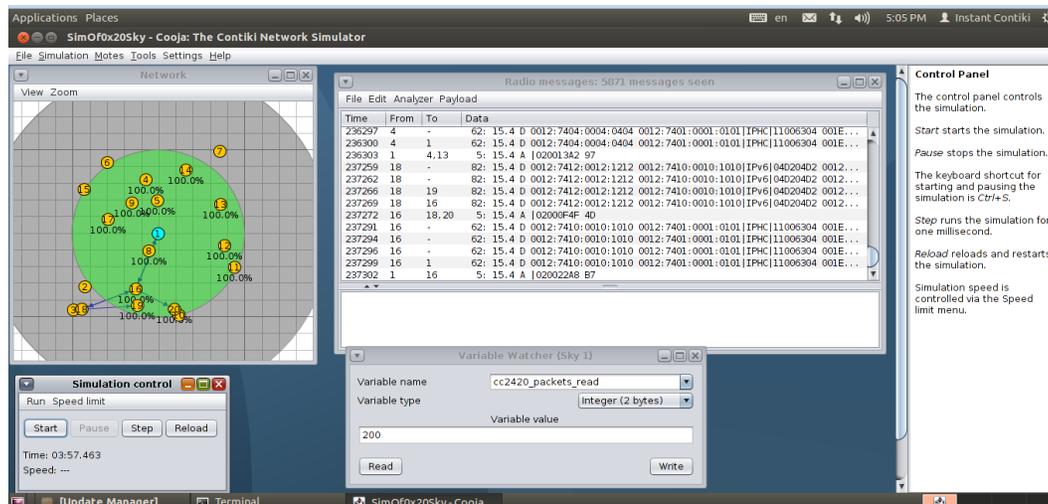
---

Para cumplir con lo anteriormente mencionado, las simulaciones se implementan en un entorno experimental, con cierta cantidad de nodos como escenarios (20, 40, 50 y 100), estos están desplegados en una zona 100m\*100m.

- Escenario I, II y III, simulación con 20 nodos.
- Escenario IV, V y VI, simulación con 40 nodos.
- Escenario VII, VIII y IX, simulación con 50 nodos.
- Escenario X, XI y XII, simulación con 100 nodos.

### 3.4.1. Simulación De La Red Inalámbrica En COOJA.

En este estudio, se ha simulado una red con un único nodo de sumidero, y hemos utilizado topología aleatoria con el fin de distribuir los nodos en una zona cuadrada con un lado  $L = 500$  metros, Se ha diseñado la red RPL utilizando la F.O propuesta, mediante simulaciones bajo diferentes cantidades de nodos: 20, 40, 50 y 100 nodos, con un nodo receptor o sumidero adicional. Además, hemos trabajado con un valor RX (100%), se analizó el comportamiento de RPL en términos de relación de entrega de paquetes y el consumo de energía.



**Ilustración 14:** Simulación de la red inalámbrica en Cooja.

### 3.4.2. Las Mediciones de Rendimiento.

Dos parámetros estándar de rendimiento se han tenido en cuenta para evaluar el desempeño del protocolo RPL: Consumo de energía y la Relación de entrega de paquetes (PDR). La

primera actuación métrica es el consumo de energía, para hacer una buena estimación de la energía utilizamos el 100% de relación de recepción de paquetes que domina el uso de energía en los nodos sensores. Además, tomamos el porcentaje constante de RX, con el fin de comparar las F.O, para todos los nodos en la configuración de la red. Para calcular el consumo de energía se utiliza el mecanismo de carga del sistema de rastreo disponible en Contiki [14], Utilizando el seguimiento de estado de energía, Power-trace proporciona una estimación de consumo de energía de un sistema. Estructuras conocidas como cápsulas de energía también se usan para asignar el uso de energía para procesos tales como, transmisiones de paquetes de recepción. [14]

La segunda métrica es la relación de la entrega de paquetes (PDR) que se define como el número de paquetes recibidos en el nodo, con el número de paquetes enviados al nodo. Hemos promediado PDR de todos los paquetes recibidos con éxito en el nodo. Con el fin de calcular el promedio PDR hemos medido el número de enviado los paquetes de todos los nodos en el sumidero y se divide por el número de paquetes recibidos con éxito en el sumidero.

