



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN
PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO MANTENIENDO LA CALIDAD DE
SERVICIO APLICADOS A RED DE SENSORES INALÁMBRICOS**

AUTOR: CARRANZA GAONA, SERGIO FRANCISCO

DIRECTOR: ING. ALVAREZ VEINTIMILLA, JORGE DAMIAN

SANGOLQUÍ

2018



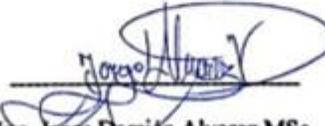
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO MANTENIENDO LA CALIDAD DE SERVICIO APLICADOS A RED DE SENSORES INALÁMBRICOS." realizada por el señor CARRANZA GAONA SERGIO FRANCISCO, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 1 de marzo del 2018



Ing. Jorge Damián Álvarez MSc.



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **SERGIO FRANCISCO CARRANZA GAONA**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO MANTENIENDO LA CALIDAD DE SERVICIO APLICADOS A RED DE SENSORES INALÁMBRICOS”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 1 de marzo del 2018

SERGIO FRANCISCO CARRANZA GAONA

C.C.: 1718130550



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, **SERGIO FRANCISCO CARRANZA GAONA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO MANTENIENDO LA CALIDAD DE SERVICIO APLICADOS A RED DE SENSORES INALÁMBRICOS**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 1 de marzo del 2018

SERGIO FRANCISCO CARRANZA GAONA

C.C.: 1718130550

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a Dios, a mis Padres por el apoyo incondicional, ya que han estado conmigo en todos los momentos de mi vida.

Sergio Francisco Carranza Gaona

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios, por estar conmigo siempre en esta etapa en todos los momentos nunca me dejo solo, a mis Padres Lucio y Lida, a mis hermanas Pao y Gaby, a mi cuñado Jacobo, a mis sobrinos Arlet y Andrés, por el apoyo y cariño que siempre me han brindado. A mis amigos John, Richard y Jean Pierre por estar conmigo en todos los momentos difíciles. A mi director y amigo Ing. Jorge Alvarez por su paciencia, ayuda y predisposición en la consecución de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT	xvii
GLOSARIO.....	xviii
1. DESCRIPCIÓN.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación e Importancia	3
1.3. Alcance del Proyecto.....	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. General	5
1.4.2. Específicos	5
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Redes de Sensores Inalámbricos (WSN).....	6
2.1.1. Introducción.....	6
2.1.2. Estándar IEEE 802.15.4	8
2.1.3. ZigBee	13
2.1.4. Topologías de Red.....	14

2.1.5. Redes Ad-Hoc	17
2.1.6. Aplicaciones	18
2.1.7. Eficiencia Energética en WSN	20
2.1.8. Protocolos de Enrutamiento	24
2.1.9. Protocolos de Enrutamiento basados en la calidad de servicio (QoS)	33
2.1.10. Protocolo de Enrutamiento SPEED.....	37
3. MATERIALES Y MÉTODOS	45
3.1. MATERIALES	45
3.1.1. Hardware y Software.....	45
4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	54
4.1. Criterios de Diseño.....	54
4.2. Implementación del protocolo por Defecto en la topología Star	56
4.3. Implementación del protocolo SPEED en la topología Star	58
4.4. Implementación del protocolo QEMPAR en la topología Star.....	59
4.5. Implementación del protocolo por Defecto en la topología Tree.....	60
4.6. Implementación del protocolo SPEED en la topología Tree	62
4.7. Implementación del protocolo QEMPAR en la topología Tree	63
4.8. Implementación del protocolo por Defecto en la topología Mesh	63
4.9. Implementación del protocolo SPEED en la topología Mesh.....	64
4.10. Implementación del protocolo QEMPAR en la topología Mesh.....	65
4.11. Medición de la Intensidad de Corriente mediante LabVIEW	65
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	69

5.1. Análisis topología Star aplicando protocolo de enrutamiento por Defecto con potencias mínima y máxima con distancia de 1 metro.....	70
5.2. Análisis topología Star aplicando protocolo de enrutamiento por Defecto con potencias mínima y máxima con distancia de 2 metros	72
5.3. Análisis topología Star aplicando protocolo de enrutamiento QEMPAR con potencias mínima y máxima con distancia de 1 metro.....	74
5.4. Análisis topología Star aplicando tres diferentes protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia mínima y máxima a la distancia de 2 metros	77
5.5. Análisis topología Tree aplicando tres diferentes protocolos de enrutamiento por Defecto, . SPEED y QEMPAR con potencia máxima.....	79
5.6. Análisis topología Mesh aplicando tres diferentes protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.....	82
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
6.1. Conclusiones	88
6.2. Recomendaciones.....	90
6.3. Trabajos Futuros en base al presente Proyecto de Investigación.....	91
REFERENCIAS	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Propiedades del IEEE 802.15.4.</i>	9
Tabla 2	<i>Bandas de Frecuencia 802.15.4.</i>	11
Tabla 3	<i>Parámetros Técnicos 802.15.4.</i>	11
Tabla 4	<i>Clasificación de los Protocolos de Enrutamiento según su nivel de Eficiencia Energética.</i>	31
Tabla 5	<i>Características Mota Iris XM2110.</i>	46
Tabla 6	<i>Características Arduino Nano.</i>	49
Tabla 7	<i>Intensidad de Corriente consumida por la mota transmisora en potencias mínima y máxima con 1 metro.</i>	71
Tabla 8	<i>Intensidad de Corriente consumida por la mota transmisora en potencias mínima y máxima con 2 metros.</i>	73
Tabla 9	<i>Intensidad de Corriente consumida por la mota transmisora en potencias mínima y máxima con 2 metros.</i>	75
Tabla 10	<i>Media de la Intensidad de Corriente consumida por mota transmisora aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.</i>	80
Tabla 11	<i>Media de la Intensidad de Corriente consumida por mota intermedia aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.</i>	81
Tabla 12	<i>Media de la Intensidad de Corriente consumida por mota transmisora aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR</i>	.

<i>con potencia máxima.</i>	83
Tabla 13 <i>Comparación de Intensidad de Corriente, Porcentaje de Error y Eficiencia Energética , en topología Mesh en mota transmisora, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.</i>	84
Tabla 14 <i>Media de la Intensidad de Corriente consumida por mota intermedia 1 aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.</i>	85
Tabla 15 <i>Media de la Intensidad de Corriente consumida por mota intermedia 2 aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.</i>	86

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Red inalámbrica de sensores.....	7
<i>Figura 2</i> Arquitectura mota o nodo inalámbrico	8
<i>Figura 3</i> Definición de canales	10
<i>Figura 4</i> Relación 802.15.4 y OSI.....	12
<i>Figura 5</i> Espectro estándares 802.....	13
<i>Figura 6</i> Comparación de robustez entre tecnologías inalámbricas	14
<i>Figura 7</i> Topología Star.....	15
<i>Figura 8</i> Topología Tree.....	16
<i>Figura 9</i> Topología Mesh	16
<i>Figura 10</i> Línea del tiempo aplicaciones WSN.....	20
<i>Figura 11</i> Mecanismos para lograr eficiencia energética en WSN a nivel de hardware y de software.....	21
<i>Figura 12</i> Niveles de la Eficiencia Energética	23
<i>Figura 13</i> Taxonomía de los Protocolos de Enrutamiento de WSN.....	24
<i>Figura 14</i> Paquetes pequeños enviados por diferentes rutas	37
<i>Figura 15</i> Componentes del Protocolo de Enrutamiento Speed.....	38
<i>Figura 16</i> Definiciones NS y FS.....	41
<i>Figura 17</i> Reencaminamiento de contrapresión caso uno	43
<i>Figura 18</i> Mota Iris XM2110	46
<i>Figura 19</i> Diagrama conector 51 pines Iris XM2110.....	47
<i>Figura 20</i> Gateway MIB520.....	48
<i>Figura 21</i> Arduino Nano.....	49

Figura 22 Fuente de alimentación GW instek gpc-30300	50
Figura 23 Interfaz MoteConfig 2.0.....	51
Figura 24 Interfaz MoteView 2.0	52
Figura 25 Circuito en serie, para medición de corriente consumida	55
Figura 26 Escenario real topología Star	56
Figura 27 Parámetros de configuración en Software MoteConfig 2.0.....	57
Figura 28 Topología STAR	57
Figura 29 Programación en Notepad del protocolo de enrutamiento SPEED.....	59
Figura 30 Programación en Notepad del protocolo de enrutamiento QEMPAR	60
Figura 31 Escenario real topología Tree	61
Figura 32 Topología TREE	61
Figura 33 Escenario real topología Mesh.....	63
Figura 34 Topología MESH	64
Figura 35 Conexión de Arduino y Circuito de medición	66
Figura 36 Modo gráfico y configuración del programa en LabVIEW para medición de corriente y voltaje	67
Figura 37 Panel Frontal del programa en LabVIEW para medición de corriente y voltaje	68
Figura 38 Intensidad de Corriente en topología Star utilizando el protocolo de enrutamiento por Defecto con potencias mínima y máxima con distancia de 1 metro	72
Figura 39 Intensidad de Corriente en topología Star utilizando el protocolo de enrutamiento por Defecto con potencias mínima y máxima con distancia. de 2 metros.....	74

Figura 40 Intensidad de Corriente en topología Star utilizando el protocolo de enrutamiento QEMPAR con potencias mínima y máxima con distancia de 1 metro.....	76
Figura 41 Comparación Intensidad de Corriente en topología Star, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia mínima y distancia de 1 metro.....	76
Figura 42 Comparación Intensidad de Corriente en topología Star, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima y distancia de 1 metro.....	77
Figura 43 Comparación Intensidad de Corriente en topología Star, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia mínima y distancia de 2 metros.....	78
Figura 44 Comparación Intensidad de Corriente en topología Star, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima y distancia de 2 metros.....	79
Figura 45 Intensidad de Corriente en topología Tree en mota transmisora, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.....	80
Figura 46 Intensidad de Corriente en topología Tree en mota intermedia, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.....	82
Figura 47 Intensidad de Corriente en topología Mesh en mota transmisora, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con	

	xv
potencia máxima.....	83

Figura 48 Intensidad de Corriente en topología Mesh en mota intermedia 1, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.....85

Figura 49 Intensidad de Corriente en topología Mesh en mota intermedia 2, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.....87

RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se realizó el análisis de la eficiencia energética en una red de sensores inalámbricos (WSN), en las topologías Star, Tree y Mesh implementando 3 protocolos de enrutamiento, los cuales son: por Defecto, QEMPAR y SPEED estos dos últimos enfocados específicamente a la calidad de servicio (QoS), utilizando el kit de sensores fabricados por CROSSBOW IRIS que trabajan en la banda de 2.4 GHz. Se realizó el análisis del funcionamiento de los protocolos de enrutamiento los cuales abarcan el algoritmo SNGF (Stateless Non-Deterministic Geographic Forwarding) y el concepto de multi-salto para el protocolo de enrutamiento SPEED, mientras que para el protocolo de enrutamiento QEMPAR el funcionamiento se basa en el descubrimiento de ruta, idoneidad de enlace, multi-salto y variedad de ruta. La configuración se realizó en el software MoteConfig 2.0 fabricado por Crossbow Technology, para programar los nodos sensores (Motas) se utilizó el software Notepad en el lenguaje NesC, mediante descargas precompiladas de aplicaciones firmware XMesh/TinyOS, permitiendo configurar Mote ID, Group ID, canales RF y potencia RF; posteriormente visualizar los resultados de transmisión y recepción en el software MoteView 2.0., finalmente con la ayuda de LabVIEW, un Arduino nano y un circuito en serie poder visualizar el consumo de corriente de las mota transmisora e intermedias, con el fin de analizar la eficiencia energética de los diferentes protocolos y topologías planteadas.

Palabras Claves:

- **WSN**
- **QEMPAR**
- **SPEED**
- **RF**

ABSTRACT

In this research project the analysis of energetic efficiency in a wireless sensor network (WSN) was performed, in topologies of Star, Tree, and Mesh implementing three routing protocols, which are QEMPAR, and SPEED by default. These two specifically are focused into quality service (QoS), and use the kit of sensors manufactured by CROSSBOW IRIS that operates on 2.4 GHz. band. Also, It was performed the analysis of routing protocol performances which includes the algorithm SNGF (Stateless Non-Deterministic Geographic Forwarding), and the multi-hop concept for the routing protocol SPEED, while for the routing protocol QEMPAR the performance is based on the discovery of route, suitability of the link, multi-hop, and variety of the route. The configuration was executed with the software MoteConfig 2.0 manufactured by Crossbow Technology. In order to program the sensor nodes (Motas), it was used the software Notepad employing NescC language, through precompiled downloads of firmware applications Mesh/TinyOS, allowing the set up of Mote ID, Group ID, Channels RF, and Power RF; subsequently visualizes the results of broadcasting and receiving in the MoteView software 2.0. finally with the help of LabVIEW, an Arduino nano and a series circuit to be able to visualize the current consumption of the transmitter and intermediates, in order to analyze the energetic efficiency of different protocols and topologies already set.

Key Words:

- WSN
- QEMPAR
- SPEED
- RF

GLOSARIO**A**

API Conjunto de funciones y procedimientos que utilizan diferentes aplicaciones con el fin de lograr comunicación entre ellas.

I

ISM Industrial, Scientific and Medical, son bandas para uso no comercial de radiofrecuencia en áreas industrial, científica y médica.

M

MMSPEED Multipath Multi-SPEED Protocolo de enrutamiento con QoS diseñado para sensores inalámbricos.

N

NesC Lenguaje de programación basado en C, dirigido a sistemas embebidos.

O

Overhead Tiempo de procesamiento utilizado por el software de los dispositivos de red.

Q

QEMPAR QoS and Energy Aware Multi-Path Routing, Protocolo de enrutamiento con QoS diseñado para sensores inalámbricos.

S

SAR Single-Aliquot Regenerative-Dose, Protocolo de enrutamiento con QoS diseñado para sensores inalámbricos.

Sink Mota o nodo recolector de información generada en un intervalo de tiempo.

SNGF Stateless Non-deterministic Geographic Forwarding o Reenvío geográfico no determinista sin estado, algoritmo que utiliza el protocolo de enrutamiento SPEED para su funcionamiento.

SPEED Protocolo de enrutamiento con QoS diseñado para sensores inalámbricos.

T

TinyOS Es un sistema operativo libre, el cual consta de código abierto para el diseño de redes de sensores inalámbricos.

W

WSN Wireless sensor networks o red de sensores inalámbricos.

CAPÍTULO I

1. DESCRIPCIÓN

1.1. Introducción

Una red de sensores inalámbricos o WSN (Wireless Sensors Network), se refiere a una red comprendida por varios dispositivos llamados motas o nodos, capaces de medir diferentes variables del ambiente como son temperatura, humedad, luminosidad etc. Además son capaces de procesar y comunicar la información de manera inalámbrica (Jain., 2004).

Las aplicaciones de las WSN son varias. Por ejemplo, en el medio ambiente: detección de inundaciones, agricultura, monitoreo de clima, detección de incendios; en defensa: monitoreo de ataques químicos, biológicos y nucleares; en salud: monitoreo de pacientes y doctores; en el hogar: automatización del mismo. Las WSN en aplicaciones comerciales se encuentran: la detección y seguimiento de vehículos, control del tráfico y movilización. Es importante mencionar que la red de sensores inalámbricos es controlada y administrada por diferentes entidades ya sean civil, comercial, industrial o del gobierno (Kazem Sohraby, 2007) .

La eficiencia energética se refiere a la maximización del tiempo de vida de la red, reduciendo el consumo de intensidad de corriente. Existen mecanismos que permiten lograr eficiencia energética como son la Técnica de Enrutamiento de Protocolos, Técnicas de Reducción de Datos,

Protocolos de Reducción del Overhead, Esquemas Sleep/Awake, Optimización de la Interfaz de Radio y Reposición de la Batería.

La Técnica de Enrutamiento de Protocolos tiene como objetivo maximizar la vida de la red reduciendo al mínimo la energía consumida por la transmisión de extremo a extremo. El consumo de corriente de transmisión de extremo a extremo permite determinar la eficiencia energética utilizando diferentes protocolos de enrutamiento.

La utilización de la Técnica de Enrutamiento de Protocolos para lograr eficiencia energética en una WSN es la más usada en la actualidad, es por esto que existen protocolos, basados en Estructura de la Red, este se divide en Enrutamiento Plano, Enrutamiento Jerárquico y Enrutamiento según la ubicación, Protocolos de Enrutamiento basados en la Operación, este se divide en Enrutamiento basado en la Negociación, Multiruta, Consulta, Calidad de Servicio (QoS), Bio-inspirados, Coherente y No Coherente.

En los protocolos de enrutamiento basados en Calidad de Servicio (QoS), es importante equilibrar la energía y la calidad. Las métricas de calidad de servicio que se consideran en la transmisión de datos a la estación base son: la latencia, la energía, el ancho de banda, entre otros (Aulakh, 2013). Es importante tener en cuenta los parámetros y requisitos en términos de calidad de servicio para el enrutamiento en WSN. Tanto la tolerancia a fallos y fiabilidad requieren un mayor despliegue de sensores para que la red pueda seguir funcionando correctamente y entregar los datos precisos detectados al SINK a pesar de alguna falla de ellos (Fahmy, 2004). Algunos protocolos de enrutamiento de QoS son: SAR, SPEED, MMSPEED, QEMPAR.

1.2. Justificación e Importancia

La eficiencia energética tiene por objetivo reducir el consumo de energía o el uso eficiente de la energía. Un dispositivo es energéticamente eficiente al momento que consume una cantidad inferior a la media de energía para realizar una actividad. Dicho de otra manera, producir más con menos energía.

Según el Observatorio de Eficiencia Energética, el 95 por ciento de las empresas valoran la eficiencia energética como “una oportunidad para mejorar la competitividad”. Y es que lograr la misma producción reduciendo el consumo energético tiene grandes beneficios desde el punto de vista ambiental y económico para las empresas (Remica, 2016).

Actualmente la calidad de servicio (QoS) es un parámetro importante al momento de utilizar un protocolo de enrutamiento. Las ventajas de un protocolo de enrutamiento con QoS son la priorización del tráfico, mayor fiabilidad y puntualidad en la WSN.

La mayor parte de los protocolos de enrutamiento enfocados a la calidad de servicio (QoS), no han sido implementados ni puestos a prueba en equipos reales de la marca CROSSBOW. Por lo tanto, este proyecto de investigación se enfocará en los resultados obtenidos de la implementación, con el fin de comprobar los mismos en estudios teóricos anteriores, esperando que los resultados sean de ayuda para futuras investigaciones en el Departamento de Eléctrica y Electrónica.

1.3. Alcance del Proyecto

En el presente proyecto de investigación se realizará el análisis de la eficiencia energética en protocolos de enrutamiento (QEMPAR y SPEED) manteniendo la calidad de servicio aplicados a red de sensores inalámbricos. Como primera parte se propone realizar el estudio de los diferentes protocolos de enrutamiento enfocados a la calidad de servicio (QoS), una vez elegidos los protocolos de enrutamiento, analizar el funcionamiento, características, ventajas y desventajas de los mismos.

Se efectúa la implementación de los protocolos de enrutamiento en este caso serán QEMPAR y SPEED enfocados específicamente a la calidad de servicio (QoS), en 3 diferentes topologías de red, Mesh, Star y Tree. Mediante el lenguaje de programación NesC, se incorporará a las motas el algoritmo correspondiente para cada protocolo de enrutamiento. Una vez hecha la implementación de los protocolos de enrutamiento en las Motas o nodos, con el programa LabVIEW se medirá la corriente de transmisión de extremo a extremo.

Finalmente se realizará la comparación de la corriente consumida de los diferentes protocolos de enrutamiento enfocados a la calidad de servicio (QoS) incluido el protocolo por defecto de los equipos CROSSBOW. Las conclusiones obtenidas en el proyecto de investigación, serán mostradas con el fin de ayudar para futuras investigaciones relacionadas al tema.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

- Analizar la eficiencia energética en redes de sensores inalámbricos utilizando protocolos de enrutamiento que mantengan la calidad de servicio y disminuyan el consumo energético en la transmisión de datos.

