



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, OPCIÓN  
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA**

Tesis para obtener el grado de

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
OPCIÓN INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA**

---

**Desarrollo de un enrutamiento dinámico mediante los criterios  
de calidad y geolocalización en una red de comunicaciones**

---

**Presenta:**

**José Luis Sánchez Chacón**

**Asesores de tesis:**

**Dra. Josefina Castañeda Camacho  
M.I. José Miguel Hurtado Madrid**

# Índice general

Lista de figuras	v
Lista de tablas	viii
Introducción	1
<b>1. Redes de comunicación</b>	<b>5</b>
1.0.1. Redes de comunicación alámbrica . . . . .	5
1.0.2. Redes de comunicación inalámbrica . . . . .	5
1.1. Modelo OSI . . . . .	6
1.2. Estándares de comunicación . . . . .	8
1.2.1. WI-FI . . . . .	8
1.2.2. Bluetooth . . . . .	9
1.2.3. Zigbee . . . . .	10
1.2.3.1. Capa Física . . . . .	11
1.2.3.2. Capa de Acceso al medio . . . . .	12
1.2.3.2.1. Modos de funcionamiento . . . . .	13
1.2.3.2.2. Algoritmo CSMA-CA . . . . .	13
1.2.3.2.3. Cálculos . . . . .	14
1.2.3.3. Capa de red . . . . .	15
1.2.4. Comparación de tecnologías inalámbricas . . . . .	16
<b>2. Modos de operación de una red</b>	<b>17</b>
2.1. Modo Infraestructura (Basic Service Set,(BSS)) . . . . .	17
2.1.1. Tipos de redes en modo Infraestructura . . . . .	17
2.1.1.1. Red inalámbrica de área extensa (Wireless Wide Area Network,WWAN) . . . . .	18
2.1.1.2. Red Inalámbrica de Área Metropolitana (Wireless Metropolitan Area Network,WMAN) . . . . .	18
2.1.1.3. Red Inalámbrica de Área Local (Wireless Local Area Network,WLAN) . . . . .	18
2.1.1.4. Red Inalámbrica de Área Personal (Wireless Personal Area Networks, WPAN) . . . . .	18
2.1.2. Comparación de redes de comunicación inalámbrica en modo infraestructura . . . . .	19
2.2. Modo ad-hoc (Independent Basic Service Set,(IBSS)) . . . . .	19
2.2.1. Tipos de redes en modo a Ad-hoc . . . . .	20
2.2.1.1. Red inalámbrica mallada (Wireless Mesh Network, WMN) . . . . .	20
2.2.1.2. Red móvil ad-hoc (Mobile Ad-hoc Network, MANET) . . . . .	21

<b>3. Sistema global de navegación por satélite</b>	<b>22</b>
3.0.1. Sistema de posicionamiento global (Global Positioning System) . . .	23
3.0.2. GLONASS . . . . .	24
3.0.3. GALILEO . . . . .	24
3.0.4. Tipos de módulos de GNSS . . . . .	25
3.0.4.1. Módulo GNSS EVA-M8M de U-blox . . . . .	26
<b>4. Redes de sensores inalámbricos</b>	<b>31</b>
4.1. Características de las WSN . . . . .	31
4.2. Elementos . . . . .	32
4.3. Tipos de nodos comerciales . . . . .	33
4.4. Topologías . . . . .	34
4.5. Áreas de aplicaciones . . . . .	35
4.5.1. Medio ambiente . . . . .	36
4.5.1.1. Sensado Climático . . . . .	36
4.5.2. Industriales y vehículos . . . . .	38
4.5.3. Domótica y salud . . . . .	39
<b>5. Enrutamientos</b>	<b>40</b>
5.1. Características de enrutamiento . . . . .	40
5.1.1. Criterios de funcionamiento . . . . .	41
5.1.2. Instante de decisión . . . . .	41
5.1.3. Lugar de decisión . . . . .	41
5.1.4. Fuente de información de la red . . . . .	41
5.1.5. Tiempo de actualización de la información de la red . . . . .	42
5.1.6. Parámetros de medición del rendimiento (Métrica) . . . . .	42
5.1.6.1. Retardo medio de extremo a extremo . . . . .	42
5.1.6.2. Rendimiento . . . . .	42
5.2. Protocolos de enrutamiento . . . . .	43
5.2.1. Enrutamiento proactivos . . . . .	43
5.2.1.1. Bellman Ford . . . . .	43
5.2.1.2. DSDV . . . . .	45
5.2.2. Enrutamiento reactivos . . . . .	46
5.2.2.1. AODV . . . . .	47
5.2.3. Enrutamiento híbridos . . . . .	48
5.3. Enrutamiento geograficos . . . . .	48
5.3.1. Enrutamiento Greedy Forwarding . . . . .	48
5.3.2. Enrutamiento Face Routing . . . . .	49
5.3.3. Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) . . . . .	50
5.3.4. Propuesta de enrutamiento . . . . .	50
<b>6. Plataforma de simulación</b>	<b>53</b>
6.1. Parámetros de diseño . . . . .	54
6.2. Definición de los algoritmos . . . . .	55
6.2.1. Greedy Forwarding . . . . .	55
6.2.2. Face Routing . . . . .	56
6.2.3. Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) . . . . .	56
6.2.4. Propuesta . . . . .	57
6.2.4.1. Algoritmo de Kruskal . . . . .	59
6.2.5. Gráficas de los algoritmos . . . . .	60
6.2.6. Bellman-Ford . . . . .	60

6.2.7. Propuesta . . . . .	62
6.2.8. Resultados de simulación . . . . .	65
<b>7. Implementación de un sistema de adquisición, captura y análisis de datos</b>	<b>67</b>
7.1. Bloque de inicio . . . . .	68
7.2. Bloque de configuración . . . . .	68
7.3. Bloque de recepción . . . . .	68
7.4. Bloque de análisis de trama . . . . .	69
7.5. Bloque de transmisión . . . . .	70
7.6. Sección de ubicación de la implementación del algoritmo propuesto . . . . .	72
7.7. Pruebas . . . . .	72
7.8. Diseño y construcción de Nodos. . . . .	77
7.8.1. Desarrollo de red. . . . .	82
<b>Conclusiones</b>	<b>88</b>
<b>A. Congresos</b>	<b>89</b>
<b>B. Estancia</b>	<b>90</b>
Bibliografía97	

# Índice de figuras

1.1. Modelo OSI. . . . .	7
1.2. Modelo OSI de la tecnología ZigBee. . . . .	11
1.3. Diagrama de bloques del algoritmo CSMA-CA. . . . .	14
1.4. Secuencia de trama en 802.15.4. . . . .	14
2.1. Modo Ad-hoc. . . . .	20
3.1. GNSS. . . . .	23
3.2. Suministros del módulo EVA-M8M. . . . .	27
3.3. RTC . . . . .	28
3.4. Circuito de costo optimizado . . . . .	29
3.5. Inmunidad a interferencia mejorada con antena pasiva . . . . .	30
3.6. Circuito usando antena activa . . . . .	30
4.1. Nodo. . . . .	33
4.2. Topología estrella. . . . .	34
4.3. Topología árbol. . . . .	35
4.4. Topología malla. . . . .	35
4.5. Variables de medición . . . . .	37
5.1. Broadcast del algoritmo Bellman-Ford . . . . .	43
5.2. Seguimiento del Bellman-Ford . . . . .	44
5.3. Seguimiento del Bellman-Ford . . . . .	44
5.4. Seguimiento del Bellman-Ford . . . . .	44
5.5. Seguimiento del Bellman-Ford . . . . .	44
5.6. Descubrimiento de la red . . . . .	45
5.7. Algoritmo Bellman-Ford . . . . .	45
5.8. Broadcast . . . . .	46
5.9. Transmisión . . . . .	46
5.10. Enrutamiento DSDV . . . . .	46
5.11. Transmision . . . . .	47
5.12. Broadcast . . . . .	47
5.13. Enrutamiento AODV . . . . .	47
5.14. Enrutamiento Greddy Forwarding . . . . .	48
5.15. Enrutamiento Greddy Forwarding Error . . . . .	49
5.16. Enrutamiento FaceRouting . . . . .	50
5.17. Enrutamiento FaceRouting . . . . .	50
5.18. Primer paso del enrutamiento propuesto. . . . .	51
5.19. Segundo paso del enrutamiento propuesto. . . . .	51
5.20. Tercer paso del enrutamiento propuesto. . . . .	51
5.21. Cuarto paso del enrutamiento propuesto. . . . .	52

6.1.	Diagrama de bloques del plataforma. . . . .	53
6.2.	Ejemplo de ecuación 1. . . . .	55
6.3.	Ejemplo de ecuación 2. . . . .	55
6.4.	Diagrama de bloques del enrutamiento Greedy. . . . .	56
6.5.	Diagrama de bloques del protocolo Face. . . . .	57
6.6.	Diagrama de bloques del protocolo GPSR. . . . .	58
6.7.	Diagrama de bloques del protocolo propuesto. . . . .	58
6.8.	Diagrama de bloques del algoritmo de Kruskal. . . . .	59
6.9.	Topología de la red . . . . .	60
6.10.	Comunicación entre nodo 1 y nodo 7 . . . . .	60
6.11.	Comunicación entre nodo 1 y nodo 8 . . . . .	61
6.12.	Comunicación entre nodo 1 y nodo 10 . . . . .	61
6.13.	Comunicación entre 1 y nodo 8 . . . . .	62
6.14.	Simulación con la cantidad de 10 nodos con topología original. . . . .	62
6.15.	Simulación con la cantidad de 10 nodos utilizando el algoritmo Kruskal. . . . .	63
6.16.	Simulación con la cantidad de 10 nodos realizando enrutamiento. . . . .	63
6.17.	Simulación con la cantidad de 100 nodos con topología original. . . . .	64
6.18.	Simulación con la cantidad de 100 nodos utilizando el algoritmo Kruskal. . . . .	64
6.19.	Simulación con la cantidad de 100 nodos realizando enrutamiento. . . . .	65
6.20.	Comparación de retardo entre enrutamiento propuesto y GPSR. . . . .	65
7.1.	Nodo . . . . .	67
7.2.	Diagrama de bloques de comunicación . . . . .	68
7.3.	Estructura de la trama de recepción de datos . . . . .	68
7.4.	Bloque de recepción . . . . .	69
7.5.	Análisis de trama recibida . . . . .	70
7.6.	Bloque de transmisión . . . . .	70
7.7.	Estructura de trama de transmisión . . . . .	71
7.8.	Estructura de trama de AT mode . . . . .	71
7.9.	Análisis Broadcast . . . . .	71
7.10.	Análisis Direccionamiento . . . . .	71
7.11.	Características del módulo XBee S1 . . . . .	72
7.12.	Firmware utilizado. . . . .	72
7.13.	Parámetros del módulo XBee S1. . . . .	73
7.14.	Trama de transmisión en XCTU. . . . .	73
7.15.	Trama de transmisión con modalidad broadcast. . . . .	73
7.16.	Trama de estatus en XCTU. . . . .	74
7.17.	Trama de estatus . . . . .	74
7.18.	Trama de transmisión en XCTU tamaño máximo. . . . .	75
7.19.	Trama de transmisión tamaño máximo. . . . .	75
7.20.	Trama broadcast "HOLA MUNDO". . . . .	76
7.21.	Trama de transmisión "HOLA". . . . .	76
7.22.	Pines del microcontrolador PIC26FJ256GA406. . . . .	77
7.23.	Circuito mínimo. . . . .	78
7.24.	Selección de pines del microcontrolador PIC26FJ256GA406. . . . .	78
7.25.	Lista de materiales utilizados. . . . .	79
7.26.	Esquemático del nodo. . . . .	79
7.27.	Tarjeta de circuito impreso PCB. . . . .	80
7.28.	Nodo. . . . .	81
7.29.	Nodo. . . . .	81

7.30. Topologia1. . . . .	82
7.31. Topologia2. . . . .	82
7.32. Topologia3. . . . .	83
7.33. Software Hercules. . . . .	84
7.34. Nodo Origen. . . . .	84
7.35. Topología1. . . . .	85
7.36. Prueba con Topología1. . . . .	85
7.37. Topología2. . . . .	86
7.38. Prueba con Topología2. . . . .	86
7.39. Topología3. . . . .	87
7.40. Prueba con Topología3. . . . .	87

# Índice de tablas

1.1.	Comparación redes de comunicación alámbrica e inalámbrica. . . . .	6
1.2.	Comparación de tecnologías Wi-Fi. . . . .	9
1.3.	Clases de Bluetooth. . . . .	10
1.4.	Versiones de Bluetooth. . . . .	10
1.5.	Características de capa física de ZigBee. . . . .	12
1.6.	Comparación de tecnologías inalámbricas [1], [2, 3] . . . . .	16
1.7.	Comparación de tecnologías inalámbricas . . . . .	16
2.1.	Modo infraestructura [4]. . . . .	17
2.2.	Comparación de redes de comunicación inalámbrica en modo infraestructura [5, 6]. . . . .	19
2.3.	Modo Ad-hoc [4]. . . . .	20
3.1.	Comparación módulos de GNSS [7–9]. . . . .	25
3.2.	Comparación módulos U-blox [7], [10]. . . . .	25
3.3.	Comparación modelo EVA-M8 [7], [11]. . . . .	26
3.4.	Configuración de interfaz . . . . .	27
4.1.	Comparación de nodos comerciales [12–16]. . . . .	33
4.2.	Comparación módulos de radio [17–21] . . . . .	33
4.3.	Comparación de microcontroladores de los nodos comerciales [22–26]. . . . .	34
5.1.	Tabla de DSDV . . . . .	45

# Introducción

Actualmente, las redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN) son de gran importancia para el desarrollo de las actividades humanas, debido a que realizan enlaces dinámicos para la transferencia de información sin la necesidad de una infraestructura centralizada. Sin embargo, existen factores como la cobertura y la saturación que afectan la eficiencia en una red por pérdidas de información [27–30].

La cobertura proporciona la capacidad de generar múltiples enlaces para la transmisión de datos en un área geográfica específica, sin embargo, requiere de una constante inversión y actualización en las estaciones repetidoras, debido a que las redes de sensores inalámbricos se realizan con una topología de malla, no se requiere el estudio de cobertura.

Por otra parte, la saturación en una red de comunicación se da como resultado de un control inadecuado en el tráfico de los datos, lo que contribuye a la colisión en los paquetes transmitidos, una estrategia para evitar la saturación se aborda mediante el enfoque del estudio del tráfico multicanal o en el estudio de monocanal. [31, 32].

Los sistemas de comunicación de canales múltiples permiten ajustar de manera dinámica el canal para evitar colisión en los datos. Sin embargo, la modificación de un canal a otro produce una cantidad considerable de retardo, además, es necesario incrementar los sistemas de transmisión y requiere un aumento en el procesamiento para ordenar la información recibida. No es recomendable para WSN, debido a que las WSN buscan implementar nodos básicos en hardware y reducir el consumo de energía [33, 34].