---

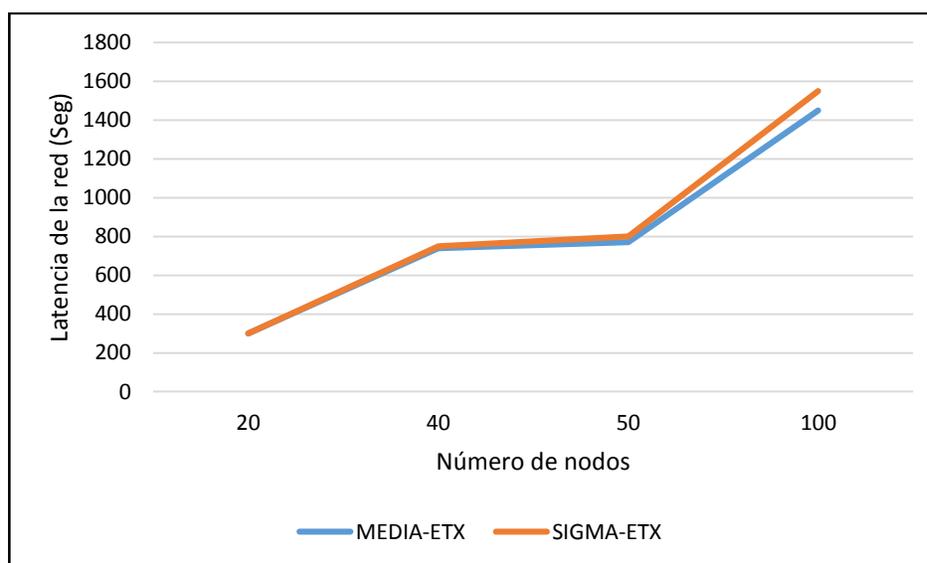
## CAPÍTULO 4

### 4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo, mediante la simulación de Cooja, con el S.O Contiki Instant 3.0, se realizó una comparación entre propuesta MEDIA con la métrica SIGMA-ETX, teniendo en cuenta los resultados publicados en [18], para latencia, pérdida de paquetes y el tiempo de vida de la red. Como se explicó en el capítulo anterior se tomaron varios experimentos, entre 20, 40, 50 y 100 nodos cliente y Un nodo raíz o receptor en el simulador Cooja.

#### 4.1.1. Latencia de La Red.

Cuando el número de nodos aumenta en la red, LA F.O MEDIA evita el retardo por aumento del número de nodos.