1.4.2. Específicos

- Investigar los diferentes mecanismos para lograr eficiencia energética en una red de sensores inalámbricos.
- Investigar el funcionamiento de los protocolos de enrutamiento QEMPAR y SPEED que son enfocados a la calidad de servicio (QoS) para WSN.
- Implementar los diferentes algoritmos de los protocolos de enrutamiento QEMPAR y SPEED en tres topologías Mesh, Star, Tree y determinar el comportamiento de la red.
- Analizar y comparar los valores de consumo de intensidad de corriente obtenidos utilizando diferentes protocolos de enrutamiento enfocados a la calidad de servicio (QoS) en una red de sensores inalámbricos, con el fin de obtener el menor consumo energético.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Redes de Sensores Inalámbricos (WSN)

2.1.1. Introducción

Actualmente los sensores han abarcado un gran espacio en el mercado, es por esto que se los puede encontrar en diferentes dispositivos electrónicos. La mayoría de sensores tienen el problema de procesar y analizar los datos que son captados, teniendo la limitante de funcionar como un transductor, es decir medir varias variables y enviar la información captada a una base central.

Una red de sensores inalámbricos se refiere a la infraestructura compuesta por varios elementos tales como: medición, comunicación y cómputo, el cual permiten al administrador instrumentar, observar y reaccionar a eventos, principalmente a fenómenos naturales específicamente (Kazem Sohraby, 2007).

Con el pasar de tiempo las WSN han evolucionado con el fin de resolver problemas relacionados con el consumo de potencia, tamaño de equipos, costo de implementación y por último mantenimiento. Las características principales de estas redes son su facilidad de

implementación y por ser auto configurables. La eficiencia energética cumple un papel fundamental ya que permite obtener una alta tasa de autonomía logrando así que sean altamente operativas (Galarza, 2016).

Una red de sensores inalámbricos está compuesta por la estación base en donde se podrán verificar los datos obtenidos por cada mota o nodo, cuenta con un gateway el cual permite la conexión inalámbrica con el fin de que los nodos puedan comunicarse los unos con otros como se observa en la Figura 1.

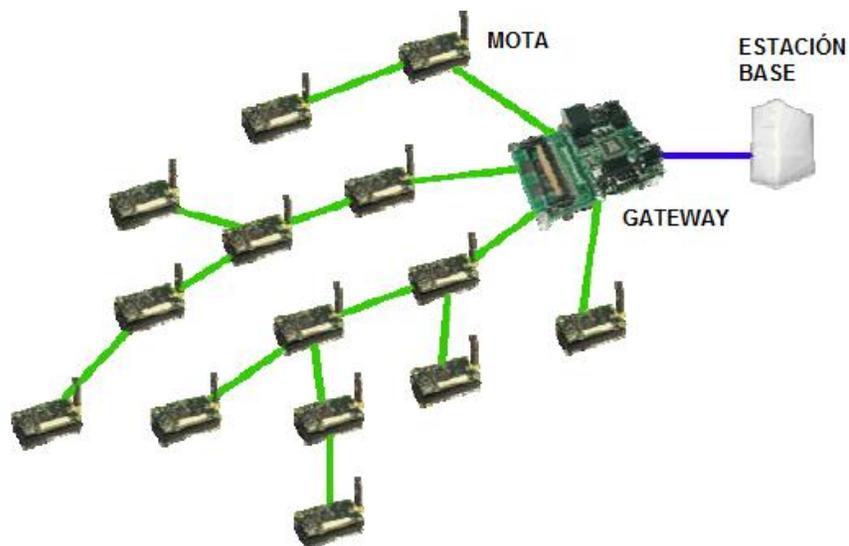


Figura 1 Red inalámbrica de sensores

Fuente: (Roberto Fernández Martínez, 2009)

En la Figura 2 se observa la arquitectura de la mota o nodo que consta de un microprocesador, una fuente de alimentación, memoria, dispositivos de radiofrecuencia y por último cuenta con sensores, los cuales pueden medir: temperatura, humedad, luminosidad y posición del mismo etc. Una de las redes de sensores más grandes desarrollados hasta la fecha consistió en 800 motas o

nodos y fue puesta en servicio el 27 de agosto del 2001, por un periodo de tiempo corto, en la Universidad de Berkeley para demostrar la potencia de los mismos (Adams, 2011).



Figura 2 Arquitectura mota o nodo inalámbrico

Fuente: (Roberto Fernández Martínez, 2009)

2.1.2. Estándar IEEE 802.15.4

Se refiere a un estándar el cual define el nivel físico (PHY) y el control de acceso al medio (MAC), proporcionando servicios a redes inalámbricas de área personal con tasas de transmisión bajas (low-rate wireless personal area network, LR-WPAN). Las características más importantes en este estándar son su flexibilidad de red, bajos costos, bajo consumo de energía; este estándar se puede utilizar para muchas aplicaciones en el hogar que requieren una tasa baja en la transmisión de datos.

En el año 2000, dos grupos especialistas en estándares (ZigBee y el grupo 15 de trabajo IEEE 802) realizaron varios estudios, con el objetivo de estandarizar redes inalámbricas de bajo consumo de energía y bajos costos, para ser utilizadas en ambientes industriales y caseros (Freescale, 2007). Existieron otras opciones para dichos ambientes como son WI-FI y Bluetooth, pero por la complejidad del funcionamiento y por no soportar anchos de banda mayores en los

cuales trabajan los sensores no pudo ser utilizado WI-FI. Por otra parte no se utilizó Bluetooth ya que su tecnología es costosa para combinarla con los sensores con el fin de satisfacer la conexión deseada.

Esto abrió la puerta a un nuevo estándar IEEE 802.15.4 que puede operar en la banda industrial, médica y científica (Industrial Scientific and Medical, ISM) , disponible a nivel mundial, soportando tasas de transmisión de datos de hasta 250 kbps en radios de 10 a 100 metros como se detalla en la Tabla 1. Esta tecnología fue diseñada para complementar a las demás tecnologías inalámbricas como Bluetooth, Wi-Fi y ultra-wideband (UWB), las cuales son dirigidas comercialmente a aplicaciones de medición donde las conexiones cableadas no son tomadas en cuenta, y donde el bajo costo y consumo de energía son parámetros requeridos (Jiménez, 2007) .

Tabla 1

Propiedades del IEEE 802.15.4.

Propiedad	Rango
Rango de transmisión de datos	868 MHz: 20kb/s; 915 MHz: 40kb/s; 2.4 GHz: 250 kb/s.
Alcance	10 – 20 m.
Latencia	Abajo de los 15 ms.
Canales	868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales.
Bandas de frecuencia	Dos PHY: 868/915 MHz y 2.4 GHz.
Direccionamiento	Cortos de 8 bits o 64 bits IEEE
Canal de acceso	CSMA-CA y ranurado CSMA-CA

2.1.2.1. Capa Física

Capa física (PHY) permite la transmisión de información o datos en el medio físico; mediante la interfaz de gestión se puede acceder a todos los servicios de gestión de nivel con el fin de que la capa física pueda controlar el transceptor de radiofrecuencia y realizar la elección de canales, señal y consumo. Existen 27 canales entre tres bandas, la capa física trabaja en una de las tres bandas de frecuencia de uso no regulado como se observa en la Figura 3.

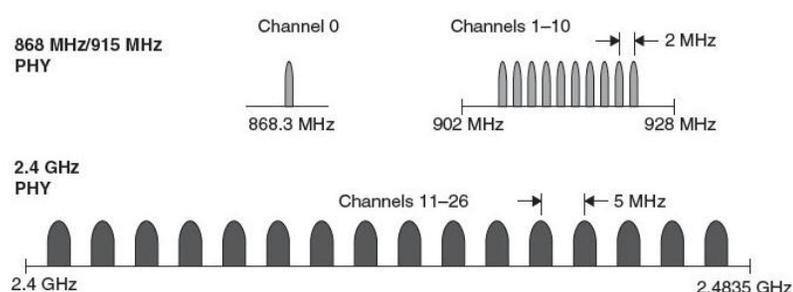


Figura 3 Definición de canales

Fuente: (Adams, 2011)

La banda de 868 MHz opera en un canal (Canal 0) entre 868-868.6 MHz, la banda de 915 MHz opera en diez canales (Canales 1-10) entre los 902.0 y 928.0 MHz teniendo una separación entre cada canal de 2MHz. En la capa física de banda de 2.4 GHz contiene 16 canales (Canales 11-26) entre los 2.4-2.4835 GHz, la separación es de 5 MHz de sus frecuencias centrales con el fin de que la transmisión y recepción sea la adecuada.

En la Tabla 2 se observa las bandas de la capa física: en los 868 MHz se muestra que en Europa opera en 865 MHz y en Estados Unidos la banda de 915 MHz definida como ISM, mientras que la capa física de la banda de 2.4 GHz se define como banda ISM, esta se encuentra disponible a nivel mundial.

Tabla 2*Bandas de Frecuencia 802.15.4.*

Capa Física	Banda	Lugar
868 MHz	868-868.8 MHz	Europa
915 MHz	902-928 MHz	Estados Unidos
2.4 GHz	2400-2483.5 MHz	Nivel Mundial

Fuente: (Adams, 2011)

La capa física en los 868/915 MHz permite trabajar con velocidades de transmisión de 20 kb/s y 40 kb/s respectivamente, ofrece una modulación BPSK, mientras que en los 2.4 GHz las velocidades de transmisión de 250 kb/s, utiliza una técnica semi-ortogonal basada en DSSS como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3*Parámetros Técnicos 802.15.4.*

Capa Física	Banda(MHz)	Velocidad de bits (kbps)	Velocidad de símbolo (kbps)	Modulación
868 MHz	868-868.8	20	20	BPSK
915 MHz	902-928	40	40	BPSK
2.4 GHz	250	250	62.5	16-Semi orthogonal

Fuente: (Adams, 2011)

Existen varias aplicaciones las cuales trabajan con ciertas velocidades de transmisión por ejemplo, en la PHY de los 868/915 MHz se puede ocupar para lograr mayor sensibilidad y áreas de cobertura extensas, con lo que se reduce el número de nodos requeridos para cubrir un área geográfica, mientras que la velocidad de transmisión en la PHY de los 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir salidas superiores y de poca latencia (Galarza, 2016).

2.1.2.2. Capa Enlace de Datos

IEEE 802 divide al DLL (Capa de Enlace de Datos) en dos sub capas: la capa de control de enlaces lógicos (Control de Enlace Lógico, LLC), que es común para todos los estándares 802 y la de enlace de acceso al medio (Control de Acceso al Medio, MAC). Esta depende del hardware y de la implementación física. En la Figura 4 se observa la relación que existe entre 802.15.4 y el modelo de referencia para la interconexión de sistemas abiertos (OSI).

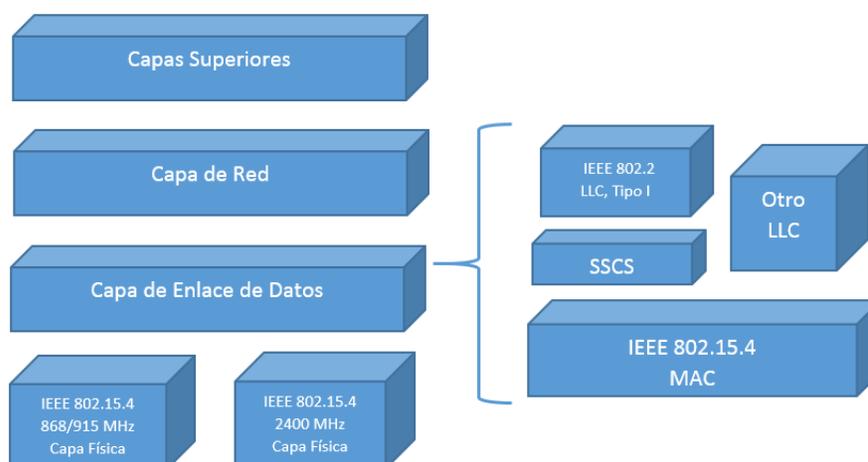


Figura 4 Relación 802.15.4 y OSI

La sub-capa MAC envía tramas MAC mediante el canal físico, proporcionando servicios de datos. Permite obtener una interfaz de control y regula el acceso al canal físico y al balizado de la red. Además se encarga de la validación de las tramas y las asociaciones/disociaciones entre nodos, proveyendo slots de tiempo. La MAC permite dos tipos de servicios hacia las capas superiores que se acceden a través de dos puntos de acceso a servicios (Punto de Acceso al Servicio SAPs). La LLC también puede acceder a la MAC a través de los SAPs (Galarza, 2016).

- (MAC subcapa de parte común, MCPS-SAP) para datos de la MAC.
- (MAC capa de entidad de gestión, MLME-SAP) para servicios de administración.

2.1.3. ZigBee

Se refiere a una tecnología inalámbrica de bajo consumo, el objetivo de su creación fue implementar aplicaciones enfocadas a la seguridad y automatización de forma inalámbrica. La relación entre IEEE 802.11 y Wi-Fi es parecida a la relación que existe entre IEEE 802.15.4 y ZigBee. La tecnología ZigBee utiliza la banda ISM para fines industriales, científicos y médicos. Al momento de diseñar dispositivos, la industria prefiere trabajar en la banda de 2.4 GHz por ser libre en todo el mundo. La creación de ZigBee se centra en la sencillez y bajo costo, en comparación a otras redes inalámbricas como Bluetooth. En la Figura 5 se observa el espectro de ocupación en las bandas de los estándares 802.

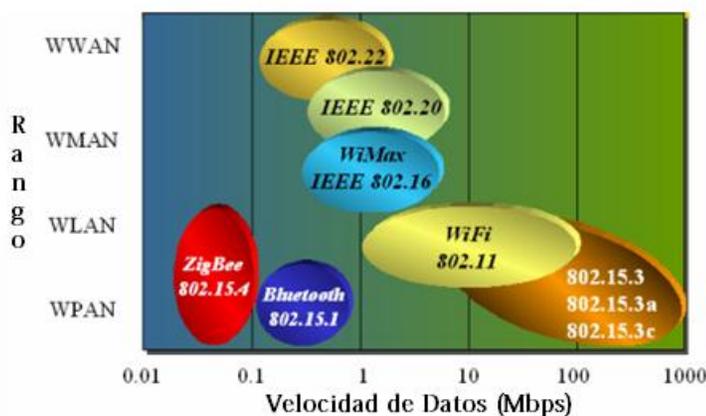


Figura 5 Espectro estándares 802

Fuente: (RUA, 2008)

En la banda de 2.4 GHz utiliza la modulación de espectro expandido DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) , en donde la velocidad de transmisión es de 250 Kbps y su potencia es de 1mW cubriendo un rango de 13 metros de radio. En la Figura 6 se visualiza la robustez de ZigBee en comparación con otras tecnologías. ZigBee opera sobre IEEE 802.15.4 el cual permite trabajar perfectamente con baja relación de señal ruido.

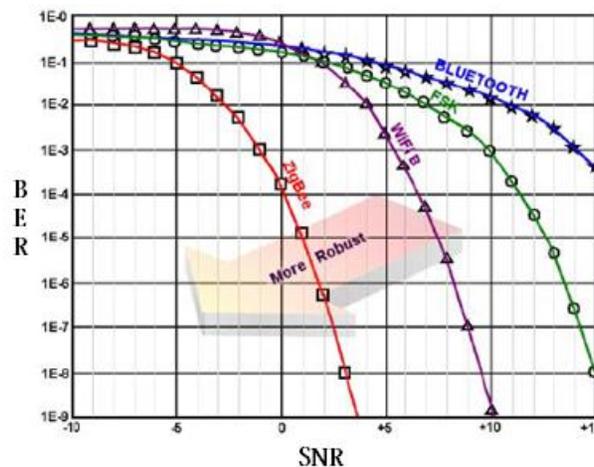


Figura 6 Comparación de robustez entre tecnologías inalámbricas

Fuente: (RUA, 2008)

2.1.4. Topologías de Red

Las topologías que se aplicarán en este proyecto de investigación serán Mesh, Star y Tree, donde cada una cuenta con ventajas, desventajas y desafíos. La palabra topología significa cómo será la configuración de los componentes en este caso las motas o nodos, y cómo los datos son transmitidos a través de la configuración de la topología.

2.1.4.1. Topología Star

La topología Star o Estrella como se observa en la Figura 7, se refiere al sistema donde la información enviada solo da un salto (monosalto) y donde todas las motas o nodos se encuentran

en comunicación directa con la puerta de enlace o Gateway, donde la distancia varia de 30 a 100 metros. La puerta de enlace o Gateway permite transmitir los datos a la estación base con el fin de la monitorización de la red. Las motas o nodos finales no comparten información entre ellos, es por esto que el encargado de realizar este trabajo es el Gateway.

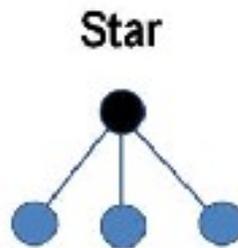


Figura 7 Topología Star

2.1.4.2. Topología Tree

La topología Tree o Árbol como se observa en la Figura 8, se refiere a un sistema multisalto, en donde cada nodo puede enviar información y recibir información de otro nodo, a diferencia con la topología Star. La propagación de la información a través de los nodos al Gateway es posible; el fallo de esta topología es alto, ya que van a existir diferentes caminos para llegar a la puerta de enlace o Gateway. Si una mota o nodo falla la red reconfigura el camino para llegar al objetivo. Además depende del número de motas o nodos y la distancia que existe entre ellos, para experimentar periodos de retrasos y espera elevados.

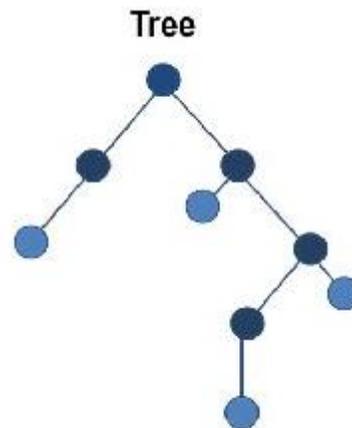


Figura 8 Topología Tree

2.1.4.3. Topología Mesh

La topología Mesh, como se observa en la Figura 9 tiene por objetivo combinar las ventajas de las 2 anteriores topologías mencionadas, como el bajo consumo y la simplicidad de la topología Star y la posibilidad de cubrir grandes distancias, con la capacidad de poder reorganizarse y descubrir nuevas rutas de la topología Tree.

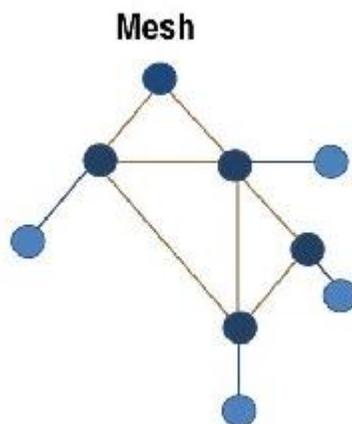


Figura 9 Topología Mesh

2.1.5. Redes Ad-Hoc

En la actualidad las redes ad-hoc con topología Mesh son las utilizadas al momento de implementar una red de sensores inalámbricos. La principal característica de las redes ad-hoc es que todos los dispositivos son parte de la red, en donde las motas o nodos permiten retransmitir la información entre ellos. Esta característica permite encaminar los distintos paquetes a los diferentes destinos sin tener una conexión directa al Gateway. El objetivo principal de estas redes es crear de una forma sencilla y rápida redes temporales para implementarlas en lugares que no cuentan con la infraestructura necesaria.

Las características de la red ad-hoc son:

- Seguridad: Las redes inalámbricas son propensas a ataques, el atacante puede emular una mota o nodo con el fin de capturar paquetes de información, y destruir la ruta propuesta en la red.
- Movilidad: Las motas o nodos se pueden ubicar en cualquier parte del lugar en el que se implementó, sin perder conexión, siempre y cuando estas se encuentren en el radio de conexión.
- Multisalto: Con el fin de utilizar la topología Mesh, y poder utilizar las motas o nodos intermedios para la retransmisión de la información.
- Escalabilidad: Poder implementar más motas o nodos en la red, este proceso es sencillo y transparente.
- Eficiencia energética: Existen diferentes mecanismos que permiten lograr eficiencia energética en las redes ad-hoc, ya sea utilizando baterías recargables o utilizar protocolos eficientes, con el fin de mejorar el rendimiento y prolongar la vida útil de las baterías.

- Auto organización: De forma autónoma la red configura parámetros como: encaminamiento, rutas, dirección etc.

2.1.6. Aplicaciones

Las WSN son un conjunto de motas o nodos de tamaño reducido con una capacidad computacional elevada, su precio es bajo y pueden soportar condiciones ambientales de todo tipo enviando la información captada a la estación base. En conclusión las WSN pueden ser utilizadas para un amplio rango de aplicaciones.

Las WSN pueden dividirse en dos tipos de redes: las redes multisalto y las monosalto. Las redes monosalto se refiere a las redes que conectan directamente con la estación base y como su propio nombre lo indica, la información es emitida desde el nodo directamente con la estación base. Y en las redes multisalto, la información es retransmitida por varios nodos antes de llegar a la estación base (Roberto Fernández Martínez, 2009).

