PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIONES

TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCION DEL TÍTULO DE:

"MAGISTER EN REDES DE COMUNICACIONES"

TEMA:

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN REMOTA UTILIZANDO SENSORES INALÁMBRICOS BAJO EL ESTÁNDAR 802.15.4 PARA LOS SERVICIOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y AGUA POTABLE.

WILMER MARCELO URBINA GAMBOA

Quito, Agosto 2014

RESUMEN

El estudio y diseño de un sistema para realizar la medición remota para los servicios de energía eléctrica y agua potable, está enfocado a mejorar los métodos de trabajo tradicional en la toma de lecturas del consumo del servicio. La implementación de una red de sensores inalámbricos, como medio de transmisión de datos, ofrece a las empresas que brindan servicios básicos una nueva herramienta que permitirá mejorar el procedimiento de medición del consumo, se evita el traslado del personal al lugar donde se encuentran instalados los medidores cada vez que sea requerida la información del consumo o acciones de corte y reconexión, de esta manera se puede obtener una mayor fiabilidad de la información y minimizar costos operativos.

Para poder determinar los beneficios del sistema de medición remota planteado se realizó un estudio de las diferentes tecnologías existentes que realizan esta tarea. Adicionalmente, el presente proyecto se centró en el diseño de una red que se encargará de transportar los datos de las lecturas de los medidores y las señales para bloquear o reconectar el servicio utilizando equipos de comunicación inalámbricos que trabajan bajo el estándar 802.15.4 en las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical).

Los equipos de comunicación que se estudiaron trabajan con protocolos orientados a redes tipo malla, existen varios protocolos entre los que podemos mencionar M-BUS, ZigBee, 6lowPAN, WirelessHART o Zwave , TinyMesh, DASH7. Estos equipos tienen un bajo costo, su tamaño es reducido, el consumo de energía es mínimo y su alcance va desde los 100m hasta las decenas de kilómetros.

Para determinar los parámetros óptimos se simularon las diferentes topologías y configuraciones de redes de sensores tipo Mesh con ayuda del software QUALNET. Se implementó un prototipo de una red de sensores para comprobar los resultados de las simulaciones utilizando equipos que cumplen con las especificaciones técnicas que exigen el estándar 802.15.4.

DEDICATORIA

Decido este trabajo a mi esposa a quien amo mucho, por compartir momentos significativos conmigo y por estar en todo momento dispuesta a escucharme y ayudarme, a mi hijo quien me dio fuerzas para seguir adelante y no desmayar ante los problemas que se presentaron.

AGRADECIMIENTO

Agradezco al creador de todas las cosas, por guiarme y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades.

A mi esposa Tatiana, por su apoyo incondicional y por demostrarme la gran fe que tienen en mí.

A mis padres, que me formaron con buenos sentimientos, hábitos y valores que me han enseñado a no desfallecer ni rendirme ante nada y siempre perseverar y seguir adelante.

Al Dr. Gustavo Chafla director de tesis, por su valiosa guía y asesoramiento a la realización de la misma.

Gracias a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto.

MARCELO URBINA.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Introducción. 1
1.2 Justificación 3
1.3 Objetivos. 4
1.3.1 Objetivo general 4
1.3.2 Objetivos específicos. 4
2. CAPÍTULO II. INFORMACIÓN PRELIMINAR. 6
2.1 Procedimiento tradicional de lectura del consumo de energía eléctrica y agua potable. 6
2.2 Redes Inteligentes. 7
2.3 Introducción a los Sistemas AMR 8
2.4 Sistemas de transmisión y recolección de datos para medición remota existentes. . 9
2.4.1 Tecnología Touch 10
2.4.2 Tecnología Handheld 10
2.4.3 Sistemas Cableados. 12
2.4.4 Sistemas Inalámbricos. 13
2.5 Bandas ISM. 13
2.6 Estándar 802.15.4 15
2.6.1 Capa Física (PHY). 16
2.6.2 Capa de Control de Acceso al Medio (MAC). 19
2.7 Hardware de un Nodo Sensor. 29
2.8 Tipos de dispositivos. 31
2.8.1 Full-Function device (FFD). 31
2.8.2 Reduced Function Device (RFD) 32
2.9 Topologías de red. 32
2.9.1 Topología en Estrella 33
2.9.2 Topología en Malla. 34
2.9.3 Topología en Árbol (Cluster Tree) 35
2.10 Protocolos de encaminamiento en el estándar 802.15.4. 36
2.10.1 Protocolos Proactivos 36

2.10.2 Protocolos Reactivos 37
2.10.3 Protocolos Híbridos 38
3. CAPÍTULO III. ESTUDIO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE DATOS. 39
3.1 Software QUALNET para desarrollo de simulaciones 39
3.2 Descripción de Protocolos de Comunicaciones. 43
3.2.1 Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV). 44
3.2.2 Optimized Link State Routing (OLSR). 45
3.2.3 Zone Routing Protocol (ZRP). 46
3.3 Simulaciones de Protocolos de Comunicación. 47
3.3.1 Capa de aplicación. 51
3.3.2 Capa de red. 52
3.3.3 Capa MAC. 54
3.3.4 Capa Física. 54
3.4 Simulación de Topologías de Red. 55
4. CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES. 59
4.1 Determinación del protocolo de encaminamiento y Topología de la Red Óptima. 59
4.1.1 Capa de Aplicación. 59
4.1.2 Capa de red. 62
4.1.3 Capa de MAC. 63
4.1.4 Capa Física. 64
4.2 Parámetros y consideraciones finales para el diseño de la red. 66
5. CAPÍTULO V. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE RED. 70
5.1 Características del Hardware. 70
5.1.1 Processor/Radio Board. 71
5.1.2 Sensor Boards. 73
5.1.3 Gateways. 73
5.2 Características del Software. 74
5.2.1 MoteView 74
5.2.2 MoteConfig 75
5.2.3 TinyOS. 76
5.2.4 NesC. 76

5.3 Topología implementada..... 76
5.4 Resultados. 80
6. CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES RECOMENDACIONES Y LÍNEAS FUTURAS. 82
6.1 Conclusiones. 82
6.2 Recomendaciones. 85
6.3 Líneas Futuras. 86
BIBLIOGRAFÍA. 87
LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES. 90

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura. 2.1. Esquema de un sistema AMR[3] 9

Figura. 2.2. Tecnología Touch.[3] 10

Figura. 2.3. Tecnología HandHeld (Walk By).[3] 11

Figura. 2.4. Tecnología AMR Drive-by.[3] 11

Figura. 2.5. Tecnología RF (Radio Frecuencia).[5] 13

Figura. 2.6. Banda de Operación en el estándar IEEE 802.15.4. [12] 16

Figura. 2.7. Estructura del paquete de capa física IEEE 802.15.4. [11] 18

Figura. 2.8. El formato general de las tramas MAC. [18] 21

Figura. 2.9. Estructura de la Trama de Datos. [19] 22

Figura. 2.10. Estructura de la Trama ACK. [19] 23

Figura. 2.11. Formato de Trama de Comando MAC. [19] 24

Figura. 2.12. Formato de la trama Beacon. [19] 25

Figura. 2.13. Estructura de la Supertrama. [18] 26

Figura. 2.14. Supertrama utilizando CAP. [18] 27

Figura. 2.15. Supertrama utilizando CFP. [18] 28

Figura. 2.16. Estructura de la Supertrama con periodo inactivo. [18] 28

Figura. 2.17. Hardware de un nodo Sensor. 29

Figura. 2.18. Arquitectura de una WNS. [17]. 32

Figura. 2.19. Topología en Estrella.[12] 33

Figura. 2.20. Topología en Malla. [12] 35

Figura. 2.21. Topología en Árbol (Cluster Tree). [12] 35

Figura. 2.22. Clasificación de los protocolos de encaminamiento.[13] 36

Figura. 3.1. Módulo para diseño de la Red.[22] 40

Figura. 3.2. Módulo de Visualización. [22] 41

Figura. 3.3. Módulo de Análisis Estadístico (Analyzer). [22] 42

Figura. 3.4. Reproductor de Escenarios. [22] 43

Figura. 3.5. Esquema del escenario de Simulación. 47

Figura. 3.6. Estructura de una Super trama 802.15.4 con Beacon's habilitados. 49

Figura. 3.7. Gráficas que entrega el software Qualnet para la capa de aplicación. 52

Figura. 3.8. Gráficas que entrega el software Qualnet para la capa de Red. 53

Figura. 3.9. Gráficas que entrega el software Qualnet para la capa MAC. 54

Figura. 3.10. Gráficas que entrega el software Qualnet para la capa Física. 55

Figura. 3.11. Topología de simulación con 40 Nodos. 56

Figura. 3.12. Topología de simulación con 60 Nodos. 56

Figura. 3.13. Topología de simulación con 80 Nodos. 56

Figura. 3.14. Topología de simulación con 100 Nodos. 57

Figura. 4.1. Resultados de las simulaciones para el parámetro First Packet Received. 60

Figura. 4.2. Resultados de las simulaciones para el Throughput. 61

Figura. 4.3. Resultados de las simulaciones para el Jitter. 62

Figura. 4.4. Número de paquetes en cola de datos en la Red. 62

Figura. 4.5. Tamaño máximo promedio de la cola de datos por Nodo. 63

Figura. 4.6. Paquetes Generados en Capa MAC. 63

Figura. 4.7. Paquetes desechados en Capa MAC. 64

Figura. 4.8. Señales transmitidas. 65

Figura. 4.9. Señales recibidas pero con errores. 65

Figura. 4.10. Consumo de energía promedio por nodo. 66

Figura. 4.11. Simulación del Throughput (100, 150, 200, 300) nodos. 67

Figura. 4.12. Señales transmitidas vs señales recibidas con error. 68

Figura. 4.13. Porcentaje de señales recibidas con error. 68

Figura. 4.14. Asignación de canales 802.11 y 802.15.4. 69

Figura. 4.15. Esquema de reutilización de Frecuencias. 69

Figura. 5.1. Modulo sensor MPR2400CB.[29] 71

Figura. 5.2. Diagrama de bloques de una Mota MPR2400CB.[8] 71

Figura. 5.3. Placa MDA100 para conexión de sensores. [29] 73

Figura. 5.4. Tarjeta de Interface USB MIB520CB. [29] 73

Figura. 5.5. Interface MoteView. 74

Figura. 5.6. Interface MoteConfig. 75

Figura. 5.7. Lugar de implementación de la red de sensores. 77

Figura. 5.8. Equipos utilizados en la implementación de la red de sensores. 77

Figura. 5.9. Ubicación de los sensores. 78

Figura. 5.10. Consumo de energía promedio de una vivienda en un día. 78

Figura. 5.11. Curva de tendencia de consumo de energía. (a) 0-7 Horas. (b) 8-15 Horas. (c) 16-23 Horas. ... 79

Figura. 5.12. Observación de los datos enviados por los nodos en el software Moteview. ... 80

Figura. 5.13. Gráfica de la recepción de los datos enviados por un nodo. 81

Figura. 5.14. Visualización de la topología lógica de la Red de sensores. 81

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1. Frecuencias ISM. 14

Tabla 2.2. Características Capa Física estándar IEEE802.15.4. 17

Tabla 2.3. Comandos de Tramas de control MAC..... 24

Tabla 3.1.Parámetros generales de configuración para las simulaciones. 48

Tabla 3.2. Valores de BO y SO y su correspondiente valor (BI) y duración del Time Slot 50

Tabla 3.3. Resultados obtenidos para la simulación de los protocolos AODV, OLSR, ZRP. 51

Tabla 3.4. Resultados para la topología de 40 Nodos. 57

Tabla 3.5. Resultados para la topología de 60 Nodos. 57

Tabla 3.6. Resultados para la topología de 80 Nodos. 58

Tabla 3.7.Resultados para la topología de 100 Nodos. 58

Tabla 5.1. Componentes que incluye el kit de desarrollo MICAZ WSN-EDU2400CB..... 70

Tabla 5.2. Características más importantes de las motas MICAz MPR2400CB. 72

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone la problemática de los métodos tradicionales de medición del consumo del servicio y por qué se plantea el desarrollo del proyecto, además se detallan el alcance del proyecto y sus los objetivos.

1.1 Introducción.

El estudio y diseño de un sistema para realizar la medición remota para los servicios de energía eléctrica y agua potable, está enfocado a mejorar los métodos de trabajo tradicional en la toma de lecturas del consumo del servicio.

Consiste en obtener, almacenar y transmitir la medición del consumo de energía eléctrica y agua potable, mediante la utilización de medidores electrónicos que poseen un sistema de transmisión de datos hacia un punto central, proporcionando las herramientas de gestión de información para la toma de decisiones, que permita realizar los procesos asociados a la medición de manera más eficiente.

Con la aplicación de este proyecto se pretende realizar una mejora sustancial al procedimiento tradicional de medición del consumo de energía eléctrica, al sustituir las funciones que realiza el personal dedicado a esta actividad, evitando realizar el traslado al lugar donde se encuentran instalados los medidores, cada vez que sea requerida esta información, su aplicación resulta en un menor costo y una mayor fiabilidad de la información.

Como se comentó anteriormente el proceso de medición de los servicios de electricidad, agua potable y en algunos países gas, es uno de los mayores problemas que tiene que afrontar las compañías proveedoras de estos servicios. Esta

problemática se ha ido acrecentando como consecuencia del crecimiento constante de clientes, las compañías proveedoras de estos servicios tienen que invertir importantes recursos tanto humanos, económicos y tiempo para poder hacer frente a esta problemática, adicionalmente los errores en la toma de las lecturas, consecuencia de la operación manual trae como consecuencia el reclamo constante de clientes. [1]

Con el tiempo se fue desarrollando sistemas de medición que emplean la infraestructura de las redes públicas de comunicaciones, como por ejemplo la red de Red Telefónica de Conmutación Pública (PSTN). Estos sistemas aprovechan las redes públicas ya instaladas para obtener de cada residencia las medidas de consumo, sin necesidad de emplear personal de campo para realizar dicha tarea, y de esta forma hacer una facturación precisa y transparente al usuario. Adicionalmente se pueden implementar otros servicios que permitan mejorar la calidad, como por ejemplo el corte y reconexión del servicio. Estos sistemas tiene el inconveniente de ser factible su uso solo en sectores residenciales en donde los usuarios en su mayoría disponen del servicio telefónico.

Existen tres campos que han tenido gran desarrollo en estos últimos años y su integración han permitido la implantación de los sistemas de medición remota conocidos por sus siglas en Ingles AMR (Automatic Meter Reading).

- La primera área fue el desarrollo de la electrónica que ha permito la aparición de dispositivos más económicos, precisos, pequeños y de bajo consumo de energía, permitiendo implementar nuevas técnicas de medición más precisas y confiables que se conoce con el nombre "Instrumentación inteligente".

- Los avances en los sistemas de comunicaciones, redes celulares, internet, que brindan diversas formas de conectarse remotamente y en forma bidireccional.
- Software especializado que utilizan protocolos de comunicación normalizados.

En la actualidad existen sistemas de medición remota de Servicios de Energía eléctrica y Agua potable que utilizan las redes celulares para realizar la tarea de transporte de los datos, pero tienen el inconveniente del alto costo del hardware y costo mensual del servicio GPRS.

1.2 Justificación

El proyecto está enfocado a mejorar los métodos de trabajo tradicional en la toma de lecturas del consumo del servicio. Consiste en obtener, almacenar y transmitir la medición del consumo de energía eléctrica y agua potable, mediante la utilización de medidores electrónicos que poseen un sistema de transmisión de datos hacia un punto central, proporcionando las herramientas de gestión de información para la toma de decisiones, que permita realizar los procesos asociados a la medición de manera más eficiente.

Para poder determinar los beneficios del sistema de medición remota planteado se realizó un estudio de las diferentes tecnologías existentes.

El presente proyecto también se centrará en el diseño de una red que se encargará de transportar los datos de las lecturas de los medidores y las señales para bloquear o reconectar el servicio utilizando equipos de comunicación inalámbricos que trabajan bajo el estándar 802.15.4 en las banda ISM (Industrial, Scientific and Medical).

En nuestro país las bandas ISM que se pueden utilizar son 902-928 MHz y 2400-2500 MHz existe otra en 433.05-434.79 MHz que necesita un permiso por parte del ente regulador de nuestro país.

Los equipos de comunicación que se estudiarán trabajan con protocolos orientados a redes tipo malla. Existen varios protocolos entre los que podemos mencionar M-BUS, ZigBee, 6lowPAN, WirelessHART o Zwave , TinyMesh, DASH7. Estos equipos tienen un bajo costo, su tamaño es reducido, el consumo de energía es mínimo y su alcance va desde los 100m hasta las decenas kilómetros.

Se simulará las diferentes topologías y configuraciones de redes de sensores tipo mesh que se utilizan para transmitir los datos con ayuda del software QUALNET. Para comprobar los resultados de las simulaciones se implementará una red de sensores utilizando equipos que cumplan con las especificaciones técnicas que exigen el estándar 802.15.4

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general

- Diseño de una red de transmisión de datos para un sistema de medición remota utilizando sensores inalámbricos bajo el estándar 802.15.4 (zigbee) para los servicios de energía eléctrica y agua potable.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Estudiar las diferentes tecnologías existentes para realizar medición remota de servicios Básicos.

- Analizar y simular las diferentes topologías y configuraciones de redes de sensores tipo mesh que se utilizan para transmitir los datos en bandas ISM con ayuda del software de simulación QUALNET
- Implementación de una red de sensores para comprobar los resultados obtenidos en las simulaciones.

CAPÍTULO II. INFORMACIÓN PRELIMINAR.

En este capítulo se detallan las ventajas y desventajas de algunos de los sistemas de recolección y transmisión de datos para medición remota existentes, además se realiza una investigación sobre los tipos de dispositivos, topologías de red y protocolos de encaminamiento que soporta el estándar 802.15.4.

2.1 Procedimiento tradicional de lectura del consumo de energía eléctrica y agua potable.

En la actualidad las empresas de servicios básicos de luz y agua potable de nuestro país realizan la operación de lecturas en los medidores mediante la visita de un empleado de la empresa al lugar donde se encuentra instalado físicamente el medidor, este mediante la observación del indicador del medidor determina el valor del consumo, ésta información es digitada y almacena en un terminal electrónica portátil, información que posteriormente será trasladada a la computadora central donde será procesada la información para finalmente emitir el recibo de pago correspondiente.[1]

El procedimiento tradicional presenta las siguientes desventajas:

- Errores de medición introducidos por el personal encargado de realizar esta operación.

Incremento del tiempo en la recolección de la información.

- Aumento de gastos de operación por contratación de personal encargado de realizar lectura, corte y conexión de servicios.

2.2 Redes Inteligentes.

En forma general las redes Inteligentes (Smart Grids) desde el punto de vista de la red de distribución de energía eléctrica, tiene como objetivo la optimización de los procesos de generación, distribución y consumo de la energía eléctrica.

Para poder cumplir este objetivo las TIC's pone al servicio de las compañías que comercializan servicios básicos diversas herramientas que permiten realizar un monitoreo, control y gestión más eficiente del recurso que se está comercializando. Por ejemplo estas herramientas aplicadas a los sistemas de comercialización eléctrica permiten tener un ahorro de consumo energético, una reducción de costes y un incremento del grado de conformidad del cliente.

En este estudio se plantea el diseño de una red para la transmisión de datos para los servicios de electricidad y de agua potable, el motivo fundamental es optimizar costos y aprovechar el mayor porcentaje la infraestructura de la red.

La denominada tecnología de Red Inteligente (RI) permite aumentar la conectividad, la automatización y la coordinación entre los diversos actores que forman parte del proceso de comercialización del servicio básico.

Los beneficios de los sistemas AMR (Automatic Meter Reading), resultan poco notorias para los abonados, por tal motivo se añade al sistema de medición contadores inteligentes (Smart Meters), los cuales permiten a los usuarios observar el consumo detallado del servicio prestado, por ejemplo la visión consiste en hacer posible que los proveedores de energía dispongan de tarifas eléctricas variables, de manera que dichas tarifas reflejen las diferencias existentes en los costos de

generación de electricidad durante las horas pico o las horas donde la demanda energética no es elevada. Con esta información el abonado podría aprovechar para realizar sus tareas en horas en las que la energía es barata, como por ejemplo prender el calentador de agua.[2]

2.3 Introducción a los Sistemas AMR

Los sistemas AMR es una tecnología que permite la recolección de manera automática los datos de consumo, diagnóstico y estado de contadores tanto de energía eléctrica, como de agua o gas y los envía a una estación central de la empresa que presta el servicio, con la finalidad de reducir costos, tiempos en la recolección de los datos y facilitar el proceso de facturación basada en datos de consumo real.

De manera general independientemente del tipo de tecnología que se emplee los componentes básicos de un sistema AMR son los siguientes:

Contadores, son dispositivos electrónicos que miden la cantidad de energía eléctrica, agua o gas que es suministrada a la residencia o negocio del abonado. Estos contadores necesitan una interface de comunicación que permita la transmisión de datos y de una fuente de alimentación, para el caso de contadores de energía eléctrica la fuente de alimentación no tiene inconvenientes porque se puede obtener de la misma red, en cambio, para medidores de agua y gas se tiene que añadir una batería, por consiguiente el protocolo de comunicaciones tiene que estar orientado al ahorro de la energía.

Concentradores de Datos, son dispositivos que tienen la capacidad de interconectarse con los contadores y el centro de control, envían la información

proporcionada por los contadores hacia una base de datos para su posterior tratamiento.

Centro de Control, es el lugar donde se recibe toda la información de consumo de los contadores enviada desde los concentradores de datos, está equipado con servidores para almacenar y procesar la información.