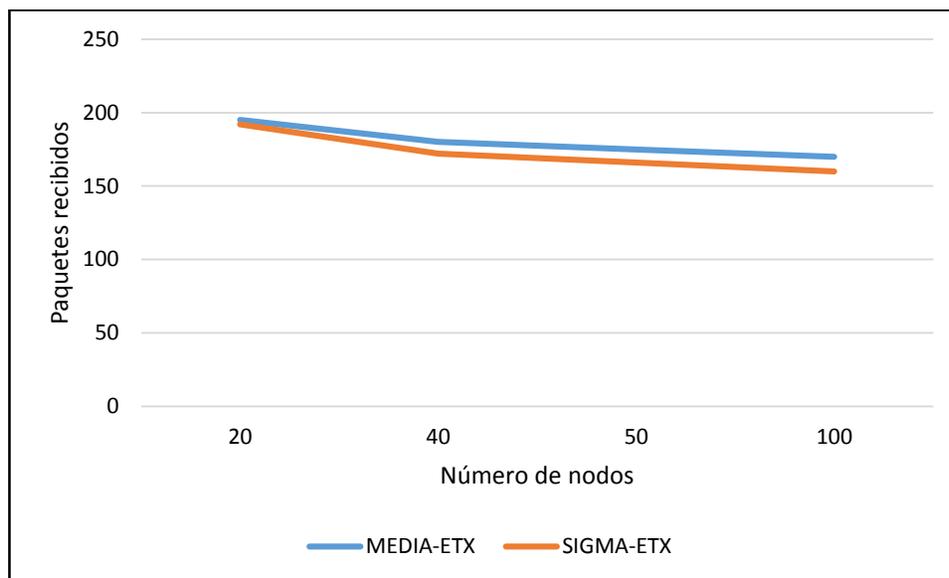


**Ilustración 15:** Latencia de Red.

La latencia de SIGMA-ETX se presentan frente a la MEDIA-ETX como de mayor porcentaje. Si observamos la ilustración 16, en el eje de las Y, Podemos ver que MEDIA-ETX comparada con SIGMA-ETX, presenta menor latencia, sin embargo, su ventaja no es tan superior, pero aun así presenta mejor rendimiento. Esto se debe a que hace una óptima selección de las rutas, con mayor número de nodos vecinos para el envío de paquetes, lo que la hace más eficiente en la propagación y trasmisión de paquetes en comparación de las otras dos métricas.

#### 4.1.2. Relación de Entrega de Paquetes.

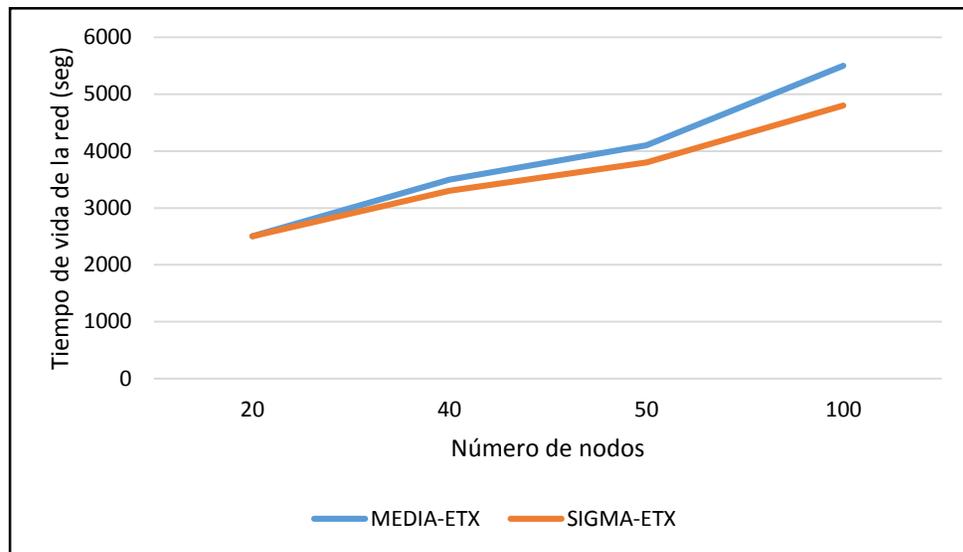
El promedio de la entrega de paquetes se calcula a partir de la ecuación  $PDR = (\text{Total Packets Received} / \text{Total Packets Sent}) * 100$ . La tasa de la entrega de paquetes de la métrica MEDIA-ETX es ligeramente mejor, lo que demuestra la validez de la F.O propuesta, ya que tiene menor congestión de paquetes en comparación con SIGMA-ETX.



**Ilustración 16:** Relación de entrega de paquetes.

#### 4.1.3. Tiempo de Vida.

En la ilustración 17, se muestra claramente la optimización de la F.O MEDIA, en cuanto a la Vida Útil de la Red, esto debido al proceso de selección de la métrica MEDIA-ETX para identificar la mejor ruta con mejores vecinos que puedan respaldar el envío de paquetes en caso de agotamiento y así evitar la pérdida de paquetes o latencia, ya que a mayor pérdida de paquetes mayor retransmisiones y a su vez mayor consumo de energía.