En la Figura 10 se observa que desde el 2002 las investigaciones de las aplicaciones con WSN se han ido extendiendo al pasar de los años, las aplicaciones más destacadas son:

- Monitorización de estructuras y construcciones: En los países de Estados Unidos y Canadá se emplea este tipo de monitorización con WSN, 25 trillones de dólares han sido invertidos en diferentes estructuras. La tecnología usada en las estructuras se llama SHM (Structural Health Monitoring), la cual es usada para la monitorización de la infraestructura en el puente Golden Gate en San Francisco.

- Aplicaciones biomédicas : Para poder monitorizar las señales vitales de las personas, más aún de las personas mayores que necesitan un seguimiento permanente de sus actividades, permitiendo así a las personas que cuidan de los adultos mayores reducir el trabajo en un cierto porcentaje.
- Monitorización agraria: En este sector las WSN cumplen funciones importantes, ya que permiten monitorizar las condiciones del clima, los cuales permiten una mejor producción y calidad del producto que se está monitoreando.
- Monitorización avícola: La temperatura a la cual deben estar expuestas las aves recién nacidas es diferente a las aves mayores. Es por esto que las WSN permiten medir la temperatura y humedad, con el fin de permitir un crecimiento adecuado de dichas aves.
- Monitorización volcánica: Con el fin de indicar un cambio de temperatura y movimientos telúricos que se presenten en estos. Anteriormente se han realizado estudio con las WSN en el volcán Cotopaxi.

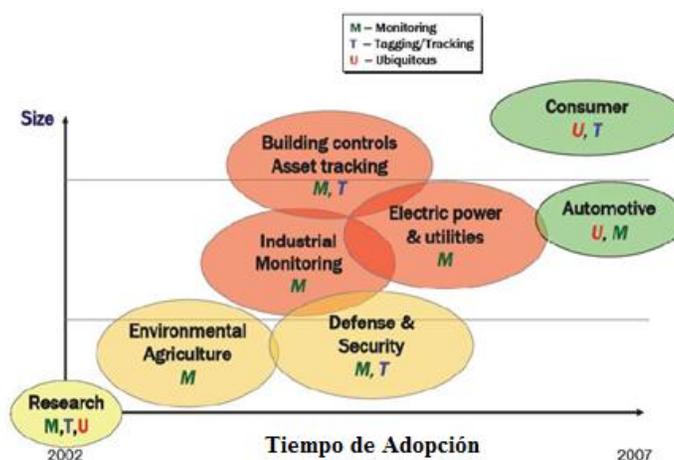


Figura 10 Línea del tiempo aplicaciones WSN

Fuente: (Roberto Fernández Martínez, 2009)

2.1.7. Eficiencia Energética en WSN

La Eficiencia Energética se refiere al uso correcto de la energía, es decir cumplir un objetivo reduciendo el consumo de corriente y manteniendo la calidad de bienes y servicios (INER, 2014). Existen varios mecanismos para conseguir eficiencia energética en una red de sensores inalámbricos. En base a estudios realizados previamente en la Figura 11 se observa las diferentes agrupaciones para obtener eficiencia energética en WSN.

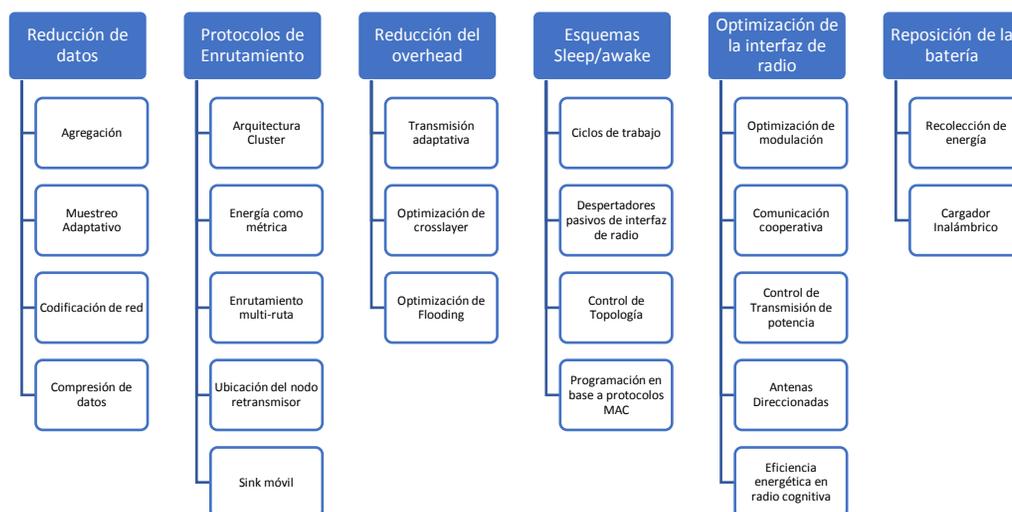


Figura 11 Mecanismos para lograr eficiencia energética en WSN a nivel de hardware y de software

Fuente: (Ortega, 2016)

2.1.7.1. Técnica de Reducción de Datos

El objetivo principal de esta técnica es la reducción de los datos al momento de transmitir. Para llegar al objetivo es necesario utilizar varios mecanismos como la agregación de datos, codificación de la red, muestreo adaptativo y la compresión de datos.

2.1.7.2. Técnica de Enrutamiento de Protocolos

El objetivo de esta técnica es prolongar la vida de la red, mediante la reducción de la energía al mínimo en la transmisión de extremo a extremo de las motas o nodos.

2.1.7.3. Protocolos de Reducción del Overhead

Al lograr reducir el overhead, se puede ahorrar el escaso recurso de la energía y por lo tanto extender el tiempo de vida de la red. Esta técnica puede ser subdividida en: periodos de transmisión adaptativa dependiendo de la estabilidad o de la distancia de la fuente de información, capas

cruzadas con las capas inferiores o superiores para optimizar los recursos de la red y la optimización de la técnica de inundación para evitar retransmisiones innecesarias (Ortega, 2016).

2.1.7.4. Esquemas Sleep/Awake

Esta técnica permite que la interfaz de radio se encuentre en modo sleep, con el fin de que cada uno de los nodos ahorre energía. Existen algunos métodos para lograr este objetivo como controlar el ciclo de trabajo de las motas o nodos, mediante el control de la topología en la red y por último programar los tiempos de sleep/awake mediante protocolos MAC.

2.1.7.5. Optimización de la Interfaz de Radio

Al momento de diseñar la capa física, se empieza con el diseño de la interfaz de radio. El dispositivo que permite la comunicación (radio) es uno de los responsables que permite el agotamiento de la batería en las motas o nodos. El correcto diseño de la interfaz de radio repercute en el rendimiento de los protocolos de las demás capas (Rajalakshmi, 2014).

2.1.7.6. Reposición de la Batería

Actualmente la carga inalámbrica es un tema importante en el mercado, la empresa HaloPT desarrolló esta idea actualmente integrada en Qualcomm, permitiendo solucionar problemas que se refieren a recargar baterías de los sensores inalámbricos.

2.1.7.7. Niveles de Eficiencia Energética

Se ha clasificado a la eficiencia energética en 5 niveles como se observa en la Figura 12. La eficiencia energética en la WSN se refiere básicamente al consumo de corriente al momento de la transmisión de extremo a extremo.

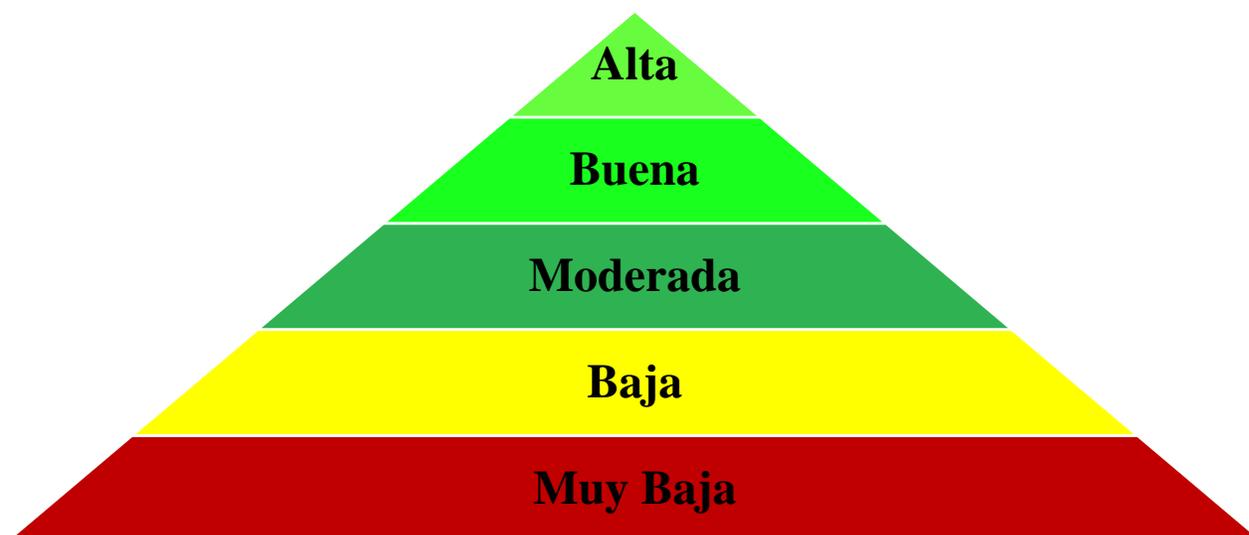


Figura 12 Niveles de la Eficiencia Energética

Cada nivel representa el porcentaje de consumo de corriente aplicando uno de los protocolos de enrutamiento existentes: en el caso del nivel alta eficiencia energética el porcentaje es menor o igual al 80% en referencia a la media del 100%; en el nivel buena eficiencia energética el rango de consumo de corriente está entre los 81% y 82% de la media; en la moderada el rango es del 83% al 85% de la media; en el nivel baja eficiencia energética el rango es del 86% al 90% de la media y por último en el nivel muy baja eficiencia energética el porcentaje es del 91% al 100% de la media.

El consumo de energía depende de varios parámetros como son: la topología, el número de motas o nodos que se utilicen en la red, la distancia de extremo a extremo entre la mota que

transmite y el Gateway. Actualmente existen protocolos de enrutamiento enfocados a la calidad de servicio y con una eficiencia energética alta, es por esto que son aplicados a la monitorización de fenómenos naturales, como por ejemplo la monitorización de volcanes activos principalmente, ya que se necesita de una monitorización constante, que los datos sean fiables, puntuales y que la vida de la WSN sea prolongada.

2.1.8. Protocolos de Enrutamiento

Las redes de sensores inalámbricos o WSN se han convertido en la actualidad en un componente fundamental de las redes de comunicaciones modernas. Las motas o nodos son colocadas aleatoriamente o cumpliendo una topología específica con el fin de analizar diferentes condiciones ambientales, como temperatura, humedad, etc. En la Figura 12 se observa la taxonomía de los protocolos de enrutamiento de WSN.

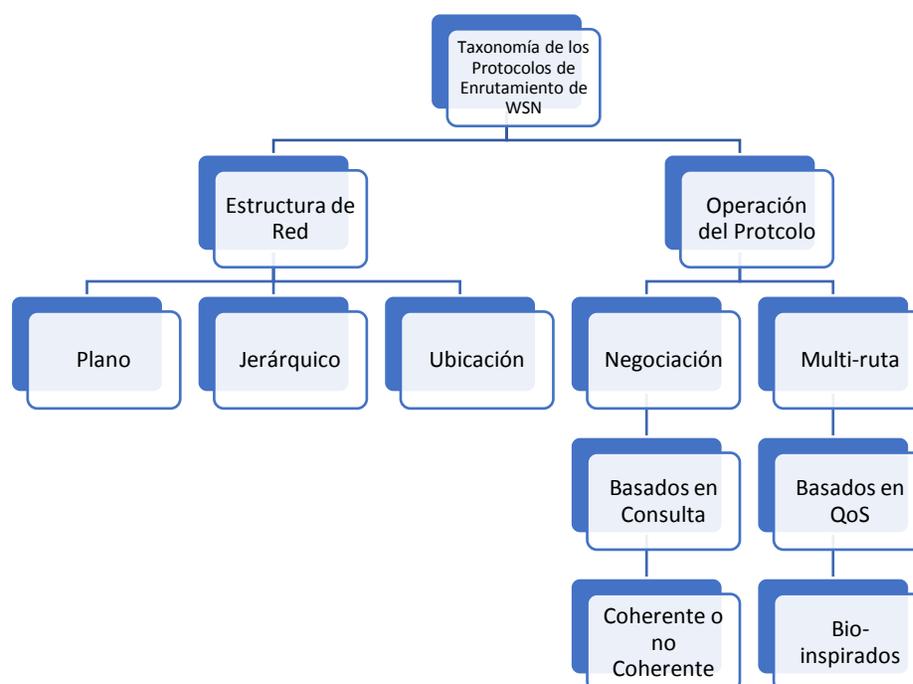


Figura 13 Taxonomía de los Protocolos de Enrutamiento de WSN

2.1.8.1. Protocolos de Enrutamiento Plano

En este enrutamiento cada mota o nodo juega el mismo rol colaborando para realizar la tarea de detección. Al existir un gran número de nodos, no es conveniente asignar una identificación o ID a cada nodo. Este punto ha permitido el enrutamiento centrado en datos, donde la estación base envía consultas a ciertas regiones y espera la respuesta de los sensores ubicados en las regiones seleccionadas (Kamal, 2004)

Algunos protocolos de este tipo son:

- Flooding
- Gossiping
- Gradient Based Rounting (GBR)
- Energy Aware Routing (EAR)
- Rumor Routing (RR)
- Flossping

2.1.8.2. Protocolos de Enrutamiento Jerárquico

En este tipo de enrutamiento todas las motas o nodos tienen diferentes papeles. Las principales funciones son el enrutamiento y el poder seleccionar el clúster-head (CH). Los nodos con energía más alta son usados para enviar los datos, mientras los nodos con energía más baja se utilizan para detectar la información (Manju, 2014).

Algunos protocolos de este tipo son:

- LEACH
- TEEN
- SOP
- APTEEN
- HPAR
- PEGASIS
- LEACH-C
- VGA
- SEP
- HEED
- TTDD
- BCDCCP
- EECS
- TL-LEACH
- MIMO
- E-LEACH
- M-LEACH
- ELCH
- SHPER
- NHPAR
- DHAC
- GBDD
- CHIRON
- V-LEACH
- LEACH-B
- A-LEACH
- I-LEACH
- HEERP
- U-LEACH
- HSEP

2.1.8.3. Protocolos de Enrutamiento basado en la Ubicación

En este tipo de enrutamiento también llamado geográfico, direccional o geométrico, basado en la posición cuenta con 2 puntos importantes. El primero es que cada nodo conoce su propia posición y las posiciones o ubicaciones de su vecino de la red. El segundo es que la fuente del mensaje es informada de la posición del destino (K. Pavai, 2009). En este enrutamiento las motas

o nodos son direccionados por medio de sus posiciones. La distancia entre los nodos puede ser estimada gracias a las intensidades de la señal de entrada.

Las coordenadas de los nodos vecinos se pueden obtener mediante varios mecanismos de intercambio de información entre ellos o la ubicación de nodos puede estar disponible utilizando GPS si los nodos están equipados con estos (Kamal, 2004).

Algunos protocolos de este tipo son:

- MECN
- GPRS
- SMECN
- GAF
- GEAR
- TBF
- GEM
- IGF
- GeRaf
- BVGF
- PAGER-M
- SELAR
- GDSTR
- MERR
- OGF
- EAGR
- HGR
- EAGRP
- LEAR

2.1.8.4. Protocolos de Enrutamiento basados en la Negociación

SPIN es el protocolo más conocido en esta categoría, este protocolo usa descriptores de datos de alto nivel denominados metadatos, con el objetivo de eliminar las transmisiones de datos

redundantes por medio de la negociación. La negociación permite asegurar que solo la información que es útil formará parte de la transmisión.

2.1.8.5. Protocolos de Enrutamiento basado en Multiruta

La comunicación entre sensores y el recolector (sink) se puede lograr mediante un único trayecto o a través múltiples trayectos. En el enrutamiento múltiple cada sensor encuentra los k primeros trayectos más cortos al sink (Shio Kumar Singh, 2010). La eficiencia de estos protocolos es alta ya que pueden tener múltiples trayectos entre origen y destino, además de poder dividir la información por diferentes rutas. Si la ruta principal falla es posible elegir otras rutas con el fin de ofrecer mayor fiabilidad.

Algunos protocolos de este tipo son:

- ReInForm
- MRMS
- N-to-1
- HMRP
- HSPREAD
- EBMR
- EEMRP
- EEAMR
- EECA
- REER
- LIEMRO

2.1.8.6. Protocolos de Enrutamiento basados en la Consulta

En este enrutamiento la mota o nodo destino es capaz de enviar una consulta por medio de la red y los nodos que tienen el dato lo envían al nodo que inició la consulta.

Algunos protocolos de este tipo son:

- DD
- COUGAR
- ACQUIRE

2.1.8.7. Protocolos de Enrutamiento basados en la Calidad de Servicio (QoS)

En estos protocolos el punto principal es equilibrar la energía y la calidad. Existen diferentes parámetros de calidad de servicio que deben ser tomados en cuenta al momento de realizar la transmisión de información a la estación base como son: la latencia, la energía, el ancho de banda etc. La fiabilidad y la tolerancia a fallos es una de las características de estos protocolos, mientras mayor número de motas o nodos la red podrá seguir funcionando correctamente y entregar los datos precisos al sink aún si es que existiera alguna falla.

Algunos protocolos de este tipo son:

- SAR
- SPEED
- MMSPEED
- QEMPAR

2.1.8.8. Protocolos de Enrutamiento Coherente y No Coherente

En este enrutamiento el procesamiento de datos es un factor importante al momento de la operación de uno de los protocolos y al utilizar uno de los diferentes mecanismos para el procesamiento de datos (Aulakh, 2013).

Algunos protocolos de este tipo son:

- MWE
- SWE

En el enrutamiento no coherente los datos son procesados localmente antes de ser enviados a las diferentes motas o nodos para ser analizados y procesados, estos nodos son llamados agregadores. En el enrutamiento coherente, los datos se envían a los agregadores con un mínimo procesamiento. El enrutamiento no coherente propone una baja carga de tráfico de datos en comparación con el enrutamiento coherente (Md Atiqur Rahman, 2013).

2.1.8.9. Protocolos de Enrutamiento Bio-inspirados

Como su nombre lo indican estos protocolos están inspirados en la naturaleza, con el fin de solucionar problemas tecnológicos.

Algunos protocolos de este tipo son:

- MADFTA
- MO-IAR
- SIO

En la Tabla 4 se observa la comparación de los 79 protocolos de enrutamiento mencionados anteriormente, en donde se muestra la eficiencia energética de cada protocolo dividido en 5 niveles:

- Muy baja
- Baja
- Moderada
- Buena
- Alta

Tabla 4

Clasificación de los Protocolos de Enrutamiento según su nivel de Eficiencia Energética.