Sistema de Comunicación, es el medio por el cual permite la transferencia de datos entre el contador eléctrico y el centro de control, pueden ser tecnología de radiofrecuencia, por medios guiados como transmisión a través de las líneas de alimentación eléctrica o plataformas de telefonía fijas.[2]

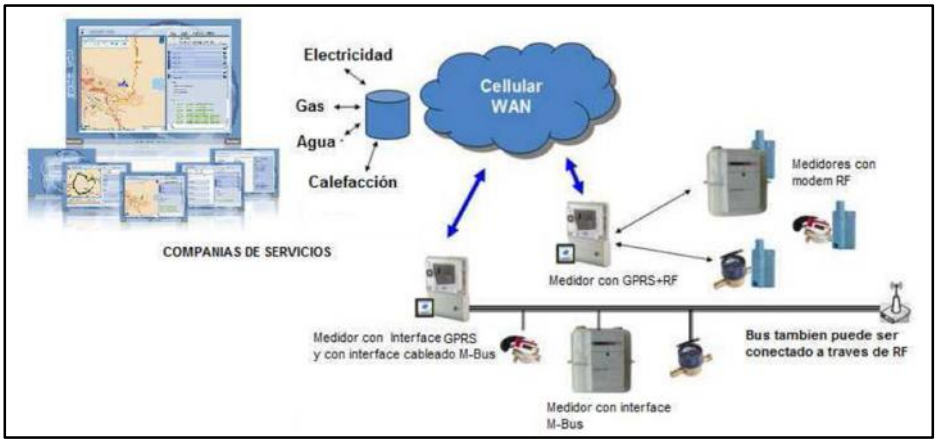


Figura. 2.1. Esquema de un sistema AMR[3]

2.4 Sistemas de transmisión y recolección de datos para medición remota existentes.

A medida que la tecnología evoluciona también lo hacen los sistemas de medición remota, a continuación mencionaremos algunos métodos utilizados para recolectar la información y enviar al centro de control o a los concentradores de datos.

2.4.1 Tecnología Touch

Para eliminar el error humano al momento de la toma de la lectura surgieron contadores con interfaces eléctricas y ópticas Figura 2.2, en las cuales el empleado conecta la terminal de recolección de datos, esta tecnología se le denomina ARM “in situ o TOUCH”, dado que la persona que realiza la medición aún tiene que ir donde se encuentra instalado el medidor. [3]



Figura. 2.2. Tecnología Touch.[3]

2.4.2 Tecnología Handheld

Este tipo de tecnología maraca el punto de partida para los sistemas inalámbricos AMR de actualidad, los medidores y la terminal que se utiliza para recolectar las mediciones tienen un sistemas de comunicaciones inalámbrico, Figura 2.3, el personal que realiza la lectura todavía tiene que dirigirse al lugar donde están instalados los medidores pero no tiene que estar frente al medidor ,la persona que realiza la lectura pasa por los lugares donde están instalados los medidores de los cuales debe tomar la lectura, la distancia dependerá del tipo de comunicación inalámbrica.



Figura. 2.3. Tecnología HandHeld (Walk By).[3]

También podemos encontrar un sistema que utiliza este principio, el sistema de lectura está instalado en un vehículo como se muestra en la Figura 2.4 , en este caso el personal conduce el vehículo por el sector mientras que el dispositivo de lectura recoge los datos del medidor automáticamente, estos sistemas incluyen dispositivos GPS y cartografía digital. [3]

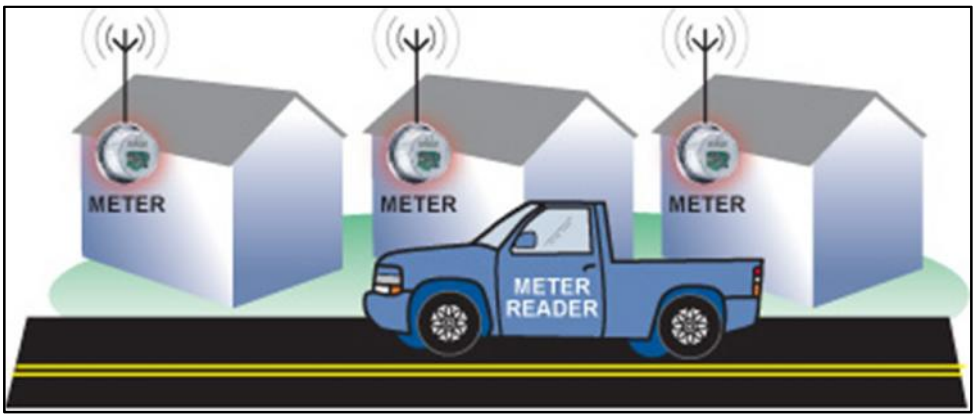


Figura. 2.4. Tecnología AMR Drive-by.[3]

2.4.3 Sistemas Cableados.

En esta área podemos encontrar sistemas que utilizan la infraestructura de las redes de comunicaciones, como por ejemplo la red PSTN (Red Telefónica de Conmutación Pública) o televisión por cable. Estos sistemas aprovechan las redes públicas y privadas ya instaladas para obtener de cada residencia las medidas de consumo. Estos sistemas tiene el inconveniente de ser factible su uso solo en sectores residenciales en donde los usuarios en su mayoría disponen del servicio telefónico.

Otros sistemas utilizan como medio de transmisión el cableado eléctrico, para poder transmitir datos se utiliza la tecnología PLC (Power Line Communication) , las principales ventajas que presenta este método de comunicación son el considerable ahorro en cableado, mientras que en otros medios de comunicación cableados como el teléfono y televisión, se tiene que realizar una conexión entre el medidor y terminal (modem, decodificador) si el abonado tiene alguno de los servicios antes mencionados, caso contrario se tiene que extender cableado hasta los puntos de acometidas que generalmente está en el poste más cercano a la vivienda, en cambio, la red de energía eléctrica está disponible y accesible en todas las viviendas. Otro punto a destacar es la facilidad de instalación y conexión de dispositivos, así como su fácil reubicación en la misma red, lo que hace de esta tecnología una buena opción en la medición del servicio eléctrico.[4]

2.4.4 Sistemas Inalámbricos.

Los sistemas AMR que utilizan señales de radio frecuencia como medio de transmisión puede tomar muchas formas, las más comunes son HandHeld, móviles (Drive-by) y sistemas fijos (GPRS, Wimax, Wifi, Zigbee), pudiendo ser sistemas dúplex y de un solo sentido. Los sistemas pueden utilizar bandas de radiofrecuencia licenciadas o no licenciadas.

Los sistemas de lectura basados en RF por lo general eliminan la necesidad de que el personal que realiza la lectura de los medidores entre en la propiedad o casa. Existe un ahorro de dinero al aumentar la velocidad y exactitud de la lectura, se puede identificar si existe robos de energía, se pueden generar datos históricos y determinar con mayor exactitud horas pico.

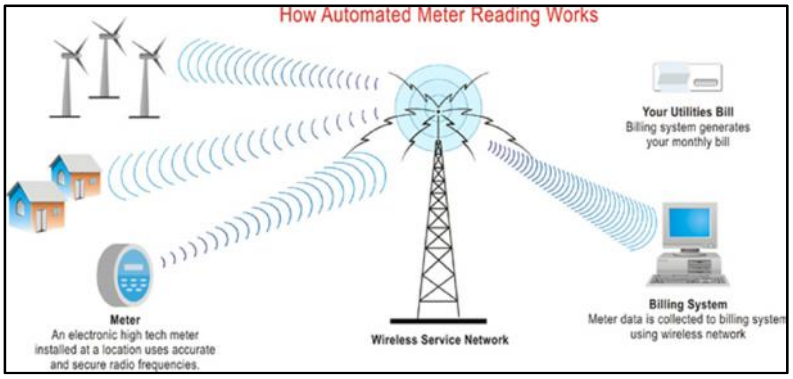


Figura. 2.5. Tecnología RF (Radio Frecuencia).[5]

2.5 Bandas ISM.

En el mundo existen rangos de frecuencia de uso libre que están destinadas para aplicaciones no comerciales en los campos industriales, científicos y médicos, que se las conocen como bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical). Estas bandas

de frecuencia no requieren de una licencia para su utilización, es decir son gratuitas, siempre que no sobrepasen los límites de potencia, y los métodos de protección contra interferencias, que establece en la normativa, ya que existen varias aplicaciones que trabajan en estas bandas de frecuencia.[6]

En la Tabla 2.1 se especifica las diferentes bandas de frecuencia ISM que están disponible en todo el mundo.

Rango de frecuencia	Frecuencia Central	Disponibilidad
6.765 – 6.795 MHz	6.780 MHz	Sujeto a Normas Locales
13.553 – 13.567 MHz	13.560 MHz	Mundial
26.957 – 27.283 MHz	27.120 MHz	Mundial
40.66 – 40.70 MHz	40.68 MHz	Mundial
433.05 – 434.79 MHz	433.92 MHz	Solamente Región 1
868 – 868.6 MHz	868.3 MHz	Solamente Región 1
902 – 928 MHz	915 MHz	Solamente Región 2
2.400 – 2.500 GHz	2.450 GHz	Mundial
5.725 – 5.875 GHz	5.800 GHz	Mundial
24 – 24.25 GHz	24.125 GHz	Mundial
61 – 61.5 GHz	61.25 GHz	Sujeto a Normas Locales
122 – 123 GHz	122.5 GHz	Sujeto a Normas Locales

Tabla 2.1. Frecuencias ISM.

La banda frecuencia de los 2,4GHz está disponible a nivel mundial, mientras que la banda de los 868/915MHz, se utiliza la banda de 868MHZ en Europa y la de 915MHZ en Estados Unidos.[7]

La posibilidad de utilizar la banda de 2.4 GHz a nivel internacional brindan ventajas en términos de mercados más grandes y costos de producción del hardware más bajos. En cambio las bandas de 868 MHz y 915 MHz brindan una alternativa a la

cogestión y las interferencias asociadas a la banda de 2.4 GHz, además ofrecen mayores rangos de cobertura debido a que existe menores pérdidas de propagación.[8]

La elección de una banda u otra dependerá siempre de las características de la aplicación, entre las que pueden estar el alcance, el consumo de energía, la tasa de datos, el tamaño de la antena, el coste, etc.[9]

2.6 Estándar 802.15.4

La primera versión del estándar surgió en el año 2003 desarrollada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos bajo el grupo de trabajo 802.15.4, conocido por su acrónimo en inglés LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Área Network). Nació de la necesidad de tener un estándar orientado para aplicaciones de domóticas, civiles, militares, industriales, médicas, entre muchas otras, donde las redes inalámbricas requeridas son de bajo consumo (energía , datos, procesamiento) y de bajo costo en comparación con el estándar existente 802.11 (WLAN: Wireless Local Area Network) que se consideraba eran muy caras y excesivas para este tipo de aplicaciones.[10][11]

Es un estándar que define la capa física (PHY) y de Control de Acceso al Medio (MAC) para Wireless Personal Area Network (WPAN, redes inalámbricas de Área Personal) con tasas bajas de transmisión de datos.

La eficiencia energética de este protocolo reside fundamentalmente en el uso de las tramas “Beacon”, que permiten sincronizar los dispositivos de la red para que puedan permanecer en modo ahorro de energía el mayor tiempo posible, esto supone una

gran ventaja para el desarrollo WSN que realicen tanto tareas de monitorización como de control.

2.6.1 Capa Física (PHY).

El estándar define tres bandas de frecuencia de operación, como se observa en la Figura 2.6 la banda global de 2.4 GHz, 915 MHz disponible en América y 868 MHz en Europa y 27 canales de comunicación, distribuidos 16 en banda de frecuencia de 2.4 GHz (11-26), 10 en la banda 915 MHz (1- 10) y uno en la banda 868 MHz (0).

Según la frecuencia de operación tenemos la tasa de transmisión de datos, en la banda de 2.4 GHz podemos transmitir a una velocidad teórica máxima de 250 kbps, en la banda de 915 MHz a una velocidad 40 kbps y 868 MHz a 20 kbps.[12]

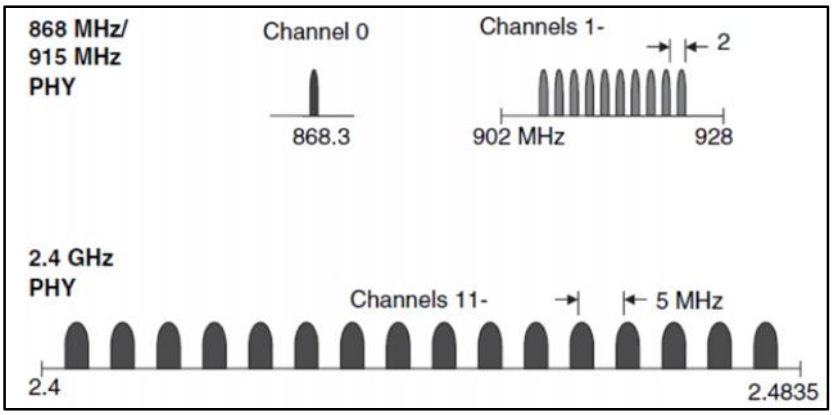


Figura. 2.6. Banda de Operación en el estándar IEEE 802.15.4. [12]

En la Tabla 2.2 se describen algunas características del estándar IEEE802.15.4, donde se detalla el rango de frecuencias de trabajo y en qué región se puede ocupar.

BANDAS DE FRECUENCIA	COBERTURA	CANALES	VELOCIDAD DE DATOS
2.4 - 2.4835 GHZ	En todos los países	16	250 Kbps
902 - 928 MHz	Américas	10	40 Kbps
868 - 868.6 MHz	Europa	1	20 Kbps

Tabla 2.2. Características Capa Física estándar IEEE802.15.4.

Entre los procedimientos que está encargada la capa física podemos mencionar la detección de energía del receptor, determinar la calidad del enlace, verificación de la claridad del canal, especifica una variedad de operaciones de baja potencia, ciclo de trabajo, gestión del consumo energético, y bajas tasas de transmisión.

En resumen la capa física fue diseñada para suplir la necesidad de obtener dispositivos de bajo costo y eficientes en el consumo de energía, operando en las bandas de frecuencias descritas en la Tabla 2.2.

El estándar IEEE 802.15.4 basado en las tres frecuencias de operación descritas define 3 medios físicos:[13]

1. Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), banda de frecuencia 868 MHz con modulación BPSK a la velocidad de 20 kbps y un solo canal.
2. DSSS, bandas de frecuencia de 915 MHz con modulación BPSK a la velocidad de 40 kbps y 10 canales.
3. DSSS, bandas de frecuencia de 2.4 GHz con modulación O-QPSK a la velocidad de 250 kbps y 16 canales.

En una enmienda del estándar del 2007 estándar (IEEE 802.15.4-2007) especifica las siguientes alternativas adicionales de capa física (PHY) :[11]

- Ultra-wide band (UWB) a frecuencias 3 a 5 GHz, 6 a 10 GHz, y < 1 GHz
- CSS (Chirp Spread Spectrum) a 2450 MHz.

El paquete de capa física se denomina PHY Protocol Data Unit (PPDU) se encarga de encapsular todos los datos de los niveles superiores. Se fundamenta en tres componentes, en la Figura 2.7 se detalla la estructura del paquete de capa física 802.15.4.

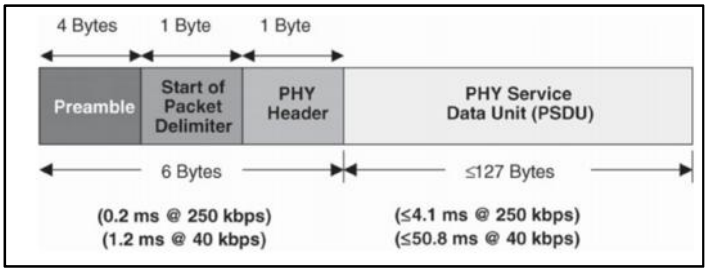


Figura. 2.7. Estructura del paquete de capa física IEEE 802.15.4. [11]

El primer campo Preamble (preámbulo) contiene 32 bits que permite a los dispositivos receptores logar la sincronización de símbolos, el siguiente campo Start of Frame Delimiter (delimitador de inicio de trama), contiene 8 bits y se utilizan para sincronizar la recepción del frame. El campo PHY Header (encabezado PHY) se utiliza para especificar la longitud de la unidad de servicio de datos PHY (PSDU) en bytes. La longitud del campo PSDU tiene un máximo de 127 bytes, en este campo se encapsula la trama MAC. [11][12] [13][14].

2.6.2 Capa de Control de Acceso al Medio (MAC).

La capa MAC es la responsable de controlar el acceso al canal de radio utilizando el algoritmo de acceso CSMA/CA, generación de las tramas de beacon, la gestión de los Guaranteed Time Slots (GTS, Time Slots Garantizados), sincronización de la red, soporte para la asociación y disociación de nodos, transmisión confiable de tramas usando Cyclic Redundancy Check (CRC, Comprobación de Redundancia Cíclica) y tramas con reconocimiento Acknowledgment (ACK).

Esta capa se caracteriza por su reducida complejidad en comparación con otras tecnologías inalámbricas como bluetooth (802.15.1) , por ejemplo mientras que Bluetooth tiene alrededor de 131 primitivas en 32 eventos en 802.15.4 la capa MAC proporciona 26 primitivas que lo hace más versátil.[15][16][17]

Entre las dificultades para un óptimo funcionamiento del protocolo MAC podemos mencionar interferencia en el receptor que pueden variar según el transmisor, imposibilidad de enviar y recibir paquetes de datos al mismo tiempo, altas tasas de error presentes en el receptor. Como requerimientos mínimos la capa MAC del estándar 82.15.4 debe tener, errores en la transmisión bajos, manejo del apagado de dispositivos para tener un consumo de energía reducido, entre otras.

Para acceder al medio inalámbrico y optimizar los recursos existentes existen algunas opciones centralizadas y distribuidas, que pueden funcionar en base a un cronograma preestablecido o en base a una petición producto de la naturaleza de la aplicación.

Las especificaciones de la capa MAC de IEEE 802.15.4 fue diseñada para soportar aplicaciones industriales y caseras de control y monitoreo, que requieren bajas

velocidades de datos y un tiempo de retardo en las transmisiones moderado. Esto ayuda a reducir la complejidad de la capa MAC. Se pueden mencionar entonces algunas características de la capa MAC:

- Soporta varias topologías de redes y dispositivos de redes.
- La posibilidad de una estructura de una supertrama opcional para controlar los ciclos de trabajo de los dispositivos.
- Soporte para transmisión de datos directa e indirecta.
- Métodos de control de acceso al medio basados en contención y determinístico.
- Modos de operación con baliza y sin baliza (En el modo con baliza, el protocolo utiliza la estructura de una supertrama para coordinar el acceso al medio), en el modo sin baliza se utiliza un modo de acceso CSMA/CA).
- Esquema de manejo de eficiencia energética para extender el tiempo de vida la batería, incluyendo periodos adaptivos de adormecimiento.
- Implementación de redes de gran escala, direccionamiento flexible para soportar teóricamente hasta 65000 nodos por red.[13]

A la trama de capa MAC en 802.15.4 se le denomina MAC Protocol Data Unit (MPDU, Unidad de Datos del Protocolo MAC) y se diseñó para que sea adaptable a las necesidades de las diferentes aplicaciones y topologías, manteniendo un protocolo simple. [18]. El formato general de las tramas MAC se presenta la Figura 2.8.

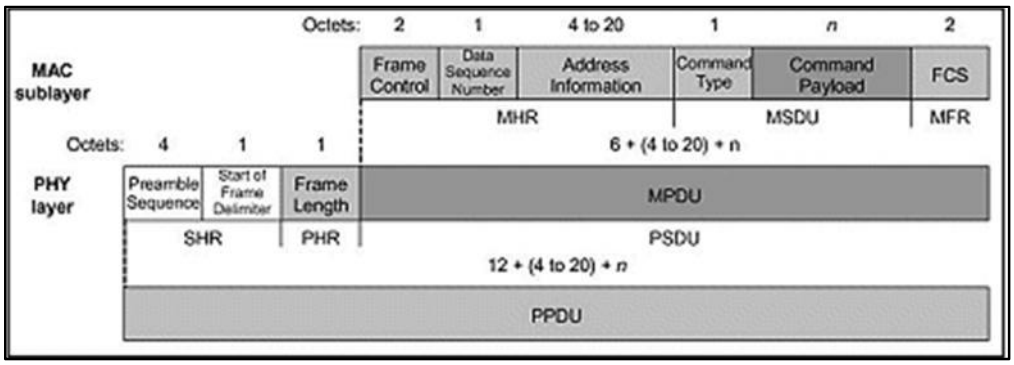


Figura. 2.8. El formato general de las tramas MAC. [18]

El estándar IEEE 802.15.4 tiene cuatro diferentes tipos de tramas. Estas son:

- Trama de datos (Data Frame).
- Trama de confirmación (Acknowledgment Frame).
- Trama de comandos MAC (MAC Command Frame).
- Trama de Beacon "Guía" (Beacon Frame).

Solo las tramas de datos y tramas beacon contienen información proveniente de capas superiores; las tramas de mensajes de confirmación y la de comandos MAC son originadas en la MAC y son usadas por la MAC para comunicaciones igual a igual

2.6.2.1 Trama de Datos (Data Frame).

Las tramas de datos se emplean para la transferencia de datos que se originan en capas superiores, la estructura se muestra en la Figura 2.9.

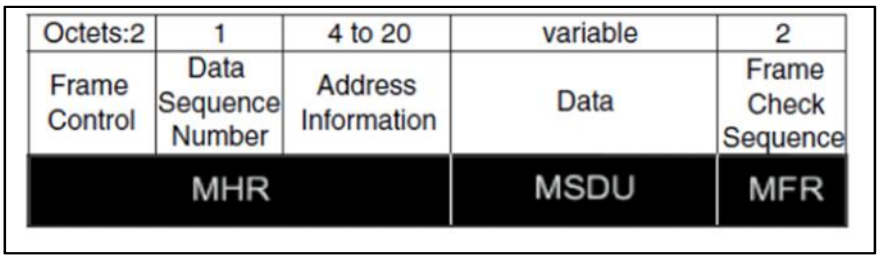


Figura. 2.9. Estructura de la Trama de Datos. [19]

Esta trama está formada por 3 campos, el MAC HeadeR (MHR, Encabezado MAC,), la MAC Service Data Unit (MSDU, Unidad de Servicio de Datos MAC) y por último el campo Mac FooteR (MFR, Chequeo de la trama).