El enfoque que considera el tráfico de datos en redes de monocanal tiene como objetivo el aprovechamiento del canal, mediante la sincronización de los elementos y la calidad en el enlace, su principal característica consiste en un bajo consumo de energía en comparación a los sistemas de comunicación multicanal [35].

La sincronización se basa en una perspectiva teórica que tiene como propósito evitar la colisión de datos, sin embargo, no contempla diversos parámetros esenciales para una red de comunicaciones práctica [36, 37].

El estudio de la calidad permite medir parámetros de interés en la red. Con la finalidad de determinar la confiabilidad en la transmisión de datos, se clasifica en 2 categorías, el análisis de la potencia en la transmisión de datos y el estudio de las estrategias de enrutamiento [38–40].

El análisis de la potencia de transmisión permite manipular la cantidad de energía necesaria para la transmisión de los datos con la finalidad de reducir la saturación en la red, sin embargo, causa un mayor gasto de energía y recursos de procesamiento, que da como resultado un incremento en latencia.

Un enrutamiento genera los caminos físicos para la transferencia de información en base a criterios propuestos. Se clasifica en proactivo, reactivo e híbrido.

El enrutamiento proactivo conserva un mapa topológico constantemente actualizado, que permite generar rutas posibles para los paquetes de datos cuando sean requeridos. Se caracteriza por el empleo de tablas de enrutamiento que incluye todos los posibles destinos y realiza el cálculo de una posible ruta de transmisión considerando el menor número de retransmisiones posible. Sin embargo, la actualización constante de la red genera una alta

densidad de información limitando la cantidad de elementos [41–43].

En el enrutamiento reactivo los nodos no mantienen ninguna información de enrutamiento, la comunicación se realiza por demanda y se inicia a petición de los nodos móviles. Es una de las estrategias más utilizadas en redes móviles ad-hoc, debido a que realiza rutinas de mantenimiento bajo demanda para asegurar la integridad de la información durante la transmisión, permitiendo rápida adaptación a las condiciones de enlace dinámico, sin embargo, a medida que aumenta el número de elementos en la red, su rendimiento se ve afectado [44, 45].

Por otra parte, el enrutamiento híbrido permite adquirir las ventajas de los enrutamientos proactivo y reactivo en un solo esquema, conservando un mapa topológico y realizando transferencia de información bajo demanda. El enrutamiento GLOR (Geolocation Oriented Routing, por sus siglas en inglés) presenta un comportamiento híbrido y emplea un sistema de geolocalización para determinar la ruta con menor trayectoria. Sin embargo, el enrutamiento no asegura la calidad en la transmisión debido a cuestiones geográficas que pueden interferir en el enlace [46].

Debido a ello surge la necesidad de desarrollar un enrutamiento que permita la generación de rutas de transmisión que consideren la calidad y la menor distancia de propagación para disminuir la saturación en una red tipo malla.

## Justificación

Actualmente, se ha incrementado el interés para generar redes de comunicación inalámbrica enfocándose en la calidad de los enlaces de comunicación, en la búsqueda de disminuir los retrasos y minimizar la saturación, debido a que la saturación ocasiona pérdidas de información por la colisión de paquetes y el tiempo de vida de cada paquete, se ha propuesto realizar un control adecuado en el tráfico de datos que permita analizar el retardo, pérdida de paquetes y rendimiento en la red.

La eficiencia que proporciona el control en el tráfico de datos, varía sobre la cantidad de canales. Los sistemas de comunicación con múltiples canales permiten realizar ajustes dinámicos del canal disminuyendo la saturación, sin embargo, presentan un consumo de energía más elevado que los sistemas enfocados en un canal.

Los sistemas de comunicación monocanal, se diferencian mediante las características de sincronización de los elementos y la calidad en el enlace, no obstante, la sincronización se basa en un enfoque teórico, mientras que los estudios basados en la calidad se enfocan en determinar la confiabilidad en la transmisión de datos en las redes de sensores.

El estudio de la calidad se clasifica en 2 categorías, el análisis de la potencia en la transmisión de datos y el estudio de los enrutamientos, el análisis de la potencia causa un mayor gasto de recursos como procesamiento y energía.

Un enrutamiento genera vías que permiten la transferencia de información analizando diversos criterios propuestos, se catalogan en proactivos, reactivos e híbridos.

Un enrutamiento proactivo se caracteriza por determinar un mapa topológico mediante solicitudes recurrentes de actualización en conexión entre nodos adyacentes, que le permiten disminuir la latencia en la red, por otra parte, un enrutamiento reactivo realiza la transmisión de datos por solicitud de algún nodo, permitiendo la reducción del tráfico en la red.

Los enrutamientos Greedy Forwarding y Face Routing emplean tablas para la generación de rutas de transmisión de igual manera que un proactivo y realiza la transmisión de la información por demanda de igual modo que un reactivo, empleando un sistema de geolocalización para determinar la ruta con menor trayectoria.

Por otra parte, los enrutamientos Greedy y Face tienen como objetivo combinar las ventajas de los enrutamientos proactivo y reactivo, para admitir redes de mayor tamaño y dinámicas. Sin embargo, no contemplan la calidad en sus enlaces, por consiguiente, no asegura la calidad en la transmisión debido a cuestiones inherentes a la red que puedan interferir en el enlace.

Se plantea el diseño de un enrutamiento que permita disminuir la saturación en base a un sistema de comunicaciones monocanal por medio del estudio de la calidad en los nodos, bajo el criterio de la calidad del enlace y geolocalización.

Además, desarrollar una metodología que contemple el estudio tanto de criterios de calidad como criterios de geolocalización para determinar una ruta que no comprometa a ambas.

## Objetivo general

Diseño de una estrategia de enrutamiento dinámico mediante el criterio de calidad y geolocalización para una red de sensores inalámbricos.

## Objetivos específicos

- Estudiar y analizar el concepto de red de comunicaciones y sistemas de geolocalización.
- Determinar la topología de la red de comunicaciones y el dispositivo de geolocalización para una aplicación de monitoreo climático.
- Analizar los algoritmos de enrutamiento más utilizados en redes modernas y medir los criterios que nos permitan evaluar la eficiencia y calidad de una red.
- Diseñar una estrategia de enrutamiento dinámico y simular su operación en una red de nodos considerando el criterio de ubicación y calidad
- Diseñar e implementar un nodo para la adquisición, captura y análisis de datos en una red de monitoreo climático de 5 nodos.
- Analizar y validar los resultados obtenidos.

## Descripción

En el capítulo 1 se realiza la revisión del estado del arte enfocado a los tipos de redes de comunicación y los protocolos de comunicación inalámbrica más usados actualmente y se determina usar el protocolo ZigBee. También se realiza una comparación entre las redes de comunicación alámbricas e inalámbricas y se analiza el modelo OSI que permite observar el comportamiento de las redes por medio de capas. En el capítulo 2 se realiza la revisión del estado del arte enfocado a los tipos de modos de comunicación que permiten las redes de comunicación. En el capítulo 3 se realiza la revisión del estado del arte enfocado a sistemas globales de navegación por satélite, en los tipos de módulos comerciales y se profundiza en los módulos GNSS, determinando el módulo que se usara. En el capítulo 4 se describen las características necesarias de las redes de sensores inalámbricos, sus elementos, las topologías que soporta y sus áreas de aplicación, junto con el estado del

arte de los nodos comerciales que existen en la actualidad. En el capítulo 5 se realiza la revisión del estado del arte de los tipos de enrutamientos, su diseño y requisitos. También se muestran las métricas que se tomarán en cuenta y se propone el enrutamiento de este trabajo. En el capítulo 6 se realiza la plataforma en Matlab que permite comprobar el funcionamiento del enrutamiento propuesto y del enrutamiento GPSR para comparar el funcionamiento de ambos. En el último capítulo se realiza el diseño y construcción de 5 nodos, con ello se implementó una red de comunicación que comprueba el funcionamiento del enrutamiento propuesto.

# Capítulo 1

## Redes de comunicación

En este capítulo se aborda el estudio y análisis de las redes de comunicación, junto con su modelo OSI y una descripción detallada de los tipos de redes con sus estándares de comunicación más utilizados como Wifi, Bluetooth y ZigBee, con una comparativa entre ellas y se introduce al tema de enrutamiento describiendo sus características.

Actualmente las redes de comunicación son de gran importancia para el desarrollo de las actividades humanas, debido a que permiten las transferencias de información entre dispositivos que pueden estar separados por grandes distancias, algunos ejemplos son realizar llamadas entre personas de un extremo a otro del mundo, descubrir nuestra ubicación en el planeta mediante un gps, monitorear un volcán o áreas geográficas de difícil acceso o peligrosas, etc. [47].

Una red de comunicación es un conjunto de medios técnicos que permiten la comunicación entre equipos autónomos. que transmiten información a través de impulsos eléctricos, ondas electromagnéticas o cualquier otro medio. La información se puede transmitir de forma analógica, digital o mixta, donde las conversiones se realizan de forma transparente al usuario, además, la comunicación se puede realizar por un medio guiado o no guiado dando como resultado las redes de comunicación alámbricas e inalámbricas [47].

### 1.0.1. Redes de comunicación alámbrica

Las redes de comunicación alámbricas se llevan a cabo mediante cables, hilos o fibra óptica, que pueden ser de varios tipos dependiendo de su capacidad para transportar información y de la resistencia que oponen a las interferencias, permiten velocidades mayores a las redes inalámbricas, con mayor robustez, sin embargo, tienen menor cobertura y no es accesible a redes dinámicas [48].

### 1.0.2. Redes de comunicación inalámbrica

Las redes de comunicación inalámbricas se realizan por medio de ondas de radio, de microondas y pulsos de luz infrarroja transmitidos a través de la atmósfera, el océano (sonar) o el espacio exterior (vía satélite).

En Tabla 1.1 se aprecia que las redes de comunicación inalámbrica tienen una mayor facilidad de instalación y de escalabilidad a diferencias de las redes alámbricas, permiten generar conectividad con dispositivos fuera de los límites del cableado de red física, por consiguiente, aumenta la cobertura de la red y son más adecuadas para redes dinámicas. [49].

Tabla 1.1: Comparación redes de comunicación alámbrica e inalámbrica.

No.	Características	Redes de comunicación alámbricas	Redes de comunicación inalámbricas
1	Instalación	Difícil de moderar (debido a que se utilizan más números de componentes durante la instalación y requieren cables para conectarse a todas y cada una de las computadoras de la red)	Instalación fácil (aseada y limpia, no se usan cables desordenados en esto)
2	Tiempo de instalación	Más (debido a la conexión de todas y cada una de las computadoras en la red)	Menos (no implica conexiones de cable desordenadas en esto)
3	Costo	Menos (tales Ethernet, cables, interruptores no son caros)	Más (adaptadores inalámbricos y puntos de acceso son bastante caros)
4	Movilidad	Limitado (porque opera solo en una computadora conectada a la red)	Excepcional (permite que el usuario inalámbrico se conecte a la red y se comunique con otros usuarios en cualquier momento y en cualquier lugar)
5	Confiabilidad	Alto (los cables Ethernet, los conmutadores son confiables porque los fabricantes han mejorado la tecnología durante varias décadas)	Razonablemente alto (porque si la sección principal como el enrutador se avería toda la red se verá afectada)
6	Velocidad y ancho de banda	Alto Hasta 100 mbps	Bajo Hasta 54 mbps (depende de los estándares 802.11g)
7	Seguridad	Bueno (mediante el uso de algún software como software de pared libre, etc.)	Débil (porque las señales de comunicación inalámbrica viajan por el aire y pueden ser interceptadas fácilmente, pero puede mejorar mediante la técnica de encriptación)
8	Pérdida de señal y desvanecimiento	Menos (porque en las conexiones por cable la interferencia será menor)	Más (debido a más interferencia, absorción, refracción y reflexión, etc.)
9	Interferencia	Menos (Las redes son invisibles para otras redes cableadas. La presencia de una red cableada no tiene ningún efecto en el rendimiento de otra red cableada)	Más alto (la posibilidad de interferencia de radio debido al clima, otros dispositivos inalámbricos u obstrucciones como las paredes)

## 1.1. Modelo OSI

Para realizar la transferencia de información en las redes de comunicación es preciso definir el sistema de transmisión y el método de acceso, así como informaciones relativas al establecimiento de los enlaces, debido a ello la organización internacional de normalización (International Standards Organization, ISO) especificó el modelo de referencia ISO/OSI, convertido en un estándar esencial a la hora de describir redes de comunicación y sus diferentes partes en las que se divide.

Este modelo propone una serie de niveles o capas, de tal modo que una se fundamenta en la anterior, aunque no es necesario emplear todas ellas para construir un sistema de comunicación ya que eso depende de su complejidad y aplicación, este trabajo se enfocara en las primeras 3 capas que son: capa física, capa de enlace y capa de red, debido a que la capa de red permite el direccionamiento y el control de flujo de la información generando rutas de comunicación o enrutamientos. En la capa de enlace se gestiona la información controlando el direccionamiento físico y el acceso al medio, en la capa física se definen las especificaciones del nodo como modulación, ancho de banda, potencia de la antena y funciones de activación mantenimiento y desactivación el enlace físico entre sistemas.

El modelo OSI se representa en siete capas, cada una de las cuales ilustra una función de red específica. Esta división de las funciones de networking se denomina división en capas que se pueden apreciar en la Figura 1.1.

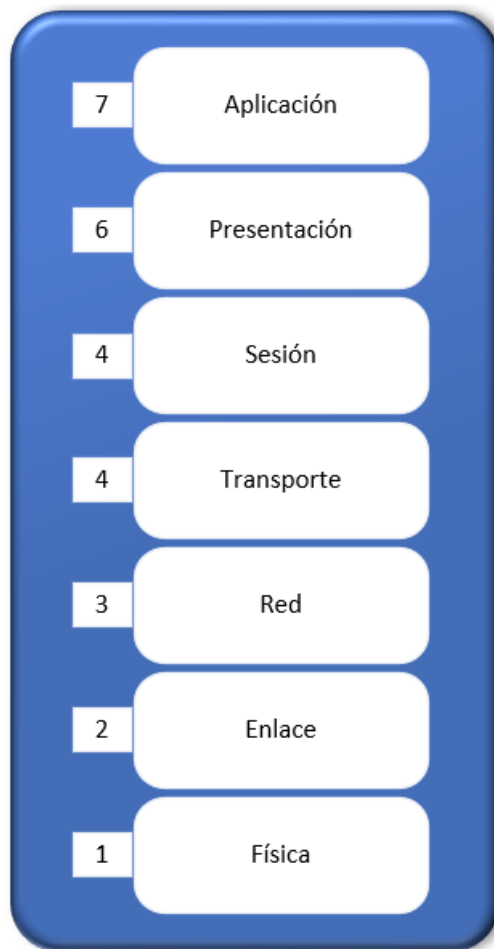


Figura 1.1: Modelo OSI.