N°	Protocolo	Plano	Jerárquico	Ubicación	Negociación	Multiruta	Consulta	QoS	Coherente	Bio	Eficiencia
1	Flooding	X									Muy baja
2	Gossiping	X									Baja
3	GBR	X						X			Moderada
4	EAR	X					X				Alta
5	RR	X									Moderada
6	Flossiping	X									Moderada
7	LEACH		X								Buena
8	TEEN		X								Buena
9	SOP		X								Moderada
10	APTEEN		X								Alta
11	HPAR		X								Buena
12	PEGASIS		X								Buena
13	LEACH-C		X	X							Alta
14	VGA		X	X							Buena
15	SEP		X								Buena
16	HEED		X								Buena
17	TTDD	X	X	X							Muy baja

CONTINÚA 

N°	Protocolo	Plano	Jerárquico	Ubicación	Negociación	Multiruta	Consulta	QoS	Coherente	Bio	Eficiencia
									No Coherente	Inspirados	Energética
18	BCDCP		X								Alta
19	EECS		X								Buena
20	TL-LEACH		X								Buena
21	MIMO		X					X			Moderada
22	E-LEACH		X								Baja
23	M-LEACH		X								Moderada
24	ELCH		X								Moderada
25	SHPER		X								Alta
26	NHPAR		X								Buena
27	DHAC		X								Moderada
28	GBDD		X	X							Moderada
29	CHIRON		X								Alta
30	V-LEACH		X								Buena
31	LEACH-B		X								Buena
32	A-LEACH		X								Alta
33	I-LEACH		X	X							Buena
34	HEERP		X					X			Alta
35	U-LEACH		X	X							Alta
36	HSEP		X								Alta
37	MECN		X	X							Buena
38	GPRS			X							Moderada
39	SMECN		X	X							Baja
40	GAF		X	X							Baja
41	GEAR			X							Moderada
42	TBF			X				X			Moderada
43	IGF			X							Buena
44	GEM		X	X							Alta
45	GeRaf			X							Alta
46	BVGF			X							Baja
47	PAGER-M			X							Buena
48	SELAR			X							Buena
49	GDSTR		X	X							Baja
50	MERR			X				X			Alta
51	OGF	X		X							Buena
52	EAGR			X							Buena
53	HGR			X							Buena

CONTINÚA 

N°	Protocolo	Plano	Jerárquico	Ubicación	Negociación	Multiruta	Consulta	QoS	Coherente	Bio	Eficiencia
											No Coherente
54	EAGRP			X							Alta
55	LEAR		X	X							Alta
56	SPIN	X			X						Baja
57	ReInForm					X					Baja
58	MRMS		X			X					Moderada
59	N-to-1	X				X					Baja
60	HMRP		X			X					Buena
61	H-SPREAD					X					Muy baja
62	EBMR					X					Buena
63	EEMRP					X					Alta
64	EEAMR					X					Buena
65	EECA					X					Buena
66	REER					X					Alta
67	LIEMRO					X					Buena
68	DD	X						X			Baja
69	COUGAR	X						X			Baja
70	ACQUIRE	X						X			Moderada
71	SAR					X		X			Alta
72	SPEED			X				X			Baja
73	MMSPEED			X		X		X			Baja
74	QEMPAR			X		X		X			Alta
75	SWE								X		Baja
76	MWE					X			X		Moderada
77	MADFTA									X	Buena
78	MO-IAR									X	Moderada
79	SIO									X	Buena

Fuente: (Ortega, 2016)

2.1.9. Protocolos de Enrutamiento basados en la calidad de servicio (QoS)

Antes de entregar datos a la estación base, se debe mantener un equilibrio entre el consumo de energía y las métricas de QoS, como el retardo, el ancho de banda, la energía, la fiabilidad, la puntualidad en las motas o nodos con QoS. Los protocolos de enrutamiento con QoS en tiempo real desempeñan un papel destacado en las comunicaciones. Las aplicaciones en tiempo real se

clasifican como HRT que se refiere a las aplicaciones que no pueden tolerar ningún retraso mientras que las aplicaciones SRT permiten algún tipo de retraso en la entrega de paquetes (Kaur, 2014).

Los requisitos básicos de los protocolos de enrutamiento con QoS son la puntualidad, la fiabilidad, el consumo de energía, el ancho de banda, el retardo, el rendimiento, etc. Los protocolos QoS se utilizan en aplicaciones de tiempo crítico y con restricciones de potencia donde el procesamiento debe realizarse dentro de cierto período de tiempo sin pérdida. Por ejemplo: aplicaciones de gestión de desastres. En el presente proyecto de investigación se propone dos protocolos de enrutamiento basados en QoS: SPEED (protocolo sin estado para retardo de extremo a extremo), y QEMPAR (QoS y enrutamiento de ruta múltiple con reconocimiento de energía), con baja y alta eficiencia energética respectivamente (Kaur, 2014).

2.1.9.1. Protocolo de Enrutamiento QEMPAR

QEMPAR es un protocolo de enrutamiento basado en QoS con alta eficiencia energética en tiempo real, diseñado para abarcar la QoS en términos de puntualidad y eficiencia energética. Se requiere eficiencia energética en la red para cumplir con la capacidad limitada de la batería. En QEMPAR, el enrutamiento de paquetes de datos se divide en tres fases:

- Mecanismo de descubrimiento de ruta
- Idoneidad de enlace
- Fase de surtido de ruta

Para el mecanismo de descubrimiento de ruta, los nodos QEMPAR envían un mensaje de baliza en la red para recopilar la información de sus vecinos inmediatos. Suponemos que todos los nodos se distribuyen aleatoriamente en una topología deseada y a cada uno de ellos se le asigna un único ID. Al inicio, la energía inicial de los nodos se considera igual. Todos los nodos de la red conocen su ubicación (por GPS o coordenadas x e y) y también son capaces de controlar su consumo de energía. Mediante esta suposición los nodos pueden comunicarse con otros nodos fuera de su rango.

Supongamos que los nodos son conscientes de lo que les queda energía y también la energía restante de otros nodos en su rango de radio de transmisión. Consideramos que cada nodo puede calcular sus probabilidades de envío de paquetes y paquetes recibidos con respecto a la calidad del enlace. Predicciones y las decisiones sobre la estabilidad del camino se pueden hacer examinando información de calidad de enlaces recientes

En el enrutamiento multitrayecto, las rutas nodo-disjunto (es decir, no tienen nodos comunes, excepto la fuente y el destino) son preferidas ya que utilizan la mayoría de los recursos disponibles de la red, por lo tanto son los más tolerantes a fallas. Si un nodo intermedio en un conjunto de rutas nodo-disjunto falla, solo la ruta que lo contiene se ve afectada, por lo que hay un impacto mínimo a la diversidad de las rutas.

En la primera fase del procedimiento de descubrimiento de ruta, cada nodo recoge la información necesaria sobre sus vecinos por intercambio beacon entre ellos y luego actualiza su

tabla vecina. Después de esta fase, cada mota o nodo tiene suficiente información para calcular la idoneidad del enlace para sus nodos vecinos.

Después de la ejecución de la fase de descubrimiento de rutas y las rutas han sido construidas, el objetivo es dividir un paquete grande a paquetes más pequeños, asignando un número a cada uno de ellos con el fin de enviar secuencialmente cada uno de los paquetes como se observa en la Figura 14; es por esto que el nodo de origen provee todas las rutas de acuerdo con el conteo de saltos (Saeed Rasouli Heikalabad, 2011).

Entonces el nodo de origen envía cada paquete pequeño a través de rutas separadas. El pequeño paquete cuyo número de secuencia es 1 se envía a través de la ruta que tiene el menor número de saltos, posteriormente el paquete pequeño con el número de secuencia 2 es enviado a través de las rutas con el número mínimo de saltos hasta enviar el último paquete ya que el nodo sumidero (sink) recibe pequeños paquetes consecutivamente como se observa en la Figura 14.

Este protocolo de enrutamiento puede dividir un paquete grande en paquetes pequeños como se mencionó anteriormente. En las motas CROSSBOW este protocolo duplica la información con el fin de llevar a su destino por diferentes rutas la información y realiza el mismo proceso de funcionamiento, ya que el fabricante no permite que la trama de paquete sea dividida. Es por esto que los 55 Bytes llegan al destino conjuntamente.

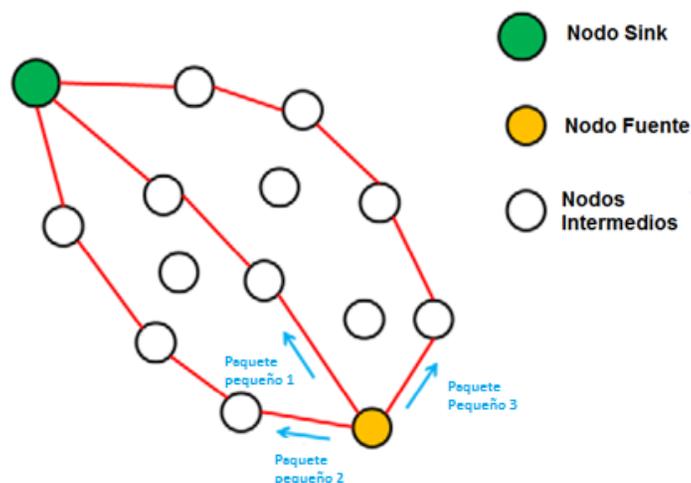


Figura 14 Paquetes pequeños enviados por diferentes rutas

Fuente: (Saeed Rasouli Heikalabad, 2011)

2.1.10. Protocolo de Enrutamiento SPEED

SPEED (Protocolo sin estado para el retardo de extremo a extremo) es un protocolo de enrutamiento basado en QoS con baja eficiencia energética, el cual está diseñado para proporcionar un servicio de comunicación en tiempo real. En SPEED, los nodos del sensor almacenan información con respecto a la ubicación de sus nodos vecinos en la tabla vecina. Las decisiones de paquetes de enrutamiento localizados se toman a partir de la información almacenada en la tabla.

El protocolo se denomina "sin estado" ya que no se necesita una tabla de enrutamiento para el reenvío de paquetes, lo que resulta en menos uso de memoria. Los componentes básicos del protocolo SPEED son:

- Una API
- Un esquema de intercambio de balizas vecinas

- Un esquema de estimación de retraso
- El envío geográfico no determinista sin estado (SNGF)
- Un Bucle de retroalimentación de grupo (NFL)
- Reencaminamiento de contrapresión
- Procesamiento de última milla

La Figura 15 muestra la distribución de los componentes del protocolo SPEED. SPEED garantiza tres tipos de servicios de entrega de paquetes: unicast, multicast y anycast.

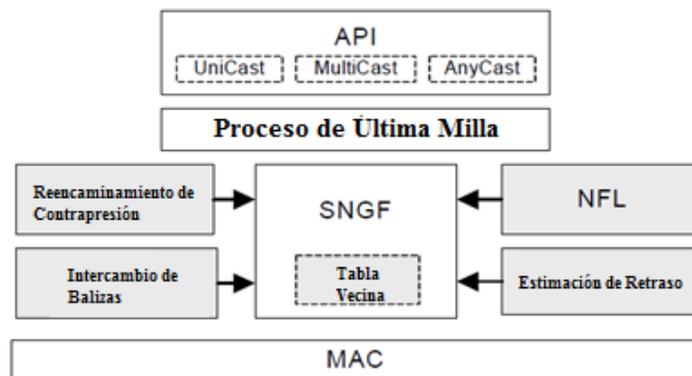


Figura 15 Componentes del Protocolo de Enrutamiento Speed

Fuente: (Tian Hea, 2003)

2.1.10.1. API

El protocolo SPEED proporciona cuatro niveles de aplicación llamadas API:

AreaMulticastSend (posición, radio, paquete): Este servicio identifica un área de destino por su centro posición y radio, envía una copia del paquete a cada nodo dentro del área especificada con una velocidad por encima de un cierto valor deseado.

AreaAnyCastSend (posición, radio, paquete): Este servicio envía una copia del paquete a al menos un nodo dentro del área especificada con una velocidad superior a cierto valor deseado.

UnicastSend (Global_ID, paquete): En este servicio el nodo identificado por Global_ID recibirá el paquete con una velocidad superior a un cierto valor deseado.

SpeedReceive (): esta primitiva permite que los nodos acepten paquetes dirigidos a ellos.

SPEED tiene como objetivo proporcionar una velocidad uniforme de entrega de paquetes a través de la WSN, de modo que la demora de extremo a extremo de un paquete es proporcional a la distancia entre la fuente y el destino. Con este servicio, las aplicaciones en tiempo real pueden estimar demora de extremo a extremo antes de tomar decisiones de admisión (Tian Hea, 2003).

Hay un único formato de paquete de datos para el protocolo SPEED, que contiene los siguientes campos principales:

- PacketType: el tipo de comunicación: Área Multicast, AreaAnyCast o Unicast.
- Global_ID: solo se usa en la comunicación Unicast para identificar un nodo de destino.
- Área de destino: describe un espacio tridimensional con un punto central y radio en el que los paquetes están destinados.
- TTL: el campo tiempo de vida es el límite de salto utilizado para procesamiento de última milla.
- Carga útil

2.1.10.2. Intercambio de balizas vecinas

Similar a otros algoritmos de enrutamiento geográfico, SPEED difunde periódicamente un paquete de baliza a sus vecinos. Esta baliza periódica solo se usa para intercambiar información de ubicación entre vecinos. Discutimos que la velocidad de balizamiento puede ser muy baja cuando los nodos dentro de la red del sensor son estacionarios o de movimiento lento. Además de balizas periódicas, SPEED usa dos tipos de balizas, una bajo demanda y una baliza de contrapresión, para identificar rápidamente los cambios de tráfico dentro de la red. En SPEED, cada nodo mantiene una tabla de vecinos para almacenar información aprobada por la baliza. Cada entrada dentro de la tabla tiene los siguientes campos: (NeighborID, Position, SendToDelay, ExpireTime).

2.1.10.3. Estimación de retraso

Se utiliza la demora de un solo salto como la métrica para aproximar la carga de un nodo. En un entorno de ancho de banda escaso, no es posible permitir el uso de paquetes de sondeo para estimar el retraso del único salto. En su lugar usamos los paquetes de datos que pasan de emisor a receptor. El retraso se mide en el emisor, el cual marca el tiempo del paquete que ingresa a la salida de la red, calculando el retraso de ida y vuelta de un solo salto para este paquete al recibir el ACK.

2.1.10.4. Reenvío geográfico no determinista sin estado (SNGF)

El algoritmo SNGF abarca 3 definiciones importantes como son:

- El conjunto vecino del nodo i : NS_i es el conjunto de nodos que están dentro del rango de radio del nodo i como se observa en la Figura 16, no asumimos que el radio de comunicación es un círculo perfecto. SPEED funciona con patrones de radio irregulares.

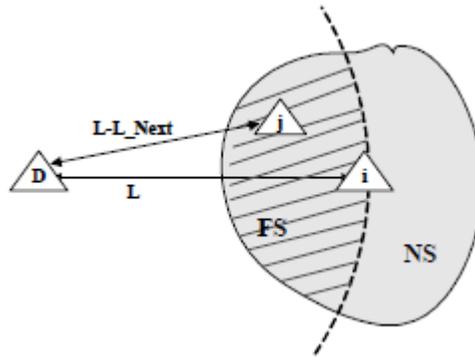


Figura 16 Definiciones NS y FS

Fuente: (Tian Hea, 2003)

- El conjunto candidato del reenvío del nodo i : se refiere al conjunto de nodos que pertenecen a NS_i y están más cerca del destino. Formalmente, $FS_i(\text{Destino}) = \{\text{nodo} \in NS_i \mid L - L_{\text{Next}} > 0\}$ donde L es la distancia desde el nodo i al destino y L_{next} es la distancia desde el salto siguiente hacia el destino. Estos nodos están dentro del área sombreada como se muestra en la Figura 16. Podemos obtener fácilmente $FS_i(\text{Destino})$ escaneando el conjunto NS de nodos una vez.
- Velocidad del relé. Este parámetro se calcula dividiendo el anticipo en distancia desde el nodo siguiente salto j por el retardo estimado para reenviar un paquete al nodo j .

$$Speed_i^j(\text{Destino}) = \frac{L - L_{\text{Next}}}{\text{RetardoSalto}_i^j}$$

SNGF enruta los paquetes de acuerdo a las siguientes reglas:

- Los paquetes se reenvían sólo a los nodos que pertenecen a la FSi (destino). Si no hay ningún nodo dentro del FSi (destino), los paquetes se descartan y se emite un aviso de contrapresión a nodos ascendentes para evitar mayores caídas.
- Divide la velocidad de nodos vecinos dentro de la FSi (destino) en dos grupos. Un grupo contiene los nodos que tienen velocidades de relé mayor comparado a una cierta velocidad deseada, mientras que el otro contiene los nodos que no puede mantener esa velocidad deseada.
- El candidato es elegido de reenvío desde el primer grupo, y el nodo vecino con mayor velocidad de relé tiene una mayor probabilidad de ser elegido como el nodo de reenvío.
- Si no hay ningún nodo perteneciente al primer grupo, la velocidad de relé se calcula basándose en el bucle de retroalimentación de grupo (NFL).
- SNGF envía los paquetes al nodo posterior capaz de mantener la velocidad de entrega deseado, en tiempo real de extremo a extremo, el retraso o retardo depende de la distancia de origen a destino.
- SNGF puede equilibrar el tráfico y reducir la congestión al enviar los paquetes en un área extensa. Este equilibrio de carga es muy útil en una red de sensores, donde la densidad de nodos es alto y el ancho de banda para la comunicación es escaso y compartido.

2.1.10.5. Bucle de retroalimentación de grupo (NFL)

Es el componente clave para mantener el salto único de velocidad de relé. La NFL es un método eficaz para mantener el rendimiento del sistema a un valor deseado. Al reducir la

velocidad de envío para el grupo de nodos, el bucle de retroalimentación de grupo puede mantener un único salto, con el fin de reducir el tráfico inyectado en la zona congestionada.

2.1.10.6. Reencaminamiento de contrapresión

Supongamos que en el área inferior derecha como se observa en la Figura 17 aparece el tráfico pesado, lo que conduce a una menor velocidad de relé en nodos 9 y 10. A través de la retroalimentación de la capa MAC, nodo 5 detectará que los nodos 9 y 10 están congestionados. Desde SNGF reducirá la probabilidad de selección de nodos 9 y 10 como candidatos y reenvía los paquetes para el nodo 7, con el fin de reducir la congestión en torno a los nodos 9 y 10.

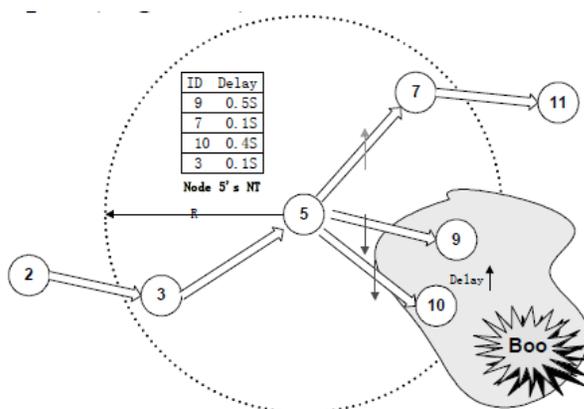


Figura 17 Reencaminamiento de contrapresión caso uno

Fuente: (Tian Hea, 2003)

2.1.10.7. Proceso de última milla

La velocidad sólo se preocupa por la ubicación donde se generan los datos del sensor. El proceso de última milla es llamado así porque sólo cuando el paquete entra en el área de destino tendrá la función. El mencionado módulo SNGF controla todos los paquetes anteriores de relés.

La última milla proceso ofrece dos nuevos servicios que se adaptan a la situación de las redes de sensores: Zona-multicast y anycast. En este caso, el área está definida por una posición (x,y,z) y un radio (Tian Hea, 2003).

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1. Hardware y Software

El presente proyecto de investigación se realizó mediante la utilización del kit de sensores Crossbow IRIS, los cuales conforman las Motas modelo XM2110 y el Gateway MIB520, a través del software MoteConfig 2.0 y el lenguaje de programación NesC el cual trabaja con el sistema operativo TinyOS, mediante los cuales fue posible la configuración de cada uno de las Motas. Para la visualización de los datos tomados por los sensores se utilizó el software MoteView 2.0 para la medición de la intensidad de corriente se implementó un circuito que incluye un arduino nano y el software LabVIEW.

3.1.1.1. Mota Iris XM2110

Las motas o nodos XM2110 como se observa en la Figura 18 pertenecen a la última generación de motas producidas por la empresa CROSSBOW. Estos tienen la capacidad de realizar varias mediciones como la temperatura, humedad, luminosidad y propagarlas vía radio. La mota Iris cuenta con 16 canales de comunicación (2405 a 2485 MHz), está compuesta por el microcontrolador de bajo consumo ATmega1281. En la Tabla 5 se especifica las características de Iris.



Figura 18 Mota Iris XM2110

Fuente: (CROSSBOW, 2006)

Tabla 5

Características Mota Iris XM2110.

Iris XM2110	
Rendimiento del Procesador	
Microprocesador	ATmega1281
Memoria Programable Flash	128 Kbytes
RAM	8 Kbytes
Configuración EEPROM	4 Kbytes
Comunicación Serial	UART
Conversor Análogo Digital	10 bit ADC
Otras Interfaces	I/O Digital, I2C, SPI
Transceiver RF	
Banda Frecuencia	2405 MHz hasta 2485 MHz
Iris XM2110	
Velocidad de Tx de datos	250 kbps
Potencia de Tx RF	+ 3dBm
Sensibilidad de recepción	-101 dBm
Ganancia de Antena	2 dBi

CONTINUA 

Electromecánico	
Baterías	2 baterías AA
Alimentación Externa	2.7 V-3.3 V
Tamaño (mm)	58x32x7
Peso (gramos)	12
Conector de Expansión	51 pines

Fuente: (CROSSBOW, 2006)

Para la comunicación inalámbrica la mota Iris utiliza radio el cual trabaja en la banda ISM de 2.4 GHz en los canales de 802.15.4 (16 canales) con una separación de 5 MHz, donde la potencia de transmisión puede ser configurada desde 17 dBm a 3 dBm.