El primer campo de la trama MAC 802.15.4 el encabezado MHR esta a su vez formado por los campos:

- Frame Control, nos indica que trama MAC es la que se enviará, controla los mensajes de reconocimiento y confirmación ASK, resumiendo este parámetro indica cómo está formada el resto de trama y que es lo que contiene.
- Data Sequence Number, es una secuencia de números que se utiliza para la verificación de la integridad de los datos de trama MAC. Una transmisión se considera exitosa únicamente cuando la trama ACK contiene la misma secuencia de números que la secuencia anterior trasmitida.
- Address information, el tamaño de este campo puede variar entre 0 y 20 bytes dependiendo del tipo de trama.

- Payload, es de longitud variable pero no debe de exceder los 127 bytes de información y los datos que lleva dependen del tipo de trama.
- FCS (Frame Check Sequency), es una trama de chequeo de 16 bits CRC (Cyclic Redundancy Chech) sirve para verificar la integridad de las tramas MAC.

2.6.2.2 Trama de confirmación (Acknowledgment Frame).

La trama de reconocimiento o de acuse de recibo se utiliza para enviar una confirmación de la recepción satisfactoria y sin errores de una trama de datos. Este mensaje corto aprovecha el tiempo de silencio (quiet time), especificado en el estándar 802.15.4, inmediatamente después de la transmisión del paquete de datos. [13][19]

El formato de esta trama se muestra en la Figura 2.10.

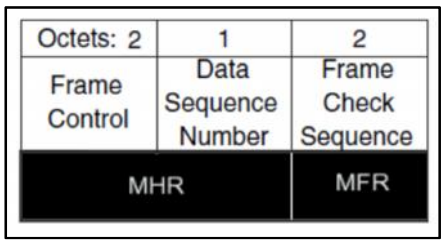


Figura. 2.10. Estructura de la Trama ACK. [19]

2.6.2.3 Trama de comandos MAC (MAC Command Frame).

La trama de comandos MAC se utilizan para enviar órdenes de control a bajo nivel entre dispositivos para negociación, comunicación y configurar los nodos remotamente, sin importar el tamaño y la topología de la red. [19] [12]

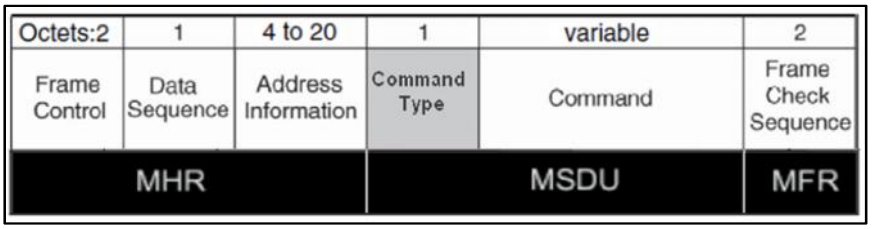


Figura. 2.11. Formato de Trama de Comando MAC. [19]

En la Figura 2.11. se detalla la estructura de una Trama de Comando MAC, en esta trama se observa que la MSDU está formada por dos campos, el primero Command Type especifica mediante un valor que trama de control es enviada, estos comandos se detallan en la Tabla 2.3. , el otro campo contiene información específica del comando que está transmitiendo.

Identificador de comando	**Tipo de Comando**	
0x01	Solicitud de Asociación	Association Request
0x02	Respuesta de Asociación	Association Response
0x03	Notificación de Disociación	Disassociation notification
0x04	Petición de datos	Data request
0x05	Conflicto en la notificación del PAN ID	PAN ID conflict notification
0x06	Notificación de huérfano	Orphan notification
0x07	Petición de trama Beacon	Beacon request
0x08	Realineación del coordinador	Coordinator realignment
0x09	Petición GTS	GTS request
0x0a-0xFF	Reservado	Reserved

Tabla 2.3. Comandos de Tramas de control MAC.

2.6.2.4 Trama de Beacon "Guía" (Beacon Frame).

Las Tramas beacon añaden un nuevo nivel de funcionalidad a la red, son tramas emitidas por el coordinador de la red en intervalos definidos, se utilizan para despertar a los nodos, sincronizarlos, buscar nuevos nodos y unirlos a la red.

Gracias a las tramas de "Beacon" los nodos finales pueden mantenerse la mayor parte del tiempo en modo dormido, ya que la principal funcionalidad de esta trama es permitir a los dispositivos despertar únicamente cuando esta es transmitida, el uso de este método se ve reflejado principalmente en el ahorro de energía de los nodos finales. Las tramas guía son importantes en las redes "mesh" y "cluster tree" porque permiten mantener todos los dispositivos sincronizados [13][19]

La estructura de la trama de Beacon se muestra en la Figura 2.12. , el campo de direcciones (Source Address) contiene el Identificador de Red de Área Personal (PAN ID) y la dirección del dispositivo coordinador. El MSDU de una trama beacon está dividido en cuatro campos.

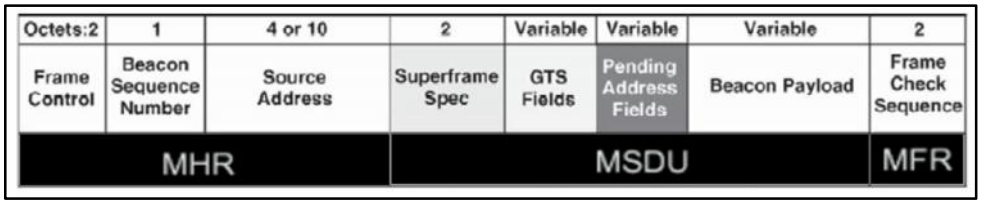


Figura. 2.12. Formato de la trama Beacon. [19]

Superframe Specification: contiene la estructura que especifican una supertrama.

Pending Address Specification: contiene la lista de direcciones de nodos con datos disponibles en el coordinador PAN.

GTS Fields: contiene información acerca de los Guaranteed Time Slot (GTSs) asignados por el coordinador.

Carga útil Beacon (Beacon Payload): contiene datos provenientes de las capas superiores y son enviados a todos los nodos que conforman la red (broadcast) dentro del rango de cobertura.[12]

2.6.2.5 Estructura de Supertramas

La estructura de la trama Beacon contiene las denominadas Supertramas (Superframes), que se utilizan de manera opcional para controlar los ciclos (estados latentes) de trabajo de los nodos permitiendo el ahorro de energía. [13] [18]

El formato de las supertramas esta inicializada y definida por un nodo denominado coordinador PAN, éstas están comprendidas entre dos beacons y puede ser tan cortos como unos 15 ms o tan largos como 245 s, como se muestra en la Figura 2.13.

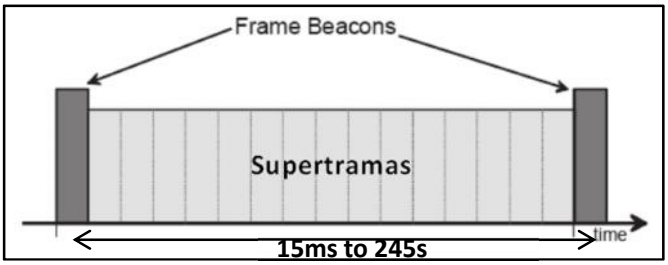


Figura. 2.13. Estructura de la Supertrama. [18]

El tiempo entre dos beacons se divide en 16 times slots iguales, la primera ranura se utiliza para transmitir los parámetros de la estructura de supertrama, sincronizar los dispositivos de la red e identificar la PAN, además en una superframe podemos definir tres periodos de tiempo dependiendo de la aplicación que se está manejando.

El primero caso se especifica un periodo denominado CAP (Contention Access Period), en esta configuración los nodos compiten por una ranura de tiempo para transmitir sus datos empleando el algoritmo de acceso al medio CSMA-CA como podemos apreciar en la Figura 2.14.

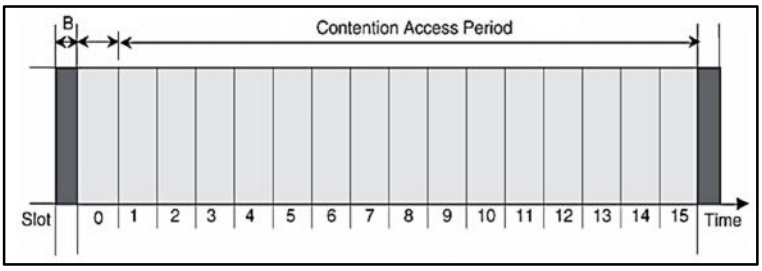


Figura. 2.14. Supertrama utilizando CAP. [18]

Para aplicaciones en las que se requiera baja latencia y un ancho de banda garantizado (QoS) se puede asignar ranuras de tiempo contiguas a un solo nodo, estos intervalos de tiempo se les denominan Guaranteed Time Slots (GTS) y no pueden existir más de 7 en una supertrama, la unión de todos los GTS forman el denominado periodo libre de contención (Contention Free Period, CFP) Figura 2.15.

El CFP siempre aparece después del periodo CAP, el periodo CAP debe estar presente en una supertrama ya que durante este periodo los nodos pueden

negociar y solicitar ranuras de tiempo GTS, edemas permite que nuevos dispositivos puedan unirse a la red.

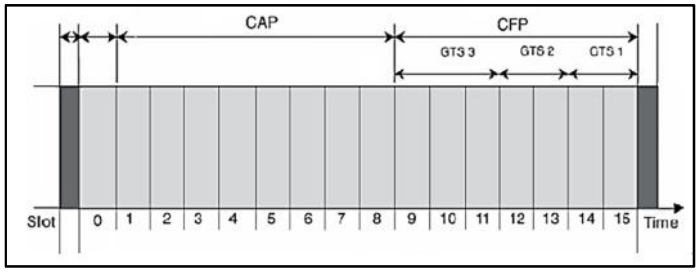


Figura. 2.15. Supertrama utilizando CFP. [18]

En aplicaciones en las que es necesario reducir el consumo energético tanto de los nodos finales como del coordinador PAN, la supertrama puede estar formada por un periodo activo y un periodo inactivo, como se indica en la siguiente Figura 2.16., la longitud del periodo de inactividad puede variar dependiendo de la actividad de la red, el tipo de variable que se está midiendo, en resumen depende de la naturaleza de la aplicación que está soportando la red.

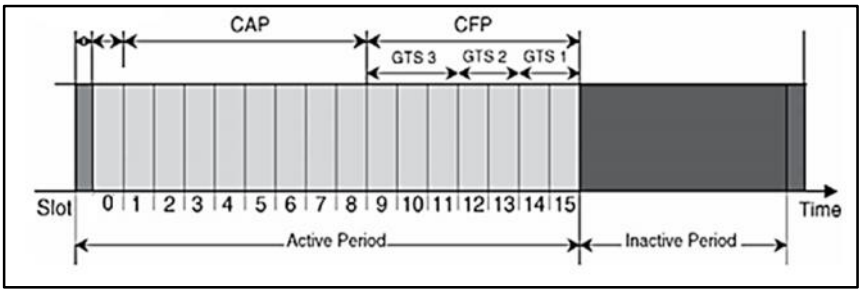


Figura. 2.16. Estructura de la Supertrama con periodo inactivo. [18]

Dependiendo de la actividad, el tipo de dispositivos conectados, y la naturaleza de la aplicación soportada por la red, la longitud del periodo de inactividad varía y puede ser fijada a cero. [8][13] [18]

2.7 Hardware de un Nodo Sensor.

Un nodo sensor es un dispositivo inalámbrico comúnmente llamado “mota”, es de tamaño reducido y tiene capacidades limitadas en lo que se refiere a procesamiento, memoria y duración de la batería.

En la Figura 2.17. se detalla la estructura interna de un nodo sensor, como se observa dispone de un transceptor, un microcontrolador, sensores, memoria para almacenamiento de información y batería.

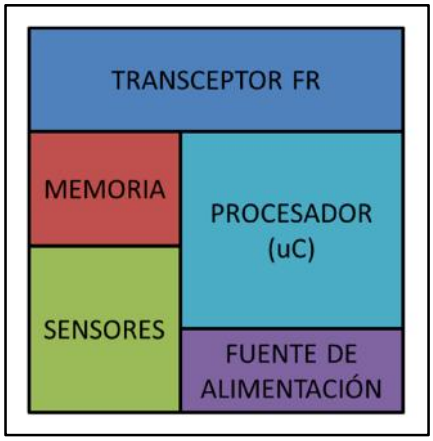


Figura. 2.17. Hardware de un nodo Sensor.

Procesador.

El procesador es el elemento principal de un nodo sensor, se encarga de controlar todos los elementos que conforman un nodo, gestionar el uso de los recursos como son el transceptor, la memoria, la batería y los periféricos de I/O, y la ejecución de programas y aplicaciones. Hay muchas unidades de procesamiento que pueden ser integrados en los nodos sensores entre las que podemos mencionar microcontroladores, microprocesadores y FPGA.

Sensores.

Los sensores son dispositivos que se encargan de transformar una unidad física en señales eléctricas, como puede ser temperatura, presión, humedad, nivel de luz, aceleración, sonido, etc.

Memoria.

La memoria en un nodo sensor está formada por una memoria principal en donde se almacena el código del programa y otra que se utiliza para el almacenamiento de la información recogida por los sensores o las interfaces de I/O. Cabe mencionar que la capacidad de estas memorias es reducida (en el orden de los Kbyte´s) especialmente por consideraciones económicas. Considerando el consumo energético las memorias más utilizadas en sensores inalámbricos son las de tecnología Flash, estas permiten un ahorro considerable porque permite leer y escribir múltiples posiciones de memoria en una misma operación de programación.

Transceptor RF.

Es el dispositivo encargado de la transmisión y la recepción de la información de manera inalámbrica en las bandas ISM, la tasa de transmisión y al alcance son reducidos, de 10 a 250Kbps y 100 m respectivamente. Están compuestos de todos elementos necesarios para realizar una comunicación por ejemplo disponen de moduladores, demoduladores, bloques de codificación, encriptación, filtros, etc.

Fuente de Alimentación.

Dependiendo de la aplicación el consumo de energía de los nodos viene dado por los sensores, la comunicación y el procesado, generalmente la fuente de alimentación son baterías, pero también pueden estar energizados vía cable o utilizando técnicas de alimentación con energía renovable como puede ser mediante placas solares, por inducción electromagnética.

2.8 Tipos de dispositivos.

Para asumir las diferentes configuraciones en una red de sensores en el estándar IEEE 802.15.4 distinguimos o se define dos tipos de dispositivos, estos se diferencian dependiendo de su función dentro de la red o de acuerdo a la complejidad y capacidad de su hardware. Estos son:

2.8.1 Full-Function device (FFD).

Es un dispositivo en cuyo hardware se puede implementar todas las funcionalidades que especifica el estándar, puede operar como coordinador de Red de Area Personal (PAN), como coordinador (Router) o como un dispositivo final.

Cuando se configura como coordinador PAN se encarga de organizar e inicializar la Red, coordinar el acceso al medio de otros dispositivos y almacenar datos de ruteo, para poder realizar todas estas tareas se requiere un hardware con una capacidad de memoria y procesamiento mayor, debido a ello suelen estar conectados a la red eléctrica porque el consumo de energía es mayor.

2.8.2 Reduced Function Device (RFD)

A diferencia que los FFD estos dispositivos tiene menos funcionalidades, son conocidos como los dispositivos finales (sensores o actuadores), el hardware es básico y tienen un bajo consumo de energía.

Un dispositivo FDD puede comunicarse con RFD y con otros FDD, pero un RFD solo puede establecer una comunicación con un FFD. [7][12][13][17]

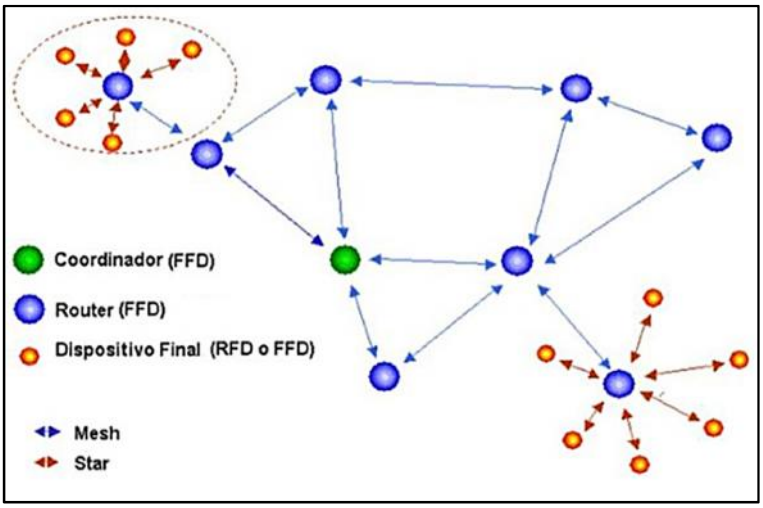


Figura. 2.18. Arquitectura de una WNS. [17].

2.9 Topologías de red.

Basado en los tipos de dispositivos que describimos en el punto 2.6.3, las redes de sensores pueden configurarse en varias topologías, cada una de estas presenta ventajas y desventajas, su elección dependerá en gran medida de la aplicación que se pretende implementar, entre las que podemos mencionar están la topologías estrella, en malla (Peer to Peer) y una combinación entre las dos que se la denomina hibrida o árbol (Cluster Tree).

2.9.1 Topología en Estrella

Esta topología está formada por un coordinador PAN (FFD) y varios dispositivos finales (RFD) como se muestra en la Figura 2.19., la topología estrella soporta un máximo de 65536 dispositivos, el nodo FFD asume el rol de coordinador de la red y es el encargado de iniciar, mantener y gestionar la comunicación de los demás nodos.

En una topología en estrella la información que se envía solo da un salto, es decir que los nodos terminales no intercambian información entre ellos, solo están en comunicación directa con el coordinador. Si un nodo final quiere enviar datos a otro nodo final, este envía los datos al coordinador y este retransmite los datos al nodo destinatario.

Entre las ventajas de utilizar una topología en estrella está la poca complejidad de la red y el menor gasto de energía, pero tiene el inconveniente de la limitada cobertura que esta brinda y tampoco tiene una ruta de comunicación alternativa.

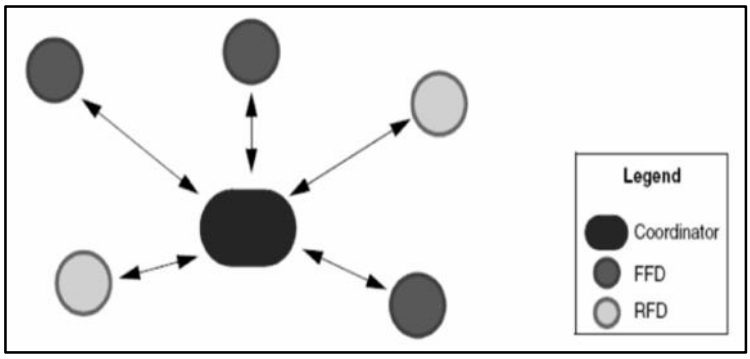


Figura. 2.19. Topología en Estrella.[12]

2.9.2 Topología en Malla.

En una red tipo malla (Peer to Peer) todos los dispositivos suelen ser FFD y tienen la misma prioridad de acceso al medio, existe un coordinador PAN que se encarga de iniciar, mantener y gestionar la comunicación de los demás nodos. En esta topología cualquier nodo está en la capacidad de comunicarse con otro, siempre que estén en rango de cobertura o puedan utilizar otros nodos para establecer una ruta para llegar al dispositivo final. Figura 2.20.

Al poder establecer una comunicación con cualquier nodo en la red pueda existir más de un camino entre el nodo origen y el nodo destino, esta característica la hace altamente tolerante a fallos, ya que si un nodo falla automáticamente la red se reconfigura, para determinar la mejor ruta entre dos nodos y asegurar que la información llegue correctamente al destino se utilizan algoritmos de ruteo, estos algoritmos determinan la latencia, eficiencia y la confiabilidad de la red.

Con esta topología en teoría se podría implementar una red de cobertura ilimitada, pero se tiene el inconveniente que mientras más grande es la red mayor será los requerimientos de hardware que deben tener los nodos para procesar los algoritmos de ruteo, menor será la eficiencia de la red, la latencia aumentara y el consumo de energía de los nodos será mucho mayor debido a la carga de procesamiento que existe.

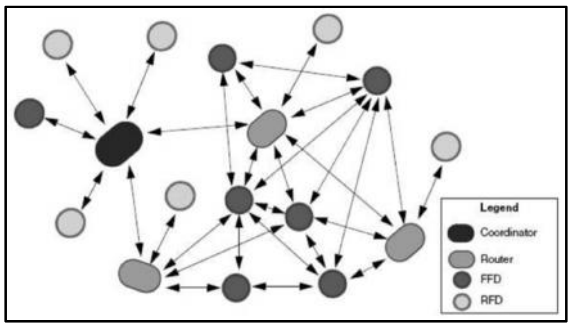


Figura. 2.20. Topología en Malla. [12]

2.9.3 Topología en Árbol (Cluster Tree)

Esta topología busca combinar la simplicidad y bajo consumo de energía de la topología en estrella con la capacidad de reorganización ante fallos y la posibilidad de incrementar la cobertura de topologías en malla.

Como se muestra en la Figura 2.21., igual que en las otras topologías también tenemos un nodo coordinador PAN, varios router´s en los que se establecen ciertos enlaces predeterminados (estáticos) para aumentar la cobertura de la red y los nodos finales que se encuentran en el rango de cobertura de un router crean una red en estrella.

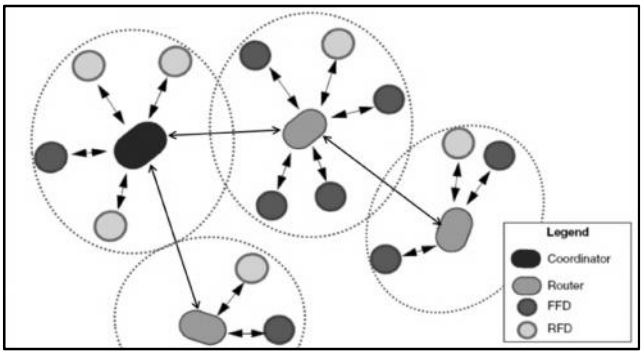


Figura. 2.21. Topología en Árbol (Cluster Tree). [12]

2.10 Protocolos de encaminamiento en el estándar 802.15.4.

Un protocolo de encaminamiento es aquel que nos permite establecer rutas desde el nodo origen hacia el destino deseado, en actualidad existen en considerable número de estos protocolos pero no fueron pensados para ser usados en redes de sensores inalámbricos, por lo que fue necesario realizar un rediseño para lograr un comportamiento eficiente a la red, los criterios para el diseño en una red de sensores dependen directamente de la aplicación.