- **Capa Física** define las especificaciones eléctricas, mecánicas, de procedimiento y funcionales para activar, mantener y desactivar el enlace físico entre sistemas finales. Las características tales como niveles de voltaje, temporización de cambios de voltaje, velocidad de datos físicos, distancias de transmisión máximas, conectores físicos y otros atributos similares son definidos por las especificaciones de la capa física. De manera sencilla se puede definir como señales y medios de la transmisión.
- **Capa de enlace** proporciona tránsito de datos confiable a través de un enlace físico. Al hacerlo, la capa de enlace de datos se ocupa del direccionamiento físico, la topología de red, el acceso a la red, la notificación de errores, entrega ordenada de tramas y control de flujo. De manera sencilla se puede definir como tramas y control de acceso al medio.
- **Capa de red** es una capa compleja que proporciona conectividad y selección de ruta entre dos sistemas de hosts que pueden estar ubicados en redes geográficamente distintas. De manera sencilla se puede definir como selección de ruta, direccionamiento y enrutamiento.
- **Capa de transporte** segmenta los datos originados en el host emisor y los reensambla en una corriente de datos dentro del sistema del host receptor. El límite entre la capa de transporte y la capa de sesión puede imaginarse como el límite entre los protocolos de aplicación y los protocolos de flujo de datos. Mientras que las capas de aplicación, presentación y sesión están relacionadas con asuntos de aplicaciones, las cuatro capas inferiores se encargan del transporte de datos.

- **Capa de sesión** establece, administra y finaliza las sesiones entre dos hosts que se están comunicando. La capa de sesión proporciona sus servicios a la capa de presentación. También sincroniza el diálogo entre las capas de presentación de los dos hosts y administra su intercambio de datos. Además de regular la sesión, la capa de sesión ofrece disposiciones para una eficiente transferencia de datos, clase de servicio y un registro de excepciones acerca de los problemas de la capa de sesión, presentación y aplicación. De manera sencilla se puede definir como diálogos y conversaciones.
- **Capa de presentación** garantiza que la información que envía la capa de aplicación de un sistema pueda ser leída por la capa de aplicación de otro. De ser necesario, la capa de presentación traduce entre varios formatos de datos utilizando un formato común. De manera sencilla se puede definir como un formato de datos común.
- **Capa de aplicación** es la capa del modelo OSI más cercana al usuario; suministra servicios de red a las aplicaciones del usuario. Difiere de las demás capas debido a que no proporciona servicios a ninguna otra capa OSI, sino solamente a aplicaciones que se encuentran fuera del modelo OSI. Algunos ejemplos de aplicaciones son los programas de hojas de cálculo, de procesamiento de texto y los de las terminales bancarias. La capa de aplicación establece la disponibilidad de los potenciales socios de comunicación, sincroniza y establece acuerdos sobre los procedimientos de recuperación de errores y control de la integridad de los datos. De manera sencilla se puede definir como los navegadores de Web.

## 1.2. Estándares de comunicación

Existen diversos estándares en las redes de comunicación dependiendo su medio de propagación y cobertura, el instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (Institute of Electrical and Electronics, IEEE) es una organización internacional sin fines de lucro, líder en el campo de la promoción de estándares internacionales, particularmente en el campo de las telecomunicaciones, donde se observa la familia de estándares IEEE 802. IEEE 802 es una familia de estándares referentes a redes de área local y metropolitanas.

Por definición los estándares IEEE 802 se restringen a redes que transportan paquetes de tamaño variables, algunos de los productos del IEEE más conocidos son el grupo de estándares para redes LAN/MAN IEEE 802 que incluye el de Ethernet (IEEE 802.3) y el de redes inalámbricas (IEEE 802.11). Los estándares de comunicación definen el uso de los dos niveles inferior de la arquitectura OSI (capa física y capa de enlace) y son la primera decisión que se debe especificar cuando se va a diseñar una red inalámbrica, ya que su comunicación dependerá del estándar que se vaya a utilizar.

Los nodos de la red de sensores inalámbricos no disponen de una fuente de alimentación ilimitada, por consiguiente se alimentan de batería externas de duración restringida, por ello se debe seleccionar un estándar de comunicaciones inalámbrico que asegure un alcance considerable en la red y a la vez tenga un consumo bajo de energía, por ello se describe a continuación algunos estándares utilizados en las redes inalámbricas.

### 1.2.1. WI-FI

WiFi es un estándar de comunicación inalámbrico inicialmente utilizado en redes de área local y luego convertido en un medio para acceder a Internet de banda ancha. La norma IEEE 802.11 es un estándar internacional que describe las características de una red de

área local inalámbrica. Wi-Fi es el nombre dado inicialmente a esta certificación por la WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), el organismo encargado de certificar que los equipos cumplan la norma 802.11. Debido a un abuso de lenguaje y por razones de marketing el nombre de la norma se confunde hoy en día con el nombre de la certificación. De este modo una red Wi-Fi es en realidad una red conforme a la norma 802.11., la principal característica que ofrece este estándar frente a los demás es una gran velocidad de transmisión de datos a costa de un gran consumo eléctrico. Permite el crear redes de cualquier topología y tamaño. También permite cifrar los datos por medio de sistemas de cifrado como WEP, WPA o WPA2 [1, 50].

En la Tabla 1.2 se muestra el avance en la tecnología Wi-Fi con respecto a las últimas 2 décadas, de manejar tasas máximas de 2 Mbps aumento hasta 54 Mbps y con el estándar 802.11n en desarrollo que pretende 600 Mbps (teórico) y en el aumento del alcance tanto en interiores como en exteriores de más de 3 veces. [1].

Tabla 1.2: Comparación de tecnologías Wi-Fi.

Parámetros	802.11 legacy	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n
Ancho de banda	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz / 5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz / 5 GHz
Capa física	FHSS / DSSS / IR	DSSS	OFDM	DSSS / OFDM	MIMO / OFDM
Tasa máxima	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	600 Mbps
Rendimiento	0.9 Mbps	4.5 Mbps	23 Mbps	20 Mbps	135 Mbps
Alcance exterior	100 m	150 m	120 m	150 m	300 m
Año	1997	1999	1999	2003	2008
Uso	En desuso	Muy extendido	Poco extendido	Extendido y creciendo	En desarrollo
Rendimiento	Bajo rendimiento	Rendimiento medio	Mejor rendimiento	Rendimiento medio	Máximo rendimiento
Consumo	Bajo consumo	Bajo consumo	Mayor consumo	Bajo consumo	

## 1.2.2. Bluetooth

Bluetooth es una especificación (especificación industrial: IEEE 802.15.1) para redes inalámbricas de área personal (WPAN), cuyo propósito es la conexión, intercambio de información y transmisión de voz entre dispositivos móviles tales como PDAs, portátiles, teléfonos móviles, cámaras digitales, impresoras, etc., a través de una conexión de radio segura y de corto alcance. Bluetooth es una tecnología diseñada para establecer una comunicación inalámbrica entre varios dispositivos que se encuentren a una distancia máxima de 10 metros (o incluso 100 m en dispositivos de Clase 1) [51].

Está basada en una conexión de radio de corto alcance, dado que está pensada para uso personal. La banda de frecuencias de trabajo se sitúa en la banda ISM de 2.4GHz, que al ser libre a lo largo de todo el mundo, permite una reducción de costos en el diseño de dispositivos. Los dispositivos Bluetooth se conectan entre sí formando una piconet en la que debe existir un dispositivo maestro que es el que controla la comunicación con los demás dispositivos denominados esclavos.

Los dispositivos se pueden clasificar en tres clases diferentes en función de la potencia máxima de transmisión permitida y del alcance del dispositivo, donde la clase 1 permite el mayor rango con una potencia de salida de 20dBm, sin embargo con el mayor consumo de 100 mW como se puede observar en la Tabla 1.3 [51].

Tabla 1.3: Clases de Bluetooth.

Clase	Potencia de salida máxima ( mW )	Potencia de salida máxima ( dBm )	Rango ( aproximado )
Clase 1	100 mW	20 dBm	100 m
Clase 2	2.5 mW	4 dBm	10 m
Clase 3	1 mW	0 dBm	1 m

La tecnología Bluetooth permite varias tasas de transmisión donde la mínima es de 1 Mbps en la versión 1.2 hasta 24 Mbps en la versión 4 como se observa en la Tabla 1.4 [51].

Tabla 1.4: Versiones de Bluetooth.

Versión	Ancho de banda
Versión 1.2	1 Mbps
Versión 2.0 EDR	3 Mbps
Versión 3.0 HS	24 Mbps
Versión 4.0	24 Mbps

### 1.2.3. Zigbee

La Alianza Zigbee es una asociación de empresas que trabajan juntas para lograr el desarrollo de un estándar para productos de monitorización y control basados en el estándar IEEE 802.15.4. La principal característica del estándar Zigbee es la flexibilidad de la red, el bajo costo, el bajo consumo y la baja tasa de datos. Otra característica importante es la capacidad de crear redes Ad-Hoc o autoorganizadas, a las que se pueden interconectar una gran cantidad de dispositivos tanto fijos como móviles [51, 52].

Hay muchas aplicaciones de control y monitorización en entornos industriales y del hogar que requieren dispositivos con una larga duración de batería, con bajas tasas de datos y una baja complejidad, que estén basados en una tecnología estándar inalámbrica. En el mercado existen varios estándares para comunicaciones inalámbricas, pero no consiguen resolver los problemas que se presentan en este tipo de entornos.

Los sensores y los dispositivos de control no necesitan grandes anchos de banda, sin embargo, sí que necesitan una baja latencia y un consumo muy bajo para lograr una larga duración de las baterías. Otros estándares inalámbricos del grupo IEEE 802, tales como Wi-Fi (IEEE 802.11a/b/g) o Bluetooth (IEEE 802.15.1) consiguen altas tasas de datos a costa de un alto consumo o una alta complejidad y coste de los dispositivos [52, 53].

El grupo de trabajo IEEE 802.15 (WPAN Working Group) ha desarrollado un estándar para este tipo de aplicaciones inalámbricas enfocado a aplicaciones que requieran dispositivos de bajo consumo, que puedan funcionar con baterías, con una duración desde varios meses hasta varios años, y con una baja complejidad.

Las aplicaciones a las que va enfocada esta tecnología son automatización del hogar, sensores inalámbricos, control remoto, etc. El trabajo de este grupo se centró en el desarrollo de la capa física (PHY) y la capa de acceso al medio (MAC), dando como resultado el estándar IEEE 802.15.4 LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network). Esta tecnología es idónea para formar redes de sensores. Los posibles usos de ZigBee/802.15.4, como principal exponente de las redes inalámbricas de bajo consumo [51, 53].

En la Figura 1.2 podemos ver el modelo OSI de la tecnología ZigBee.

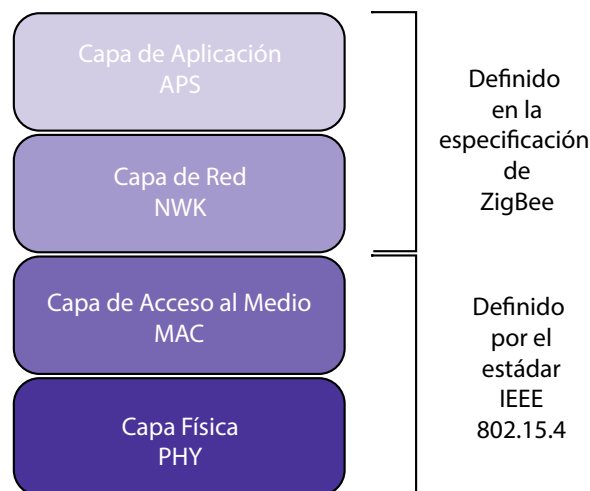


Figura 1.2: Modelo OSI de la tecnología ZigBee.

ZigBee se compone de 3 tipos distintos de dispositivos, estos son [54]:

- **Estación base.** Este dispositivo inicializa y controla la red. También se encarga de gestionar las tareas de seguridad. Para poder formar una red ZigBee debe existir un coordinador.
- **Router.** Estos dispositivos son los encargados de extender la cobertura de la red, gestionando nuevos caminos en el caso de que la red experimente congestión o se produzca la caída de algún nodo. Pueden conectarse directamente al coordinador o a otros routers. Gestionan dispositivos hijo.
- **Dispositivo final.** Este tipo de dispositivo puede enviar y recibir datos pero no realizar tareas de encaminamiento. Deben estar conectados a un router o al coordinador y no admiten dispositivos hijo.

Los dispositivos también pueden organizarse según otro criterio [54]:

- **FFD (Full Function Device).** Este dispositivo tiene una funcionalidad completa. Puede funcionar como Estación base, router o dispositivo final.
- **RFD (Reduced Function Device).** Tiene una implementación mínima del protocolo 802.15.4. Está pensado para realizar tareas extremadamente simples en las que se envíen pequeñas cantidades de datos. Ejemplos de esto pueden ser interruptores de luz, sensores de infrarrojos u otros dispositivos con una funcionalidad básica. Sólo pueden estar conectados a un FFD. Únicamente pueden funcionar como dispositivos finales.

### 1.2.3.1. Capa Física

La capa física gestiona la transmisión y recepción de datos usando determinados canales radio. En 802.15.4 tenemos tres posibles bandas de frecuencia en las que poder trabajar: 868 MHz, 915 MHz y 2,4 GHz. En la primera banda únicamente tenemos un canal entre 868 y 868,6 MHz. En la siguiente banda tenemos 10 canales entre 902 y 928 MHz. Por

último, 16 canales más están localizados entre 2,405 y 2,48 GHz. Otra diferencia es que, la banda de 868 MHz está disponible sólo en Europa mientras que la de 915 MHz sólo en Estados Unidos y Australia. Sin embargo, la banda a 2,4 GHz es universal.

En 804.15.4 se utiliza DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) como técnica de ensanchado de espectro, en la Tabla 1.5 se puede observar una de las características del estándar ZigBee que es la baja velocidad de transferencia dando 20, 40, y 250 Kbps, utilizando bandas libres y modulación de BPSK Y OQPSK [51, 53].

Tabla 1.5: Características de capa física de ZigBee.