La mota Iris XM2110 cuenta con tres diodos LEDs (rojo, amarillo, verde), contiene un conector de 51 pines como se observa en la Figura 19, el cual soporta entradas analógicas, entradas y salidas digitales, SPI, I2C e interfaces UART.

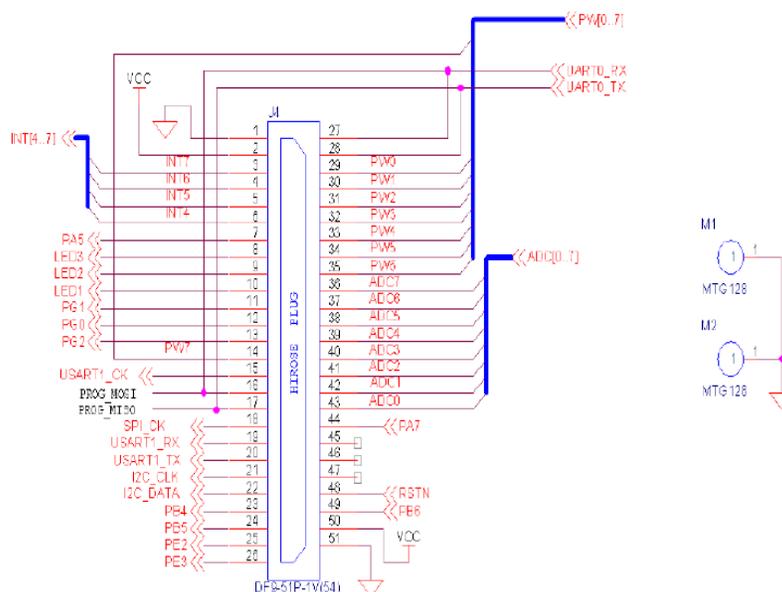


Figura 19 Diagrama conector 51 pines Iris XM2110

Fuente: (CROSSBOW, 2006)

3.1.1.2. Gateway MIB520

La principal función del Gateway MIB520 (ver Figura 20) es la transferencia de datos obtenidos por parte de las motas, los cuales se reflejan en la estación base que en este caso fue un ordenador. Al momento de instalar los drivers correspondientes al Gateway se generan 2 puertos COM, el uno permite programar las motas y el segundo permite recibir los datos provenientes de las motas.



Figura 20 Gateway MIB520

Fuente: (CROSSBOW, 2006)

3.1.1.3. Arduino Nano

El Arduino Nano es una placa basada en el ATmega328, el cual permite en el presente proyecto de investigación medir el voltaje de la mota transmisora mediante la realización de un circuito en serie, no posee conector para alimentación externa y funciona con un cable USB Mini-B. Las características principales del Arduino nano se observan en la Tabla 6.

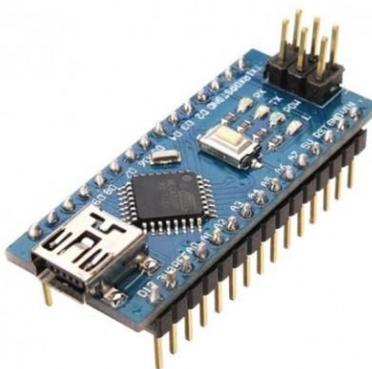


Figura 21 Arduino Nano

Tabla 6

Características Arduino Nano.

Arduino Nano	
Microcontrolador	Atmel ATmega328 (ATmega168 versiones anteriores)
Tensión de Operación	5 V
Tensión de Entrada (recomendado)	7-12 V
Tensión de Entrada (límites)	6-20 V
Pines E/S Digitales	14 (de los cuales 6 proveen de salida PWM)
Entradas Analógicas	8 Corriente máx por cada PIN de E/S: 40 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328) de los cuales 2KB son usados por el bootloader (16 KB – ATmega168)

CONTINUA →

Arduino Nano	
SRAM	2 KB (ATmega328) (1 KB ATmega168)
EEPROM	1 KB (ATmega328) (512 bytes – ATmega168)
Dimensiones	18,5mm x 43,2mm
Frecuencia de reloj	16 MHz

3.1.1.4. GW instek gpc-30300

Mediante la fuente de alimentación GW instek gpc-30300, las motas o nodos pueden ser puestas en funcionamiento. El máximo voltaje que otorga la fuente de alimentación es 30 Voltios y una corriente de 3 Amperios.



Figura 22 Fuente de alimentación GW instek gpc-30300

Fuente: (Group, 2015)

3.1.1.5. MoteConfig 2.0

Este software presenta una interfaz comprensible para el usuario como se ve observa en la Figura 22, permitiendo la configuración de las motas o nodos, en donde se va a cargar archivos pre compilados creados por el fabricante. Este software permite además la configuración de los siguientes parámetros: Nodo ID; Grupo ID; Potencia RF; Canal RF.

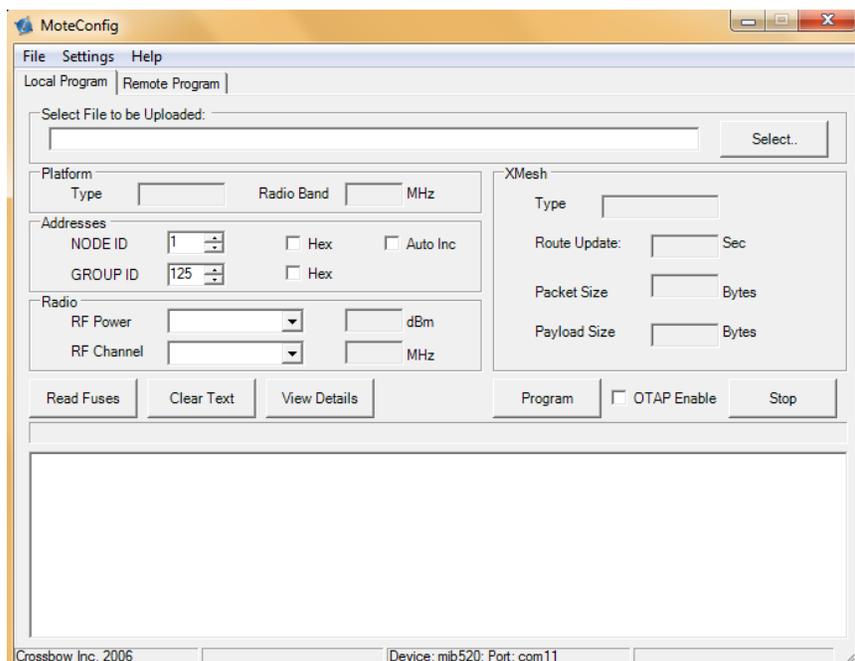


Figura 23 Interfaz MoteConfig 2.0

Fuente: (CROSSBOW, 2006)

3.1.1.6. LabVIEW

LabVIEW permite la visualización del voltaje y corriente consumida por la mota transmisora y además por las motas intermedias, mediante la programación gráfica, en donde se realizó la conexión con arduino con el fin de visualizar los datos que este toma en tiempo real.

3.1.1.7. MoteView 2.0

Es la interfaz que permite visualizar los datos que cada mota o nodo está tomando en tiempo real. Existen varias variables que se pueden visualizar como la temperatura, humedad, luminosidad y posición x e y, además poder comprobar y visualizar las topologías que en el presente proyecto de investigación se propusieron.



Figura 24 Interfaz MoteView 2.0

3.1.1.8. Sistema Operativo TinyOS

Se refiere a un sistema operativo de código abierto, donde su modelo de programación es basado al de los sistemas embebidos, el cual permite diseñar WSN. Su lenguaje de programación es NesC, que cumple con las necesidades de las WSN como son bajo consumo de energía, tamaño de memoria etc.

TinyOS fue creado mediante la alianza de la Universidad de California Berkeley e Intel Research and Technology Ballesta (García, 2008). TinyOS presenta la siguiente estructura:

- **Eventos:** Permiten realizar procesos pequeños, los cuales pueden funcionar como interrupciones en las diferentes tareas requeridas. El consumo de energía de las mismas es mínimo.
- **Tareas:** Permiten realizar procesos más grandes, las tareas se ejecutan en su totalidad, las funciones de inicio y fin de tarea son separadas, es por esto que al momento de programar se lo hace por componentes.

TinyOS se basa en un conjunto de componentes, los cuales permiten la creación de aplicaciones. Existen cuatro elementos que forman parte de un componente:

- Manejador de eventos.

- Manejador de comandos.
- Bloque con tareas simples.
- Frame de tamaño fijo y estáticamente asignado.

3.1.1.9. Lenguaje de Programación NesC

NesC está basado en el lenguaje de programación C, este integra diferentes parámetros como el manejo de comunicaciones, diferentes concurrencias basadas en las tareas, eventos y el más importante que se refiere a la capacidad de reacción en sucesos ambientales. NesC utiliza interfaces bidireccionales.

El conjunto de componentes mediante interfaces permiten aumentar la eficiencia en los tiempos de ejecución, logrando así un mejor funcionamiento del programa. NesC está conformado por dos componentes:

- **Módulos:** El objetivo de estos es proporcionar el código de la aplicación, permite implementar una o más interfaces.
- **Configuraciones:** Permiten que los componentes puedan unirse entre sí, conectan las interfaces que los componentes generan con interfaces que otros utilizan. El objetivo principal es ensamblar todos los componentes que conforman la aplicación.

Todas las aplicaciones de TinyOS están conformadas por un componente de módulo, un componente de configuración y por último un Makefile el cual permite compilar el programa.

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

4.1. Criterios de Diseño

Para el presente proyecto de investigación, se tomaron en cuenta el número de motas o nodos disponibles en este caso seis, con el fin de implementar tres topologías de red diferentes (Star, Tree, Mesh), con tres diferentes protocolos de enrutamiento (Defecto, QEMPAR, SPEED), en donde se tendrá una mota transmisora la cual es el punto de inicio. Dependiendo de la topología se tendrá diferentes nodos intermedios con el fin de que toda la información captada por la mota inicial llegue completa y sin ningún retraso al Gateway MIB520 que posteriormente transmitirá toda la información a la estación base y se podrá visualizar en el software MoteView 2.0.

Cada mota o nodo estará asignada con un identificador único con el fin de realizar la conexión entre las demás y funcionen correctamente. Se implementará tres protocolos de enrutamiento (Defecto, QEMPAR, SPEED), con la ayuda de MoteConfig 2.0 y Notepad, los cuales permiten programar, grabar y configurar en las motas los protocolos de enrutamiento. Cada mota estará configurada con potencia máxima (3.2 dBm) y potencia mínima (-17 dBm), se tomará en cuenta la distancia entre motas, se realizará las pruebas con 2 distancias; distancia menor (1 metro) y distancia mayor (2 metros) dependiendo de la topología. En la topología Star y Tree las motas iniciales e intermedias serán alimentadas con la fuente GW instek gpc-30300, con voltaje 3.2 voltios y corriente 0.5 amperios, mientras que en la topología Mesh las motas transmisora e intermedias serán alimentada con la fuente antes mencionada y las motas que no participan en la

transmisión de la información serán puestas en funcionamiento con dos baterías de 1.5 voltios cada una.

Una vez implementado el protocolo de enrutamiento y la topología de red, se procede a realizar un circuito en serie, en donde se medirá la corriente consumida (mota transmisora e intermedias). Este circuito consta de una fuente de alimentación (GW instek gpc-30300), una resistencia de 30 ohms y la mota como se observa en Figura 24, mediante el software LabVIEW conectado a un Arduino nano a la resistencia de 30 ohms se podrá medir la corriente que circula en el circuito en serie. En el software la toma de datos será configurada que cada 1 segundo se tomen 10 muestras por un tiempo total de 40 minutos.

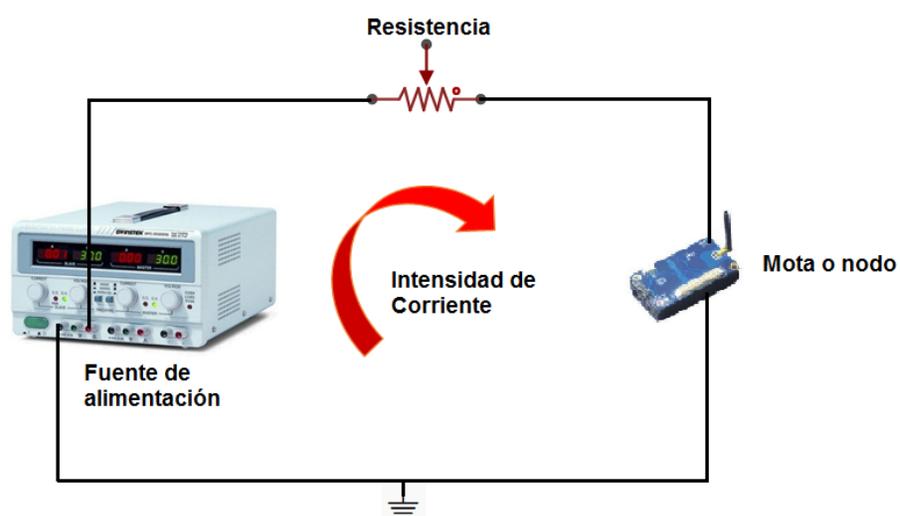


Figura 25 Circuito en serie, para medición de corriente consumida

Mediante el software MoteView 2.0, instalado en la estación base se podrá monitorear y comprobar la calidad de servicio brindado por los diferentes protocolos implementados, aparte se

puede visualizar la topología de red, la conexión de las diferentes motas y las diferentes variables expuestas por las motas (temperatura, humedad, luminosidad, posición x e y, voltaje).

4.2. Implementación del protocolo por Defecto en la topología Star

Para realizar la implementación del protocolo por Defecto en la topología Star (Figura 25), se deben tratar diferentes parámetros relacionados con la instalación y configuración, con el fin de lograr el correcto funcionamiento de la WSN. Los diferentes parámetros son:



Figura 26 Escenario real topología Star

- Programación y configuración de motas o nodos: El software MoteConfig 2.0 permite cargar los archivos precompilados por el fabricante CROSSBOW, en este punto el software permite configurar diferentes parámetros como se observa en la Figura 26.

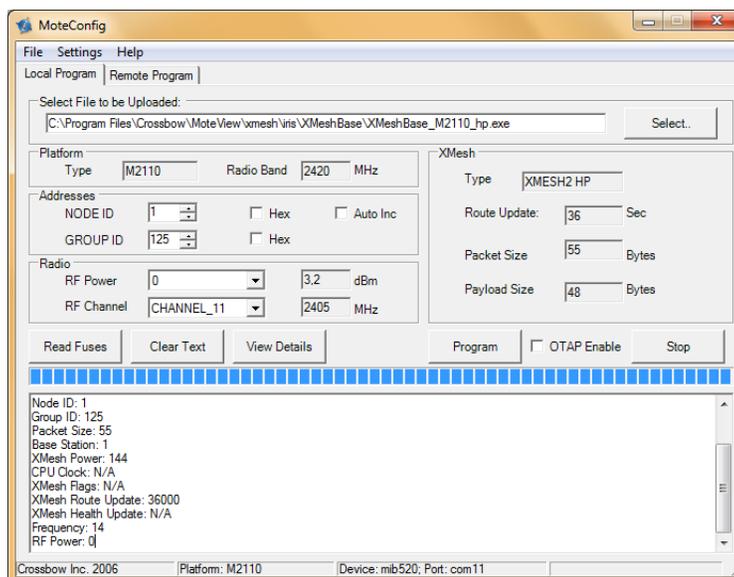


Figura 27 Parámetros de configuración en Software MoteConfig 2.0

- NODE ID: como se observa en la Figura 27, se utilizaron cuatro motas o nodos, en esta topología se asignaron los NODE ID del 1 al 4, recordando que el número 0 siempre se asigna automáticamente al Gateway.

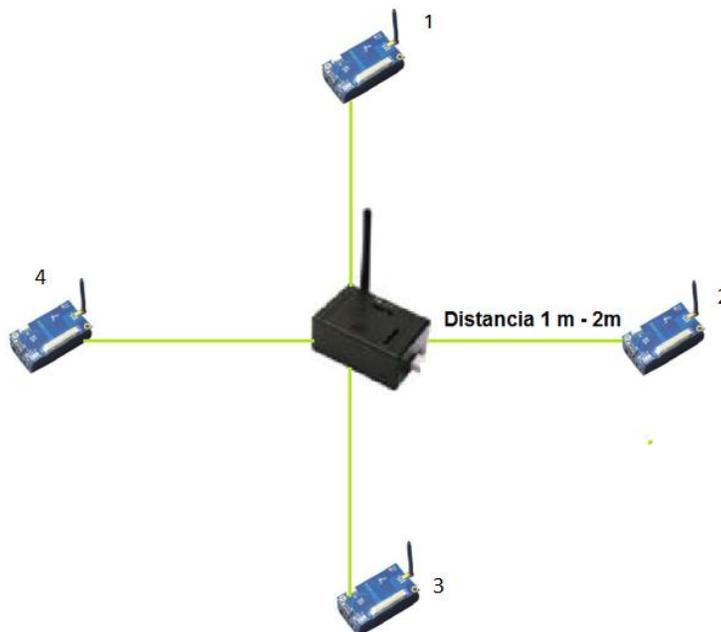


Figura 28 Topología STAR

- RF POWER: se implementó las diferentes topologías para máxima y mínima potencia, en máxima potencia el valor que el software permite configurar es 3.2 dBm y en mínima potencia -17dBm.
- RF CHANNEL: el canal utilizado fue el 15, el cual permite trabajar en 2425 MHz. Es importante recordar que todas las motas deben estar configuradas en este canal para lograr un correcto funcionamiento.

Una vez configurados todos los parámetros mencionados anteriormente se procede a grabar el archivo precompilado en cada una de las motas por medio del grabador del kit de CROSSBOW. Es importante recordar que cada una de las motas o nodos fueron puestas en funcionamiento mediante una fuente de alimentación (GW instek gpc-30300).

La distancia entre mota y Gateway, primero fue de 1 metro y posteriormente de 2 metros con el fin de verificar si existe mayor consumo de corriente al momento de que la distancia cambie.

4.3. Implementación del protocolo SPEED en la topología Star

Para realizar la implementación del protocolo de enrutamiento SPEED, el primer paso a seguir es programar el algoritmo SNGF en el software Notepad como se observa en la Figura 28. Notepad permite configurar varios parámetros como el lenguaje de programación en este caso es NesC – TinyOS, el algoritmo permite definir los diferentes nodos involucrados en la transmisión de la información (inicial, intermedios, final), en este caso la trama que se envía siempre será de 55 Bytes, las motas de fábrica no permiten la división de los Bytes enviados. Notepad genera un archivo .exe el cual mediante el software MoteConfig 2.0 permite cargar a las motas o nodos.

```

1 SNGF(message){
2 my_tenght = get_distance(message>target_ID,myID);
3 Ten = get_neighbors(neighborIDs, sizeof(neighborIDs));
4 num_FS_first = 0, num_FS_Second = 0;
5 for(i=0;i<len;i++){
6 nodeID=neighbor_IDs[i];
7 diff=my_tenght
8 get_distance(message>target_ID,nodeID);
9 if(diff>0){
10 if(diff/get_delay(myID,nodeID)>set_point)
11 FS_first[num_FS_first++]=nodeID;
12 else
13 FS_second[num_FS_Second++]=nodeID;
14 }
15 }
16 if(num_FS_first>0){
17 forwarding_probability=0;
18 forwarning_nodeID=FS_first[0];
19 for(i=0;i<num_FS_first;i++){
20 nodeID=FS_first[i];
21 fp=get_probability
22 (get_distance(myNodeID,nodeID)
23 get_queue_size(nodeID));
24 if(fp>forwarding_probability){
25 forwarding_probability = fp;
26 forwarding_nodeID = nodeID;
27 }
28 send_unicast_packet(nodeID,message);
29 }
30 else // forward toward the nodes in FS_Second

```

Figura 29 Programación en Notepad del protocolo de enrutamiento SPEED

El parámetro configurado se refleja en la línea 28 del código del algoritmo SNGF (Figura 28), los demás parámetros son configurados con la ayuda del software MoteConfig 2.0 como se mencionó anteriormente (Figura 26).