Existen una gran variedad de clasificaciones sobre los protocolos de encaminamiento pero nosotros consideraremos la clasificación que se muestra en la Figura 2.22., como se observa están divididos en tres grupos, reactivos, proactivos, y los protocolos híbridos.

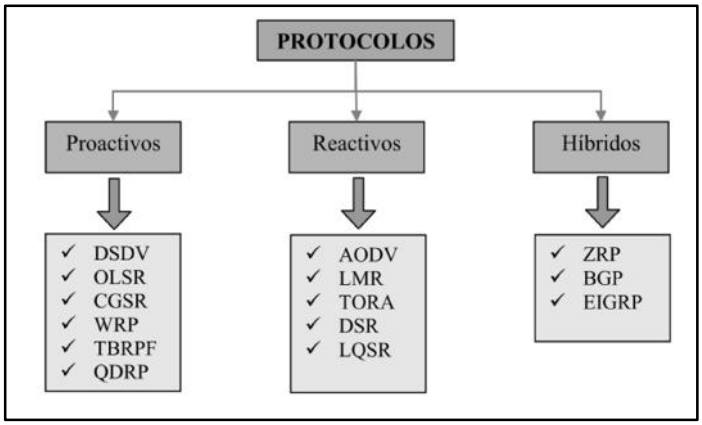


Figura. 2.22. Clasificación de los protocolos de encaminamiento.[13]

2.10.1 Protocolos Proactivos

Los protocolos de encaminamiento proactivos son aquellos que mantienen actualizadas la información de las rutas hacia todos los nodos de la red aunque no

estén transmitiendo información, debido a la sobrecarga que se introduce en la red con los mensajes de control cuando existe un cambio en la topología de la red estos protocolos disminuyen el throughput y aumenta el consumo energético, pero por otra parte reduce la latencia ya que antes de mandar un paquete el nodo siempre tiene una ruta disponible hacia un destino.

2.10.2 Protocolos Reactivos

Los protocolos reactivos crean las rutas únicamente cuando se requiere enviar datos, es decir, bajo demanda. Para poder establecer comunicación entre dos nodos primero se debe determinar una ruta entre el nodo origen y el destino, por esta razón la latencia del primer paquete que se transmite es alta, pero se mejora la eficiencia energética. Podemos establecer dos subtipos de protocolos reactivos.

- **Protocolos con encaminamiento origen**: en este caso la ruta por donde tiene que pasar la información está disponible en la cabecera de los paquetes que se están enviando, el procesamiento en los nodos intermedios es reducido porque no necesita almacenar ni procesar Tablas de enrutamiento. La desventaja de estos protocolos es que no se pueden utilizar en redes extensas ya que a medida que el mensaje pasa por un nodo la cabecera aumenta por consiguiente payload disminuye.
- **Protocolos con encaminamiento salto a salto**: en este caso los nodos intermedios disponen de la información del siguiente salto que tiene que realizar el paquete, en este solo se especifica la dirección del nodo destino y la dirección del siguiente salto. Con estos protocolos la topología de la red se

reconfigura más rápido pero se incrementa el consumo de recursos en los nodos intermedios, ya que tienen que procesar y almacenar las Tablas de encaminamiento.

2.10.3 Protocolos Híbridos

Los protocolos híbridos combinan las mejores características que proporcionan los protocolos proactivos con los reactivos, de manera que la adaptación a ciertos entornos sea más apropiada. [15][20][21].

CAPÍTULO III. ESTUDIO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE DATOS.

Este capítulo se realiza una descripción del software de simulación utilizado, las ventajas que este presenta y los parámetros que se pueden obtener en cada capa del modelo OSI. Se realiza una descripción detallada de los protocolos de encaminamiento que se utilizaron en las simulaciones y los parámetros que hay que configurar. Se presenta los esquemas de las topologías de red con 20, 40, 60, 80 y 100 nodos que se simularon y los resultados preliminares.

3.1 Software QUALNET para desarrollo de simulaciones

El software QualNet es una plataforma de modelado y simulación que provee de una alta fidelidad en simulaciones a gran escala, utilizando dispositivos inalámbricos y cableados. QualNet es una herramienta en la que se puede analizar el rendimiento, y el comportamiento de miles de dispositivos en una misma simulación, por ejemplo, routers, switches, servidores, puntos de acceso, antenas, radios, computadoras y cualquier otro equipo, también incluye la posibilidad de realizar simulaciones incorporando la topología del terreno y condiciones climáticas, para ello hace uso de la multitarea y capacidades de multicore y procesado en la nube.

Entre las ventajas de utilizar el software QualNet tenemos:

- Precisión: ofrece simulaciones ultra alta fidelidad de dispositivos de red, transmisores, antenas todos en tiempo real.
- Rendimiento: si se desea realizar simulaciones a gran escala con miles de dispositivos que podrían tomar meses con otro software de simulación,

Qualnet hace uso del procesamiento en paralelo que le permite ejecutar simulaciones en minutos.

De manera general el software Qualnet incluye 5 módulos para configurar, visualizar, analizar una simulación.

Módulo para diseño de la red.

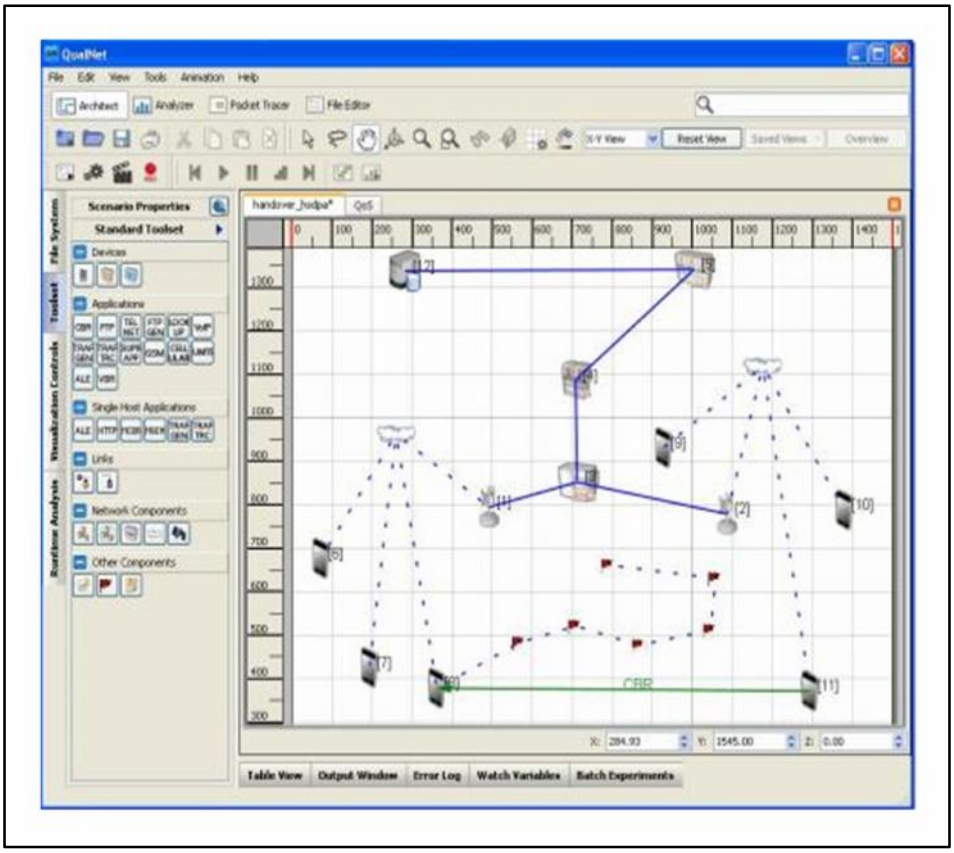


Figura. 3.1. Módulo para diseño de la Red.[22]

Este módulo permite a los usuarios configurar parámetros como terreno, conexiones, topología de la red, subredes, patrones de movilidad en caso de comunicaciones móviles, y otros parámetros funcionales de los nodos de la red. Una de las ventajas

del software Qualnet es la facilidad de ubicar los diferentes elementos de la red, únicamente con hacer clic y arrastrar y soltar. También puede personalizar la pila de protocolos de cualquiera de los nodos y especificar el tráfico que se generara en la capa de aplicación y servicios que se ejecutarán en la red.

Módulo de Visualización.

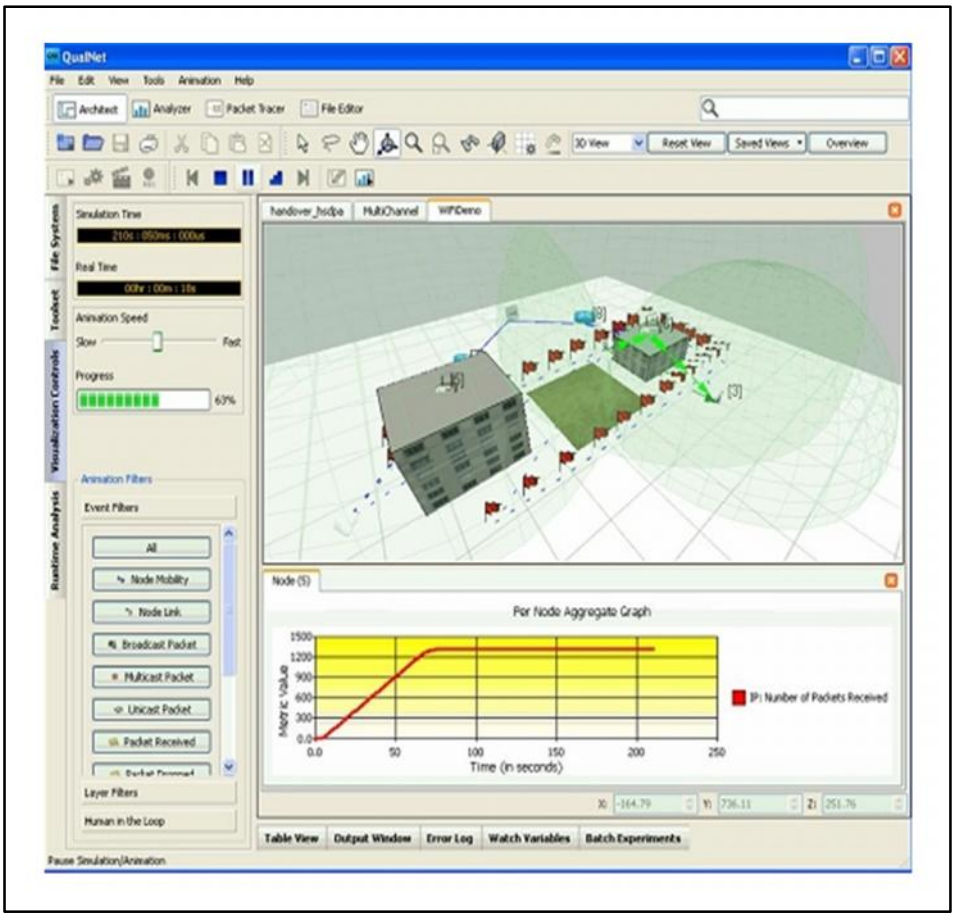


Figura. 3.2. Módulo de Visualización. [22]

En este módulo el usuario tiene la oportunidad de visualizar el escenario de la red creada en módulo de diseño, cuando se ejecuta la simulación se puede observar como los datos viajan a través de la red en sus diferentes caspas, también se puede

visualizar mediante gráficas dinámicas las diferentes métricas de rendimiento de una red y nos da estadísticas en tiempo real.

Módulo de Análisis Estadístico (Analyzer).

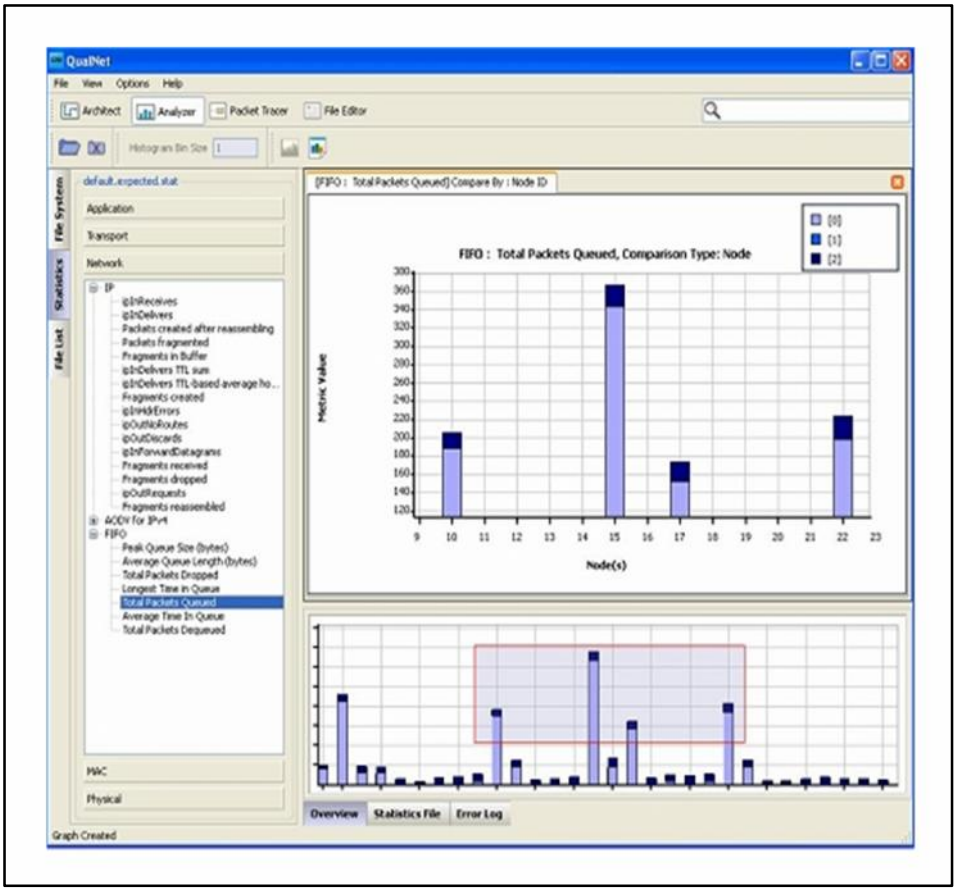


Figura. 3.3. Módulo de Análisis Estadístico (Analyzer). [22]

Analyzer es una herramienta estadística que muestra cientos de gráficos de las diferentes métricas que se pueden tomar de una red, además se puede personalizar la visualización de las gráficas mediante la exportación de los datos a hojas de cálculo en formato CSV.

Reproductor de Escenarios.

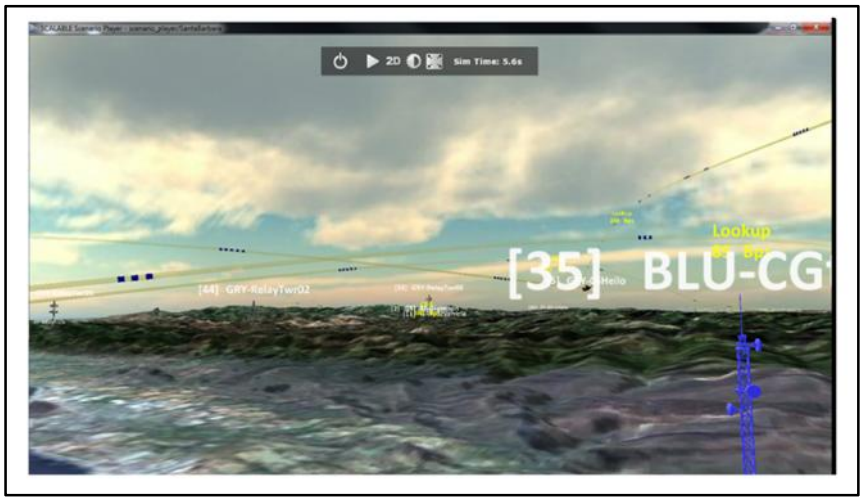


Figura. 3.4. Reproductor de Escenarios. [22]

Los archivos de configuración de una red creados en el módulo de diseño de QualNet pueden ser reproducidos en escenarios 3D con imágenes de alta calidad y alto nivel de detalle de los diferentes elementos de la red, esta herramienta es adecuada para realizar presentaciones a nivel gerencial donde se necesita comprender rápidamente si la red va a funcionar como se espera.

Statistics Database (Stats DB)

QualNet tiene la posibilidad de guardar las Tablas estadísticas una base de datos, estas Tablas contienen información con mayor detalle que los archivos generados por el módulo Analyzer.

3.2 Descripción de Protocolos de Comunicaciones.

En las simulaciones que se realizaron en el software Qualnet se utilizaron los siguientes protocolos de encaminamiento: AODV, OLSR, ZRP. El criterio para

seleccionar los protocolos antes mencionados es considerar un tipo de protocolo reactivo, proactivo e hibrido respectivamente, y poder determinar los beneficios y problemas que se presentan en cada uno de estas tipos de protocolos. A continuación se realiza una pequeña descripción de los protocolos utilizados en las simulaciones.

3.2.1 Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV).

AODV es un protocolo de encaminamiento reactivo para redes inalámbricas AD-HOC, una de las características de este protocolo es el uso de Tablas de enrutamiento en cada uno de los nodos que conforman la red, únicamente intercambia mensajes cuando se necesita transmitir información, por este motivo la latencia en el primer paquete que se envía es alto comparado con otros protocolos de enrutamiento, como ventaja existe un ahorro considerable de energía ya que el número de mensajes de control que genera este protocolo es reducido.

En una Tabla de enrutamiento encontramos los siguientes campos:

- Dirección IP Origen
- Tiempo de Vida (TTL)
- Dirección IP Destino
- Número secuencia Destino.
- Contador de saltos (hop count)

El número de secuencia permite determinar si la información que se envía es reciente o antigua para evitar bucles o transmisiones por rutas antiguas o caducadas, la función del tiempo de vida es evitar el uso de caminos de los que su estado no se conoce desde hace mucho tiempo, el contador de saltos nos indica por cuantos nodos

ha pasado el mensaje y si llega a su destino antes de un valor máximo (35 default) el mensaje es desechado para evitar que siga transmitiéndose por la red.

En este algoritmo de ruteo se generan dos procesos, uno es el descubrimiento de rutas que se produce cada vez que se quiere transmitir un mensaje, siempre y cuando la ruta hacia el nodo destino no esté presente en la tabla de enrutamiento, este proceso inicia enviando un paquete RREQ (Route Request) a sus nodos vecinos, los que a su vez se lo envían a sus vecinos hasta llegar al nodo destino, una vez recibido el mensaje RREQ en el destino, este responde con un mensaje RREP (Route Reply) en cual viaja hacia el nodo fuente estableciendo un camino directo al destino.

El mantenimiento de rutas es otro proceso que se realiza en el protocolo AODV se utiliza para no tener que iniciar un descubrimiento de ruta para cada mensaje de información que se quiere enviar, este surge cuando el tiempo de vida de una ruta encontrada expira o en redes móviles, cuando un nodo cambia de posición, en estos casos el nodo que detecta el enlace roto genera un mensaje REPP (Route Error) con número de salto infinito para informar a todos los nodos sobre este suceso, y eliminar de sus Tablas de enrutamiento dicha ruta y si lo desean generar un mensaje RREQ para encontrar una nueva ruta o dar por terminado la comunicación con dicho nodo.[20][23]

3.2.2 Optimized Link State Routing (OLSR).

OLSR al ser un protocolo proactivo mantiene actualizada su Tabla de ruteo en todo momento, en su Tabla de ruteo se guarda todas las rutas posibles a los diferentes nodos que conforman la red.

Uno de los inconvenientes de este tipo de protocolos es la carga de datos adicionales en la red debido al aumento mensajes de control, una ventaja es la baja latencia que existe debido a que siempre está disponible en la Tabla de enrutamiento la información de la ruta por la que tiene que ir el paquete.

Para optimizar el ancho de banda disponible en la red en la difusión de mensajes se utiliza la técnica de retransmisores multipunto, es decir cada nodo selecciona un conjunto de nodos vecinos Multipoint Relays (MPR), que son los encargados de reenviar el tráfico de control por toda la red.[24]

OLSR para mantener actualizada la Tabla de enrutamiento genera los siguientes tipos de mensajes:

- Mensajes HELLO: se encarga de sensar el estado de un enlace, descubrimiento de nodos vecinos y señalización de MPR.
- Mensajes Topology Control (TC): realizan la tarea de actualizar la topología de la red y la comunica a sus nodos vecinos.
- Mensajes MID: declarar la presencia de nodos con múltiples interfaces.[25]

3.2.3 Zone Routing Protocol (ZRP).

ZRP es un protocolo hibrido que se mantiene características proactiva en un ámbito local y reactiva a nivel más global. En cada nodo se define la zona mediante un radio que es medido en cantidad de saltos, al momento de enviar un paquete de datos si este tiene como destino un nodo que está dentro de su zona, utiliza un protocolo proactivo y si esta fuera utiliza un protocolo reactivo.

El protocolo que se utiliza para ruteo dentro de la zona se llama Intra Zone Routing

Protocol (IARP), que un protocolo basado en el protocolo Link- State que se encarga de mantener actualizada la información de todos los nodos que pertenecen a la zona. Para el ruteo de los paquetes para nodos que están fuera de la zona de utiliza el protocolo Interzone Routing Protocol (IERP), en este protocolo se introduce el término de bordercasting que no es más que enviar un mensaje directamente a los nodos frontera para que se encarguen de proceso de descubrimiento de la ruta dentro de su zona, este procedimiento continua hasta que se llegue al nodo destino o hasta que se examine toda la red, una vez que se encuentra el destino , este responde con un mensaje unicast hacia el origen.[26]

3.3 Simulaciones de Protocolos de Comunicación.

En el escenario de simulación que se utilizó se observa en la Figura 3.5. y los parámetros que se configuraron se detallan en la Tabla 3.1.