Banda de frecuencias ( MHz )	Velocidad de bits ( Kbps )	Modulación
868	20	BPSK
915	40	BPSK
2400	250	OQPSK

Respecto a las funciones que realiza la capa física en 802.15.4 podemos destacar [54,55]:

- **Activar y desactivar el transceptor radio.** El transceptor radio tiene tres modos de funcionamiento: transmisión, recepción y sleeping (descanso). Bajo petición de la capa MAC la capa física debe conmutar entre estos tres estados. El estándar exige que la conmutación entre transmisión y recepción, o viceversa, se haga en menos de 12 símbolos (aTurnaroundTime = 12). Para el caso de 2,4 GHz y teniendo en cuenta que cada símbolo corresponde a 4 bits, se puede calcular el tiempo máximo de conmutación entre los estados de transmisión y recepción: 12 símbolos = 48 bits  $(48 \text{ bits}) / (250 \text{ kbits/s}) = 192 \mu\text{s}$
- **Detección de energía de cada canal (ED, Energy Detection).** La capa física también es la encargada de comprobar qué nivel de potencia tiene un determinado canal. Esta medida es utilizada por la capa de red como parte de su algoritmo para la elección de canal.
- **Indicación de la calidad de enlace (LQI, Link Quality Indicator).** Mide la potencia en dBm de la señal que ha transmitido el último paquete.
- **Evaluación de canal libre (CCA, Clear Channel Assessment).** Este indicador será utilizado por el algoritmo CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance ) como se verá más adelante.
- **Selección de frecuencia.** Dentro de los 27 canales posibles de ZigBee, la capa física debe ser capaz de seleccionar aquel que le especifiquen las capas superiores.
- **Envío y recepción de datos.**

### 1.2.3.2. Capa de Acceso al medio

La capa MAC, o capa de acceso al medio, es la responsable de asegurar la comunicación entre un nodo y todos los nodos conectados directamente a él, evitando colisiones y mejorando la eficiencia. Más concretamente, las tareas que la capa MAC tiene que realizar son [54, 55]:

- Generar balizas (beacons) si el dispositivo es un coordinador y se funciona en modo balizado.

- Sincronizar las balizas de la red.
- Gestionar la conexión y desconexión a la red de los dispositivos asociados al propio nodo.
- Emplear el algoritmo CSMA-CA para gestionar el acceso al canal.
- Asegurar un enlace fiable con la capa MAC de los nodos contiguos.

#### 1.2.3.2.1. Modos de funcionamiento

El protocolo MAC soporta dos modos de funcionamiento (el coordinador es el encargado de seleccionar uno u otro en el momento de iniciar la red) [55]:

- **Modo balizado.** La baliza es generada periódicamente por el coordinador y distribuida por toda la red gracias a los routers. Dicha baliza sirve para sincronizar todos los nodos de la red, de modo que estos puedan despertarse en un momento determinado (conocido por todos), enviar los datos almacenados y volver al modo de ahorro energético (sleep). Así, tanto el coordinador, como los routers y los dispositivos finales pueden pasar gran parte del tiempo en modo de bajo consumo. La topología en malla no admite el modo balizado debido a la complejidad que ello conllevaría (a un mismo dispositivo podrían llegarle balizas provenientes de distintos routers).
- **Modo no balizado.** En este modo los dispositivos no están sincronizados unos con otros. Así, únicamente los dispositivos finales pueden entrar en el modo sleep mientras que los routers y el coordinador deben estar continuamente con el sistema radio en modo recepción y así estar preparados para recibir datos en cualquier momento. Este modo es más simple, pero hace que gran parte

#### 1.2.3.2.2. Algoritmo CSMA-CA

Cuando se emplea este algoritmo los dispositivos anuncian que están listos para enviar paquetes de datos antes de acceder al canal. De esta forma se evita la colisión. Dependiendo de unos ciertos parámetros se da prioridad a uno de los candidatos, que podrá acceder al canal para enviar su paquete de datos. El resto de los dispositivos esperarán un tiempo aleatorio (distinto en cada uno de ellos) para volver a intentar acceder al canal [54].

Se definen dos tipos distintos de algoritmo CSMA-CA según estemos usando el modo balizado o el no balizado. Para el modo balizado se emplea el CSMA-CA ranurado mientras que para el no balizado se utiliza el CSMA-CA no ranurado. En ambos casos, un transmisor sólo puede intentar acceder al medio con una periodicidad concreta (determinada por el tiempo de backoff). En el CSMA-CA ranurado, este tiempo de backoff debe estar sincronizado con la baliza. Para el caso del CSMA-CA no ranurado, cada transmisor tiene su propio tiempo de backoff, en la Figura 1.3 se puede observar su diagrama de bloques [55].

El algoritmo CSMA-CA utiliza tres variables para priorizar el acceso al medio [54,55]:

- NB (Number of Backoffs). Es el número intentos de acceso al canal que un dispositivo lleva acumulados. Cada vez que un dispositivo quiere enviar un nuevo paquete esta variable debe ser inicializada a 0.

- CW (Contention Window). Es la longitud de la ventana de contienda. Representa el número de periodos de backoff que el canal debe estar sin actividad para que se considere libre y, en consecuencia, poder ser asignado a un dispositivo.
- BE (Backoff Exponent). Se emplea para determinar, aleatoriamente, el número de periodos de backoff que el dispositivo debe esperar para intentar acceder al canal después de un acceso fallido.

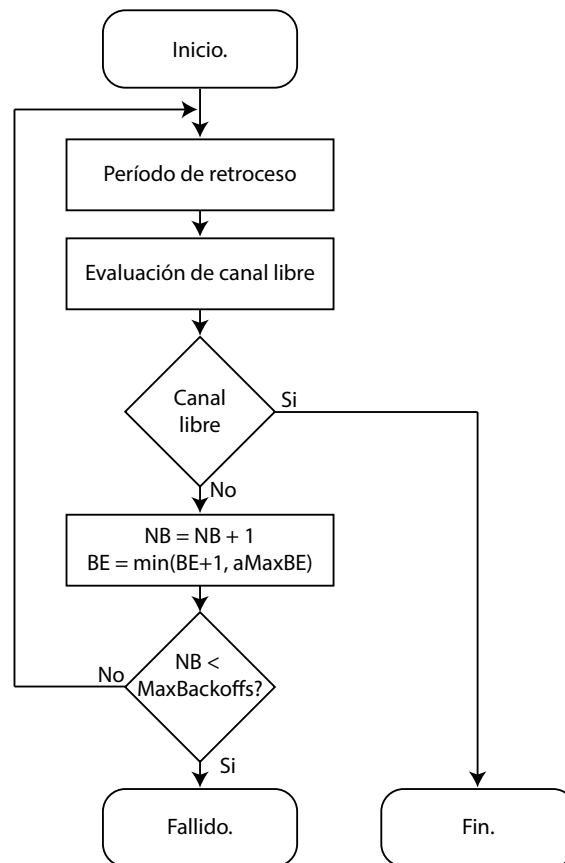


Figura 1.3: Diagrama de bloques del algoritmo CSMA-CA.

### 1.2.3.2.3. Cálculos

El rendimiento máximo se calcula dividiendo la cantidad de bits en un paquete por el tiempo que lleva transmitir el paquete. A continuación, se muestra como determinar el retraso de un paquete, en la Figura 1.4 se observa el comportamiento de la trama en el medio.

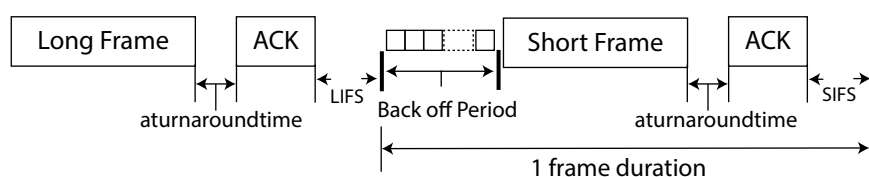


Figura 1.4: Secuencia de trama en 802.15.4.

El retraso experimentado por cada paquete se puede formular como:

$$delay(x) = T_{BO} + T_{frame}(x) + T_{TA} + T_{ACK} + T_{IFS} \quad (1.1)$$

Dónde

- $T_{BO}$  : Período de retroceso.
- $T_{frame}(x)$ : Tiempo de transmisión de la carga de x byte.
- $T_{TA}$  : Tiempo de vuelta (192μs).
- $T_{ACK}$  : Tiempo de transmisión de ACK.
- $T_{IFS}$  : Tiempo IFS.

$T_{frame}$  es el tiempo necesario para transmitir la carga útil de la trama dado por x:

$$T_{frame}(x) = 8 * \frac{Data}{R_{data}} \quad (1.2)$$

Dónde

$$Data = \frac{L_{PHY} + L_{MAC\_HDR} + L_{address} + L_{MAC\_FTR}}{R_{data}} \quad (1.3)$$

- $L_{PHY}$  : Tamaño de PHY y sincronización de encabezado (6 bytes).
- $L_{MAC\_HDR}(x)$  : Tamaño de encabezado MAC (3 bytes).
- $L_{address}$  : Tamaño de la información del campo de dirección MAC, utilizando 64 bits (20 bytes).
- $L_{MAC\_FTR}$  : Tamaño de pie MAC (2 bytes).
- $R_{data}$  : Tasa de transmisión (250 kbps).
- $x$  : Tamaño máximo de carga (102 bytes).

### 1.2.3.3. Capa de red

La capa de red se define en la especificación de ZigBee. Esta capa es necesaria para gestionar las capas físicas y MAC del estándar 802.15.4 y para proveer de una adecuada interfaz de servicio al nivel de aplicación. Básicamente las tareas que realiza la capa de red son las siguientes [54, 55]:

- Configuración de nuevos dispositivos.
- Inicialización de la red PAN.
- Asociación, reasociación y abandono de una red.
- Adjudicación de direcciones de red.
- Descubrimiento de la topología de red.
- Enrutamiento (routing).

Tabla 1.6: Comparación de tecnologías inalámbricas [1], [2, 3]

Parámetros	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Bandas de frecuencias	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz, 868 - 915 MHz
Tasa de transferencia	54 Mbps	24 Mbps	250 Kbps
Rango de nodos Interno	100 m	10 - 100 m	10 - 100 m
Número de dispositivos	32	8	65535
Requisitos de alimentación	Media - Horas de batería	Media - días de batería	Muy baja - años de batería
Arquitecturas	Ad-hoc, Árbol, Estrella, Malla	Ad-hoc hasta 8 dispositivos	Ad-hoc, Árbol, Estrella, Malla hasta 65535 en sub-redes de 255
Encriptación	WPE, WPA, WPA2	128 bits	64 y 128 bits
Precio	Costoso	Accesible	Bajo
Complejidad	Complejo	Complejo	Simple

A nivel de red, existen dos tipos de direcciones: direcciones cortas (16 bits) y direcciones largas o direcciones IEEE (64 bits). Cada dispositivo debe tener asignada una dirección IEEE única. No puede haber dos dispositivos que cumplan con la especificación ZigBee y que posean la misma dirección IEEE. Así, esta dirección es asignada en el momento de la fabricación del dispositivo. Por contra, la dirección corta es asignada por la capa de red de forma dinámica. Dentro de una red ZigBee no puede haber más de un dispositivo con igual dirección corta [54].

#### 1.2.4. Comparación de tecnologías inalámbricas

En la Tabla 1.6 se hace una comparación de los estándares de comunicación, Wi-Fi es el estándar con mayor tasa de transferencia permitiendo hasta 54 Mbps y permite todo tipo de topologías, sin embargo, por una mayor tasa de transferencia tiene el mayor consumo de energía (de horas), un mayor costo y solo permite un máximo de 32 dispositivos, Bluetooth tiene un consumo bajo de energía a diferencia del Wi-Fi, permite tasas de transferencia de 24 Mbps y con alcances de hasta 100 metros, sin embargo, la escalabilidad de redes con esta tecnología es baja, debido que solo permite 8 dispositivos con estación base quien los organiza, a diferencia del Wi-Fi y Bluetooth el estándar Zigbee permite redes de hasta 65535 dispositivos donde cada uno puede ser configurado como estación base, router o nodo final, desarrollando redes de baja complejidad, bajo precio y bajo consumo de energía, debido a su baja tasa de transferencia de hasta 250 kbps [1], [2, 3].

En la Tabla 1.7 se puede observar la comparación de las tecnologías inalámbricas desde el punto de vista del consumo de corriente en sleeping, awake, transmitting y receiving mode, donde se puede apreciar en Sleeping Mode las 3 tecnologías tienen un consumo muy bajo. Sin embargo, la tecnología ZigBee y Bluetooth se encuentran muy cercanos en su consumo, a diferencia de la tecnología Wi-Fi que consume más de 5 veces en corriente a los anteriores.

Tabla 1.7: Comparación de tecnologías inalámbricas

	Bluetooth	ZigBee	Wi-Fi
IEEE estandar	802.15.1	802.15.4	802.11b
Sleeping Mode	9 $\mu$ A	12 $\mu$ A	30 $\mu$ A
Awake Mode	35 mA	50 mA	245 mA
Transmitting Mode	39 mA	52 mA	251 mA
Receiving Mode	37 mA	54 mA	248 mA

# Capítulo 2

## Modos de operación de una red

En este capítulo se aborda los modos de arquitectura que existen para configurar una red de comunicación inalámbrica, resaltando la importancia de su elección con respecto a los requisitos necesarios para la red y mejorar el rendimiento de la misma, se dividen en dos tipos de modos.

1. Infraestructura
2. Ad-hoc

Los modos pueden ser vistos como la configuración individual de la tarjeta inalámbrica de un nodo, más que como una característica de toda la infraestructura, debido que no siempre se verán reflejados directamente en la topología. Por ejemplo, una red con topología de estrella puede ser construida por conexiones ad-hoc [4, 56].

### 2.1. Modo Infraestructura (Basic Service Set,(BSS))

En el modo de infraestructura existe un elemento de coordinación: un punto de acceso o estación base. Si el punto de acceso se encuentra conectado con más redes, los dispositivos inalámbricos que contenga la red puede acceder a la información de las demás redes a través del punto de acceso. A diferencia del modo ad-hoc los dispositivos inalámbricos en modo de infraestructura pueden utilizar diferentes canales que maneje el punto de acceso dependiendo del protocolo que se use como se puede apreciar en la Tabla 2.1 [51], [4, 5].

Tabla 2.1: Modo infraestructura [4].

Configuración	Punto de acceso / Gateway	Nodo x1
Modo	Infraestructura	Infraestructura
SSID	Defina MI_SSID	Conectar a MI_SSID
Canal	Defina el canal x	Descubre el canal

#### 2.1.1. Tipos de redes en modo Infraestructura

Las redes inalámbricas se pueden clasificar en cuatro grupos específicos según el área de aplicación y el alcance de las señales.

Las dos primeras de mayor alcance (hasta miles de kilómetros) utilizan bandas de frecuencias altas. Cada gobierno las asigna bajo licencia (concesión para su explotación) a los operadores de telecomunicaciones, que puján por ellas durante largos periodos de tiempo por grandes cantidades de dinero. Esto supone una barrera de entrada que limita su explotación solo a grandes empresas [51], [5, 6].