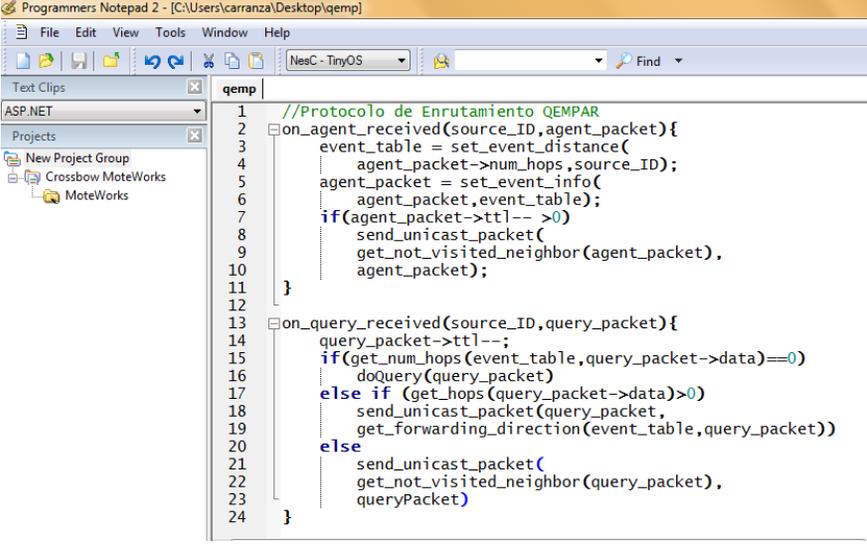
`send_unicast_packet(0,55); //0 nodo receptor, 55 Bytes (Daniel Macedo, 2008)`

La configuración del nodo receptor es 0 ya que por defecto se le asigna el ID 0 al Gateway.

4.4. Implementación del protocolo QEMPAR en la topología Star

Para realizar la implementación del protocolo de enrutamiento QEMPAR, el primer paso a seguir es programar el mismo mediante el software Notepad como se observa en la Figura 29. QEMPAR permite realizar dos tipos de envío de información es decir el primero enviar la trama de paquetes por diferentes rutas, duplicando la información de la trama, y el segundo dividir una trama de paquete enviando cada trama pequeña por diferentes rutas; en las motas CROSSBOW

este segundo no es posible aplicarlo ya que por defecto las motas cuentan con un bloqueo de fábrica al momento de dividir la trama.



```

1 //Protocolo de Enrutamiento QEMPAR
2 on_agent_received(source_ID,agent_packet){
3     event_table = set_event_distance(
4         agent_packet->num_hops,source_ID);
5     agent_packet = set_event_info(
6         agent_packet,event_table);
7     if(agent_packet->tvl-- >0)
8         send_unicast_packet(
9             get_not_visited_neighbor(agent_packet),
10            agent_packet);
11 }
12
13 on_query_received(source_ID,query_packet){
14     query_packet->tvl--;
15     if(get_num_hops(event_table,query_packet->data)==0)
16         doQuery(query_packet)
17     else if (get_hops(query_packet->data)>0)
18         send_unicast_packet(query_packet,
19             get_forwarding_direction(event_table,query_packet))
20     else
21         send_unicast_packet(
22             get_not_visited_neighbor(query_packet),
23             queryPacket)
24 }

```

Figura 30 Programación en Notepad del protocolo de enrutamiento QEMPAR

4.5. Implementación del protocolo por Defecto en la topología Tree

Para realizar la implementación del protocolo por Defecto en la topología Tree (Figura 30), como se mencionó anteriormente se deben tratar diferentes parámetros relacionados con la instalación y configuración.



Figura 31 Escenario real topología Tree

En esta topología se utilizaron 6 motas o nodos, la configuración y asignación del ID en las motas se visualiza en la Figura 31.

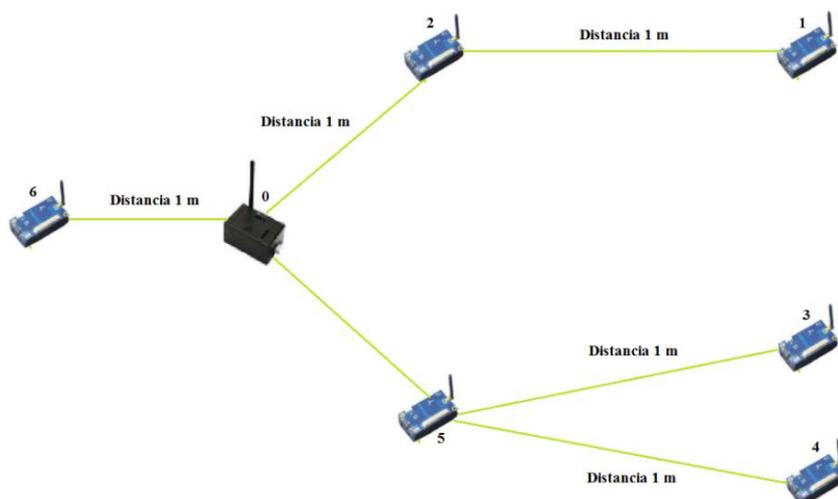


Figura 32 Topología TREE

El nodo inicial es el 1, el cual capta toda la información del ambiente y la transmite hacia el nodo 2, posteriormente el nodo 2 envía toda la información recibida del nodo 1 hacia el Gateway y finalmente toda la información se puede visualizar en la estación base en este caso en el software del fabricante MoteView 2.0.

4.6. Implementación del protocolo SPEED en la topología Tree

Para realizar la implementación del protocolo de enrutamiento SPEED en la topología Tree, se realiza el procedimiento anterior es decir mediante el software MoteConfig 2.0 grabar el algoritmo SNGF perteneciente al protocolo de enrutamiento SPEED, el único cambio es corregir la línea 28 del programa en Notepad (Figura 28), en la mota con ID 1 se debe proceder a grabar con el siguiente cambio:

```
send_unicast_packet(2,55); //2 nodo receptor intermedio, 55 Bytes (Daniel Macedo, 2008)
```

mientras que en la mota con ID 2 ,el cambio será el siguiente:

```
send_unicast_packet(0,55); //0 nodo receptor, 55 Bytes (Daniel Macedo, 2008)
```

La configuración del nodo receptor es 0 ya que por defecto se le asigna el ID 0 al Gateway, la transmisión es unicast.

El primer paso a seguir es programar el algoritmo SNGF en el software Notepad como se observa en la Figura 28, Notepad permite configurar varios parámetros como el lenguaje de programación en este caso es NesC – TinyOS. El algoritmo permite configurar los diferentes nodos involucrados en la transmisión de la información (inicial, intermedios, final), en este caso la trama que se envía siempre será de 55 Bytes, las motas de fábrica no permiten la división de los Bytes enviados. Notepad genera un archivo .exe el cual mediante el software MoteConfig 2.0 permite cargar a las motas o nodos.

4.7. Implementación del protocolo QEMPAR en la topología Tree

Para realizar la implementación del protocolo de enrutamiento QEMPAR en la topología Tree, se realiza lo antes mencionado en la topología Star. En este protocolo de enrutamiento se configura el nodo inicial y el número de saltos de las diferentes rutas con el fin de enviar por varios caminos la trama de información, para este caso se toma en cuenta el inicio que es el nodo con ID 1 al nodo con ID 2, finalmente del nodo con ID 2 al Gateway con ID 0, en total serían 2 saltos en esta topología.

4.8. Implementación del protocolo por Defecto en la topología Mesh

Para realizar la implementación del protocolo por Defecto en la topología Mesh (Figura 32), como se mencionó anteriormente se deben tratar diferentes parámetros relacionados con la instalación y configuración.



Figura 33 Escenario real topología Mesh

En esta topología se utilizaron 6 motas o nodos, la configuración y asignación del ID en las motas se visualiza en la Figura 33.

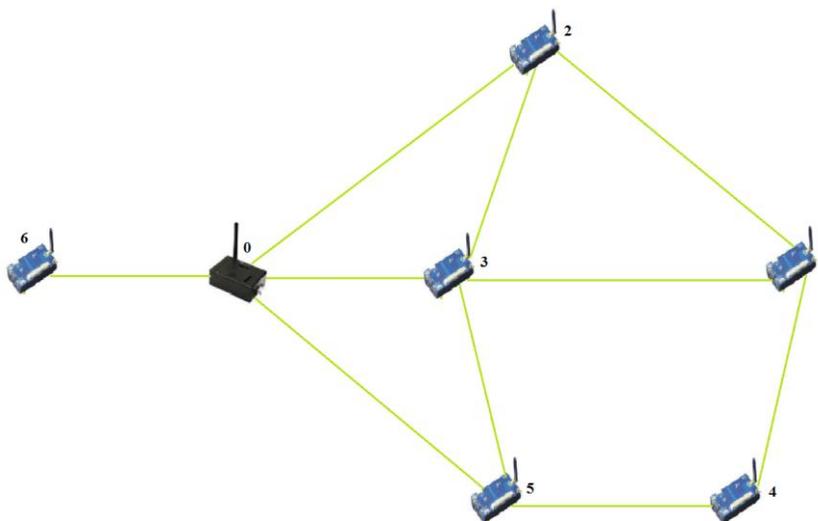


Figura 34 Topología MESH

El nodo inicial es el 1, el cual capta toda la información del ambiente y la transmite hacia el nodo 2, posteriormente el nodo 2 envía toda la información recibida del nodo 1 hacia el nodo 3, el nodo 3 reenvía toda la información hacia el Gateway. Finalmente toda la información se puede visualizar en la estación base en este caso en el software del fabricante MoteView 2.0.

4.9. Implementación del protocolo SPEED en la topología Mesh

Para realizar la implementación del protocolo de enrutamiento SPEED en la topología Mesh, se realiza el procedimiento anterior es decir mediante el software MoteConfig 2.0 grabar el algoritmo SNGF perteneciente al protocolo de enrutamiento SPEED, el único cambio es corregir la línea 28 del programa en Notepad (Figura 28), en la mota con ID 1 se debe proceder a grabar con el siguiente cambio:

```
send_unicast_packet(2,55); //2 nodo receptor intermedio, 55 Bytes (Daniel Macedo, 2008)
```

mientras que en la mota con ID 2, el cambio será el siguiente:

```
send_unicast_packet(3,55); //0 nodo receptor, 55 Bytes (Daniel Macedo, 2008)
```

finalmente, la mota con ID 3, el cambio será el siguiente:

```
send_unicast_packet(0,55); //0 nodo receptor, 55 Bytes (Daniel Macedo, 2008)
```

La configuración del nodo receptor es 0 ya que por defecto se le asigna el ID 0 al Gateway, la transmisión es unicast. El primer paso a seguir es programar el algoritmo SNGF en el software Notepad como se observa en la Figura 28, Notepad permite configurar varios parámetros como el lenguaje de programación en este caso es NesC – TinyOS. El algoritmo permite configurar los diferentes nodos involucrados en la transmisión de la información (inicial, intermedios, final), en este caso la trama que se envía siempre será de 55 Bytes, las motas de fábrica no permiten la división de los Bytes enviados. Notepad genera un archivo .exe el cual mediante el software MoteConfig 2.0 permite cargar a las motas o nodos.

4.10. Implementación del protocolo QEMPAR en la topología Mesh

Para realizar la implementación del protocolo de enrutamiento QEMPAR en la topología Mesh, se realiza lo antes mencionado en la topología Star. En este protocolo de enrutamiento se configura el nodo inicial y el número de saltos de las diferentes rutas con el fin de enviar por varios caminos la trama de información, para este caso se toma en cuenta el inicio que es el nodo con ID 1 al nodo con ID 2, posteriormente el nodo con ID 2 realiza un salto al nodo con ID 3, finalmente del nodo con ID 3 al Gateway con ID 0 como se observa en la Figura 33, en total serían 3 saltos en esta topología.

4.11. Medición de la Intensidad de Corriente mediante LabVIEW

LabVIEW permite medir la corriente consumida por parte de las diferentes motas o nodos (transmisora e intermedias) por medio de una tarjeta de programación en este caso Arduino nano, el procedimiento para realizarlo es el siguiente:

- Realizar el circuito en serie como se observa en la Figura 24.
- Una vez armado el circuito en serie, se procede a conectar el Arduino nano, la entrada analógica A0 específicamente en el pin positivo de la resistencia como se observa en la Figura 34, con el fin de medir el voltaje en el mismo. Como es un circuito en serie la corriente va a ser la misma para la mota y para la resistencia.

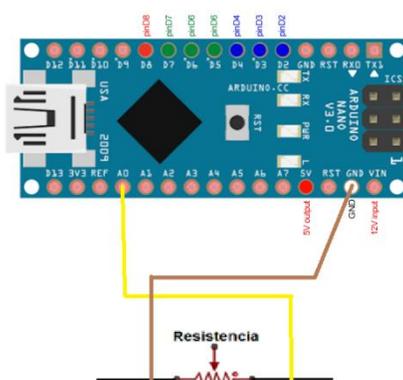


Figura 35 Conexión de Arduino y Circuito de medición

- En el software LabVIEW se procede a configurar todos los parámetros que permiten realizar la medición correctamente. En la Figura 35, se visualiza el modo gráfico del funcionamiento del medidor de corriente y voltaje; los parámetros que se toman en cuenta son las muestras que se van a tomar en la medición, en este caso se tomaron 10 muestras cada 1 segundo en un tiempo total de 40 minutos, se configura el valor de la resistencia utilizada en el circuito con el fin de realizar y aplicar la Ley de Ohm en el programa realizado para posteriormente mostrar los resultados de voltaje e intensidad de corriente en dos Waveform Chart (Figura 36) que equivale a reemplazar a un osciloscopio. Finalmente en el mismo programa realizado en LabVIEW se genera un archivo .txt con todos los valores de la intensidad de corriente tomados en los 40 minutos de medición, donde existen

parámetros como configuración de tarjeta de adquisición de datos, formato del archivo de resultados y puerto COM que deben ser tomados en cuenta para realizar la medición de una forma correcta.

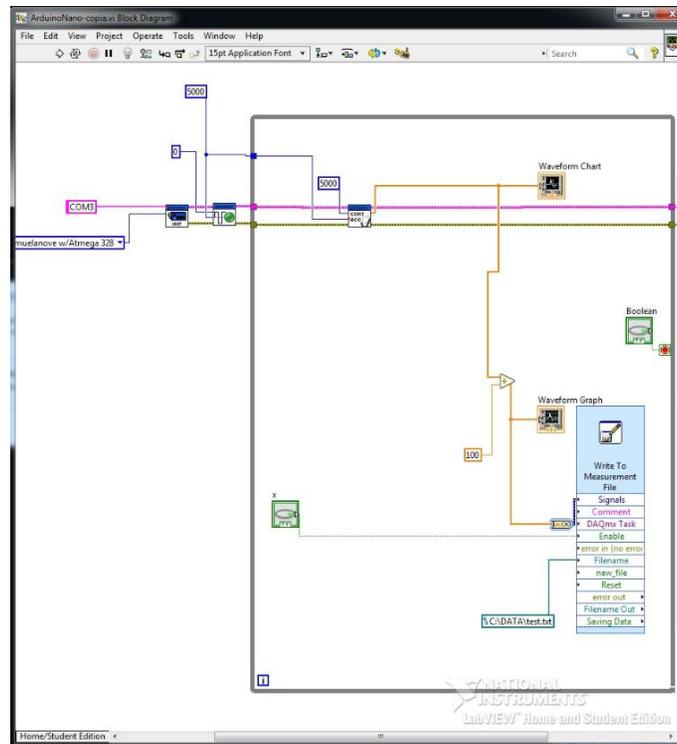


Figura 36 Modo gráfico y configuración del programa en LabVIEW para medición de corriente y voltaje

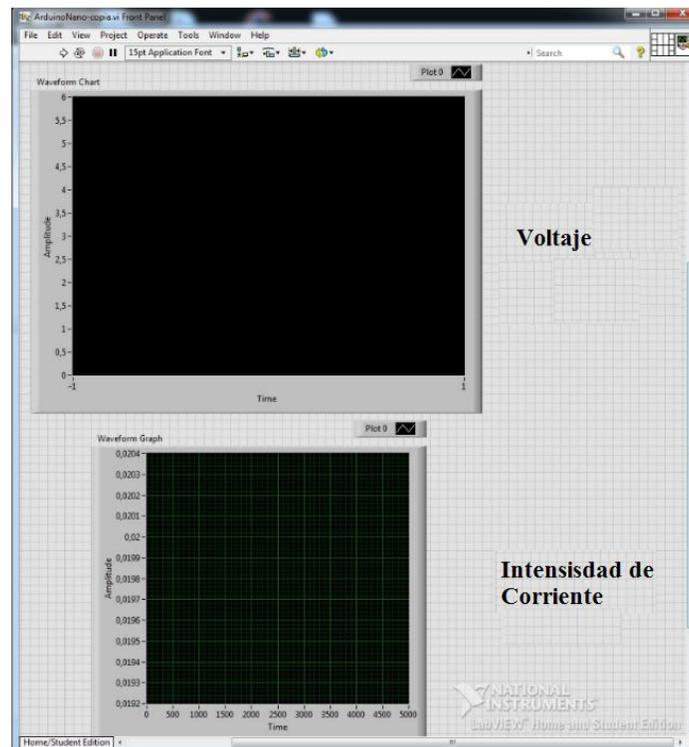


Figura 37 Panel Frontal del programa en LabVIEW para medición de corriente y voltaje

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se detalla las diferentes pruebas realizadas para verificar y validar la corriente consumida por las diferentes motas (transmisora e intermedias) al momento de aplicar e implementar diferentes protocolos de enrutamiento y topologías de red. Se procederá a realizar el análisis descriptivo de los resultados (en la topología Star corriente consumida en potencia mínima y máxima aplicando los tres protocolos de enrutamiento Defecto, SPEED, QEMPAR, en la topología Tree corriente consumida en potencia máxima, en la topología Mesh corriente consumida en potencia máxima posteriormente en todas las mediciones de la corriente consumida se procede a calcular la media mediante el software Matlab). Por último se comenta las conclusiones de los resultados obtenidos.

Para la realizar la comparación de eficiencia energética nos dirigimos hacia el concepto del mismo que se refiere a lograr un objetivo consumiendo la menor intensidad de corriente posible, basándonos en el consumo de intensidad de corriente podemos calcular el porcentaje de eficiencia energética de cada uno de los protocolos de enrutamiento en la mota transmisora, el valor referente será la intensidad de corriente del protocolo de enrutamiento SPEED el cual equivale a un 86% de eficiencia energética como dice la teoría, mientras mayor sea el porcentaje su eficiencia energética será menor, es importante tomar en cuenta que los protocolos de enrutamiento QEMPAR y SPEED son protocolos que ya están clasificados con una alta y baja eficiencia energética ya que las pruebas para comprobar este parámetro se realizan con un alto número de motas conectadas.

5.1. Análisis topología Star aplicando protocolo de enrutamiento por Defecto con potencias mínima y máxima con distancia de 1 metro

En la Tabla 7 se muestran diferentes parámetros para realizar la medición de la intensidad de corriente, en este caso se midió la corriente en las motas transmisoras 1 y 2, a la distancia de 1 metro entre mota y Gateway. En este escenario la mota con ID 1 cuenta con una mínima potencia equivalente a -17 dBm mientras que la mota con ID 2 cuenta con una máxima potencia de 3.2 dBm. En el parámetro de la intensidad de corriente de la Tabla 7 se observa 3 valores en Amperios, estos valores son los más relevantes o en otras palabras son valores que tuvieron mayor repetición en la toma de datos, los valores son bastante parecidos al momento de utilizar y aplicar una potencia mínima y máxima; estos valores se asemejan ya que cada mota está conectada directamente con el Gateway, el valor mínimo de intensidad de corriente en la mota con ID 1 utilizando una potencia mínima es de 0.023193 Amperios en comparación con la intensidad de corriente con potencia máxima en la mota con ID 2 que tiene un valor de 0.023030 Amperios. A pesar de ser valores pequeños en la diezmilésima se nota la diferencia y así ocurre con la máxima intensidad de corriente en potencia mínima y máxima con valores de 0,025562 y 0,025153 respectivamente la diferencia se nota igualmente en la diezmilésima. Finalmente al momento de calcular la media de todas las muestras tomadas el resultado es de 0.024052 utilizando potencia mínima y 0.024422 utilizando potencia máxima.

Tabla 7

Intensidad de Corriente consumida por la mota transmisora en potencias mínima y máxima con 1 metro.