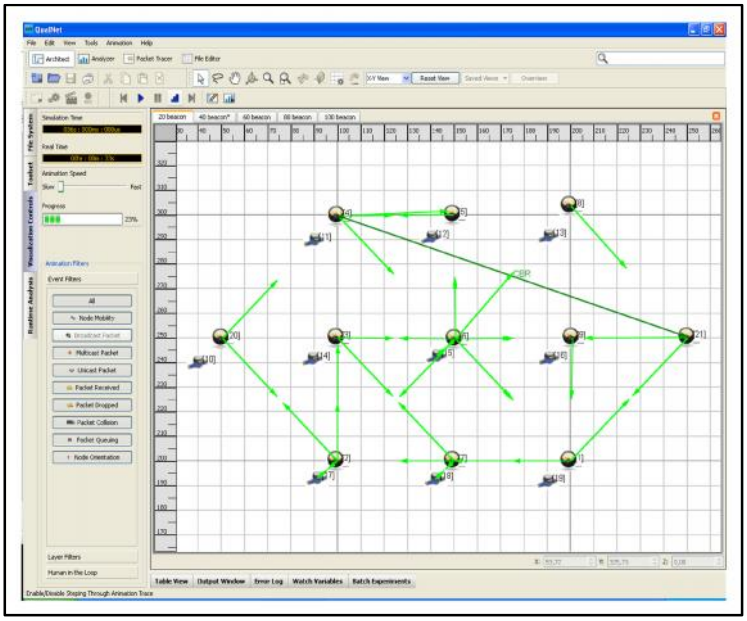


Figura. 3.5. Esquema del escenario de Simulación.

PARÁMETRO GENERALES	
Tiempo se Simulación.	150 Segundos
Inicio de Transmisión.	30 segundos
Intervalo Transmisión.	1 segundo
Numero de Paquetes.	60
Tamaño de Paquetes.	50 bytes
Numero de Nodos.	20
Frecuencia	2.4 Ghz Canal 1
Modelo de Propagación	Two Ray
Protocolos de Ruteo	AODV, OLSR, ZRP
Nodos (Medidor Potencia Eléctrica)	
Potencia	0 dbm
Beacon Order	14
SuperFrame Order	3
Nodos (Medidor Caudal)	
Potencia	-24 dbm
Beacon Order	6
SuperFrame Order	6

Tabla 3.1.Parámetros generales de configuración para las simulaciones.

El tamaño del paquete se determinó en base a los parámetros que tiene que enviar cada nodo, entre los que podemos mencionar, ID del medidor, fecha y hora de la medición, parámetros de medición (potencia consumida Kwh, VAH, Factor de potencia, Voltaje L-L, Voltaje L-N, Corriente, datos del medidor de caudal.)

En número de nodos que se tomó como base fue 20 (10 Nodos medidor de potencia Eléctrica y 10 nodos medidor de caudal) a partir de este valor se desarrollaron simulaciones para 40, 60, 80, 100 nodos cuyos resultados se detallaran más adelante.

Los datos de Beacon Order y SuperFrame Order nos sirven para calcular el tiempo

que debe haber entre beacons y en tiempo de la zona activa en el cual los nodos pueden transmitir información Figura 3.6.

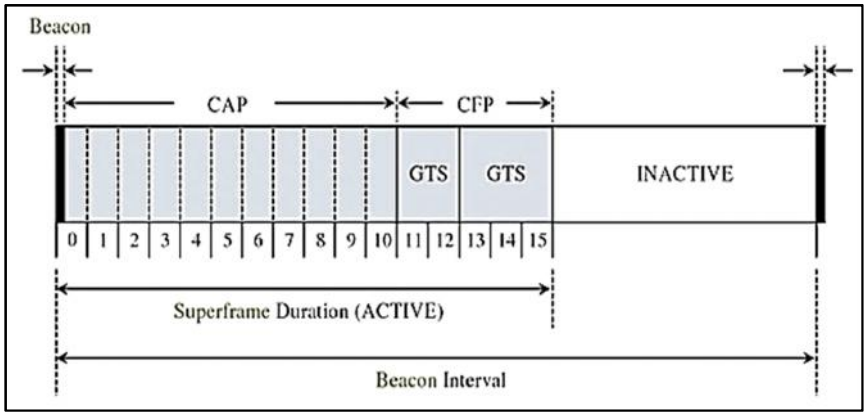


Figura. 3.6. Estructura de una Super trama 802.15.4 con Beacon's habilitados.

BI=*aNumeSuperframeSlots***aBaseSlotDuration**2^{BO}/DataRate).

SD= *aBaseSlotDuration**2^{SO}/ DataRate)

aNumeSuperframeSlots =16

aBaseSlotDuration = 60

dataRate = 62500

aNumeSuperframeSlots : Es una constante e indica número base de Time Slots.

aBaseSlotDuration : Es una constante e indica el Tiempo base de un Time Slot. [27]

dataRate : Numero de Símbolos por segundo a 2.4 Ghz y modulación O-QPSK. [28]

En la Tabla 3.2., se indican los valores de BO y SO y su correspondiente valor Beacon Interval (BI) y duración del Time Slot.

SO	BO	BI	SD
0	0	0,01536	0,00096
1	1	0,03072	0,00192
2	2	0,06144	0,00384
3	3	0,12288	0,00768
4	4	0,24576	0,01536
5	5	0,49152	0,03072
6	6	0,98304	0,06144
7	7	1,96608	0,12288
8	8	3,93216	0,24576
9	9	7,86432	0,49152
10	10	15,72864	0,98304
11	11	31,45728	1,96608
12	12	62,91456	3,93216
13	13	125,82912	7,86432
14	14	251,65824	15,72864
15	15	SIN BEACON	

Tabla 3.2. Valores de BO y SO y su correspondiente valor (BI) y duración del Time Slot

En cuanto a los niveles de potencia seleccionados se tomó el máximo valor de potencia que se puede transmitir para los nodos que irán ubicados en los medidor potencia eléctrica ya que estos tienen una fuente de energía permanente, en cambio en los nodos de los medidores de caudal la potencia en la mínima porque estos funcionaran con baterías y la distancia de transmisión es pequeña.

En primer lugar en la Tabla 3.3., presentamos los resultados obtenidos para una simulación utilizando el protocolo AODV, OLSR y ZRP.

PARÁMETRO	AODV	OLSR	ZRP
First Packet Received (seg)	31,701146	30,01064	30,009946
Last Packet Received (seg)	89,00994	89,01128	89,010586
Paquetes recibidos	58	58	58
Throughput (bits/s)	404	393	393
Average End-to-End Delay (seg)	0,05245	0,011708	0,011040
Average Jitter (seg)	0,28481	0,001940	0,001858

Tabla 3.3. Resultados obtenidos para la simulación de los protocolos AODV, OLSR, ZRP.

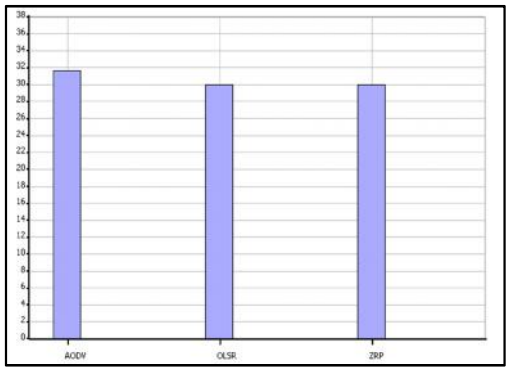
Como se puede observar en la Tabla el protocolo AODV presenta un mayor retardo en el primer paquete en comparación con los otros protocolos en donde el retardo está en el orden de la décima de segundo. También se observa que el jitter promedio en el protocolo AODV es mayor esto se debe a que antes de transmitir el paquete de datos tiene que determinar la ruta por la que se debe enviar el mismo.

A continuación presentamos algunas de las gráficas que se pueden obtener de la simulación para las capas de aplicación, red, MAC y física. En base a estas se puede determinar las ventajas y desventajas que presentan cada uno de los protocolos.

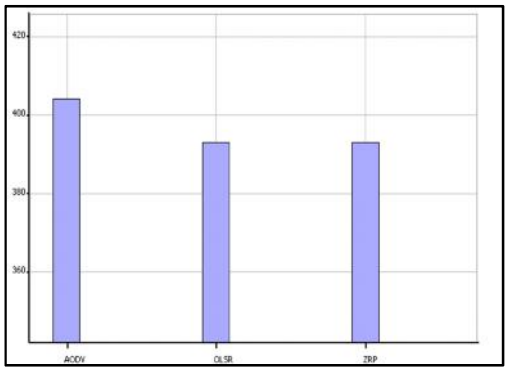
3.3.1 Capa de aplicación.

En la simulación se obtiene las gráficas de First Packet Received (seg), Throughput (bits/s), Average End-to-End Delay (seg), Average Jitter (seg), los datos que se obtienen representan las métricas de los datos que circulan por la red en capa la capa de aplicación.

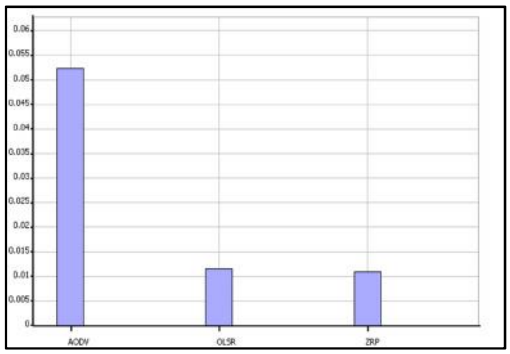
First Packet Received (seg)



Throughput (bits/s)



Average End-to-End Delay (seg)



Average Jitter (seg)

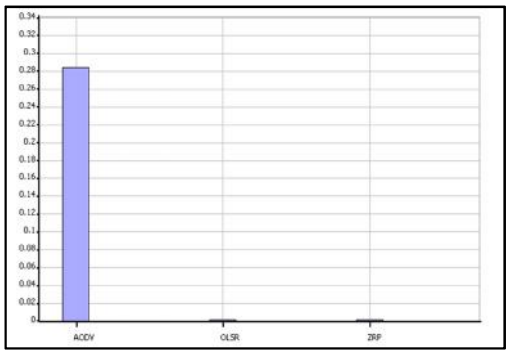


Figura. 3.7. Gráficas que entrega el software Qualnet para la capa de aplicación.

3.3.2 Capa de red.

En esta capa se tomaron las gráficas correspondientes al número de paquetes que se mantuvieron en cola, paquetes perdidos, máximo tamaño de la cola.

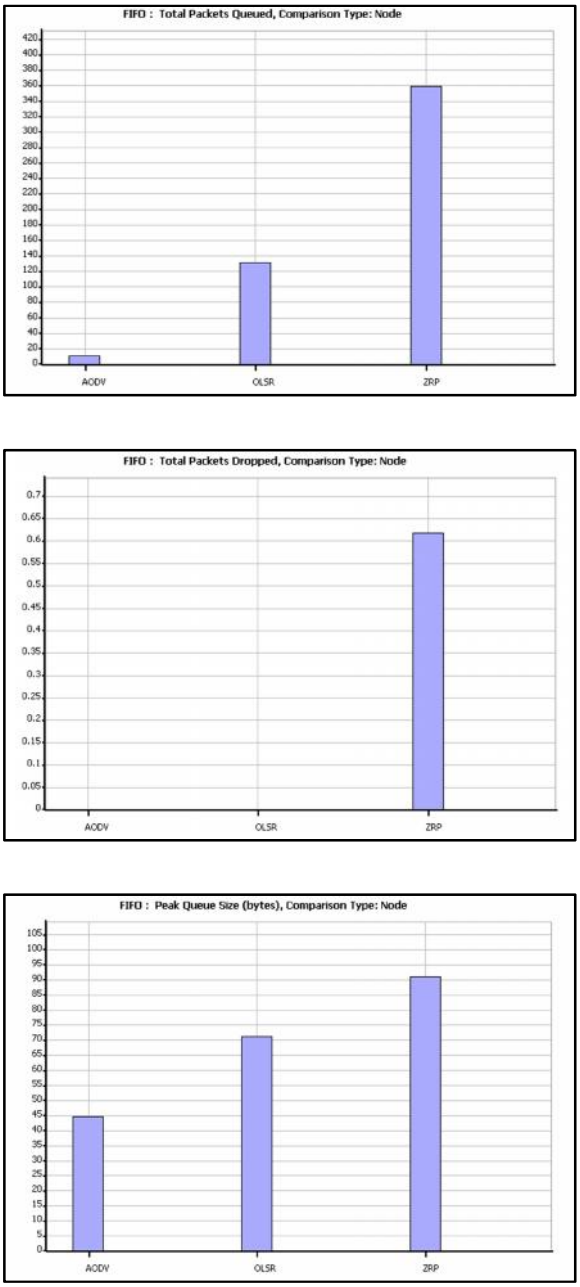


Figura. 3.8. Gráficas que entrega el software Qualnet para la capa de Red.

3.3.3 Capa MAC.

En esta capa se mide el número de paquetes de datos y de control que se generaron y numero de paquetes perdidos en toda la red.

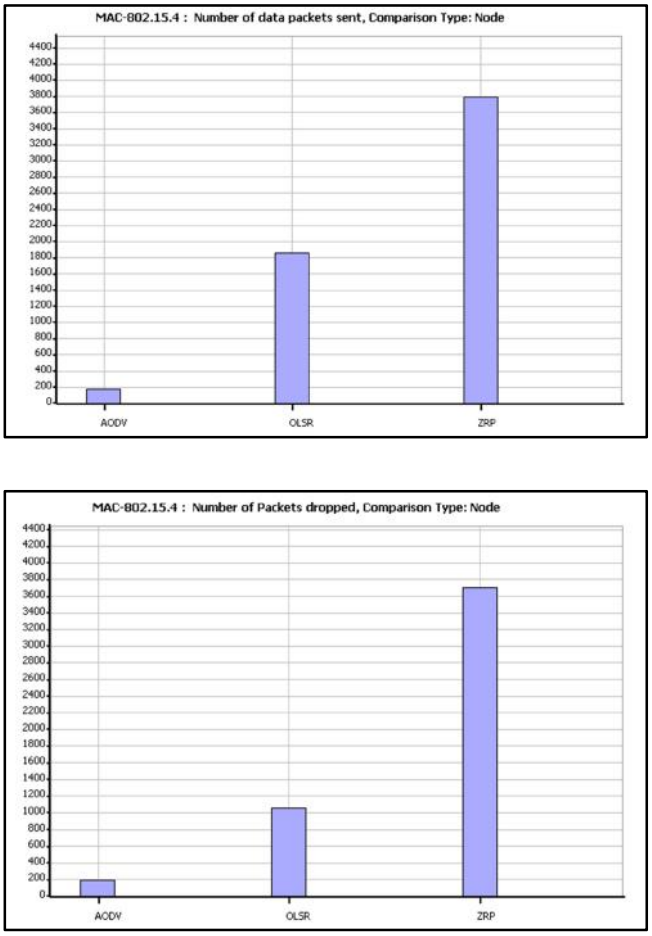


Figura. 3.9. Gráficas que entrega el software Qualnet para la capa MAC.

3.3.4 Capa Física.

En esta capa se obtienen valores de la cantidad de señales transmitidas y el número de señales recibidas pero con errores.

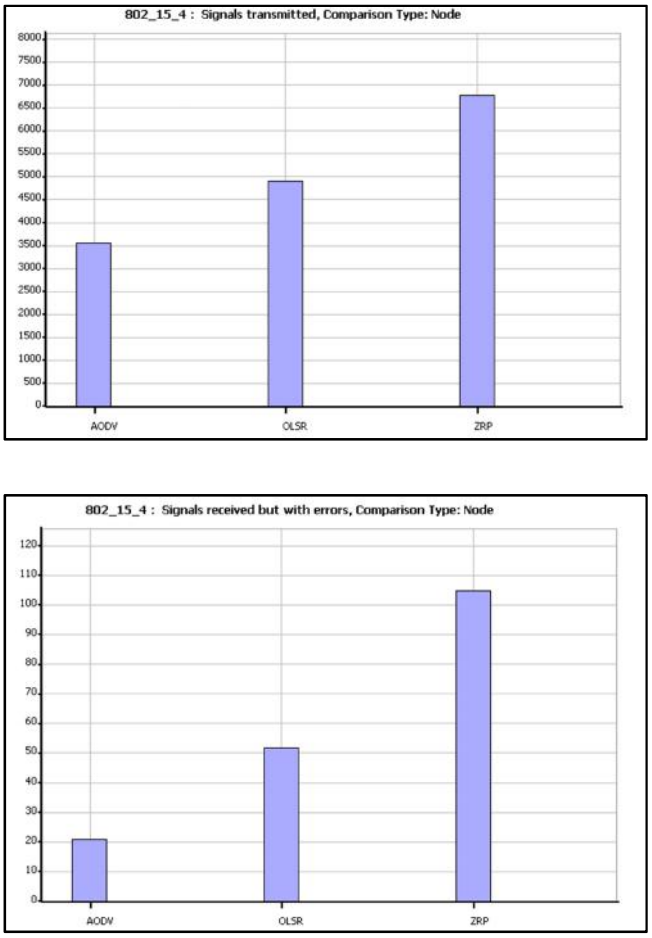


Figura. 3.10. Gráficas que entrega el software Qualnet para la capa Física.

3.4 Simulación de Topologías de Red.

En cuanto a las topologías en las simulaciones se consideró el tamaño de la red, se realizaron simulaciones para 40, 60, 80 y 100 nodos, se consideraron los mimos parámetros que se establecieron en la simulación para 20 nodos. En la Figura 3.11, 3.12, 3.13, 3.14., se muestra las diferentes topologías que se simularon.

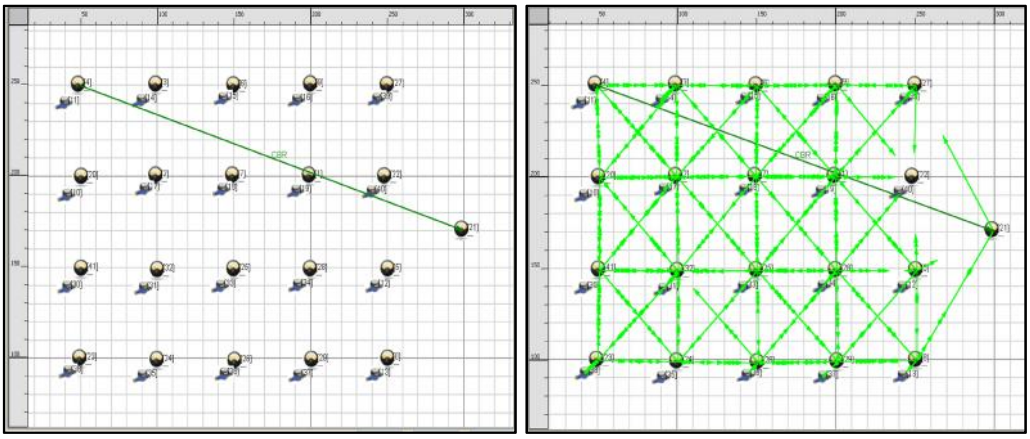


Figura. 3.11. Topología de simulación con 40 Nodos.

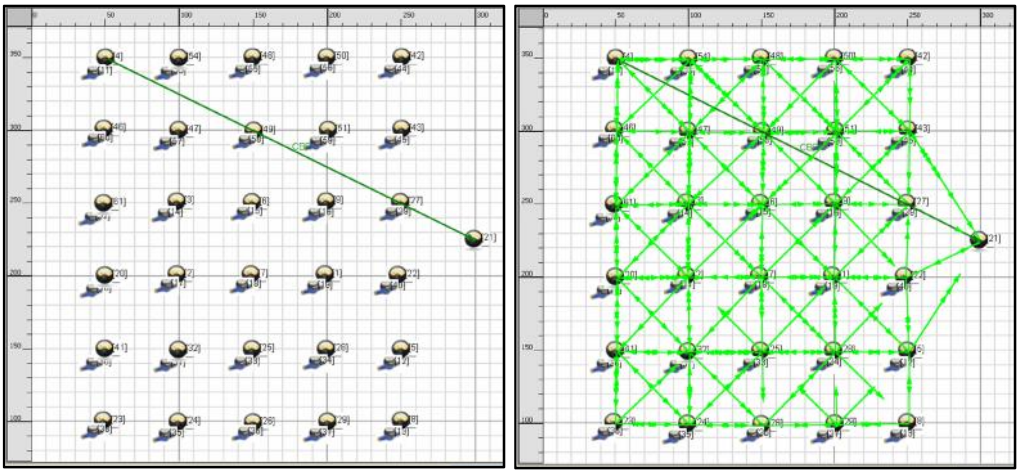


Figura. 3.12. Topología de simulación con 60 Nodos.

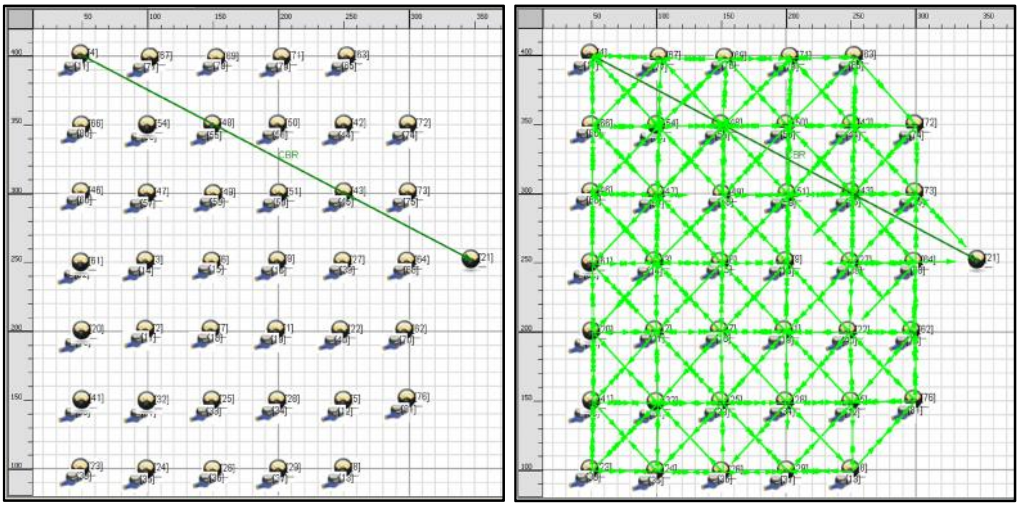


Figura. 3.13. Topología de simulación con 80 Nodos.