#### **2.1.1.1. Red inalámbrica de área extensa (Wireless Wide Area Network, WWAN)**

Tiene el alcance más amplio de todas las redes inalámbricas, son típicamente redes celulares para telefonía móvil y transmisión de datos.

- Tecnologías vía satélite (IEEE 802.20)
- Todas las redes móviles GSM/EGPRS (2G), UMTS (3G), HSDPA/HSUPA (3.5G) o LTE/SAE (4G)

#### **2.1.1.2. Red Inalámbrica de Área Metropolitana (Wireless Metropolitan Area Network, WMAN)**

Es una red de alta velocidad que dando cobertura en un área geográfica extensa, proporciona capacidad de integración de múltiples servicios mediante la transmisión de datos, voz y vídeo, sobre medios de transmisión inalámbricos.

- WiMax 2 o móvil (IEEE 802.16)

Las siguientes dos categorías se encuentran dentro de las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical), utilizadas para usos industriales, científicos y médicos. Estas bandas de 2.4GHz y 5GHz son libres, no se encuentran reservadas para uso no comercial.

#### **2.1.1.3. Red Inalámbrica de Área Local (Wireless Local Area Network, WLAN)**

Es un sistema de comunicación de datos inalámbrico flexible muy utilizado como alternativa a las redes LAN cableadas o como extensión de éstas. Utiliza tecnología de radiofrecuencia que permite mayor movilidad a los usuarios al minimizar las conexiones cableadas.

- Wi-Fi (IEEE 802.11). Es el estándar más utilizado para la interconexión de este tipo de redes.

#### **2.1.1.4. Red Inalámbrica de Área Personal (Wireless Personal Area Networks, WPAN)**

Es una red para la comunicación entre distintos dispositivos (tanto ordenadores, puntos de acceso a internet, teléfonos móviles, PDAs, dispositivos de audio, impresoras, etc.)

cercanos al punto de acceso. Estas redes normalmente son de unos pocos metros y para uso personal.

- Bluetooth (IEEE 802.15.1), convertida en el estándar del sector, se halla en todo tipo de dispositivos de uso personal
- Infrarrojos (IrDA), la primera en aparecer, en 1993. Trabaja en el espectro de infrarrojos.
- Zigbee (IEEE 802.15.4), de las últimas en aparecer para cubrir un hueco en la gama baja (de coste más bajo) de estas tecnologías. Al tener una pila de protocolo básico, forma una red en malla, un factor de forma reducida, baja velocidad de datos (de hasta 250 kbps), pero sobre todo una duración muy larga de la batería, que le da una autonomía de hasta cinco años.

### 2.1.2. Comparación de redes de comunicación inalámbrica en modo infraestructura

Se puede observar en la Tabla 2.2 como se dividen en 2 las redes de comunicación inalámbrica en modo infraestructura dependiendo la cobertura, las WMAN y WWAN permiten alcances mayores de 50 km, con bandas de frecuencia arriba de los 3 GHz, sin embargo, son de difícil implementación, debido a que cada gobierno asigna las banda de frecuencia bajo licencia por grandes cantidades de dinero, a diferencia de las redes WLAN y WPAN que manejan bandas de frecuencia libres de 868 MHz, 900 MHz, 2.4 GHz y 5GHz con una cobertura menor, sin embargo, con un menor costo de implementación [5, 6].

Tabla 2.2: Comparación de redes de comunicación inalámbrica en modo infraestructura [5, 6].

Tipo de red	Nombre	Estandar	Banda de frecuencia	Rango nominal	Máxima velocidad de transmisión
WPAN	Bluetooth	802.15.1	2.4 GHz	10 m	24 Mbps
	IrDA	IrDA	Infrarrojo	1 m	16 Mbps
	ZigBee	802.15.4	868 MHz, 900 MHz y 2.4 GHz	100 m	250 Kbps
WLAN	Wi-Fi	802.11a	5 GHz	100 m	48 Mbps
		802.11b	2.4 GHz	100 m	11 Mbps
		802.11g	2.4 GHz	100 m	54 Mbps
		802.11n	2.4 - 5 GHz	250 m	600 Mbps
		802.11ac	5 GHz	250 m	1.3 Gbps
WMAN	WIMAX	802.16	2 - 11 GHz y 10 - 66 GHz	50 km	70 Mbps
WWAN	Móvil	LTE, GSM, GPRS	850 MHz, 900 MHz, 2.6 GHz	50 km	1 Gbps
	Satélite	DVB-S2	3 - 30 GHz	50 km	60 Mbps

## 2.2. Modo ad-hoc (Independent Basic Service Set, (IBSS))

El modo ad-hoc también conocido como punto a punto, es un método para que los dispositivos inalámbricos puedan establecer comunicación directa entre si, debido a ello no es necesario involucrar un punto de acceso central. Una red ad-hoc normalmente está conformada por un pequeño grupo de dispositivos, a medida que aumenta el número de nodos el rendimiento de la red es menor.

Cada dispositivo inalámbrico en una red ad-hoc se debe configurar con los mismos SSID (Identificador de la red) y "número de canal" de la red como se puede observar en la Tabla 2.3 [4].

Una red inalámbrica ad hoc está compuesta por dispositivos informáticos móviles que utilizan transmisión inalámbrica para la comunicación sin ninguna infraestructura fija, como se muestra en la Figura 2.1 a continuación [57].

Tabla 2.3: Modo Ad-hoc [4].

Configuración	Nodo 1	Nodo 2
Modo	Ad-hoc	Ad-hoc
SSID	ML.SSID	ML.SSID
Canal	Debe ser convenido y conocido por todos	Debe ser convenido y conocido por todos
Dirección IP	Normalmente fija	Normalmente fija

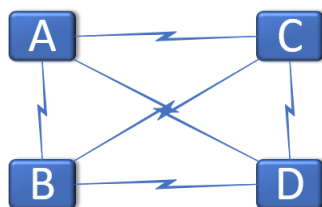


Figura 2.1: Modo Ad-hoc.

En una red inalámbrica ad hoc, la gestión de enrutamiento y recursos se realiza de forma distribuida en la que todos los nodos se coordinan para permitir la comunicación entre ellos. Cada nodo debe funcionar como un servidor de red para transmitir y recibir datos y como un enrutador de red para enrutar paquetes desde otros nodos. Por lo tanto, los nodos móviles en redes ad hoc son más complejos que las redes celulares.

Las diferencias clave entre la infraestructura y las redes ad hoc son

- Debido a que la red ad-hoc no requiere un punto de acceso, es más fácil de configurar, especialmente en una red pequeña o temporal.
- La infraestructura aprovecha la gran potencia de un punto de acceso para cubrir áreas amplias. Las conexiones del modo ad-hoc son limitadas.
- Debido a que la topología de red ad-hoc cambia regularmente, los recursos del sistema se toman solo para mantener la conectividad.
- A medida que la topología de red ad-hoc cambia, el rendimiento y el rango cambiarán, a veces de forma imprevista.

### 2.2.1. Tipos de redes en modo a Ad-hoc

Según su aplicación, las redes ad hoc pueden ser clasificadas de la siguiente manera.

- Red inalámbrica mallada (Wireless Mesh Network, WMN)
- Red móvil ad-hoc (Mobile Ad-hoc Network, MANET)
- Red de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN)

#### 2.2.1.1. Red inalámbrica mallada (Wireless Mesh Network, WMN)

Este tipo de red mezclan los modos infraestructura y ad-hoc. Los nodos que la forman pueden ser enrutadores de malla o clientes de malla, son redes con modo infraestructura que permiten que dispositivos que se encuentran fuera del rango de cobertura de los puntos de acceso puedan unirse a la red a través de otros nodos que sí lo estén [58].

Las redes de malla inalámbrica (WMN) se autoorganizan dinámicamente y se autoconfiguran, con los nodos en la red estableciendo automáticamente una red ad hoc y manteniendo la conectividad de malla. Las redes WMN se componen de dos tipos de nodos, enrutadores de malla y clientes de malla. Además de la capacidad de enrutamiento para las funciones de puerta de enlace / puente como en un enrutador inalámbrico convencional, un enrutador de malla contiene funciones de enrutamiento adicionales para admitir redes de malla.

A través de las comunicaciones de varios saltos, se puede lograr la misma cobertura con un enrutador de malla con una potencia de transmisión mucho más baja. Para mejorar aún más la flexibilidad de la red de malla, un enrutador de malla generalmente está equipado con múltiples interfaces inalámbricas construidas con las mismas o diferentes tecnologías de acceso inalámbrico. A pesar de todas estas diferencias, los enrutadores inalámbricos de malla y convencionales generalmente se construyen sobre la base de una plataforma de hardware similar.

Los enrutadores de malla tienen una movilidad mínima y forman la red troncal de malla para clientes de malla. Por lo tanto, aunque los clientes de malla también pueden funcionar como un enrutador para redes de malla, la plataforma de hardware y el software para ellos pueden ser mucho más simples que los de enrutadores de malla. Por ejemplo, los protocolos de comunicación para clientes de malla pueden ser livianos, las funciones de puerta de enlace o puente no existen en clientes de malla, solo se necesita una única interfaz inalámbrica en un cliente de malla, y así sucesivamente [59].

#### **2.2.1.2. Red móvil ad-hoc (Mobile Ad-hoc Network, MANET)**

Es una colección de nodos inalámbricos que se pueden configurar dinámicamente en cualquier lugar y en cualquier momento sin utilizar ninguna infraestructura de red preexistente. Es un sistema autónomo en el que los hosts móviles conectados por enlaces inalámbricos se pueden mover aleatoriamente y, a menudo, actúan como enrutadores al mismo tiempo. Los tipos de tráfico en redes ad hoc son bastante diferentes de los de una red inalámbrica estructurada, que incluyen [60]:

1. Peer-to-Peer. Comunicación entre dos nodos que están dentro de un salto.
2. Remoto a remoto. Comunicación entre dos nodos más allá de un solo salto pero que mantienen una ruta estable entre ellos. Esto puede ser el resultado de varios nodos que se mantienen dentro del rango de comunicación entre sí en una sola área o posiblemente moviéndose como un grupo.
3. Tráfico dinámico. Esto ocurre cuando los nodos son dinámicos y se mueven. Las rutas deben ser reconstruidas. Esto da como resultado una conectividad deficiente y actividad de red en ráfagas cortas

## Capítulo 3

# Sistema global de navegación por satélite

En este capítulo se describen los sistemas globales de navegación por satélite, los tipos de sistemas y las características de los módulos comerciales que existen en la actualidad, con esta información se determinó el módulo EVA-M8M como la mejor elección cumpliendo con las características requeridas para una red de sensores inalámbricos.

Desarrollado inicialmente para uso militar, el GPS fue el primer sistema global de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System, GNSS). Hoy en día existen otros sistemas, todos accesibles para fines personales y gratuitos, como el ruso Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS), que ya está disponible, el europeo Galileo y el chino BeiDou, ambos en desarrollo [61,62].

Todos los GNSS actualmente disponibles operan bajo el mismo principio, el procedimiento de cálculo de posición se denomina trilateración o triangulación y consiste en utilizar la información de al menos tres satélites, la distancia y el objeto de un satélite se determina por el retraso en las señales intercambiadas entre ellos, con una distancia es posible rastrear un círculo de posibles posiciones, cuando hay distancia entre el objeto y tres satélites diferentes, la intersección entre los círculos indica la ubicación de los objetos [61,63].

Los satélites conocen su posición actual en relación con la Tierra debido a que siguen una órbita de ficción y todas las posiciones en sus rutas se almacenan previamente, como la distancia se calcula a través de la demora y la transmisión de velocidad puede variar de acuerdo con las condiciones atmosféricas y los obstáculos en el camino, usualmente se necesita un cuarto satélite para otorgar una mayor precisión al sistema, para tener una cobertura global, la constelación o el grupo de satélites que compone el sistema necesita tener al menos 24 satélites. Esto asegura que siempre haya un mínimo de 4 satélites sobre el horizonte en cada lugar del planeta [62,63].

La alta precisión de estos sistemas solo es posible debido a los relojes extremadamente estables dentro de cada satélite. Todos ellos tienen un reloj atómico interno con alta estabilidad y la media entre esos relojes proporciona un estándar de tiempo, derivado del estándar global conocido como TAI, es por eso que los sistemas GNSS se pueden utilizar como referencia de tiempo global con precisión de hasta nanosegundos, además de proporcionar geolocalización en la Figura 3.1 se puede observar el procedimiento.

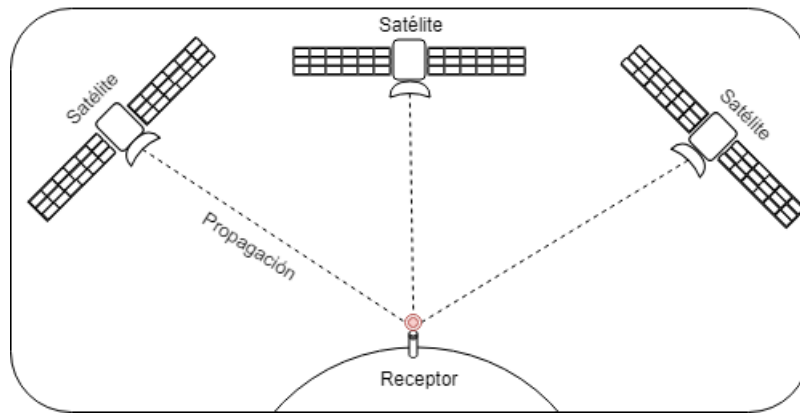


Figura 3.1: GNSS.

### 3.0.1. Sistema de posicionamiento global (Global Positioning System)

GPS es un sistema de posicionamiento global basado en tecnología satelital. La técnica fundamental del GPS es medir los rangos entre el receptor y algunos satélites observados simultáneamente. Las posiciones de los satélites se pronostican y transmiten junto con la señal de GPS para el usuario. A través de varias posiciones conocidas (de los satélites) y las distancias medidas entre el receptor y los satélites, se puede determinar la posición del receptor (latitud, longitud y altitud). El cambio de posición, que también se puede determinar, es la velocidad del receptor. Las aplicaciones más importantes del GPS son el posicionamiento y la navegación [61, 63–65].

Si alguien está trotando con un reloj GPS y quiere saber dónde se encuentra, lo que necesita hacer es muy simple; presionar una tecla será suficiente. Sin embargo, el principio de tal aplicación es complejo. Incluye el conocimiento de la electrónica, la mecánica orbital, la ciencia de la atmósfera, la geodesia, la teoría de la relatividad, las matemáticas, el ajuste y el filtrado, así como la ingeniería de software [66, 67].