**Ilustración 17:** Tiempo de vida de la red

## CAPÍTULO 5

### 5. CONCLUSIONES

En este capítulo se suscitan las conclusiones que se establecieron como resultado del desarrollo de la investigación de enrutamiento en redes LLN para ofrecer QoS, además se indica la manera como se logran alcanzar los objetivos de la investigación; el despliegue de aplicaciones y los problemas de enrutamiento planteados por el protocolo RPL, las métricas de enrutamiento y las F.O, también han sido discutidas.

Para esto, en el estado del arte, se realizó una revisión detallada de las F.O MRHOF, OF0 y SIGMA-ETX, posteriormente se propone la F.O MEDIA, basada en la nueva métrica MEDIA-ETX, la cual combina la métrica del mínimo número de saltos y ETX, calculando la mejor ruta de encaminamiento utilizando la media de los valores de ETX entre cada nodo.

La F.O propuesta ofrece una mayor sensibilidad en los cambios que requiere el entorno, mejorando el rendimiento y el tiempo de vida de la red. Para validar su efectividad se diseñó y simuló una red de sensores inalámbrica Multisalto, donde se escogió el simulador Cooja, por sus características como; interfaz amigable, soporte con gran cantidad de nodos RPL y una API configurable, que obtiene datos específicos, que permiten ser graficados y analizados fácilmente.

Para buscar cubrir el espectro de posibilidades en redes LLN de uso densidades de nodos, de acuerdo al radio de transmisión de: 20, 40, 50 y 100 nodos, desplegados en una zona 100m\*100m.

Las métricas evaluadas fueron: Tiempo de Vida de la Red, Relación de Entrega de Paquetes (PDR), y latencia. Finalmente, se realizó un análisis comparativo del enrutamiento de los nodos. La F.O propuesta MEDIA, demuestra que es más eficiente con redes de gran cantidad de nodos por unidad de área, en redes LLN que ofrecen QoS; al comparar su implementación con los desempeños de enrutamiento de las F.O, OF0, MRHOF basado en los resultados presentados en [18].

---

Como resultado, se propuso la F.O MEDIA basada en la nueva métrica MEDIA-ETX, que optimizara el desempeño y la vida útil en las redes de baja potencia con pérdida de paquetes, alcanzado sus mejores métricas en cuanto a calidad de servicio.

Con base en el análisis de la literatura y las simulaciones realizadas, se plantean los desafíos futuros para las redes LLN con QoS. Los resultados obtenidos en el documento serán una referencia útil para el análisis del enrutamiento en este tipo de redes, y una motivación para los ingenieros de redes, al momento desarrollar soluciones de enrutamiento más efectivas para el campo del IoT.

### 5.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las simulaciones realizadas en Cooja, permitieron comparar los resultados de las F.Os MRHOF, OF0 y PER HOP-ETX presentados en [18], con la propuesta F.O MEDIA, a través de pruebas de simulación con distintas métricas; La siguiente tabla muestra los resultados de las simulaciones aplicadas a diferentes F.O, en distintos escenarios y con gran cantidad de nodos ( hasta 100 )

FUNCION OBJETIVO	Tiempo de vida de la red	Menor Latencia	Relacion de Entrega de paquetes
MEDIA	92%	29%	85%
SIGMA - ETX	80%	35%	80%
MRHOF	68%	42%	60%
OF0	57%	78%	40%

Tabla 5 : Valoración de resultados en las simulaciones.

La simulación realizada para la métrica de Latencia de Red, muestra que la latencia de las F.O OF0, MRHOF y SIGMA - ETX se presentan frente a MEDIA-ETX como de mayor porcentaje, tal como se observa en la tabla 5 con una menor Latencia de red del 44%.

La simulación realizada para la métrica Entrega de paquetes de Red, demuestra que la tasa de la entrega de paquetes de la F.O MEDIA es ligeramente mejor que SIGMA y MRHOF, pero muy superior a la OF0, lo que demuestra la validez de MEDIA-ETX, ya que tiene menor congestión de paquetes en comparación con OF0, MRHOF y SIGMA-ETX, tal como se observa en la tabla 5 con una entrega de paquetes del 85%.