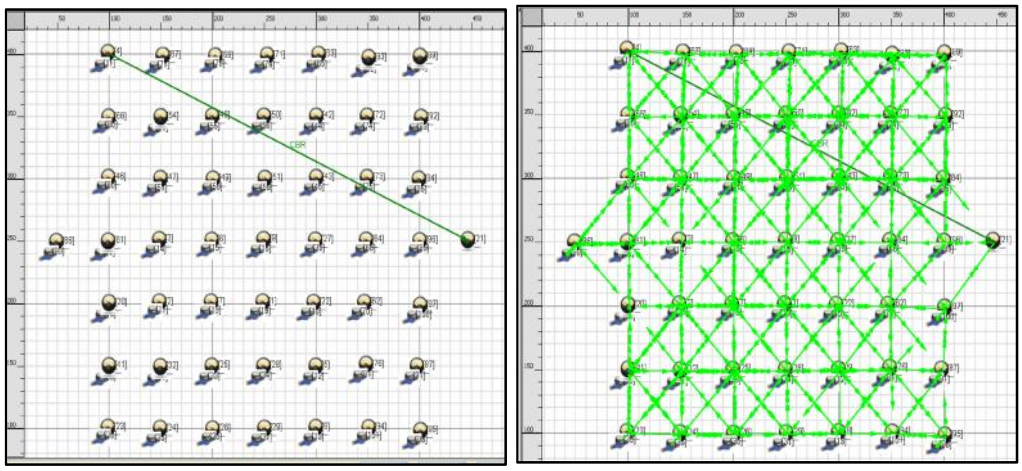


Figura. 3.14. Topología de simulación con 100 Nodos.

Los resultados de las simulaciones en la capa de aplicación de las diferentes topologías antes indicadas se presentan en las Tablas 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7.

PARÁMETRO	AODV	OLSR	ZRP
First Packet Received (seg)	48,0621696	32,8400896	39,0192896
Last Packet Received (seg)	90,0298496	89,0199293	112,01193
Paquetes recibidos	39	47	45
Throughput (bits/s)	397	334	282
Average End-to-End Delay (seg)	1,15857161	0,16981878	15,3323776
Average Jitter (seg)	0,7985682	0,0911286	0,62254396

Tabla 3.4. Resultados para la topología de 40 Nodos.

Parámetro	AODV	OLSR	ZRP
First Packet Received (seg)	46,0103295	37,0232903	37,0221695
Last Packet Received (seg)	90,0128895	89,0239303	100,88329
Paquetes recibidos	39	34	50
Throughput (bits/s)	371	261	246
Average End-to-End Delay (seg)	1,21846903	0,02492382	4,40079994
Average Jitter (seg)	0,68985633	0,00340567	0,25999247

Tabla 3.5. Resultados para la topología de 60 Nodos.

Parámetro	AODV	OLSR	ZRP
First Packet Received (seg)	47,8830018	42,0269694	63,9494336
Last Packet Received (seg)	89,0266818	74,0483136	95,8823294
Paquetes recibidos	21	14	20
Throughput (bits/s)	359	51	92
Average End-to-End Delay (seg)	0,06898278	0,41635466	23,8404127
Average Jitter (seg)	0,49578108	0,09326648	1,79219931

Tabla 3.6. Resultados para la topología de 80 Nodos.

Parámetro	AODV	OLSR	ZRP
First Packet Received (seg)	49,0308096	42,0373376	84,8914176
Last Packet Received (seg)	89,0330496	44,0354176	144,060378
Paquetes recibidos	36	3	19
Throughput (bits/s)	320	11	78
Average End-to-End Delay (seg)	0,03366289	0,03680426	54,8997544
Average Jitter (seg)	0,53123939	0,00038	3,709163

Tabla 3.7.Resultados para la topología de 100 Nodos.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.

Una vez que se ha realizado las simulaciones con los diferentes parámetros descritos en anteriormente, en este capítulo se realizara el análisis de los datos, se comparara las diferentes métricas en las capas de aplicación, red, MAC, y física, y se determinara cual topología y que protocolo de comunicaciones es el adecuado para la aplicación que se está realizando el estudio.

4.1 Determinación del protocolo de encaminamiento y Topología de la Red Óptima.

Para determinar la topología óptima y el protocolo de encaminamiento óptimo para esta aplicación se realizó un análisis comparativo de todas las simulaciones que se realizaron, se estudió el comportamiento de las métricas en capa de aplicación como el Througput, First Packet Received, Average Jitter. En capa de red se analizó parámetros como el número de paquetes que se mantuvieron en cola, máximo tamaño de la cola. En capa MAC se midió el número de paquetes de datos y de control que se generaron y número de paquetes perdidos, en capa física se analizó cantidad de señales transmitidas y el número de señales recibidas pero con errores.

4.1.1 Capa de Aplicación.

En primer lugar se realizó un estudio del comportamiento de los protocolos en una topología de red específica, y después se realizó el análisis del comportamiento de cada protocolo a medida que aumenta el tamaño de la red, en las siguientes gráficas se presenta los resultados.

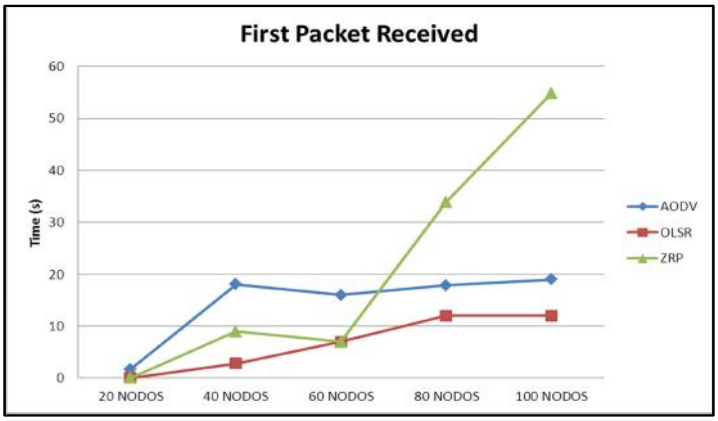


Figura. 4.1. Resultados de las simulaciones para el parámetro First Packet Received.

En primer parámetro que se analizó fue el First Packet Received es decir el tiempo que le toma al primer paquete desde que se envió del nodo fuente hasta llegar al nodo destino, en la Figura 4.1. se demuestra el comportamiento de este parámetro con relación al protocolo de encaminamiento utilizado y tamaño de la red. En la gráfica se observa que en el protocolo AODV el tiempo que le toma en enviar el primer paquete al destino es mayor en comparación con el protocolo OLSR y ZRP. En el protocolo ZRP al ser un protocolo hibrido se observa que el First Packet Received es mucho menor que en el protocolo AODV pero se vuelve inestable en redes de gran tamaño como se observa en las datos de las simulaciones de 80 y 100 nodos. En el protocolo OLSR el comportamiento de este parámetro se mantiene constante en todas las simulaciones que se realizaron, pero hay que analizar el resto de parámetros para poder determinar que protocolo es el adecuado para la aplicación que estamos planteando.

Otro parámetro que se analizó es el throughput el cual nos indica la tasa promedio de éxito en la entrega de un mensaje sobre un canal de comunicación, como se observa

en la Figura 4.2. en el protocolo AODV este parámetro se mantiene constante a medida que aumenta el tamaño de la red, lo que no sucede con los otros protocolo en los que a medida que aumenta la red el throughput disminuye.

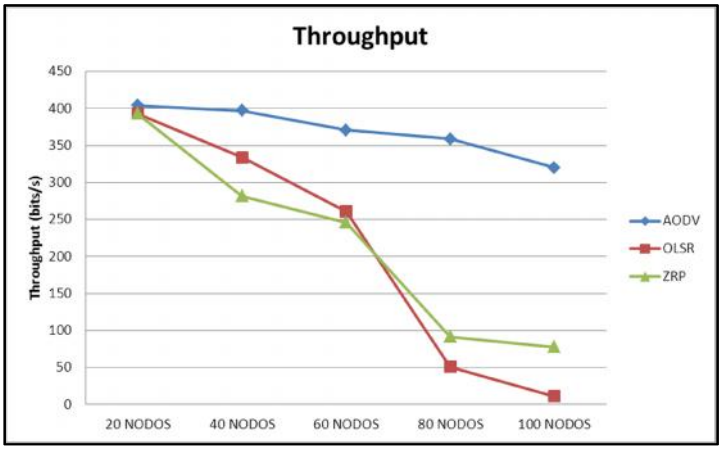


Figura. 4.2. Resultados de las simulaciones para el Throughput.

Otro parámetro analizado fue el Jitter, como sabemos en una red de sensores el camino por donde son enviados los paquetes entre dos nodos pueden puede variar en función de muchos parámetros, a causa de esto factores, el retardo que puede sufrir un paquete en relación a otro enviado inmediatamente después, puede no ser el mismo, a esta variación de retardos entre paquetes de la misma comunicación se le denomina jitter. En la Figura 4.3. se observa que OLSR el jitter tiende a cero, lo que nos indica que es un protocolo útil para aplicaciones multimedia y en tiempo real. AODV tiene un jitter promedio de 1s, es aceptable en redes de gran tamaño y aplicaciones en donde no es prioritario el tiempo sino la confiabilidad de la entrega de los datos, por otro lado ZRP sigue presentando inconvenientes en redes grandes.

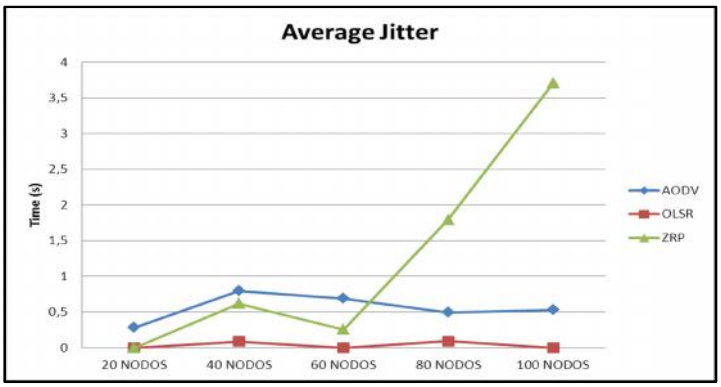


Figura. 4.3. Resultados de las simulaciones para el Jitter.

4.1.2 Capa de red.

En esta capa analizaremos el número de paquetes que se mantuvieron en una cola de datos (Buffer) y máximo tamaño de la cola, estos parámetros permitirá determinar la capacidad de memoria que deben tener los nodos para evitar el desecho de datos cuando una cola de datos se llene.

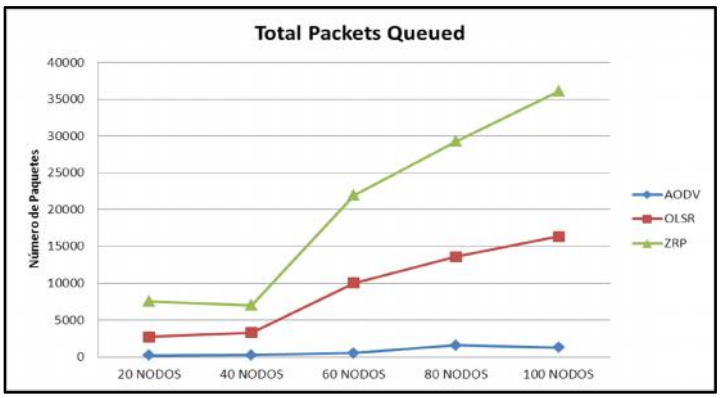


Figura. 4.4. Número de paquetes en cola de datos en la Red.

En la Figura 4.4. observamos que en el protocolo AODV es donde se produce menor encolamiento de los paquetes, y se mantiene constante a medida que el tamaño de la red aumenta, para los protocolos OLSR y ZRP se aprecia que el encolamiento de los datos es sumamente elevado en especial cuando el tamaño de la red aumenta.

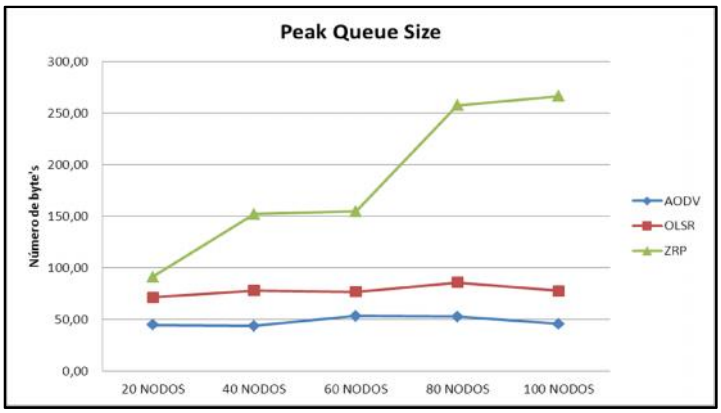


Figura. 4.5. Tamaño máximo promedio de la cola de datos por Nodo.

En la Figura 4.5. se observa el tamaño máximo en promedio de la cola de datos en los nodos, este parámetro e útil al momento del seleccionar o dimensionar el hardware de los nodos en lo que se refiere a la memoria RAM, con los resultados podemos determinar que para el protocolo AODV el tamaño aproximado de la cola de datos tiene que ser aproximadamente de 50 Bytes y para OLSR 75. Para el caso ZRP el comportamiento es muy inestable y está directamente relacionado al tamaño de la red, llegando a necesitar un tamaño de buffer de aproximadamente 260 bytes.

4.1.3 Capa de MAC.

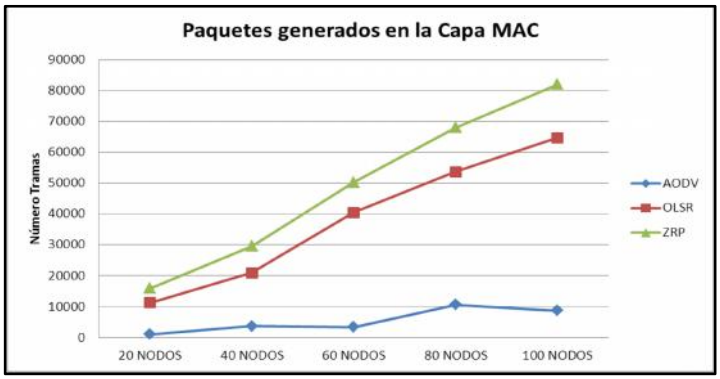


Figura. 4.6. Paquetes Generados en Capa MAC.

En la Figura 4.6. se observa el comportamiento de los protocolos en capa MAC a medida que el tamaño de la red aumenta, es claro que los protocolos OLSR y ZRP generan una gran cantidad de paquetes en comparación con el protocolo AODV, este considerable aumento de paquetes se debe a que, los protocolos OLSR y ZRP generan más cantidad de paquetes de control para mantener las Tablas de ruteo siempre actualizadas.

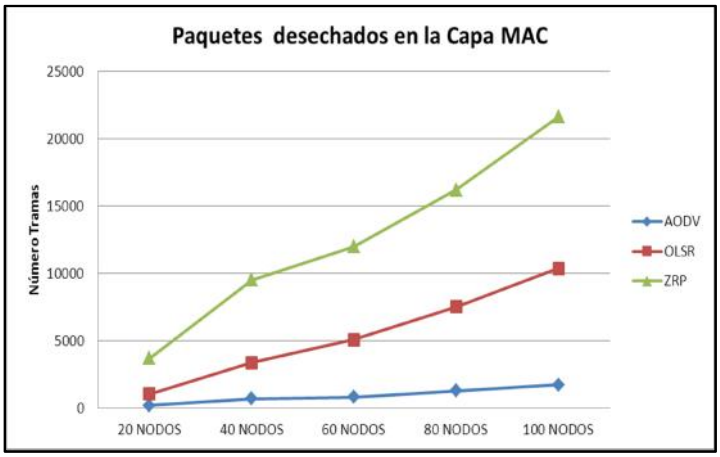


Figura. 4.7. Paquetes desechados en Capa MAC.

Al generar más cantidad de tráfico por la red también aumenta la probabilidad de que los paquetes generados tengan errores y sean desechados, el comportamiento de este parámetro se observa en la Figura 4.7.

4.1.4 Capa Física.

Los resultados que se obtienen en la simulación para esta capa permiten determinar la cantidad de señales que se transmitieron, de estas cuantas se recibieron con errores, también se obtiene métricas sobre el tiempo que permanecen los nodos en modo de transmisión, recepción, Idle (inactivo) y sleep y consumo de energía en cada uno de los modos.

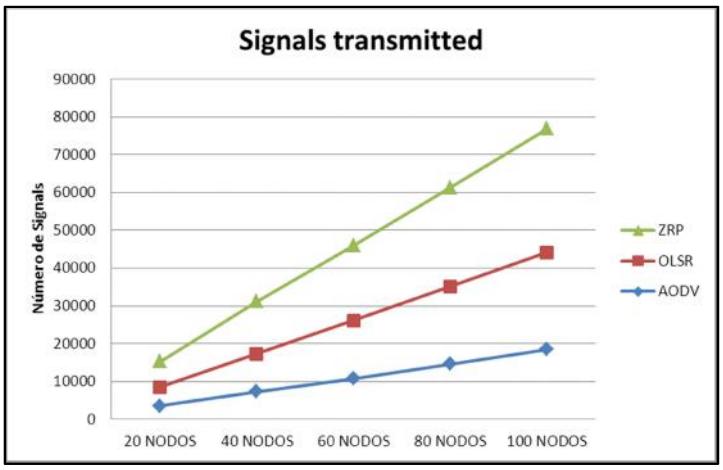


Figura. 4.8. Señales transmitidas.

En la Figura 4.8 se observa que el protocolo AODV transmite menos señales que los protocolos OLSR y ZRP y la pendiente de crecimiento es menor a medida que aumenta el tamaño de la red. AODV al generar menor cantidad de señales menor será el consumo de energía.

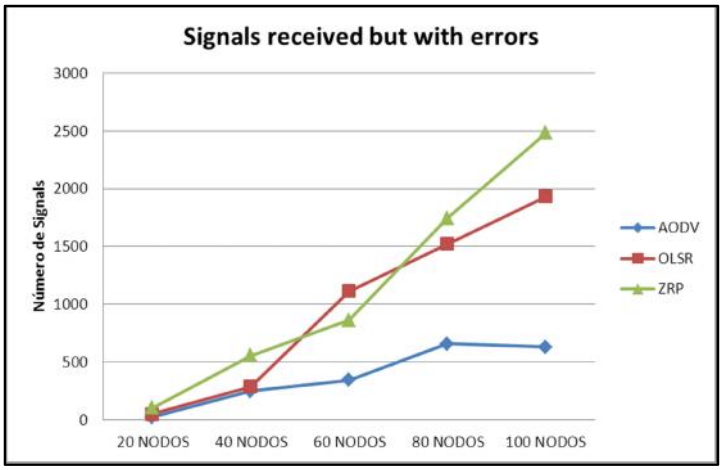


Figura. 4.9. Señales recibidas pero con errores.

En la Figura 4.9 se observa que la cantidad de señales erróneas se da con más frecuencia en los protocolos OLSR y ZRP, y está relacionada directamente con la

cantidad de señales que son generadas. AODV sigue manteniendo un comportamiento estable a medida que el tamaño de la red de la aumenta.

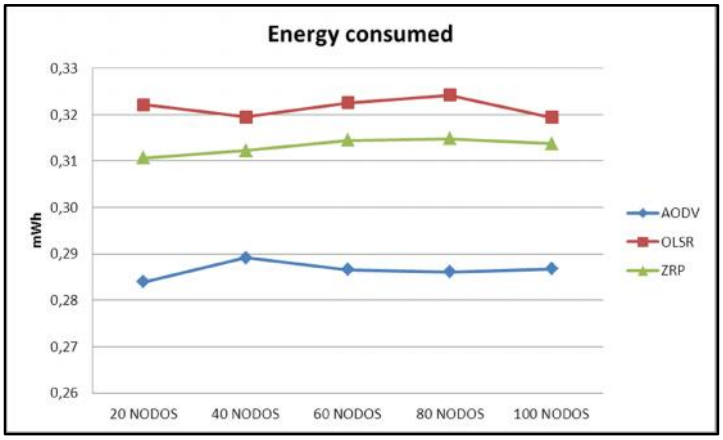


Figura. 4.10. Consumo de energía promedio por nodo.

En la Figura 4.10 se presenta la gráfica del consumo de energía promedio por nodo, se observa que el protocolo OLSR al ser un protocolo proactivo presenta un mayor consumo de energía, esto se debe a que en todo momento este tipo de protocolos está generando mensajes de control. AODV tiene el menor consumo de energía, por consiguiente es el protocolo que mejor se ajustaría a los requerimientos energéticos de los nodos encargados de transmitir la información del medidor de caudal que se plantea en esta aplicación, ya que estos estar energizados por medio de baterías.

4.2 Parámetros y consideraciones finales para el diseño de la red.

Una vez realizado el análisis de los diferentes parámetros podemos concluir que el protocolo que mejor se ajusta a los requerimientos de la aplicación es el protocolo AODV, este protocolo presenta el throughput más elevado y se mantiene constante a medida que el tamaño de la red aumenta, en la capa de Red el nivel de encolamiento

es mucho menor. La generación de paquetes en capa MAC, las señales transmitidas en capa física y el consumo de energía son considerablemente menores en comparación con los otros protocolos.