El GPS se compone de tres partes [62], [65]:

- **Segmento espacial**, es una constelación de al menos 24 satélites del gobierno de EE. UU. Distribuidos en seis planos orbitales inclinados  $55^\circ$  desde el ecuador en una órbita terrestre media (Medium Earth Orbit, MEO) a unos 20,200 kilómetros de altura y dando una vuelta completa a la tierra cada 12 horas, donde en todo momento se pueda visualizar 4 satélites [62], [65].
- **Segmento de control**, está constituido por todas las infraestructuras en tierra necesarias para el control de la constelación de satélites, mantenidas por la fuerza aérea estadounidense. Dichas infraestructuras tienen coordenadas terrestres de muy alta precisión y consisten en cinco grupos de instalaciones repartidas por todo el planeta, para tener un control homogéneo de toda la constelación de satélites.
- **Segmento de usuario**, está constituido por el hardware (equipos de recepción) y el software que se utilizan para captar y procesar las señales de los satélites. Para los usuarios del sistema GPS, el segmento usuario es quizá la parte que más interesa puesto que del tipo de instrumental y métodos utilizados depende la precisión alcanzada [62], [65].

La base del GPS es la triangulación desde los satélites. Para realizar la triangulación el receptor de GPS mide distancias utilizando el tiempo de viaje de señales de radio, la fórmula para conseguir la distancia es velocidad \* tiempo = distancia, donde una señal de radio viaja a la velocidad de la luz que es alrededor de 300,000 km por segundo, para medir el tiempo de viaje de estas señales el GPS necesita un control muy estricto del tiempo, además de la distancia, el GPS necesita conocer exactamente donde se encuentran los satélites en el espacio. Con orbitas de mucha altura y cuidadoso monitoreo es posible hacerlo, finalmente el GPS debe corregir cualquier demora en el tiempo de viaje de la señal que esta pueda sufrir mientras atraviesa la atmósfera [64, 65].

Cada satélite tiene cuatro relojes atómicos, son del tamaño de un automóvil y pesa alrededor de 1 000 kg, los relojes atómicos a bordo del satélite producen la frecuencia fundamental de la banda L, 10,23 MHz y cada satélite de GPS transmite datos en tres frecuencias: L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) y L5 (1176.45 MHz). Las frecuencias portadoras L1, L2 y L5 se generan multiplicando la frecuencia fundamental por 154, 120 y 115, respectivamente, donde la frecuencia L1 (1575.42 MHz) es comercial a comparación de L2 (1227.60 MHz) es para uso del gobierno de los Estados Unidos [62, 63].

### **3.0.2. GLONASS**

GLONASS es un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) administrado por las Fuerzas Espaciales Rusas y el sistema es operado por el Centro de Información Científica de Coordinación (KNIT) del Ministerio de Defensa de la Federación Rusa. El sistema es comparable al Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de Estados Unidos, y ambos sistemas comparten los mismos principios de transmisión de datos y métodos de posicionamiento.

GLONASS consta de 21 satélites en tres planos orbitales, con tres recambios en órbita, los satélites están espaciados por igual en 45 grados, cada satélite opera en órbitas casi circulares con un semieje mayor de 25 510 km que completa en aproximadamente 11 horas y 16 minutos, las órbitas tienen un ángulo de inclinación de 64.8°. Los satélites GLONASS contienen a bordo relojes Cesium y transmiten señales codificadas en dos frecuencias ubicadas en dos bandas de frecuencia, 1,602 - 1,615.5 MHz y 1,246 - 1,256.5 MHz con un intervalo de frecuencia de 0.5625 MHz y 0.4375 MHz respectivamente [61], [64, 65].

### **3.0.3. GALILEO**

Galileo es un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) iniciado por la Unión Europea (UE) y la Agencia Espacial Europea (ESA) para proporcionar un servicio de posicionamiento global altamente preciso y garantizado bajo control civil. Como sistema de navegación independiente, Galileo, mientras tanto, será interoperable con los otros dos sistemas de navegación por satélite, GPS y GLONASS. Un usuario podrá posicionarse con el mismo receptor de cualquiera de los satélites en cualquier combinación. Galileo garantizará la disponibilidad del servicio con mayor precisión [61, 63].

La constelación de Galileo consta de 30 satélites de órbita media de la Tierra (MEO) en tres planos orbitales con nueve satélites operativos espaciados equitativamente en cada plano más un satélite de reserva inactivo. Los planos orbitales están inclinados 56°. Cada satélite de Galileo se encuentra en una órbita casi circular con un semieje mayor de 29 600 km y un período de aproximadamente 14 horas.

El satélite Galileo tiene cuatro relojes y en cualquier momento, solo uno está operando. Si el reloj maser falla, el reloj de rubidio operativo tomaría control instantáneamente y los dos relojes de reserva se pondrían en marcha. Galileo proporcionará diez señales de

navegación en la Polarización Circular de la Mano Derecha (RHCP) en los rangos de frecuencia 1,164 - 1,215 MHz (E5a y E5b), 1,215 - 1,300 MHz (E6) y 1,559 - 1,592 MHz (E2- L1-E1). La interoperabilidad y compatibilidad de Galileo y GPS se realiza al tener dos frecuencias centrales comunes en E5a / L5 y L1 [61, 63].

El uso de un solo GNSS como referencia de tiempo es la solución más utilizada, por lo general depende del GPS, pero el uso de una sola solución introduce algunas vulnerabilidades y limitaciones en el sistema [61, 63], [65].

### 3.0.4. Tipos de módulos de GNSS

De la Tabla 3.1 se hace una comparación entre módulos comerciales de GNSS entre 3 diferentes compañías que son U-blox, G-top y Linx. U-blox y Linx contienen un catalogo más amplio de más de 6 dispositivos cada uno a diferencia de G.top con 4, todos los dispositivos de la tabla mantienen una precisión de 2.5m y una frecuencia central de 1,575.42 MHz, con un Hot Start de 1s y Cold Start entre 29 y 32s [7–9].

Tabla 3.1: Comparación módulos de GNSS [7–9].

Compañía	Módulo	Sistema	Interfaces	Precio
U-blox	LEA series	GPS - GLONASS	I2C, SPI, UART	\$89 USD
	CAM-M8 series	GPS - GLONASS - GALILEO	UART, SPI	\$35.15 USD
	NEO series	GPS - GLONASS - GALILEO	UART, USB, SPI, I2C	\$30.59 USD
	MAX series	GPS - GLONASS	UART, I2C	\$29.59 USD
	EVA series	GPS - GLONASS - GALILEO	UART, USB, SPI	\$19.76 USD
	SAM-M8Q series	GPS - GLONASS - GALILEO	UART, I2C, RTCM	\$16.74 USD
	ZOE-M8G series	GPS - GLONASS - GALILEO	UART, SPI, I2C, SQI	\$16.63 USD
Linx	GM	GPS - GLONASS - GALILEO	UART	más de 100 unidades
	TM	GPS - GLONASS - GALILEO	UART	más de 100 unidades
	FM	GPS	UART	\$26.41 USD
	F4	GPS	UART	\$24.5 USD
	R4	GPS	UART	\$22.32 USD
G.top	RM	GPS	UART	\$20.38 USD
	Firefly X1	GPS - GLONASS	UART, I2C, RTCM	\$64.85 EUR
	Ladybird 1	GPS	UART, RTCM	\$14.55 EUR
	Ladybird 3	GPS	UART	\$11.36 EUR
	Firefly 1	GPS - GLONASS	UART, RTCM	\$11.18 EUR

En la Tabla 3.2 se hace una comparación sobre los diferentes módulos de la tecnología U-blox, de lo más destacable son los módulos ZOE y EVA por sus reducidas dimensiones, el módulo MAX que permite diferentes rendimientos y costo. Sin embargo, por el costo mínimo del sistema y reducidas dimensiones el módulo EVA cumple con los requisitos de las redes de sensores inalámbricos [7], [10].

Tabla 3.2: Comparación módulos U-blox [7], [10].

Módulo	Características distintivas	Encapsulado	Tamaño (mm)
ZOE	El módulo multi GNSS más pequeño de la industria	LGA	4.5 x 4.5
EVA	Costo mínimo del sistema; factor de forma en miniatura	LGA	7.0 x 7.0
MAX	Variantes para requisitos de rendimiento, costo e integración de antenas	LCC	9.7 x 10.1
NEO	Conectividad HW versátil para una integración más facil	LCC	12.2 x 16.0
LEA	Para la migración desde diseños de LEA existentes	LCC	17.0 x 22.4
CAM	Módulo GNSS concurrente con antena de chip integrada	LCC	9.6 x 14.0
SAM	Módulo GNSS simultáneo con antena de parche integrada	LGA	15.5 x 15.5

En la Tabla 3.3 se hace la comparativa entre el modelo EVA-M8M y EVA-M8Q, se puede observar la diferencia del oscilador, un oscilador basado en TCXO esta optimizado para el rendimiento, permite acelera la adquisición de señales débiles, con la finalidad de tiempos de inicio y readquisición más rápidos, es ideal para aplicaciones con antenas muy pequeñas o en condiciones difíciles, como aplicaciones de seguimiento, a diferencia de TCXO los osciladores basados en cristal están optimizados para aplicaciones sensibles a los costos, es una solución ideal para lograr los menores costos del sistema, tomando en cuenta las características de las WSN de bajo consumo, bajo costo y reducidas dimensiones, se escogió el módulo EVA-M8M [7], [11].

Tabla 3.3: Comparación modelo EVA-M8 [7], [11].

Modelo	EVA-M8M	EVA-M8Q
GNSS	GPS - GLONASS - GALILEO - BeiDou	GPS - GLONASS - GALILEO - BeiDou
Número de GNSS concurrentes	3	3
Fuente	1.65v - 3.6v	2.7v - 3.6v
Interfaces	UART, USB, SPI	UART, USB, SPI
Características	Cristal	TCXO
Cold Start	30s	29s
Hot Start	1s	1s
Sensibilidad (dBm)	-164	-167

### 3.0.4.1. Módulo GNSS EVA-M8M de U-blox

A continuación se describen las características y especificaciones de hardware de los módulos GNSS de la serie U-blox EVA-M8M, la información fue obtenida de la hoja de datos del móduloa EVA-M8 de U-blox [11]. Los módulos de la serie EVA cuentan con el factor de forma más pequeño de la industria. Los módulos de la serie EVA-M8M combinan un excelente rendimiento GNSS con opciones de comunicación serial, poder y diseños altamente flexibles.

Los módulos GNSS de la serie EVA-8M / EVA-M8 proporcionan cuatro pines de suministro: VCC, VCC\_IO, V\_BCKP y VDD\_USB. Se pueden suministrar de forma independiente o vinculados para adaptar diversos conceptos, según la aplicación prevista. Los diferentes voltajes de suministro se explican en las siguientes subsecciones. La Figura 3.2 muestra un ejemplo para suministrar los módulos de la serie EVA-8M / EVA-M8 cuando no se utiliza la interfaz USB. En este caso, el pin VDD\_USB está conectado a tierra.

#### Fuente de alimentación principal (VCC)

Durante la operación, los módulos GNSS de la serie EVA-8M / EVA-M8 se suministran a través del pin VCC. Hace uso de un convertidor CC / CC interno para una mejor eficiencia energética. En un paso siguiente, los LDO incorporados generan voltajes estabilizados para los dominios Core y RF del chip, respectivamente. La corriente en VCC depende en gran medida del estado actual del sistema y, en general, es muy dinámica.

#### Voltaje de suministro de E / S (VCC\_IO)

Las E / S digitales de los módulos GNSS de la serie EVA-8M / EVA-M8 se pueden suministrar con un voltaje separado del sistema host conectado al pin VCC\_IO del módulo. La amplia gama de VCC\_IO permite una interfaz perfecta con los niveles de tensión lógica

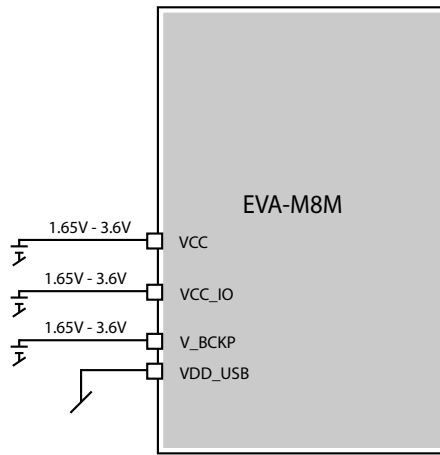


Figura 3.2: Suministros del módulo EVA-M8M.

estándar. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones, VCC\_IO y VCC comparten el mismo nivel de voltaje y están unidas. VCC\_IO también suministra el RTC y la RAM de respaldo durante el funcionamiento normal.

### Fuente de alimentación de respaldo (V\_BCKP)

En el caso de un corte de energía en VCC\_IO, V\_BCKP proporciona el dominio de respaldo.

### Fuente de alimentación de interfaz USB

Si no se utiliza la interfaz USB, el pin VDD\_USB debe estar conectado a GND.

### Interfaces

Los módulos GNSS de la serie EVA-M8M proporcionan interfaces UART, SPI y DDC (compatibles con I2C) para la comunicación con una CPU host, también hay una interfaz USB disponible en los pines dedicados. Además, hay disponible una interfaz SQI para conectar los módulos GNSS de la serie EVA-M8M con una memoria flash externa opcional. Los pines UART, SPI y DDC son suministrados por VCC\_IO y operan a este nivel de voltaje.

Cuatro pines dedicados pueden configurarse como 1 x UART y 1 x DDC o una única interfaz SPI seleccionable por el pin D\_SEL. La Tabla 3.4 proporciona los detalles del mapeo del puerto.

Tabla 3.4: Configuración de interfaz

Pin 32(D_SEL) = "High"	Pin 32(D_SEL) = "Low"
UART TXD	SPI MISO
UART RXD	SPI MOSI
DDC SCL	SPI CLK
DDC SDA	SPI CS-N

- No es posible usar la interfaz SPI simultáneamente con la interfaz DDC o UART.

- **Para fines de depuración, se recomienda tener una segunda interfaz, USB disponible que es independiente de la aplicación y accesible a través de puntos de prueba.**

## Cristal

La forma más sencilla de proporcionar información de tiempo al receptor es conectar un cristal RTC a los pines correspondientes del oscilador RTC, RTC\_I y RTC\_O como se muestra en la Figura 3.3. No es necesario agregar condensadores de carga al cristal para la sintonización de frecuencia, porque ya están integrados en el chip. El uso de un cristal RTC proporcionará el consumo de corriente más bajo para V\_BCKP en caso de una falla de energía.

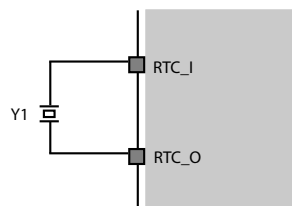


Figura 3.3: RTC

## Sistema de enlace

La entrada de RF del módulo GNSS de la serie EVA-M8M ya está adaptada a 50 ohm y tiene un bloque interno de CC. Para alcanzar los valores de rendimiento, una antena activa con un buen LNA en el interior o el LNA obligatorio con antena pasiva delante de EVA-M8M (debe tener una cifra de ruido por debajo de 1dB). EVA-M8Q con la antena pasiva solo se recomienda un LNA externo.