ID Mota	Tipo de Mota	Protocolo de Enrutamiento	Potencia (dBm)	Distancia mota-gateway (m)	Intensidad de Corriente (A)	Media (A)	
1	Transmisora	Por Defecto	-17	1	0,025562	0.024	
					0,023275		052
					0,023193		
2	Transmisora	Por Defecto	3.2	1	0,025153	0.024	
					0,024687		422
					0,023030		

En la Figura 37 se muestra la intensidad de corriente de las motas con ID 1 y 2, de todas las muestras tomadas en 40 minutos en la topología Star aplicando el protocolo de enrutamiento por Defecto con potencias mínima y máxima con una distancia de 1 metro entre mota y Gateway, existe una diferencia mínima ya que las motas con ID 1 y 2 están conectadas directamente al Gateway, al momento de comparar la media de las 2 gráficas la diferencia es mínima ya que si solo tomamos en cuenta hasta las milésimas los valores concuerdan totalmente es decir 0.024 Amperios, pero como las motas CROSSBOW son fabricadas con el objetivo de que su consumo de corriente sea bajo, desde las diezmilésimas son valores que hacen la diferencia al momento de comparar y utilizar protocolos de enrutamiento, al utilizar máxima potencia podemos ver que se requiere un mayor consumo de intensidad de corriente.

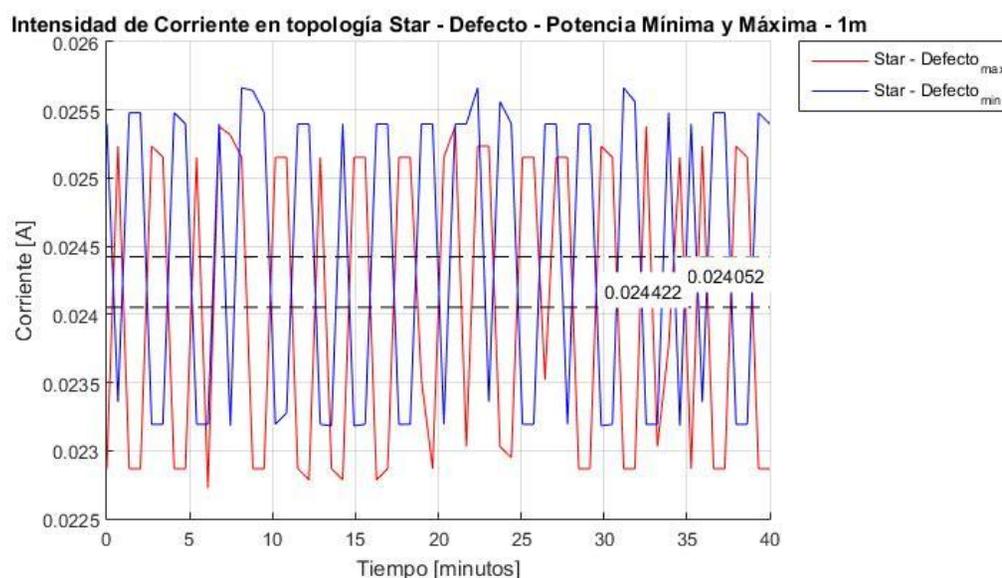


Figura 38 Intensidad de Corriente en topología Star utilizando el protocolo de enrutamiento por Defecto con potencias mínima y máxima con distancia de 1 metro

5.2. Análisis topología Star aplicando protocolo de enrutamiento por Defecto con potencias mínima y máxima con distancia de 2 metros

En la Tabla 8 se observa 3 valores en Amperios, estos valores son los más relevantes o en otras palabras son valores que tuvieron mayor repetición en la toma de datos, el valor mínimo de intensidad de corriente en la mota con ID 1 utilizando una potencia mínima es de 0,024196 Amperios en comparación con la intensidad de corriente con potencia máxima en la mota con ID 2 que tiene un valor de 0,025214 Amperios, en este caso si se encuentra una diferencia en milésimas. Analizando la máxima intensidad de corriente en potencia mínima y máxima con valores de 0,027398 y 0,027778 respectivamente la diferencia se nota igualmente en la diezmilésima, al momento que se aumenta la distancia a 2 metros el consumo de intensidad de corriente es mayor en comparación cuando se utilizó 1 metro, a esto hay que sumarle la potencia en el caso de la máxima potencia se visualiza que el consumo de intensidad de corriente crece.

Tabla 8

Intensidad de Corriente consumida por la mota transmisora en potencias mínima y máxima con 2 metros.

ID Mota	Tipo de Mota	Protocolo de Enrutamiento	Potencia (dBm)	Distancia mota-gateway (m)	Intensidad de Corriente (A)	Medi a (A)
1	Transmisora	Por Defecto	-17	2	0,027398	0.025643
					0,025051	
					0,024196	
2	Transmisora	Por Defecto	3.2	2	0,027778	0.025966
					0,026321	
					0,025214	

En la Figura 38 se refleja la diferencia del consumo de intensidad de corriente que existe si la distancia de las motas al Gateway aumenta. Si nos basamos en el valor de referencia que equivale a la media en el caso de la mota con ID 1 que utiliza una mínima potencia el valor es de 0.025643 este valor es mayor a la media del primer caso en donde la distancia de las motas al Gateway fue de 1 metro, los resultados obtenidos reflejan una diferencia mínima ya que las motas con ID 1 y 2 están conectadas directamente al Gateway, las motas CROSSBOW son fabricadas con el objetivo de que su consumo de corriente sea bajo, desde las diezmilésimas son valores que hacen la diferencia al momento de comparar y utilizar protocolos de enrutamiento, al utilizar máxima potencia podemos ver que se requiere un mayor consumo de intensidad de corriente.

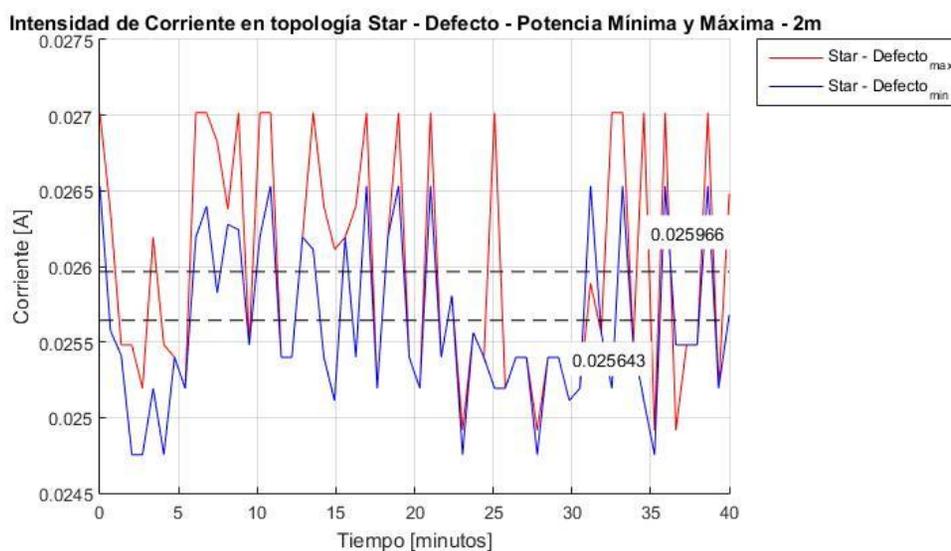


Figura 39 Intensidad de Corriente en topología Star utilizando el protocolo de enrutamiento por Defecto con potencias mínima y máxima con distancia de 2 metros

5.3. Análisis topología Star aplicando protocolo de enrutamiento QEMPAR con potencias mínima y máxima con distancia de 1 metro

En la Tabla 9, se muestra que la media aplicando el protocolo de enrutamiento QEMPAR con mínima potencia es 0.023856 Amperios sin embargo al momento de utilizar máxima potencia este valor cambia a 0.024162 Amperios, estos valores demuestran que el protocolo de enrutamiento QEMPAR en comparación con los dos protocolos de enrutamiento mencionados y aplicados anteriormente el consumo de corriente es menor cumpliendo el mismo objetivo.

Tabla 9

Intensidad de Corriente consumida por la mota transmisora en potencias mínima y máxima con 2 metros.

ID Mota	Tipo de Mota	Protocolo de Enrutamiento	Potencia (dBm)	Distancia mota-gateway (m)	Intensidad de Corriente (A)	Medi a (A)
1	Transmisora	QEMPAR	-17	1	0,024378	0.023856
					0,023210	
					0,023021	
2	Transmisora	QEMPAR	3.2	1	0,024857	0.024162
					0,024211	
					0,023001	

La Figura 39 muestra los valores obtenidos en la toma de datos de la intensidad de corriente del protocolo de enrutamiento QEMPAR, la potencia es un parámetro que se debe tomar en cuenta al momento de aplicar este protocolo de enrutamiento, ya que, a pesar de que QEMPAR tenga una eficiencia energética alta en base a la teoría, la variación del consumo de corriente es notoria al momento de comparar la media de la intensidad de corriente con potencia mínima y máxima.

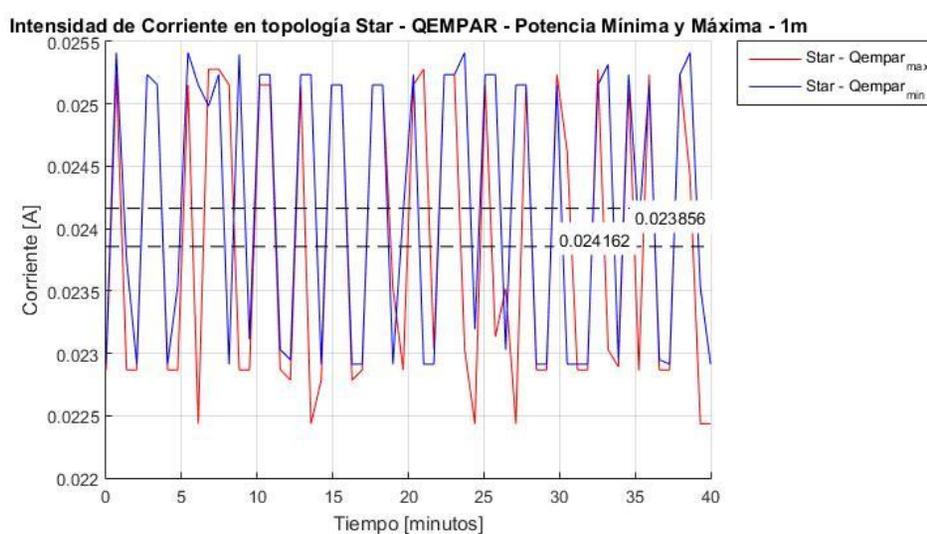


Figura 40 Intensidad de Corriente en topología Star utilizando el protocolo de enrutamiento QEMPAR con potencias mínima y máxima con distancia de 1 metro

En la Figura 40 se muestra la intensidad de corriente consumida por la mota transmisora aplicando los tres protocolos de enrutamiento, por Defecto, SPEED y QEMPAR, existe una diferencia leve visualmente, sin embargo si analizamos la media de intensidad de corriente equivalente a 0.024052, 0.024266 y 0.023856 Amperios respectivamente, el de menor consumo de intensidad de corriente es al momento de aplicar el protocolo de enrutamiento QEMPAR, la diferencia no es tan notable pero en este tipo de sensores inalámbricos, esta diferencia equivale a más tiempo de vida de la red.

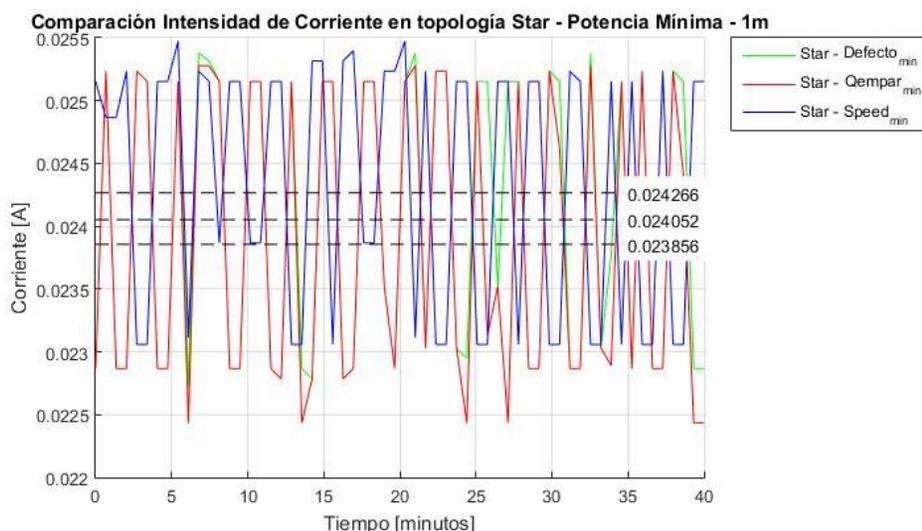


Figura 41 Comparación Intensidad de Corriente en topología Star, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia mínima y distancia de 1 metro

En la Figura 41 se puede observar que al aplicar potencia máxima, el consumo de intensidad de corriente aumenta sin embargo el protocolo de enrutamiento QEMPAR a comparación de los protocolos de enrutamiento por Defecto y SPEED, muestra un menor consumo de intensidad de

corriente equivale a 0.024162 Amperios, en comparación con 0.025065 y 0.024422 Amperios que pertenecen a los protocolos de enrutamiento SPEED y por Defecto respectivamente.

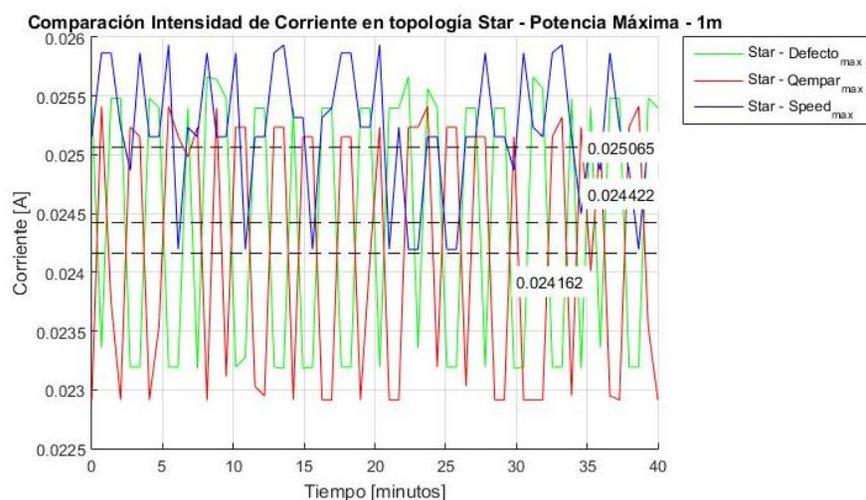


Figura 42 Comparación Intensidad de Corriente en topología Star, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima y distancia de 1 metro

5.4. Análisis topología Star aplicando tres diferentes protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia mínima y máxima a la distancia de 2 metros

En la Figura 42 se visualiza la intensidad de corriente consumida por la mota transmisora aplicando los tres protocolos de enrutamiento a una distancia de dos metros, los valores obtenidos guiándonos en la media, el protocolo de enrutamiento QEMPAR cuenta con un menor consumo de corriente en comparación con los dos protocolos de enrutamiento aplicados, la distancia es un factor primordial ya que el consumo de intensidad de corriente aumenta en comparación cuando la distancia fue de un metro, el valor de la media de intensidad de corriente de QEMPAR es de

0.023974 Amperios, mientras que por Defecto y SPEED cuentan con una media de 0.024186 y 0.024376 Amperios respectivamente con una potencia mínima de -17 dBm.

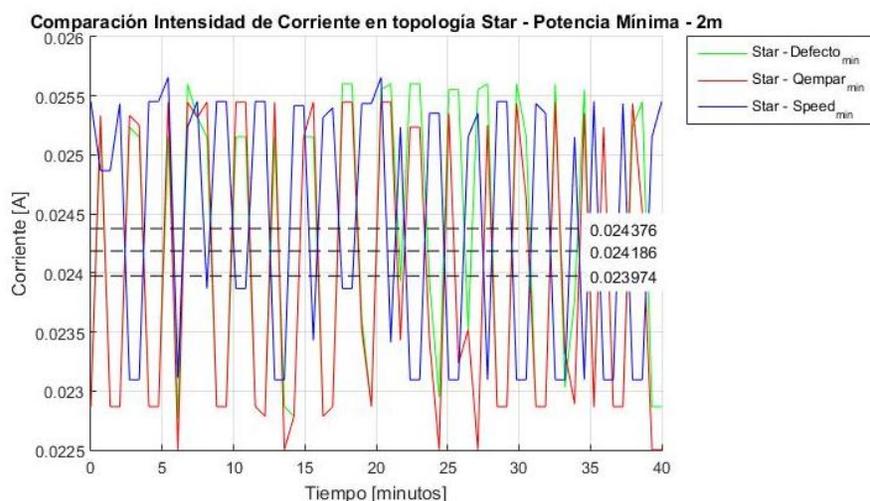


Figura 43 Comparación Intensidad de Corriente en topología Star, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia mínima y distancia de 2 metros

Al momento de aplicar una potencia máxima de 3.2 dBm a una distancia de dos metros el consumo de intensidad de corriente aumenta en comparación cuando la potencia fue mínima, la media de intensidad de corriente del protocolo de enrutamiento por Defecto es de 0.024519 Amperios, es un valor mayor en comparación cuando la potencia era mínima, en SPEED pasa algo similar la media es de 0.025197 Amperios y en QEMPAR la media es de 0.024299 Amperios, estos valores son mayores ya que la potencia influye al momento de la trasmisión, además la distancia mientras sea mayor el consumo de intensidad de corriente aumenta.

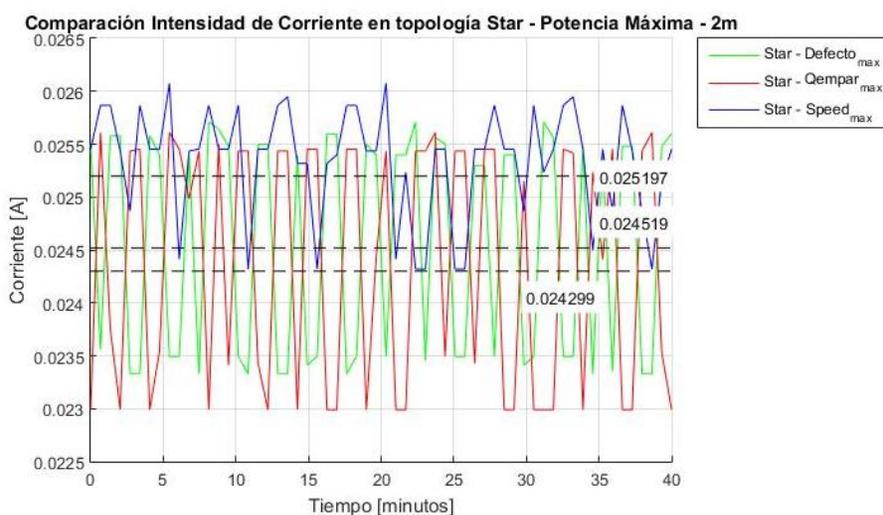


Figura 44 Comparación Intensidad de Corriente en topología Star, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima y distancia de 2 metros

5.5. Análisis topología Tree aplicando tres diferentes protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima

En la Tabla 10 se muestra los valores de media de intensidad de corriente consumidas por la mota transmisora en la topología Tree, en esta topología existe una mota intermedia la cual permite que la información captada por la mota transmisora llegue al Gateway y posteriormente la información se visualice en la estación base, el valor de media del protocolo de enrutamiento por Defecto es de 0.026929 Amperios en esta topología en comparación con la topología Star, el consumo de corriente es mayor ya que la mota con ID 1 se conecta a la mota con ID 2, por lo tanto necesita mayor procesamiento y consumo de corriente, para que la información llegue correctamente desde la mota con ID 2 al Gateway, el valor de media de intensidad de corriente del protocolo de enrutamiento SPEED, es de 0.027432 Amperios, este valor es mayor en comparación a los 0.025065 Amperios tomados en la topología Star, finalmente aplicando el protocolo de enrutamiento QEMPAR, el valor de la media de intensidad de corriente es de

0.025763 Amperios, este valor es menor en comparación a los valores obtenidos de los protocolos de enrutamiento por Defecto y SPEED.

Tabla 10

Media de la Intensidad de Corriente consumida por mota transmisora aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.