Una vez determinado que AODV el protocolo de encaminamiento más óptimo para esta aplicación, se realizaron simulaciones para 150, 200, 300 nodos con la finalidad de determinar el tamaño óptimo de la red, en donde se evidencio que en la red de 300 nodos el throughput decae drásticamente como se indica en la Figura 4.11, esto se debe a que el porcentaje de señales recibidas con error en relación al total de señales transmitidas supera el 58.39 % como se indica en la Figura 4.12 y 4.13, por tal razón considerando el porcentaje de señales recibidas con error, el tamaño óptimo de la red que se debe considerar es de 200 nodos.

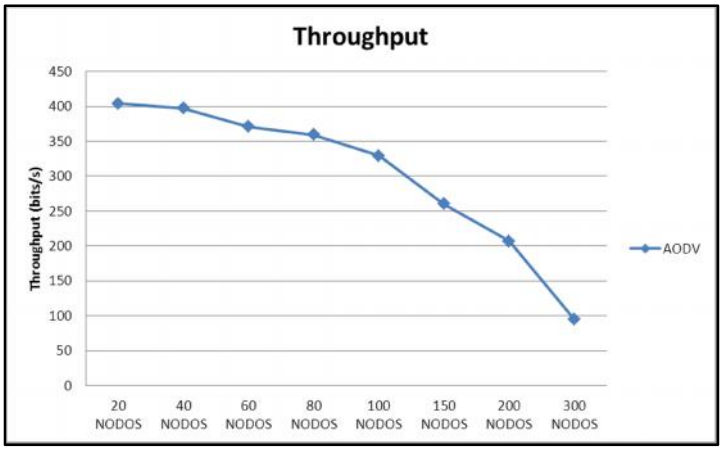


Figura. 4.11. Simulación del Throughput (100, 150, 200, 300) nodos.

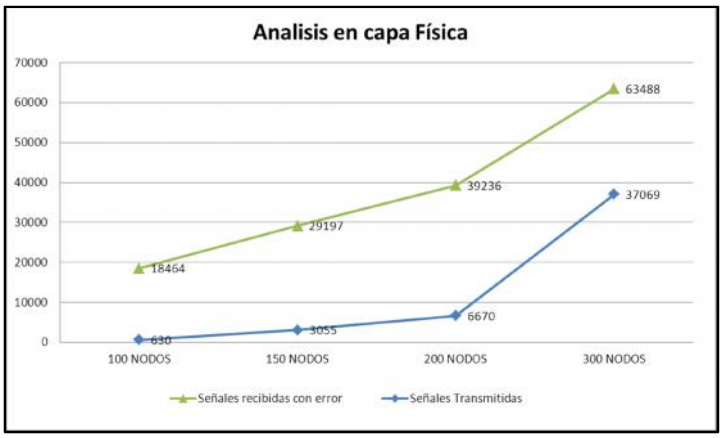


Figura. 4.12. Señales transmitidas vs señales recibidas con error.

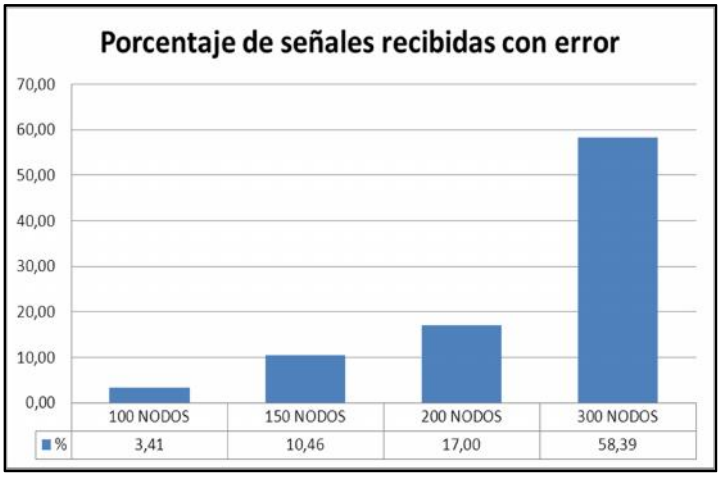


Figura. 4.13. Porcentaje de señales recibidas con error.

Para obtener un mayor rendimiento y reducir la interferencia producida por otras tecnología que operan en el mismo rango de frecuencias , y considerando que en nuestro país de acuerdo a la normativa americana se debe configuran las redes wifi (802.11) en los canales 1,6,11, como se indica en la Figura 4.14, para minimizar las interferencias producidas por estas redes se recomienda configurar las redes de sensores 802.15.4 en los canales 15, 20, 25 o 26, en la red que se implementó se configuraron los sensores en el canal 15 a una frecuencia central de 2425 Mhz.[27]

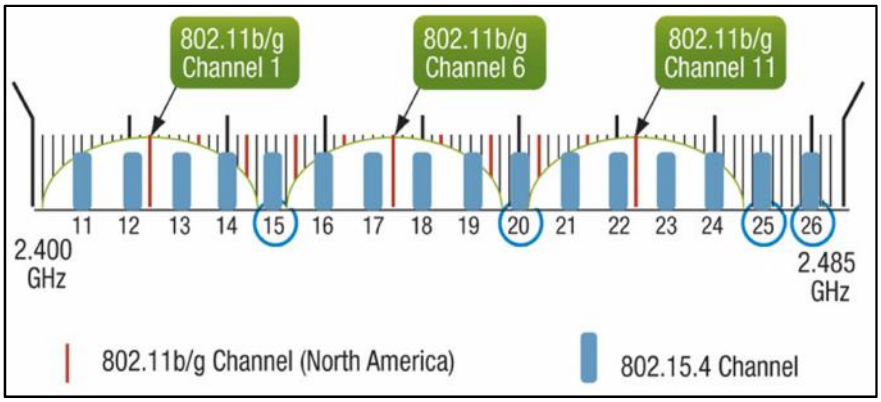


Figura. 4.14. Asignación de canales 802.11 y 802.15.4.

Con los cuatro canales que se mencionó anteriormente podemos realizar un diseño similar a las celdas en telefonía celular, es decir realizando el reuso de frecuencia, el reuso de frecuencia permite reutilizar canales de frecuencia en distintas zonas geográficas y garantizar un nivel de interferencia adecuado. En la Figura 4.15 podemos observar como estarían utilizados los 4 canales, cada celda representa una red de sensores con 200 nodos.

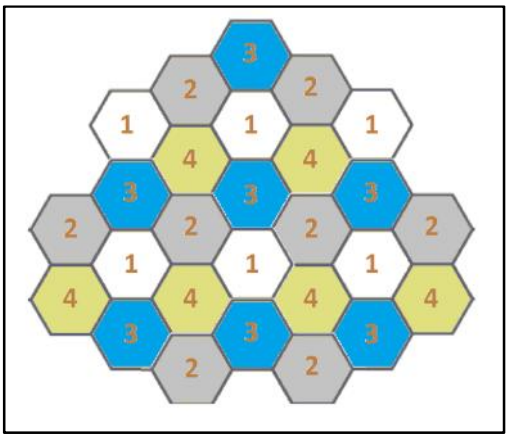


Figura. 4.15. Esquema de reutilización de Frecuencias.

CAPÍTULO V. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE RED.

Para poder demostrar la viabilidad del sistema de lectura de los datos de consumo de energía eléctrica y agua potable, se planteó el diseño de un prototipo de una red de sensores que se encargara de transmitir los datos de dichos medidores, hay que aclarar que en los objetivos no estaba previsto la implementación de los sistemas de medición, por tal razón para demostrar el funcionamiento de la red de sensores se procedió a generar los datos internamente en los nodos, con la ayuda de información estadísticos de consumo energético de una residencia promedio

5.1 Características del Hardware.

La plataforma de sensores que se utilizó para la implementación del prototipo es un kit de desarrollo MICAZ WSN-EDU2400CB que es comercializado por la compañía MEMSIC Crossbow Technologies[29], este la Tabla 5.1 se muestra los componentes que kit incluye.

Kit Contents	
30	Processor/Radio Boards
20	Sensor Boards
10	Gateways

Tabla 5.1. Componentes que incluye el kit de desarrollo MICAZ WSN-EDU2400CB.

5.1.1 Processor/Radio Board.

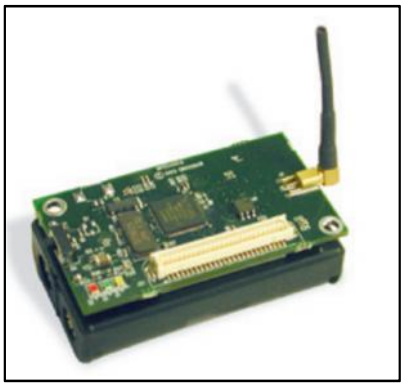


Figura. 5.1. Modulo sensor MPR2400CB.[29]

La mota MPR2400CB que se muestra en la Figura 5.1, incorpora el chip CC2420 para el sistema de transmisión inalámbrica, que es un transceptor a 2.4 GHz que cumple con las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4.

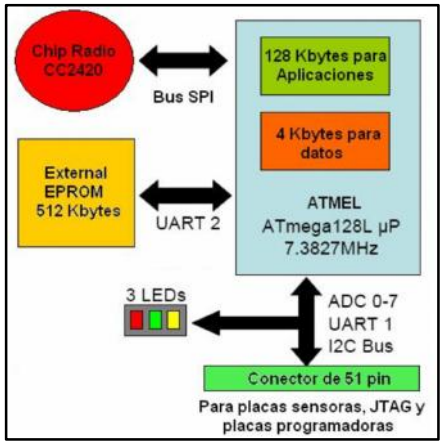


Figura. 5.2. Diagrama de bloques de una Mota MPR2400CB.[8]

Como se observa en la Figura 5.2 la mota MPR2400CB también utiliza un microcontrolador Atmega128L con una frecuencia de oscilación de 7.3827 MHz, memoria de programa de 128K bytes y una memoria datos de 4K bytes, además está conectado mediante una conexión serial UART a una memoria flash externa de 512K

Bytes, dispone de un conector de entrada / salida de 51 pines para introducir señales de otros sensores como por ejemplo temperatura, luz, presión.[8]

La siguiente Tabla 5.2 muestra un resumen de las características más importantes de las motas MICAz MPR2400CB.

MICAz MPR2400		
MCU	Chip	ATMega128L
	Tipo	7.37 MHz, 8 bits
	Memoria	128 kb
	SRAM	4 kb
Interfaz placa Sensora	Tipo	51 pins
	10-Bit ADC	7.0 V a 3 V de entrada
	UART	2
	Otras interfaces	D I/O, I2C
Transceptor RF	Chip	CC2420
	Frecuencia radio	Mín: 2400 MHz, Máx: 2483.5 MHz
	Máx. tasa datos	250 kbps
	Conector antena	MMCX
	Potencia mínima	-24 dBm
	Potencia máxima	0 dBm
	Sensibilidad	- 94 dBm
Memoria Flash	Chip	AT45DB014B
	Tipo de conexión	SPI
	Tamaño	512 kb
Alimentación	Tipo	2 baterías tipo AA
	Capacidad típica	2000 mA / h

Tabla 5.2. Características más importantes de las motas MICAz MPR2400CB.

5.1.2 Sensor Boards.

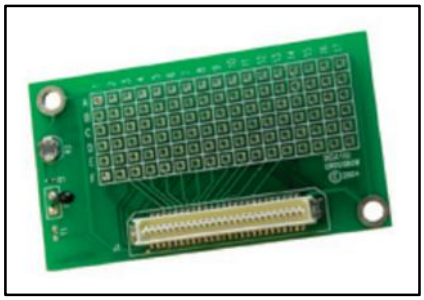


Figura. 5.3. Placa MDA100 para conexión de sensores. [29]

La placa MDA100 que se observa en la figura 5.3 incorpora un sensor de temperatura de alta precisión, un sensor de luz, y proporciona un área para conexiones externas con los diferentes periféricos que se dispone el microcontrolador Atmega128L, entre los que podemos mencionar: Dispone de 7 canales analógicos ADC de 12 bits con un rango de 0-2.5V, 0.6mV de precisión, 3 canales ADC de 12 bits diferencial con un rango de 0-2.5V, 0.6 mV de precisión, 4 canales ADC de 12 bits diferencial con alta ganancia, rango de +/-- 12.5mV, 6 uV de precisión, 6 entradas digitales de con interrupción, 6 salidas digitales, una salida a relé normalmente cerrado, una salida a relé normalmente abierto, una entrada a un contador de alta velocidad.[13]

5.1.3 Gateways.

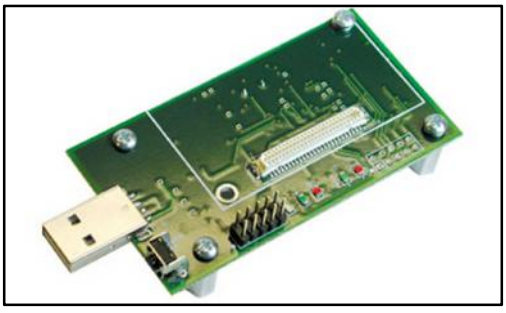


Figura. 5.4. Tarjeta de Interface USB MIB520CB. [29]

En la Figura 5.4 se muestra la tarjeta USB MIB520CB que se utiliza para interconectar la PC con la red de sensores, la finalidad de este dispositivo es enviar los datos capturados por el sensor coordinador PAN hacia el software de administración y gestión que está instalado en la PC, también es utilizado para programar a las motas mediante la aplicación MoteConfig.

5.2 Características del Software.

El kit MICAz MPR2400CB de Crossbow incluye también un conjunto de software que permite el desarrollo de aplicaciones para redes de sensores inalámbricas, estas aplicaciones son implementadas bajo el sistema operativo TinyOS que utiliza como lenguaje de programación NesC.

5.2.1 MoteView

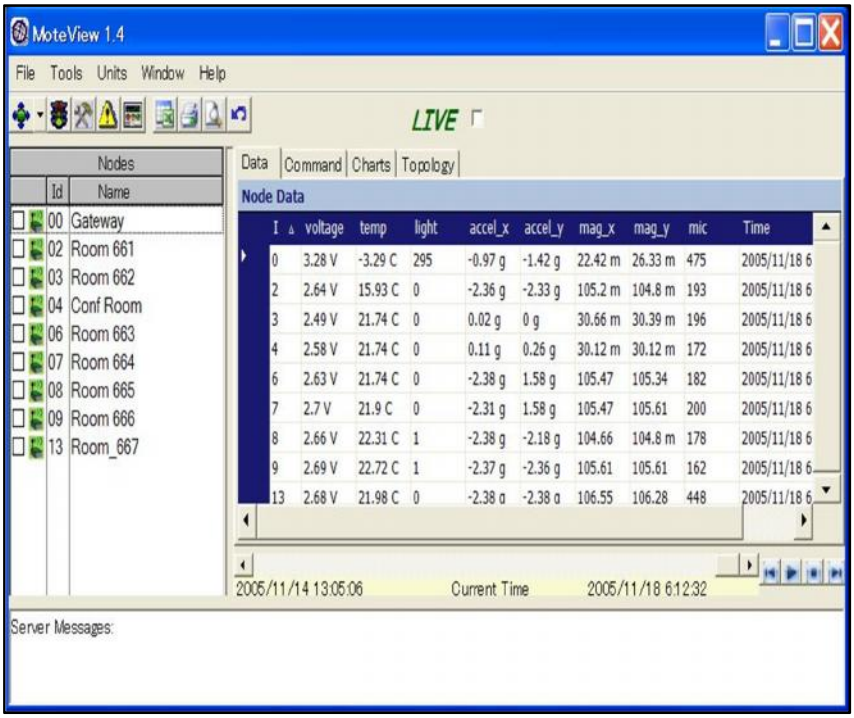


Figura. 5.5. Interface MoteView.

La aplicación MoteView está diseñada para procesar los datos capturados por la estación base MIB520CB y, además proporciona una interfaz gráfica intuitiva en la cual podemos monitorizar y gestionar la red de sensores inalámbrica, también facilita la conexión a una base de datos, para poder analizar y hacer gráficas en tiempo real a partir de las lecturas de los nodos. Figura 5.5.

5.2.2 MoteConfig

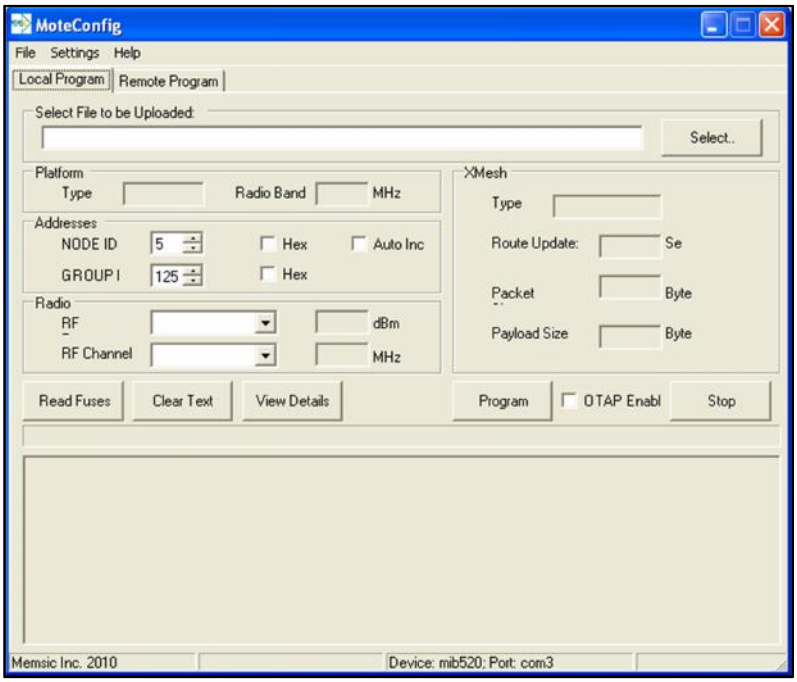


Figura. 5.6. Interface MoteConfig.

MoteConfig es un programa empleado para la programación de Motes, Figura 5.6, esta aplicación proporciona una interfaz intuitiva y de fácil manejo, en la que se puede configurar y descargar el firmware de las aplicaciones. Permite al usuario configurar parámetros generales como el ID Mote, identificador de red, frecuencia y potencia de operación. [30]

5.2.3 TinyOS.

TinyOs es un sistema operativo que fue diseñado para dispositivos embebidos como los sensores inalámbricos, este software optimiza las limitadas capacidades del hardware en cuanto a procesamiento y memoria, el modelo de ejecución está basado en eventos y la programación está basada en la creación de módulos que responden a eventos de entrada, el lenguaje de programación utilizado es el NesC.

5.2.4 NesC.

NesC mantiene similitudes con el lenguaje de programación C pero esta optimizado para trabajar con las limitaciones de memoria y procesamiento que presentan los sensores inalámbricos, un programa desarrollado en NesC está estructurado en componentes, un componente puede estar formado por otros componentes ya creados anteriormente es decir reciclando código. Existen dos tipos de componentes: los módulos y las configuraciones, los primeros contiene el código del programa y es donde se implementan las interfaces, y las configuraciones son las que se usan para enlazar las interfaces de los componentes, al proceso de enlazar las interfaces de dos componentes se le conoce como wiring.

5.3 Topología implementada.

Esta topología que se implementó se la realizo en una zona reducida, específicamente en los laboratorios de la facultad de electrónica de la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE, el área en la que se realizó la implementación del prototipo de la red es de 2300 m^2 aproximadamente. Figura 5.7.

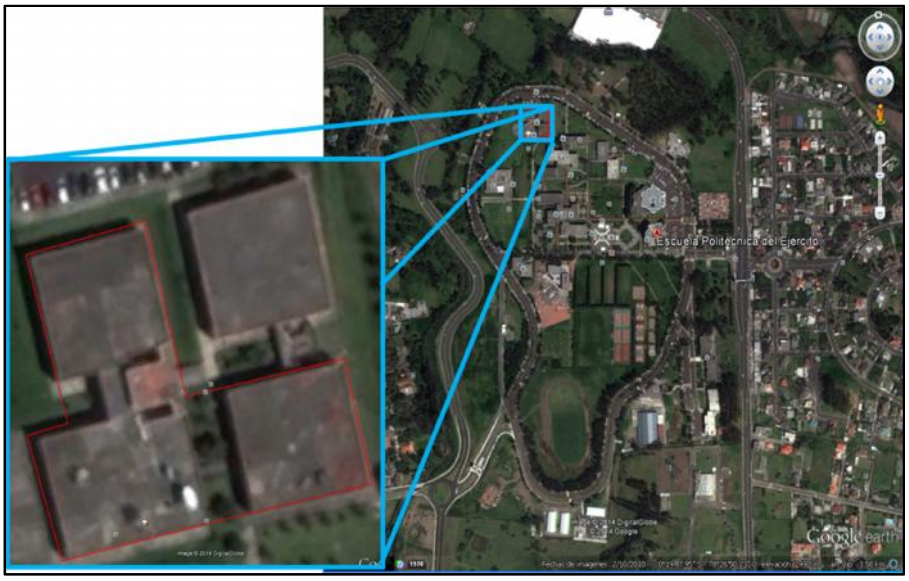


Figura. 5.7. Lugar de implementación de la red de sensores.

El número de sensores utilizados en la implementación fue 21, de los cuales 20 fueron configurados como coordinadores (routers) y uno como coordinador de red PAN. En la Figura 5.8 se muestran los equipos que se utilizaron para la implementación del prototipo de RED.



Figura. 5.8. Equipos utilizados en la implementación de la red de sensores.

Para maximizar el número de saltos y lograr que el escenario de prueba se comporte como una red de gran tamaño, los sensores fueron configurados con la mínima potencia (-24 dBm) y dispuestos como se indica en la Figura 5.9.



Figura. 5.9. Ubicación de los sensores.

Para simular la toma de lecturas se tomó como referencia el consumo promedio de una vivienda en un día[31], y se realizó un análisis como se muestra en la Figura 5.10 para obtener una curva de tendencia, para que sea más exacta la curva de tendencia se dividió en tres rangos como se indica en la Figura 5.11 (a, b, c), las ecuaciones resultantes de estas curvas de tendencia se las ingreso en los sensores.