Los módulos GNSS de la serie EVA-M8M pueden recibir y rastrear múltiples sistemas GNSS (por ejemplo, señales GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou y QZSS). Debido a la arquitectura de front-end RF de doble frecuencia, dos señales GNSS (GPS L1C / A, GLONASS L1OF, Galileo E1B / C y BeiDou B1) se pueden recibir y procesar al mismo tiempo. Esta operación concurrente se extiende a 3 GNSS cuando se usan GPS y Galileo además de GLONASS o Beidou.

El EVA-M8M puede recibir señales de GPS L1C / A y GLONASS L1OF. Sin embargo, debido a las diferentes frecuencias centrales, el receptor debe cambiarse al modo GPS o GLONASS utilizando un mensaje UBX.

- **La recepción simultánea de GPS y GLONASS no es posible con EVA-M8M.**

## Antena pasiva

Si se conecta una antena pasiva a un módulo GNSS de la serie EVA-M8M, es obligatorio utilizar un LNA adicional delante del módulo para alcanzar los valores de rendimiento. Un LNA (U1) solo haría los módulos más sensibles a los bloqueadores fuera de banda, por lo que se debe conectar un filtro adicional SAW GNSS (F1) entre el LNA externo (U1) y el módulo GNSS de la serie EVA-M8M Entrada de RF.

El LNA (U1) se puede seleccionar para ofrecer el rendimiento requerido por la aplicación en términos de:

- Figura de ruido (sensibilidad)
- Selectividad y linealidad (Robustez contra atascos)
- Robustez contra potencia de RF y ESD
- El LNA externo (U1) debe colocarse cerca de la antena pasiva para obtener el mejor rendimiento.

### Circuito de costo optimizado

- Antena pasiva
- Sin cristal RTC
- Sin batería de respaldo
- UART y DDC para la comunicación al host

En la Figura 3.4 se muestra el circuito de costo optimizado para el módulo GPS.

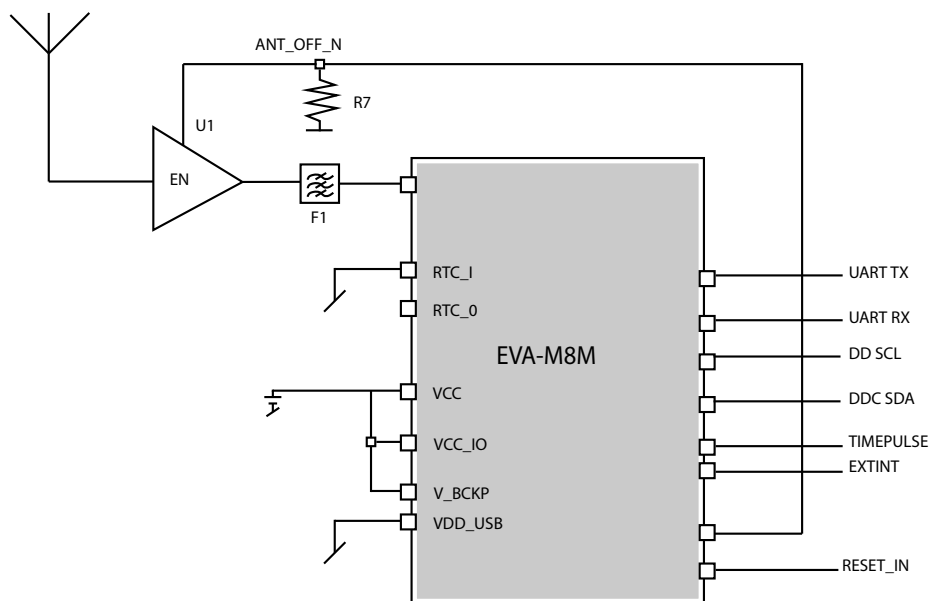


Figura 3.4: Circuito de costo optimizado

### Inmunidad a interferencia mejorada con antena pasiva

En la Figura 3.5 se muestra el circuito que permite disminuir la interferencia con antena pasiva para el módulo GPS.

- Filtro SAW externo - LNA - filtro SAW
- Cristal RTC
- Batería de respaldo
- UART y DDC para la comunicación al host

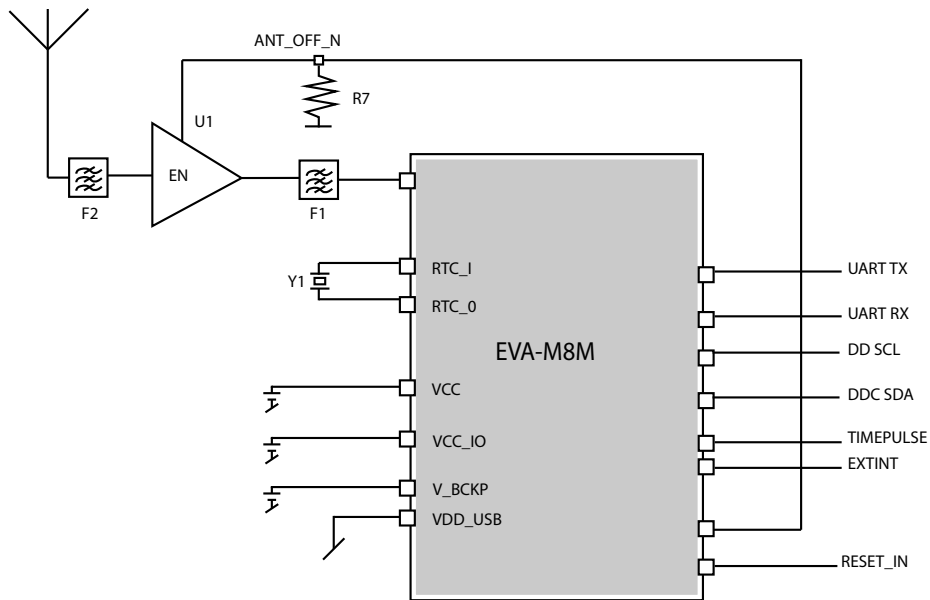


Figura 3.5: Inmunidad a interferencia mejorada con antena pasiva

### Antena activa

En caso de que se use una antena activa, solo se debe agregar el circuito activo de suministro de antena delante de la entrada de RF de los módulos, se observa el circuito en la Figura 3.6.

### Circuito usando antena activa

- Antena activa
- Cristal RTC
- Batería de respaldo
- UART y DDC para la comunicación al host

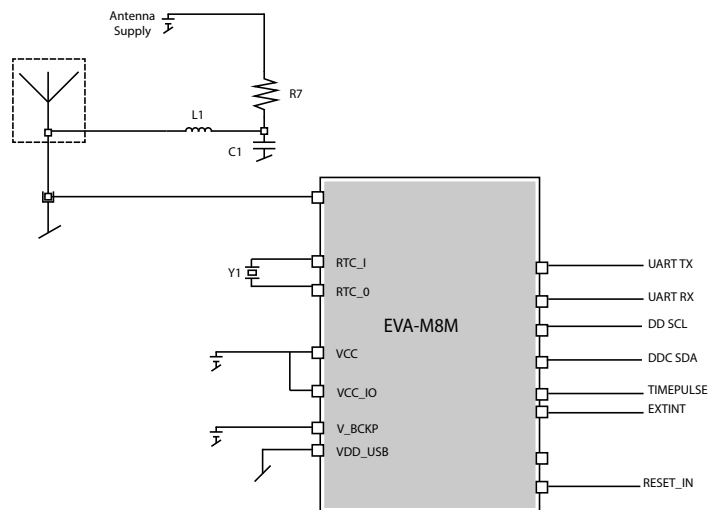


Figura 3.6: Circuito usando antena activa

# Capítulo 4

## Redes de sensores inalámbricos

En este capítulo se describen las características necesarias de las redes de sensores inalámbricos, sus elementos, las topologías que soporta y sus áreas de aplicación, junto con el estado del arte de los nodos comerciales que existen en la actualidad y protocolos de enrutamientos.

Las redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN) son un campo de estudio actualmente en auge, que evoluciona rápidamente debido al gran interés suscitado. Son un concepto relativamente nuevo dentro de la adquisición y tratamiento de datos, relacionado con el paradigma de los agentes inteligentes en busca del “entorno inteligente”. Si observamos la tendencia seguida por las tecnologías de la información y de las comunicaciones, podremos constatar una constante evolución hacia dispositivos embebidos, cada vez más pequeños y de menor consumo, dotados con mayor potencia de proceso, capacidad de almacenamiento y facilidad para las comunicaciones [68].

WSN es una red inalámbrica de pequeña o gran escala, permite ser organizada, multi configurada y con una gran cantidad de nodos de recursos limitados, la comunicación se realiza de modo multisalto por medio de canales estrechos de comunicación, tiene un bajo costo de diseño y es una tecnología relativamente nueva. La funcionalidad de la red, es decir, las rutas y protocolos de comunicación se implementan en software y se ejecuta generalmente en microcontroladores de gama baja [69, 70].

### 4.1. Características de las WSN

Los nodos de sensores se pueden implementar de forma ad-hoc o de forma planificada. Una implementación ad-hoc es útil para regiones grandes descubiertas donde una red de un número muy grande de nodos se puede implementar y dejar sin supervisión para realizar funciones de supervisión y generación de informes. El mantenimiento de la red, como la administración de la conectividad y la detección de fallas, es difícil en una WSN así debido a la gran cantidad de nodos. Por otro lado, la implementación planificada de antemano es buena para una cobertura limitada en la que se implementan menos nodos en ubicaciones específicas con la ventaja de un menor costo de mantenimiento y administración de la red [71].

Las limitaciones de hardware, el consumo de energía, el costo unitario del nodo, el entorno y los estándares son algunas de las limitaciones de las redes de sensores inalámbricos [72].

- **Costos unitarios del nodo**, la red de sensores consiste en muchos nodos, siendo el costo del nodo individual un crítico para la métrica financiera general de la red del sensor.

- **El consumo de energía**, la duración de la batería es el factor vital del que depende la vida útil del nodo. La detección de eventos, el procesamiento local de datos y la transmisión de datos en bruto y procesados son funciones de un nodo. Por lo tanto, el consumo de energía se puede asignar en tres dominios funcionales como detección, procesamiento de datos y comunicación. Como la red de sensores multihop desempeña un doble rol de recopilación y procesamiento de datos, el enrutamiento o la retransmisión requieren más potencia.
- **Ambiente**, las redes de sensores generalmente operan de manera desatendida en ubicaciones geográficas o remotas. El entorno en el que se implementan los nodos genera desafíos en los mecanismos de gestión. Tales entornos pueden ser ampliamente disperso o hostiles.
- **Tolerancia a fallos**, debido a los entornos de implementación hostiles, los nodos son propensos a fallas. Entonces deben ser tolerantes a fallas.
- **Seguridad**, como los nodos tienen propiedades de almacenamiento y computacional, la red debe contar con algunos mecanismos de seguridad efectivos para evitar el acceso no autorizado o los ataques maliciosos.
- **Auto configurabilidad**, después del despliegue en la red, los nodos deben tener la capacidad de configurarse de forma autónoma y de reconfigurarse según los cambios de topología.

## 4.2. Elementos

El nombre dado a este tipo de dispositivos cumple con la finalidad de indicar en una sola palabra dos de los conceptos principales: su pequeño tamaño y la idea de que pueden estar distribuidos en cualquier lugar, esto es posible gracias a que son dispositivos autónomos que funcionan con baterías muy similares a las de los teléfonos celulares y que permiten ser cargadas por paneles solares en el momento que así se requiera, además del hecho de que sus comunicaciones se basan en protocolos de bajo consumo como es el caso de ZigBee gracias al cual pueden pasar de un estado de inactividad a realizar una transmisión y luego regresar a su estado inicial evitando el desgaste de energía [73].

Los nodos tienen la capacidad de comunicarse entre sí gracias a la creación de redes mesh usando el protocolo ZigBee y retransmitir la información hasta un punto destinado al control donde incluso se pueden tomar decisiones. Estos nodos se organizan en ciertos intervalos de tiempo y determinar cuáles rutas están disponibles para la comunicación.

Estos dispositivos que llamamos nodos pueden ser fijos o móviles y constan de los siguientes 4 elementos como se puede ver en la Figura 4.1 [74].

- **Fuente de energía**, es la encargada de alimentar al nodo.
- **Sensores**, es el encargado de obtener la información del medio que lo rodea y es específico dependiendo de la problemática a solucionar.
- **Sistema embebido**, se encarga de procesar y comprimir la información obtenida por el sensor, además de crear el encaminamiento para enviar la información a la estación base.
- **Sistema de comunicación**, su funcionamiento es la de enviar y recibir información.



Figura 4.1: Nodo.

### 4.3. Tipos de nodos comerciales

Existen diferentes tipos de nodos comercialmente, resaltando en su mayoría el uso del protocolo 802.15.4, microcontroladores de 8 a 16 bits, con memorias RAM de 4K a 10K y memorias Flash de hasta 256K y dependiendo su aplicación el uso diverso de sensores que se pueden apreciar en la Tablas 4.1 [12–16].

Tabla 4.1: Comparación de nodos comerciales [12–16].

Parámetros	IRIS [75]	Mica2 [76] /MicaZ [77]	Waspnotes [78]	Shimmer [79]	EZ430-RF2480 [80]	Telos B [81]
Microcontrolador	Atmel Atmega 1281	Atmel Atmega 128L	Atmel Atmega 1281	TI MSP430F1611	TI MSP430F2274	TI MSP430F1611
Bits	8	8	8	16	16	16
Memoria	8K Ram - 640K Flash	4K Ram - 128K Flash	8K Ram - 128K Flash	10K Ram - 256K Flash	8K Ram - 128K Flash	10K Ram - 48K Flash
I / O sensores	Luz	Temperatura, humedad y luz	Acelerómetro y temperatura	Acelerómetro	Temperatura, humedad y luz	Temperatura, humedad y luz
Radio Chip	ATMEL RF230	C CC1000/C CC2420	Xbee-802.15.4	C CC2420	C CC2480	C CC2420
Protocolo	802.15.4	802.15.4	802.15.4	802.15.1	802.15.4	802.15.4

Cada nodo sensor utiliza un módulo de radio. En la tabla 4.2 se puede apreciar que la frecuencia más usada es de 2,400 - 2,483.5 MHz, con una modulación OQPSK, a velocidades de 250 kbps y con una sensibilidad muy cercana. Sin embargo, la potencia de transmisión es muy variante respecto a cada módulo de radio [17–21].