ID Mota	Tipo de Mota	Protocolo de Enrutamiento	Potencia (dBm)	Distancia mota-mota (m)	Medi a (A)
1	Transmisora	Por Defecto	3.2	1	0.026929
1	Transmisora	SPEED	3.2	1	0.027432
1	Transmisora	QEMPAR	3.2	1	0.025763

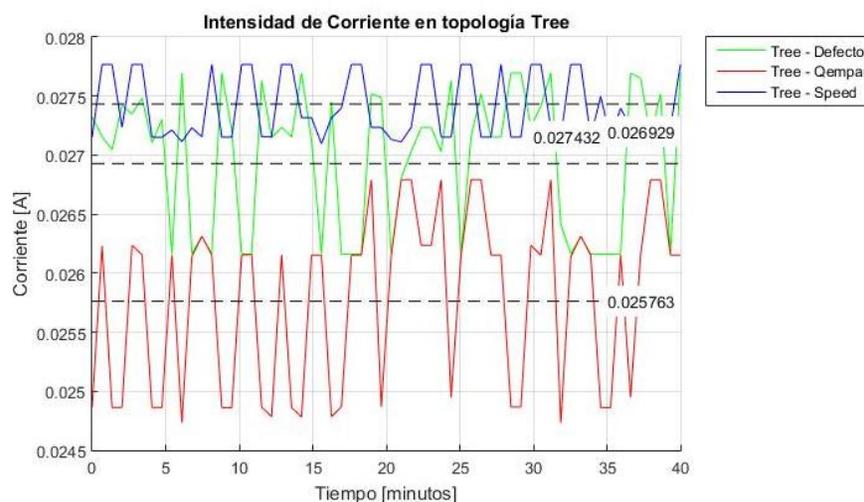


Figura 45 Intensidad de Corriente en topología Tree en mota transmisora, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima

En la Tabla 12 se visualiza los valores de media de la intensidad de corriente consumida por la mota intermedia, el recorrido posterior va desde la mota con ID 2 al Gateway, los valores de

media de cada protocolo de enrutamiento aplicado, son valores menores a los de la mota transmisora, la mota con ID 2 aplicando el protocolo de enrutamiento por Defecto cuenta con una media de intensidad de corriente de 0.025994 Amperios, este valor es menor al de la mota transmisora cuando se aplicó el mismo protocolo que tiene una media de 0.026929 Amperios, así mismo analizando el valor de media del protocolo de enrutamiento SPEED que cuenta con un valor de 0.027699 Amperios, finalmente el valor de media del protocolo de enrutamiento QEMPAR es de 0.024847 Amperios, todos los valores en este apartado son menores en comparación con los valores de la mota transmisora, además el protocolo de enrutamiento QEMPAR presenta un menor consumo de intensidad de corriente en comparación a los protocolos de enrutamiento SPEED y por Defecto.

Tabla 11

Media de la Intensidad de Corriente consumida por mota intermedia aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.

ID Mota	Tipo de Mota	Protocolo de Enrutamiento	Potencia (dBm)	Distancia mota-Gateway(m)	Media (A)
2	Intermedia	Por Defecto	3.2	1	0.025994
2	Intermedia	SPEED	3.2	1	0.027699
2	Intermedia	QEMPAR	3.2	1	0.024847

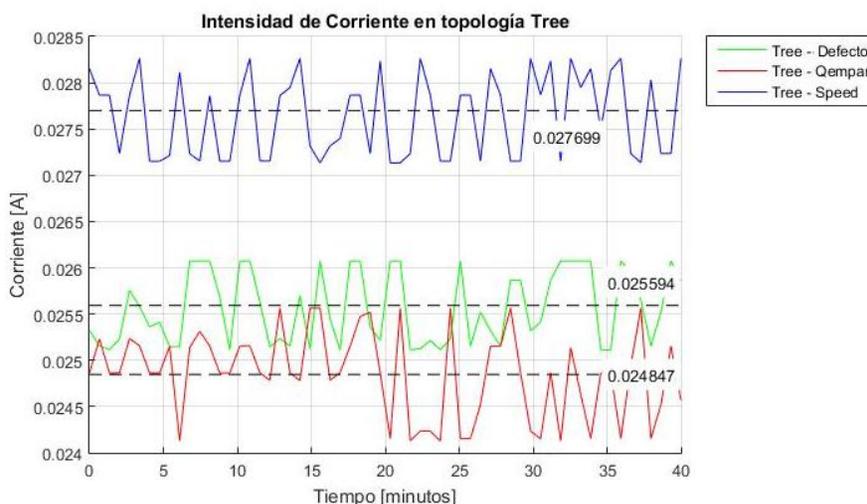


Figura 46 Intensidad de Corriente en topología Tree en mota intermedia, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima

5.6. Análisis topología Mesh aplicando tres diferentes protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima

En la Tabla 12 se muestra, los valores de media de la intensidad de corriente medido en la mota transmisora con la topología Mesh, en esta topología intervienen dos motas intermedias que permiten que la información llegue correctamente hacia el Gateway, en esta topología se nota claramente una diferencia entre protocolos de enrutamiento al momento de comparar el consumo de intensidad de corriente, el valor de la media del protocolo de enrutamiento QEMPAR es de 0.030821 Amperios , en comparación a los 0.032440 y 0.034416 Amperios de los protocolos de enrutamiento por Defecto y SPEED, analizando estos valores mientras la red cuente con un mayor número de motas se puede verificar la diferencia en el consumo de la corriente.

Tabla 12

Media de la Intensidad de Corriente consumida por mota transmisora aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.

ID Mota	Tipo de Mota	Protocolo de Enrutamiento	Potencia (dBm)	Distancia mota-mota (m)	Medi a (A)
1	Transmisora	Por Defecto	3.2	1	0.032440
1	Transmisora	SPEED	3.2	1	0.034416
1	Transmisora	QEMPAR	3.2	1	0.030821

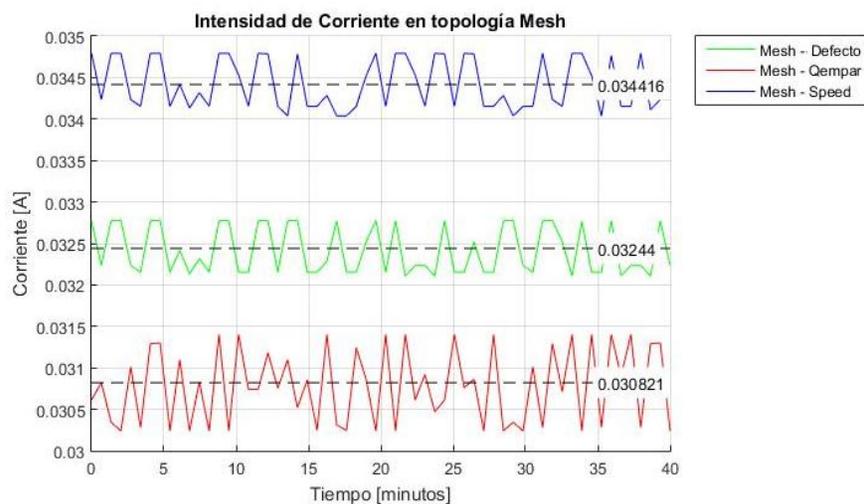


Figura 47 Intensidad de Corriente en topología Mesh en mota transmisora, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima

En la Tabla 13 se reflejan los resultados de la eficiencia energética, basándonos en la sección 2.1.7.7 referente a la escala y niveles del mismo, la clasificación de los protocolos de enrutamiento correspondiente es, con un 77.01 % el protocolo de enrutamiento QEMPAR

pertenece al nivel de alta eficiencia energética es importante mencionar que mientras más motas estén conectadas se puede apreciar y diferenciar el consumo de corriente y por lo tanto el porcentaje de eficiencia energética, el protocolo de enrutamiento SPEED el cual es la base para calcular el porcentaje de eficiencia energética corresponde a una baja eficiencia energética con un 86% , finalmente el protocolo de enrutamiento por Defecto el cual no se encuentra clasificado según la Tabla 4 cuenta con un 81.06% de eficiencia energética el cual pertenece a una buena eficiencia energética según los niveles del mismo.

Tabla 13

Comparación de Intensidad de Corriente, Porcentaje de Error y Eficiencia Energética , en topología Mesh en mota transmisora, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.

Protocolo de Enrutamiento	Intensidad de Corriente (A)	Porcentaje de Eficiencia Energética (%)	Eficiencia Energética
QEMPAR	0.030821	77.01	Alta
Por Defecto	0.032440	81.06	Buena
SPEED	0.034416	86	Baja

En la Tabla 14 el valor de la media de la intensidad de corriente pertenece al protocolo de enrutamiento QEMPAR con 0.029969 Amperios en la medición de la mota con ID 2, es decir en la mota intermedia número uno, una vez más existe una diferencia mínima entre protocolos de enrutamiento, la intensidad de corriente baja en la mota intermedia 1 en comparación a la mota

transmisora, los parámetros de la distancia, potencia y protocolo de enrutamiento, influyen en el consumo de la intensidad de corriente directamente.

Tabla 14

Media de la Intensidad de Corriente consumida por mota intermedia 1 aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.

ID Mota	Tipo de Mota	Protocolo de Enrutamiento	Potencia (dBm)	Distancia mota-mota(m)	Media (A)
2	Intermedia	Por Defecto	3.2	1	0.031881
2	Intermedia	SPEED	3.2	1	0.034183
2	Intermedia	QEMPAR	3.2	1	0.029969

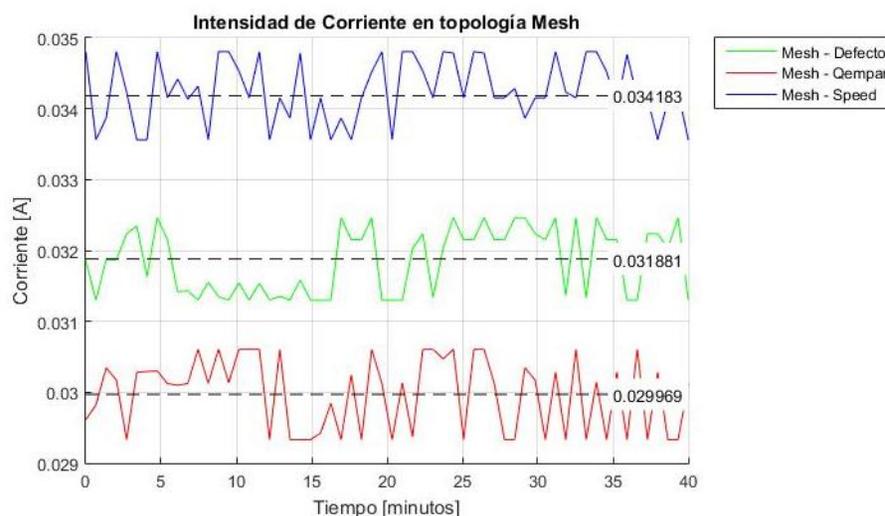


Figura 48 Intensidad de Corriente en topología Mesh en mota intermedia 1, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima

Como se observa en la Tabla 14, la media del consumo de intensidad de corriente de la última mota en este caso con ID 3, esta mota es equivalente a la mota intermedia dos, en los tres protocolos implementados con una potencia máxima, es menor en comparación con las anteriores es decir con la mota transmisora y la mota intermedia uno, el valor con el protocolo de enrutamiento por Defecto es de 0.031746 Amperios, mientras que con SPEED el valor es de 0.033728 Amperios, sin embargo el valor al momento de aplicar el protocolo de enrutamiento QEMPAR baja considerablemente a 0.028756 Amperios, estos datos comprueban que el mejor protocolo de enrutamiento para la topología Mesh es QEMPAR, ya que su eficiencia energética es alta, logrando el objetivo de transmitir información con un menor consumo de intensidad de corriente.

Tabla 15

Media de la Intensidad de Corriente consumida por mota intermedia 2 aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima.

ID Mota	Tipo de Mota	Protocolo de Enrutamiento	Potencia (dBm)	Distancia mota-Gateway(m)	Media (A)
3	Intermedia	Por Defecto	3.2	1	0.031746
3	Intermedia	SPEED	3.2	1	0.033728
3	Intermedia	QEMPAR	3.2	1	0.028756

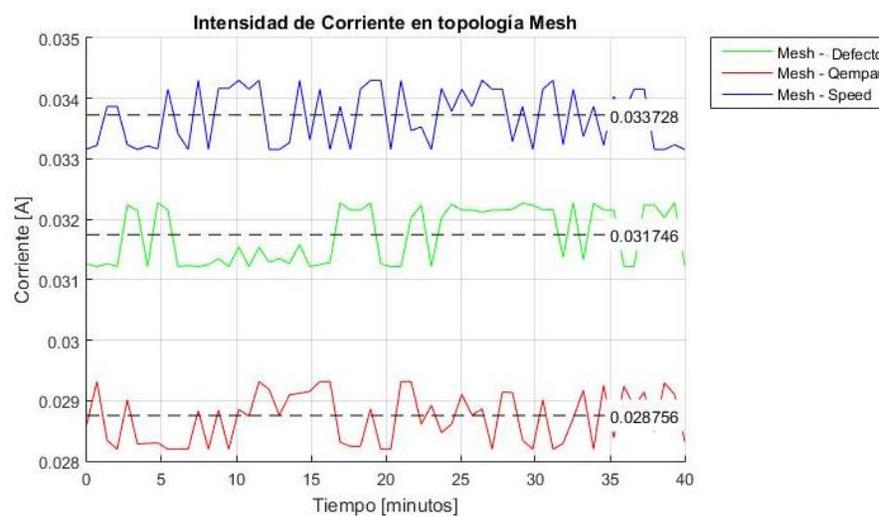


Figura 49 Intensidad de Corriente en topología Mesh en mota intermedia 2, aplicando tres protocolos de enrutamiento por Defecto, SPEED y QEMPAR con potencia máxima

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- A partir del estudio del Marco Teórico de las WSN se determinó que existen diferentes mecanismos para lograr eficiencia energética como reducción de datos, reducción del overhead, esquemas sleep/awake, optimización de la interfaz de radio, reposición de la batería y por último protocolos de enrutamiento, estos permiten que las WSN logren eficiencia energética y por lo tanto la vida de la WSN sea prolongada.
- En base a la investigación de los diferentes protocolos de enrutamiento enfocados a la calidad de servicio, se determinó que existen siete protocolos de enrutamiento que ofrecen QoS, de los cuales se profundizó e implementó dos en la WSN, QEMPAR y SPEED, comprobando que estos cuentan con alta y baja eficiencia energética respectivamente.
- Para realizar la programación de los protocolos de enrutamiento QEMPAR y SPEED, se realizó el estudio del lenguaje de programación NesC con el fin de configurar cada mota perteneciente a la WSN con el protocolo de enrutamiento

correcto en este caso QEMPAR y SPEED, el diseño en NesC logra la implementación de nuevos diseños de aplicaciones consumiendo poca memoria.

- En la topología de red Star, el consumo de intensidad de corriente resultó ser la más baja con 0.024052 y 0.024422 Amperios con potencia mínima y máxima respectivamente en comparación a las topologías Tree y Mesh, aplicando los tres diferentes protocolos de enrutamiento, esto se debe a que la conexión es directa al Gateway ya que no existen motas intermedias.
- La distancia entre motas, potencia, topología y protocolo de enrutamiento son parámetros que permiten definir el consumo de corriente por parte de cada mota y por lo tanto permiten obtener una alta, buena, moderada, baja o muy baja eficiencia energética.
- El protocolo de enrutamiento QEMPAR cuenta con una alta eficiencia energética, mientras que SPEED tiene una baja eficiencia energética, finalmente el protocolo de enrutamiento por Defecto, en comparación de QEMPAR y SPEED, se encuentra en la escala de buena eficiencia energética, según los valores obtenidos a partir de las mediciones en las tres topologías Star, Tree y Mesh.

6.2. Recomendaciones

- Con el fin de que no exista reflexiones, multitrayectos o interferencia en la transmisión de la información, se debe evitar escenarios que trabajen con dispositivos que trabajen a la misma frecuencia que las motas (2.4 GHz).
- Se recomienda aplicar diferentes mecanismos con el fin de comprobar, verificar y lograr eficiencia energética en diferentes topologías de WSN.
- Al momento de alimentar las motas, verificar que el voltaje sea el correcto con el fin de que todas las motas se encuentren con el voltaje ideal y poder obtener las mediciones correctas.
- Para realizar pruebas en una red con mayor distancia entre motas, se recomienda configurar las motas con una potencia máxima, con el fin de obtener una conexión eficiente en la red.
- Evitar el uso de máquinas virtuales, al momento de la instalación de los diferentes programas que se utilizaron en el presente proyecto de investigación, ya que puede existir interferencias, retrasos en la adquisición de datos medidos por las diferentes motas.

6.3. Trabajos Futuros en base al presente Proyecto de Investigación

- Se podría realizar las mismas pruebas mencionados en el presente proyecto de investigación, aplicando diferentes protocolos de enrutamiento enfocados a la estructura de la red.
- Se podría lograr eficiencia energética utilizando uno de los diferentes mecanismos existentes ya sea reducción de datos, reducción del overhead, esquemas sleep/awake, optimización de la interfaz de radio o reposición de la batería.
- Se podría implementar una WSN en el volcán Cotopaxi con protocolos de enrutamiento enfocados a la calidad de servicio, con el fin de monitorear y que los datos obtenidos sean fiables y puntuales.

REFERENCIAS

- Adams, J. (2011). *An Introduction to IEEE STD 802.15.4*. Obtenido de https://www.sonoma.edu/users/f/farahman/sonoma/courses/cet543/resources/802_intro_01655947.pdf
- Aulakh, P. K. (2013). *Wireless Sensor Network Routing Protocols*. Panjab, India.
- CROSSBOW. (2006). *MPR-MIB Users Manual*.
- Daniel Macedo, A. d. (2008). A Knowledge Plane for Autonomic Context-Aware Wireless Mobile Ad Hoc Networks. *Management of Converged Multimedia Networks and Services- IEEE*.
- Fahmy, O. Y. (2004). HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks. *IEEE*.
- Freescale. (2007). *IEEE 802.15.4 y Zigbee*. SILICA.
- Galarza, A. (2016). *Diseño e implementación de un prototipo de sistema de radiolocalización mediante una red de sensores Inalámbricos (WSN)*. Sangolquí.
- García, J. (2008). *Desarrollo y Estudio de Capacidades de Redes 802.15.4 Usando Dispositivos MicaZ*. Cartagena España: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Group, G. (2015). *GW Instek*. Obtenido de http://www.gwinstek.com/en-global/products/DC_Power_Supply/Multiple_Channel_DC_Power_Supplies/GPC-Series
- INER. (20 de Agosto de 2014). *Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables*. Obtenido de <http://www.iner.gob.ec/eficiencia-energetica/>
- Jain., N. (2004). *Energy Aware Adaptive Routing Protocols in Wireless Sensor Networks*. Cincinnati, United States.

- Jiménez. (2007). *Localización en interiores con redes de sensores mediante técnicas de fingerprinting*. Murcia, España.
- K. Pavai, A. S. (2009). Study of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. *IEEE International Conference on Advances in Computing, Control and Telecommunication Technologies*, 522-525.
- Kamal, J. N.-K. (2004). Routing Techniques in Wireless Sensor Networks. *IEEE Wireless communications*, 6-28.
- Kaur, A. a. (2014). Review on Qos and real time routing protocols in wireless sensor networks. *International Journal of Advances in Computer Science and Communication Engineering*.
- Kazem Sohraby, D. M. (2007). *Wireless Sensor Networks*.
- Manju, G. K. (2014). Energy Efficient Algorithm For Routing Problem In Wireless Sensor Networks. *IEEE Recent Advances and Innovations in Engineering*, 1-6.
- Md Atiqur Rahman, S. A. (2013). A Survey on Energy Efficient Routing Techniques in Wireless Sensor Network. *IEEE* , 200-205.
- Ortega, H. K. (2016). Energy efficiency in routing protocols applied to WSN. *IEEE*, 171-178.
- Rajalakshmi, M. (2014). Review of Typical Power Conservation Techniques in Wireless Sensor Network. *International Journal of Computer Applications*, 7-13.
- Remica. (19 de Enero de 2016). *Remica*. Obtenido de <http://remicaopinion.es/novedades/eficiencia-energetica-productividad-empresas/>
- Roberto Fernández Martínez, J. O. (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*.
- RUA. (2008). *ZigBee*. Obtenido de <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/1/InformeTecZB.pdf>

Saeed Rasouli Heikalabad, H. R. (2011). QEMPAR: QoS and Energy Aware Multi-Path Routing

Algorithm for Real-Time Applications in Wireless Sensor Networks. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*.

Shio Kumar Singh, M. P. (2010). Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. *International*

Journal of Computer Science & Engineering Survey, 63-83.

Tian Hea, J. A. (2003). SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication.

International Conference on Distributed Computing Systems.