La simulación realizada para la métrica Perdida de Energía, demuestra, que cuando la red es pequeña, por motivo de cálculos complejos, la F.O propuesta MEDIA puede consumir más energía, pero cuando la red se expande, MEDIA puede mantener mejores conexiones que MRHOF, y OF0, esto es ocasionado por la debilidad de sus conexiones, por lo que el consumo total de energía de la F.O MEDIA comparada con las otras dos F.O será menor. Tal como se muestra en la ilustración 18, con Potencia y consumo de energía del 53%.

La simulación realizada para la métrica Vida Útil de la Red, se muestra claramente la optimización de la F.O MEDIA en cuanto a esta métrica, esto debido al proceso de selección de MEDIA para identificar la mejor ruta con mejores vecinos que puedan respaldar al Sender en caso de agotamiento y así evitar la pérdida de paquetes o latencia, ya que a mayor pérdida de paquetes mayor retransmisiones y a su vez mayor consumo de energía.

## **5.2. RESPUESTA A LA PREGUNTA PROBLEMA**

A continuación, se plantea la respuesta a la pregunta problema inicialmente planteado

¿De qué manera es posible optimizar la eficiencia en términos de QoS del protocolo de enrutamiento RPL, para redes de baja potencia con pérdida de paquetes?

En los últimos años la popularidad del internet y de las redes inalámbricas no ha parado de crecer, La tecnología inalámbrica es la vía fundamental por la que los “objetos inteligentes”

---

se comunican entre ellos y hacia Internet. En este sentido, cobran importancia las redes LLN como la tecnología que permite la escalabilidad del IoT y con la funcionalidad suficiente para proporcionar su integración con la arquitectura actual de Internet [55][56] [2] [3].

En esta investigación se presenta una Función Objetivo, basada en una nueva métrica de enrutamiento, la cual ofrece un mejor rendimiento frente a la Calidad de Servicio (QoS), permitiéndoles a los nodos RPL, sensibilidad en los cambios que requiere el entorno de la red, y a los ingenieros de redes, la posibilidad de desarrollar soluciones de enrutamiento más efectivas para las IoT.

Es por esto que como resultado de esta investigación se presenta una mejora muy importante, en este sentido, al enrutamiento de redes LLN, que ofrece un mejor rendimiento frente a la Calidad de Servicio (QoS), permitiéndoles a los nodos RPL, sensibilidad en los cambios que requiere el entorno de la red, y a los ingenieros de redes, la posibilidad de desarrollar soluciones de enrutamiento más efectivas para las IoT,

### **5.3. TRABAJOS FUTUROS**

En el futuro es necesario realizar investigaciones acerca de la relación entre este tipo de métricas de calidad de servicio y MEDIA-ETX; descubrir de qué manera es posible optimizar la eficiencia de las otras métricas de enrutamiento, en comparación con MEDIA-ETX. Y así mejorar la contribución de QoS en cada una de ellas, y su relación con la vida útil de la red; considerar la relación de estos aspectos, posibilitara a posteriores investigadores, delimitara los factores de análisis para el beneficio de estos resultados.

Otro de los desafíos de RPL, en LLN es incuestionablemente el de la seguridad informática. Ya que muchas de las vulnerabilidades de las redes de sensores sin duda harán la transición a IoT, particularmente con ataques RPL como, Sinkhole, HELLO Flood, Wormhole y Clone ID, que se producen utilizando nodos intrusos. Por esto se debe tener cuidado, ya que muchos dispositivos IoT (nodos) pueden tener sistemas operativos vulnerables a otros tipos de ataques, como los android.