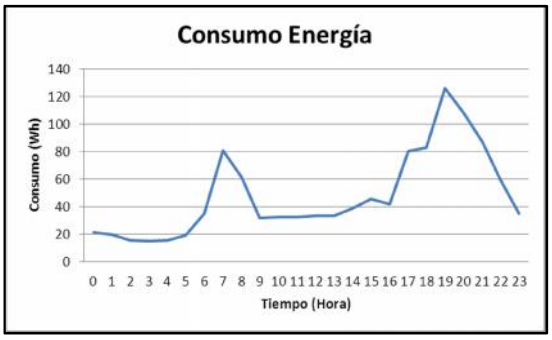
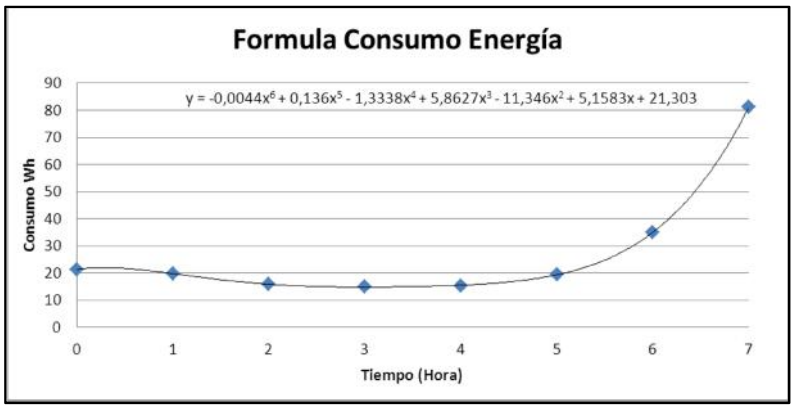
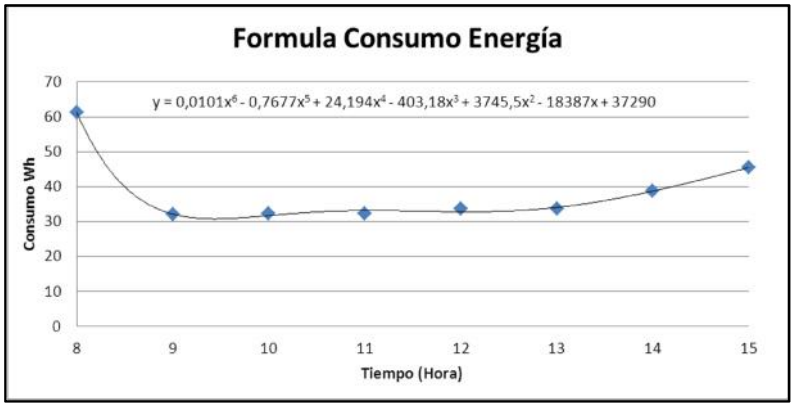


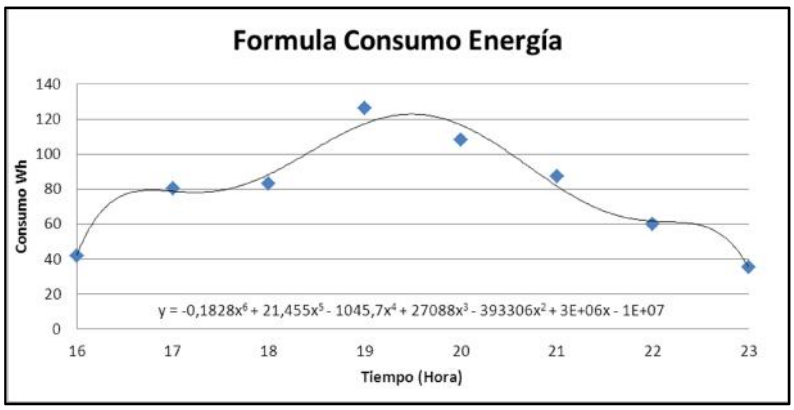
Figura. 5.10. Consumo de energía promedio de una vivienda en un día.



(a)



(b)



(c)

Figura. 5.11. Curva de tendencia de consumo de energía. (a) 0-7 Horas. (b) 8-15 Horas. (c) 16-23 Horas.

5.4 Resultados.

Con ayuda del software Moteview se procedió a comprobar el funcionamiento de la red, en la Figura 5.12 podemos observar la recepción de los datos de todos los sensores que conforman la red, estos datos pueden ser guardados en una base datos para su posterior análisis. Para un trabajo futuro se tiene que implementar un software que administre la base de datos y permita generar graficas personalizadas de acuerdo a la aplicación que se está implementando.

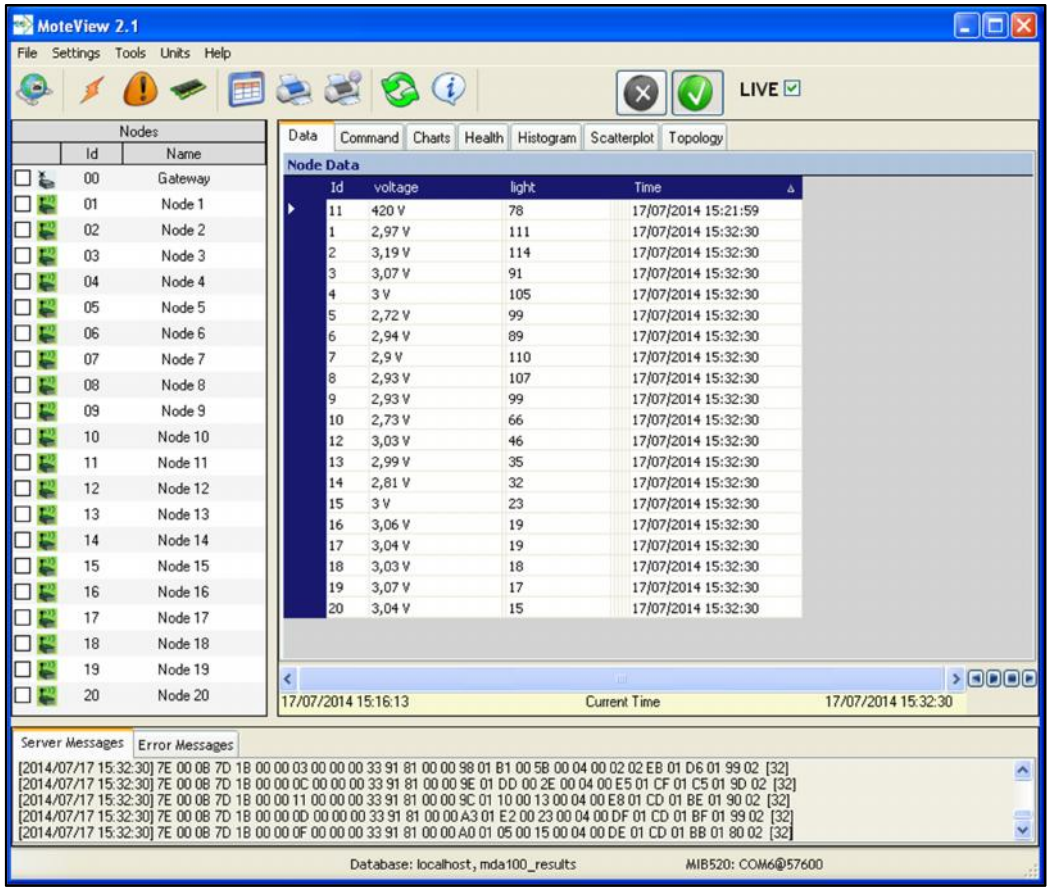


Figura. 5.12. Observación de los datos enviados por los nodos en el software Moteview.

También podemos observar de manera gráfica los datos que envía cada sensor, en la Figura 5.13 observamos los datos que fueron enviados por dos sensores y la similitud con la curva de consumo promedio de una vivienda.

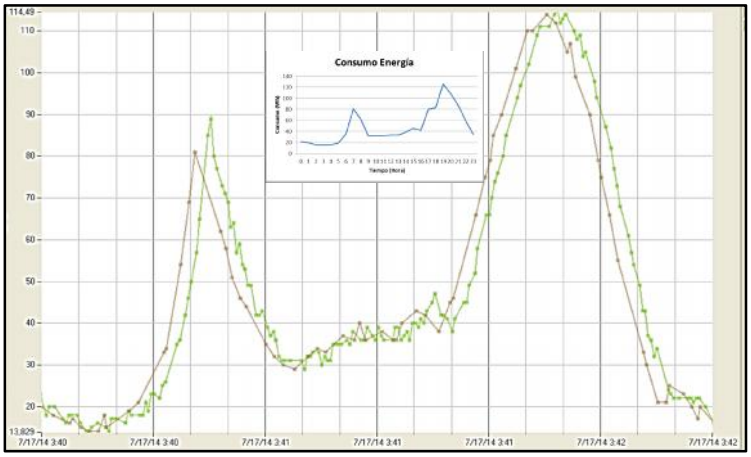


Figura. 5.13. Gráfica de la recepción de los datos enviados por un nodo.

El software Moteview permite observar la topología lógica de la red, se puede observar cómo están los nodos interconectados y cuales pierden la conexión. Figura 5.14.

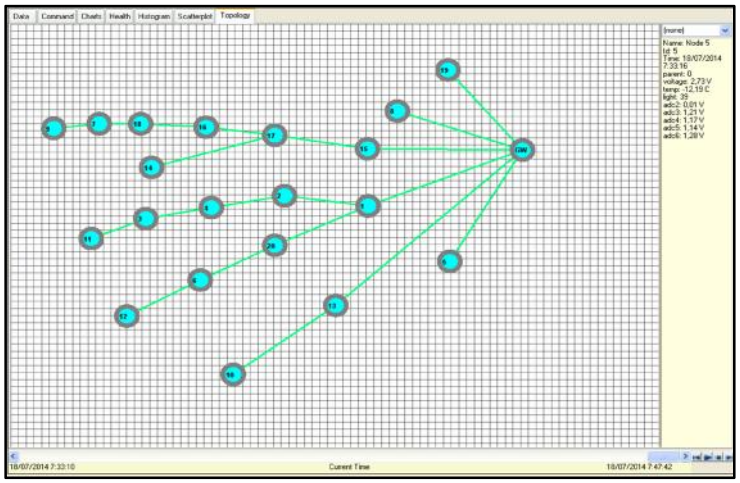


Figura. 5.14. Visualización de la topología lógica de la Red de sensores.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES RECOMENDACIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

6.1 Conclusiones.

La utilización de las redes de sensores inalámbricos, como medio de transmisión de datos, ofrece a las empresas que brindan servicios básicos (agua, luz) una nueva herramienta que permitirá mejorar el procedimiento de medición del consumo.

Con la implementación de esta nueva tecnología, se evita el traslado del personal al lugar donde se encuentran instalados los medidores cada vez que sea requerida la información del consumo o acciones de corte y reconexión, de esta manera se puede obtener una mayor fiabilidad de la información y minimizar costos operativos.

Los avances e integración de la electrónica, los sistemas de comunicaciones y el software han contribuido al desarrollo de dispositivos pequeños, económicos, precisos y de bajo consumo de energía, permitiendo implementar nuevas técnicas de medición remota más precisas y confiables.

De la investigación realizada de los sistemas AMR que utilizan señales de radio frecuencia como medio de transmisión, los sistemas basados en tecnología celular como medio de transporte de datos son los más difundidos , pero estos tienen el inconveniente del alto costo del hardware y del consumo mensual de servicio de datos GPRS.

Para determinar los beneficios y problemas que presentan los protocolos de encaminamiento, en las simulaciones realizadas en el software Qualnet se utilizaron los protocolos de encaminamiento: AODV, OLSR, ZRP. El criterio para seleccionar los protocolos antes mencionados es considerar un tipo de protocolo reactivo, proactivo e hibrido respectivamente.

Considerando que los nodos que están conectados a los medidores de energía disponen de una fuente energía permanente, el valor de potencia de transmisión que se debe configurar es la máxima, en cambio en los nodos de los medidores de caudal la potencia de transmisión debe ser la mínima, porque estos funcionan con baterías y la distancia de transmisión por lo general es pequeña.

En base a las simulaciones realizadas y una vez realizado el análisis de los diferentes parámetros podemos concluir que el protocolo que mejor se ajusta a los requerimientos de la aplicación es el protocolo AODV, este protocolo presenta el throughput más elevado y se mantiene constante a medida que el tamaño de la red aumenta, en la capa de red el nivel de encolamiento es mucho menor. La generación de paquetes en capa MAC, las señales transmitidas en capa física y el consumo de energía son considerablemente menores en comparación con los otros protocolos.

Un parámetro que hay que considerar el elegir el protocolo y el tamaño de la red es el nivel de encolamiento que se presenta en la capa de red, ya que este parámetro determina la capacidad de memoria de datos (RAM) que debe tener el nodo sensor.

Se realizaron simulaciones para 150, 200, 300 nodos con la finalidad de determinar el tamaño óptimo de la red, en donde se evidencio que en la red de 300 nodos el throughput decae drásticamente, esto se debe a que el porcentaje de señales recibidas con error en relación al total de señales transmitidas es del 58.39 %, por tal razón el tamaño máximo de la red que se debe considerar es de 200 nodos en donde el porcentaje de error es del 17.00 %.

Para obtener un mayor rendimiento y reducir la interferencia producida por otras tecnologías que operan en el mismo rango de frecuencias, por ejemplo 802.11, las redes de sensores (802.15.4) se deben configurar para que trabajen en los canales 15, 20, 25 o 26.

Empleando la técnica de reutilización de frecuencias que se utiliza en el diseño de una red de telefonía celular, con los cuatro canales (15, 20, 25 o 26) podemos desplegar varias redes de sensores garantizando que no exista interferencia entre ellas.

Con la topología de red que se implementó y con la ayuda de información estadística de consumo energético de una residencia promedio, se procedió a generar los datos de consumo internamente en 20 nodos, de esta manera se demostró la viabilidad del sistema de lectura de los datos de consumo de energía eléctrica y agua potable.

Los conocimientos impartidos en la maestría permitió aplicar los conceptos de las redes y sus protocolos a una nueva tecnología como es la de los sensores inalámbricos, además la formación transversal como gestión de proyectos, y los

diferentes seminarios me dieron las herramientas y la capacidad investigadora muy necesaria para el desarrollo de este tipo de proyectos.

Considerando las leyes y normativas que se están planteando en nuestro país entre ellas la matriz productiva, las empresas que brindan servicios básicos deberán considerar la implementación de sistemas inteligentes de gestión y comercialización de sus servicios, y es la oportunidad que tienen las universidades de nuestro país para ser los generadores de estas soluciones tecnológicas.

6.2 Recomendaciones.

Para el diseño e implementación de un sistema de lectura remota se recomienda la adopción de estándares, que permita la integración e interoperabilidad entre hardware y software de diferentes fabricantes

La universidad debe invertir en software de simulación ya que es una herramienta que permite abaratar costos, reducir el tiempo de análisis, el software se puede utilizar en las clases en donde es indispensable que el alumno de manera visual pueda entender el tema de estudio, y se puede emplear en el desarrollo de trabajos prácticos.

Se recomienda profundizar la investigación en lo que se refiere a sistemas de cifrado e encriptación de datos, considerando que la información que se transmite es sensible y en caso de adulteración podría causar perjuicio a las empresas que comercializan el servicio.

Una vez demostrado que una red de sensores bajo el estándar 802.15.4 puede ser utilizada para el transporte de los datos de consumo de energía eléctrica y agua

potable, se recomienda como siguiente paso la implementación de un prototipo que pueda ser comercializado, que involucre tanto hardware como software propio, que este desarrollado en base a estándares y normas que los sistemas AMR exigen.

6.3 Líneas Futuras.

En lo que se refiere al hardware se está planteando como tesis de grado en la Facultad de Electrónica de la Universidad de las fuerzas Armadas

- El diseño y construcción de un medidor de potencia eléctrica inalámbrico (802.15.4) en base al microprocesador MSP430FE42x y CC2530, el microprocesador MSP430FE42x incorpora interfaces y módulos especializados para la adquisición y en el cálculo de parámetros energéticos, CC2530 es un módulo transceptor que opera en la frecuencia de 2.4 GHz y trabaja bajo el estándar 802.15.4.
- En la facultad de macatrónica se planteara como proyecto de tesis la construcción de un medidor de caudal inalámbrico.
- Diseño y construcción de un Gateway 802.15.4 a GPRS, que permitirá transmitir la información de una red de sensores hacia un servidor central.

En cuanto a software de plantea el diseño e implementación de un Software que permita administrar una plataforma AMR.

BIBLIOGRAFÍA.

[1] J. Gudiño, “Sistema de Lectura Remota,” Revista Electrónica de la Escuela de Ingeniería Eléctrica., pp. 1–6, 2000.

[2] J. Aguilar, “Sistemas AMR en el marco de la Redes Inteligentes,” 2010.

[3] S. Montesdeoca, “Diseño y construcción de un prototipo de lectura automática de parámetros eléctricos (AMR Automatic Meter Reading) para medidores de energía eléctrica de tipo industrial a través de GPRS.,” 2012.

[4] H. Espinosa, “Sistema de medición remota de energía eléctrica,” 2007.

[5] C. Automation, “Wireless SCANET SCADA,” 2011. .

[6] L. López, “Análisis de alternativas de desarrollo de sistemas de medida avanzada bajo el concepto de redes inteligentes en chilectra S.A.,” 2008.

[7] A. Nabarro and E. Caballero, “Sistema de adquisición y explotación de datos basados en una red de sensores IEEE 802.15.4.,” 2010.

[8] J. García, “Desarrollo y Estudio de Capacidades de Redes 802.15.4 usando dispositivos Micaz,” 2008.

[9] M. Molina, “Estudio De Banda De Frecuencias Sub-Ghz Para Redes De Sensores Inalámbricas e Implementación En Plataforma Modular,” 2011.

[10] E. García, “Implementación de Protocolos de Transporte en Redes de Sensores,” 2009.

[11] J. Garbarino, “Protocolos para redes inalámbricas de sensores,” 2011.

[12] M. Ruiz, “Diseño E Implementación De Un Sistema De Adquisición Y Control De Temperatura Mediante El Estándar Zigbee,” 2007.

[13] I. Vizcaíno, “Diseño De Una Red De Sensores Inalámbricos Aplicados A La Detección De Pesticidas En Aguas De Zonas Bananeras,” 2010.

[14] R. Castejón, “Interconexión de redes de sensores inalámbricos 802.15.4 en localizaciones remotas,” 2011.

[15] S. Calpe, “Optimización de un protocolo de encaminamiento en redes de sensores IEEE 802.15.4,” 2006.

[16] M. Acosta, “Estudio del Estándar IEEE 802.15.4 ‘Zigbee’ para Comunicaciones Inalámbricas de Área Personal de Bajo Consumo de Energía y su Comparación con el Estándar IEEE 802.15.1 ‘Bluetooth,’” 2006.

[17] J. Tarifa, “Red de sensores inalámbricos para monitorización de instalaciones eléctricas de baja tensión,” 2011.

[18] W. Barriga and F. Zúñiga, “Tecnologías Inalámbricas De Corto Alcance: Zigbee Y Bluetooth,” 2006.

[19] S. Cantillo, “Desarrollo de aplicaciones basadas en wsn,” 2010.

[20] D. Garzón, “Evaluación y optimización de criterios para la selección de ruta en redes inalámbricas de sensores,” 2011.

[21] F. Gómez, “Protocolo de encaminamiento adaptativo para la optimización de comunicaciones de captura de datos y diseminación dirigida en redes de sensores inalámbricos,” 2011.

[22] T. Qualnet, S. Platform, and Q. K. Capabilities, “Make Networks Work Network simulation software for :”

[23] J. Villanueva, “Seguridad en el enrutamiento del protocolo aodv para redes móviles ad hoc,” 2005.

[24] R. Piermattei and B. Garcia, “Análisis de los protocolos de ruteo OLSR y AODV en redes Ad-Hoc IBSS.,” in Análisis de los protocolos de ruteo OLSR y AODV en redes Ad-Hoc IBSS., 2012, pp. 620–630.

[25] O. Maestre and J. García, “Prototipo de una red mesh con protocolo de enrutamiento olsr para la universidad pontificia bolivariana seccional bucaramanga,” Revista Digital Apuntes de Investigación, vol. 6, 2013.

[26] J. Caracoche, “Redes Móviles Seguras en un Ambito Urbano.”

[27] S. Caprile, Equisbí Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4.pdf. 2009, p. 340.

[28] J. Misic and V. Misic, Wireless Personal Area Networks Performance, Interconnection, and Security with IEEE 802.15.4. 2008, p. 336.

[29] MENSIC, “Classroom WSN-EDU2400CB kit.” [Online]. Available: http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/6020-0056-05_C_WSN_CLASSROOM_KIT_logo.pdf.

[30] V. Cobos, “Estudio y pruebas de campo de redes de sensores sin hilos.,” 2003.

[31] R. Medina, “Plan de gestión del consumo residencial en la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR C.A.,” 2009.

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES.

AMR : Automatic Meter Reading.

AODV: Ad-hoc On-demand Distance Vector.

CAP: Contention Access Period.

CFP: Contention Free Period.

CRC: Cyclic Redundancy Check.

CSS: Chirp Spread Spectrum.

DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum.

FCS: Frame Check Sequency.

FFD: Full-Function device.

GPRS: General Packet Radio Service.

GPS: Global Positioning System.

GTS: Time Slots Garantizados.

IARP: Intra Zone Routing Protocol.

ISM: Industrial, Scientific and Medical.

LR-WPAN: Low Rate Wireless Personal Área Network.

MAC: Medium Access Control.

MPDU: MAC Protocol Data Unit.

MPR: Multipoint Relays.

OLSR: Optimized Link State Routing.

PHY: Physical layer.

PLC: Power Line Communication.

PPDU: PHY Protocol Data Unit

PSTN: Red Telefónica de Conmutación Pública.

REPP: Route Error.

RFD: Reduced Function Device.

RREP: Route Reply.

RREQ: Route Request.

UWB: Ultra-wide band.

WLAN: Wireless Local Area Network.

WPAN: Wireless Personal Area Network.

ZRP: Zone Routing Protocol.