---



---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Mainetti, L. Patrono, and A. Vilei, "Evolution of wireless sensor networks towards the internet of things: A survey," pp. 1-6: IEEE.
  - [2] P. T. Alonso, "Redes de sensores, Fundamentos y aplicaciones," *Santander, Julio*, 2008.
  - [3] F. O. Tapia, "Redes de Sensores Inalámbricos," ed: ed, 2006.
  - [4] T. Clausen, C. Dearlove, and B. Adamson, "Jitter considerations in mobile ad hoc networks (MANETs)," 2070-1721, 2008.
  - [5] U. Herberg and T. Clausen, "A comparative performance study of the routing protocols load and rpl with bi-directional traffic in low-power and lossy networks (lln)," pp. 73-80: ACM.
  - [6] S. Andreev and Y. Koucheryavy, "Internet of things, smart spaces, and next generation networking," Springer.
  - [7] X. Liu, Z. Sheng, C. Yin, F. Ali, and D. Roggen, "Performance analysis of Routing Protocol for Low power and Lossy Networks (RPL) in large scale networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 6, pp. 2172-2185, 2017.
  - [8] E. Ana De Pablo, "Development of a Wireless Sensor Network with 6LoWPAN Support," 2009.
  - [9] S. C. Ergen, "ZigBee/IEEE 802.15. 4 Summary," *UC Berkeley, September*, vol. 10, p. 17, 2004.
  - [10] T. Tsvetkov and A. Klein, "RPL: IPv6 routing protocol for low power and lossy networks," *Network*, vol. 59, 2011.
  - [11] T. Winter, "RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks," 2012.
  - [12] Y. Yang and J. Wang, "Design guidelines for routing metrics in multihop wireless networks," pp. 1615-1623: IEEE.
  - [13] O. Gnawali, "The minimum rank with hysteresis objective function," 2012.
  - [14] P. Thubert, "Objective function zero for the routing protocol for low-power and lossy networks (RPL)," 2012.
  - [15] N. Javaid, A. Javaid, I. A. Khan, and K. Djouani, "Performance study of ETX based wireless routing metrics," pp. 1-7: IEEE.
-

- 
- [16] J.-P. Vasseur, "Quality of service (QoS) configuration in low-power and lossy networks," ed: Google Patents, 2015.
- [17] J. Hurtado de Barrera, "Metodología de la investigación holística," *Fundacite-SYPAL. Caracas*, 1998.
- [18] P. Sanmartin, A. Rojas, L. Fernandez, K. Avila, D. Jabba, and S. Valle, "SIGMA Routing Metric for RPL Protocol," *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1277, 2018.
- [19] J.-P. Vasseur, M. Kim, K. Pister, N. Dejean, and D. Barthel, "Routing metrics used for path calculation in low-power and lossy networks," 2070-1721, 2012.
- [20] P. Karkazis *et al.*, "Design of primary and composite routing metrics for rpl-compliant wireless sensor networks," pp. 13-18: IEEE.
- [21] C. Lin, "Composite Metrics for Routing in Low Power and Lossy Networks," *inf cyut edu tw*.
- [22] "jsim," Available: <https://sites.google.com/site/jsimofficial/>
- [23] W. Xiao, J. Liu, N. Jiang, and H. Shi, "An optimization of the object function for routing protocol of low-power and lossy networks," pp. 515-519: IEEE.
- [24] P. Karkazis, P. Trakadas, H. C. Leligou, L. Sarakis, I. Papaefstathiou, and T. Zahariadis, "Evaluating routing metric composition approaches for QoS differentiation in low power and lossy networks," *Wireless networks*, vol. 19, no. 6, pp. 1269-1284, 2013.
- [25] W. Zhou, D. Zhang, and D. Qiao, "Comparative study of routing metrics for multi-radio multi-channel wireless networks," vol. 1, pp. 270-275: IEEE.
- [26] Y. Yang, J. Wang, and R. Kravets, "Interference-aware load balancing for multihop wireless networks," 2005.
- [27] Y. Yang, J. Wang, and R. Kravets, "Designing routing metrics for mesh networks," pp. 1-9.
- [28] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future generation computer systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, 2013.
- [29] A. M. Canalejo, "Trabajo Fin de Grado Ingeniería de Telecomunicación."
-

- 
- [30] R. Anwar, M. Bakhtiari, A. Zainal, and K. Qureshi, "A Survey of Wireless Sensor Network Security and Routing Techniques," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 1016-1026, 2015.
- [31] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, and D. Culler, "Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15. 4 networks," 2070-1721, 2007.
- [32] N. Kushalnagar, G. Montenegro, and C. Schumacher, "IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPANs): overview, assumptions, problem statement, and goals," 2070-1721, 2007.
- [33] P. Thubert and J. W. Hui, "Compression format for IPv6 datagrams over IEEE 802.15. 4-based networks," 2011.
- [34] E. Kim and D. Kaspar, "Design and Application Spaces for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs)," 2012.
- [35] T. Instruments. (junio). *Red WSN implementada con 6LoWPAN*. Available: <http://www.ti.com/wireless-connectivity/6lowpan/overview.html>
- [36] K. Machado, D. Rosário, E. Cerqueira, A. A. F. Loureiro, A. Neto, and J. N. de Souza, "A routing protocol based on energy and link quality for internet of things applications," *sensors*, vol. 13, no. 2, pp. 1942-1964, 2013.
- [37] E. Recommendation, "800: Definitions of terms related to quality of service," *International Telecommunication Union's Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) Std*, 2008.
- [38] R. Roman and J. Lopez, "Integrating wireless sensor networks and the internet: a security analysis," *Internet Research*, vol. 19, no. 2, pp. 246-259, 2009.
- [39] I. T. U. Strategy and P. Unit, "ITU Internet Reports 2005: The internet of things," *Geneva: International Telecommunication Union (ITU)*, 2005.
- [40] B. Mohamed and F. Mohamed, "Experimental evaluation of RPL protocol," pp. 455-458: IEEE.
- [41] K. Pister, P. Thubert, S. Dwars, and T. Phinney, "Industrial routing requirements in low-power and lossy networks," 2070-1721, 2009.
- [42] A. Brandt and G. Porcu, "Home automation routing requirements in low power and lossy networks," 2010.
-

- 
- [43] J. Ko, A. Terzis, S. Dawson-Haggerty, D. E. Culler, J. W. Hui, and P. Levis, "Connecting low-power and lossy networks to the internet," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 4, 2011.
- [44] J. Ko, S. Dawson-Haggerty, O. Gnawali, D. Culler, and A. Terzis, "Evaluating the Performance of RPL and 6LoWPAN in TinyOS," vol. 80, pp. 85-90.
- [45] N. T. Long, N. De Caro, W. Colitti, A. Touhafi, and K. Steenhaut, "Comparative performance study of RPL in wireless sensor networks," pp. 1-6: IEEE.
- [46] M. Zennaro and I. Trieste-Italy, "Introduction to wireless sensor networks," 2012, 2012.
- [47] Y. Li and M. T. Thai, *Wireless sensor networks and applications*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [48] R. Mac Ruairí, M. T. Keane, and G. Coleman, "A wireless sensor network application requirements taxonomy," pp. 209-216: IEEE.
- [49] J. del Valle, "Aplicaciones de redes de sensores inalámbricos," *La Semana vitivinícola*, no. 3269, pp. 1542-1545, 2009.
- [50] M. Corporaton, "Tmote Sky: Datasheet," ed, 2006.
- [51] wirelessensornetworks. *Tmote Sky*. Available: <https://wirelessensornetworks.weebly.com/blog/tmote-sky>
- [52] O. Gaddour, A. Koubâa, N. Baccour, and M. Abid, "OF-FL: QoS-aware fuzzy logic objective function for the RPL routing protocol," pp. 365-372: IEEE.
- [53] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman, "A taxonomy of wireless micro-sensor network models," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 6, no. 2, pp. 28-36, 2002.
- [54] K. Sohraby, D. Minoli, and T. Znati, *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [55] J. E. Salazar, C. G. García, C. S. Alarcón, and J. I. M. Novella, "Diffserv como solución a la provisión de QoS en Internet," *Universidad Carlos III*, 2001.
- [56] D. Gascón, "Redes de sensores inalámbricos, la tecnología invisible," *Revista MIT Technology Review*, pp. 53-55, 2010.
-