Tabla 4.2: Comparación módulos de radio [17–21]

Módulo de radio	Frecuencia ( MHz )	Modulación	Velocidad de datos	Tx Power ( dBm )	Rx Sensitivity ( dBm )
CC 1000 [82]	300 - 1000	FSK	76.8 kBaud	- 20	- 110
CC 2420 [17]	2400 - 2483.5	OQPSK	250 kbps	- 24	- 95
CC 2480 [19]	2400 - 2483.5	GFSK, MSK, OOK	500 kBaud	- 30	- 108
CC 2500 [18]	2400 - 2483.5	OQPSK	250 kbps	- 55.8	- 92
ATMEL RF230 [20]	2400 - 2483.5	OQPSK	250 kbps	- 17	- 101
Xbee-802.15.4 [21]	2400 - 2483.5	OQPSK	250 kbps	- 40	- 100

En la Tabla 4.3 se realizó una comparación de los microcontroladores utilizados por los nodos comerciales y se propone el PIC24FJ256GA406, con características similares como las interfaces, la cantidad de bits y memoria de programa. TI MSP430F1611 tiene la mayor cantidad de memoria RAM de los microcontroladores de nodos comerciales de 10 kb, sin embargo, el pic propuesto tiene 16 kb y una frecuencia de reloj de 32MHz facilitando que el procesador acceda a mayor información de manera más eficaz y rápida y nos permita reducir el retardo por procesamiento en la red.

Tabla 4.3: Comparación de microcontroladores de los nodos comerciales [22–26].

Parámetros	Atmega 128L [22]	Atmega 1281 [23]	MSP430F1611 [24]	MSP430F2274 [25]	PIC24FJ256GA406 [26]
Bits	8	8	16	16	16
Memoria Flash	128K	128K	48K	32K	256K
Memoria Ram	4K	8K	10K	1K	16K
Core	AVR	AVR	MSP430	MSP430	PIC24
Frecuencia del reloj	8 MHz	16 MHz	8 MHz	16 MHz	32 MHz
Interfaces	I2C, SPI, USART	SPI, USART	I2C, SPI, USART	USCI, SPI	I2C, SPI, USART

## 4.4. Topologías

Una de las principales características de las redes de sensores es que se interconectan por medio de enlaces inalámbricos multi-salto, de corta distancia y de baja potencia de transmisión, para enviar información a estaciones recolectoras o de monitoreo. Se definen 3 tipos de topologías de red, según los requisitos de red de las aplicaciones: la topología estrella (STAR), la topología árbol (cluster tree) y la topología malla (MESH).

- Topología de estrella** es un sistema que está compuesto por estación base y nodos finales, donde cada nodo final de la red se encuentra comunicado con la estación base normalmente a una distancia de 30 a 100 metros, la transferencia de información se da a través de un solo salto. Los nodos finales no tienen comunicación entre ellos, en caso de que sea necesario se comunicaran con la estación base y ella lo enviara al nodo final necesario. La estación base también es usada para transferir información al exterior y permitir monitorear la red. Una de las problemáticas de la topología de estrella es la limitación de cobertura que es dada por la distancia de transmisión de la estación base, tampoco cuenta con caminos alternos para la transferencia de información, en caso de que uno de los nodos no tenga forma de comunicarse, lo que lleva a pérdida de información [55]. Se puede apreciar en la Figura 4.2.

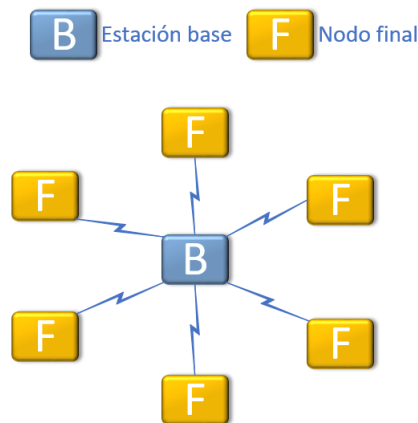


Figura 4.2: Topología estrella.

- Topología de árbol** en la topología árbol existen 3 tipos de nodos, estación base, enrutadores y nodo final. La estación base que coordina la red se comunica solo con los enrutadores, que a su vez se comunican de forma directa con los nodos finales. Como en la topología de estrella, los nodos finales no pueden comunicarse entre sí, de ser necesario se comunicarían con su enrutador y este con otro enrutador o directo con la estación base para generar la ruta al nodo final necesario. A diferencia de la topología de estrella, la topología árbol permite obtener un rango más amplio de distancia, sin embargo, tampoco cuenta con caminos alternos para la transferencia

de información, permitiendo suscitarse pérdida de información, se puede apreciar en la Figura 4.3.

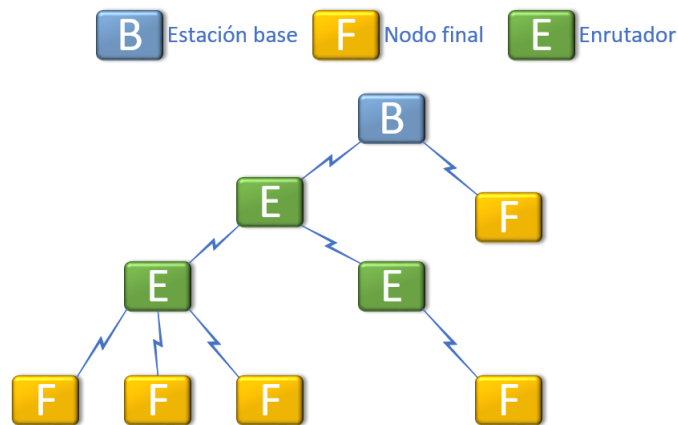


Figura 4.3: Topología árbol.

- **Topología de malla** en la topología de malla todos los nodos son enrutadores e idénticos. Cada nodo es capaz de enviar y recibir información de otro nodo y de la estación base. Es altamente tolerante a fallos, debido a que cuenta con caminos alternos para la transferencia de información en caso de que uno de los nodos no tenga forma de comunicarse. Además, por contar con protocolos de enrutamiento permite nodos móviles y estáticos logrando redes dinámicas [83]. Se puede apreciar en la Figura 4.4.

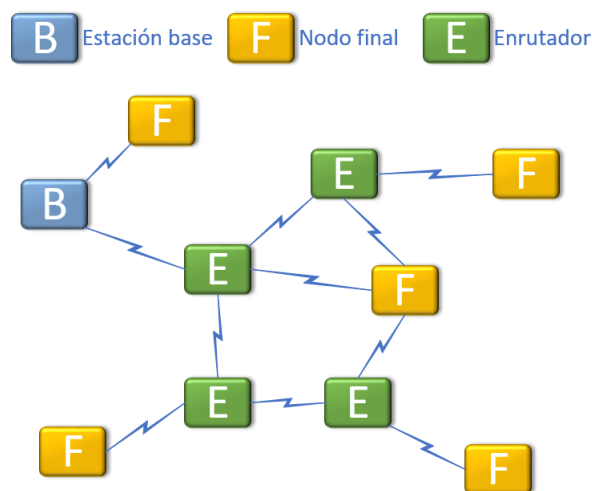


Figura 4.4: Topología malla.

## 4.5. Áreas de aplicaciones

Las redes de sensores pueden constar de muchos tipos diferentes de sensores, tales como sísmicos, de baja frecuencia, de muestreo magnética, térmica, visual, infrarroja, acústico y radar, son capaces de controlar una amplia variedad de condiciones ambientales. Algunas de estas condiciones son:

- Temperatura.
- Humedad.
- Movimiento vehicular.
- Niveles de ruido.
- Presencia o ausencia de ciertos tipos de objetos.
- Niveles de estrés mecánico en objetos adjuntos.
- Características actuales, como velocidad, dirección y tamaño de un objeto.

Los nodos de sensado se pueden utilizar para detección continua, detección de eventos, identificación de eventos, detección de ubicación y control local de actuadores. El concepto de micro detección y conexión inalámbrica de estos nodos promete muchas áreas de aplicación. Categorizamos las aplicaciones en áreas militares, medioambientales, de salud, domésticas y comerciales. Es posible ampliar esta clasificación con más categorías como la exploración espacial, el procesamiento químico y el alivio de desastres [84].

#### 4.5.1. Medio ambiente

Las WSN son ampliamente utilizadas para el monitoreo de hábitats y ecosistemas [85,86], monitoreo sísmico [87], monitoreo de volcanes [88], monitoreo en el área de agricultura y monitoreo de la estructura de salud civil [89]. Tales aplicaciones incluyen nodos de sensado estacionarios o móviles que pueden moverse en el área prevista para alcanzar ciertos objetivos de las redes.

El sistema puede implementarse en áreas remotas o áreas de interés donde los datos ambientales son necesarios. Se podría acceder a la información en una ubicación remota o estación base utilizando un transreceptor inalámbrico. Debido a la baja potencia, la configuración fácil y el bajo presupuesto, el módulo Wi-Fi es ampliamente utilizado para aplicaciones de monitoreo. Un nodo receptor o estación base es un coordinador central del sistema que recopila información de los nodos del sensor y la envía al usuario final. El usuario final puede acceder a los datos del sensor de forma remota a través de la tecnología basada en web [90].

##### 4.5.1.1. Sensado Climático

###### Clasificación de las estaciones meteorológicas

Dependiendo su cobertura geografica se pueden clasificar como [91]:

- Microescala: menor a 100 m: por ejemplo aplicación en agrometeorología
- Escala Local entre 100 m y 3 km: contaminación atmosférica, tornados, etc.
- Meso escala: 3 a 100 Km: tormentas, brisa de mar y tierra, etc.
- Escala Sinóptica: 100 a 3000 km: frentes, ciclones.
- Escala planetaria: mayor a 3000 km: ondas largas en altura.

Las Estaciones Meteorológicas pueden medir precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación, radiación, presión, dirección y velocidad del viento, entre otros [91].

En la Figura 4.5 se muestra las variables de medición que permite un nodo.

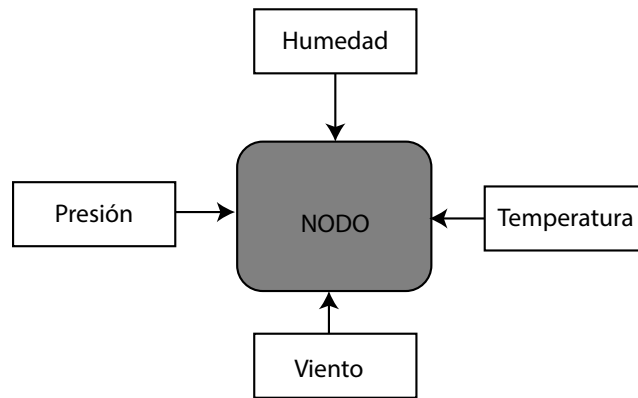


Figura 4.5: Variables de medición

### TEMPERATURA (termometría)

En la escala Celsius de temperatura, el cero de la escala corresponde a la temperatura del punto de congelamiento del agua, y el 100 a su temperatura de ebullición, ambos a nivel del mar. Las mediciones se realizan en un ambiente con buena ventilación, pero protegido de la radiación solar, para lo cual se utiliza el típico cobertizo meteorológico de madera que caracteriza las estaciones meteorológicas convencionales. En las estaciones automáticas se utilizan cobertizos de menor tamaño.

En la temperatura, se utiliza la unidad de medida en grado centígrado ( $^{\circ}\text{C}$ ) que corresponde a las lecturas directas efectuadas en los termómetros.

### HUMEDAD ATMOSFÉRICA (higrometría)

Existen diversas formas para medir el contenido de vapor de agua de la atmósfera. La medición más frecuente es la de humedad relativa, que corresponde a la fracción porcentual entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor de agua en el punto de saturación a la temperatura ambiente.

### BRILLO SOLAR

El instrumento que registra el periodo en que el sol alumbra se denomina heliofanógrafo. Este consiste en una esfera de vidrio que actúa como una lente concentradora de la luz solar sobre una banda de papel. Mientras que la radiación solar no es interceptada por las nubes la banda, que tiene una escala graduada en horas, se va quemando a lo largo de una línea. Posteriormente, y en forma manual, se evalúa el periodo diario con insolación. Con el uso de estaciones automáticas que permiten registrar en forma continua la radiación solar, este equipo ha caído en desuso. En las estaciones modernas, el registro de todas las variables se realiza en forma automática, y los sensores están integrados en circuitos electrónicos. La información se guarda en un medio magnético para su posterior procesamiento computacional.

La presentación de la Humedad Relativa y el Brillo Solar o Insolación se da en porcentaje (%).

### VIENTO (anemometría)

En las mediciones del viento se especifica su intensidad o fuerza (unidad = m/s) y su dirección. Esta se expresa según un código alfabético que indica la dirección geográfica

desde donde sopla el viento (N: Norte; E: Este; S: Sur; W: Oeste, y las direcciones intermedias, como NE o SSW). También se utiliza un código numérico que indica el ángulo desde donde sopla el viento, con respecto al Norte, de acuerdo con la siguiente convención:  $0^\circ$  = norte;  $90^\circ$  = este;  $180^\circ$  = sur;  $270^\circ$  = oeste).

En las estaciones meteorológicas el viento se mide a 10 m sobre la superficie y los sensores deben instalarse en un lugar bien expuesto. Se recomienda que si hay obstáculos que alteren la velocidad y dirección del viento, la distancia al punto de medición sea por lo menos unas 20 veces la altura del obstáculo.

Existe el grupo Global Observing System, GOS. Este grupo se conforma de subgrupos [92]:

- **Medidas en superficie:** está compuesta por aproximadamente 4000 estaciones de superficie que representan la base de redes de estaciones sinópticas
- **Observaciones de altura.** Son aproximadamente 1300 estaciones de radio sondeo o globo sonda distribuidas en todo el globo. Realizan mediciones de presión, temperatura, viento y humedad desde superficie hasta aproximadamente 30 km de altura. Aproximadamente dos tercios de estas estaciones realizan observaciones a las 00 UTC y 12 UTC, mientras que el resto realiza una observación por día (generalmente a las 12 UTC en Sudamérica). Las observaciones en los océanos se realizan abordo de barcos.
- **Observaciones Marinas.** Sobre los océanos las observaciones provienen de barcos, boyas fijas y boyas a la deriva. Las observaciones provenientes de barcos, además de las variables que se reportan en las estaciones de superficie, transmiten la temperatura de agua de mar, altura y período de las olas. Cerca de 1000 barcos reportan observaciones diariamente. En cuanto a boyas a la deriva, existen aproximadamente 1200, que reportan además presión a nivel del mar.
- **Observaciones provenientes de aviones.** Cerca de 3000 aviones reportan presión, temperatura y viento durante el vuelo. Este tipo de información es muy importante en regiones donde existen muy pocas estaciones de radio sondeo.
- **Observaciones satelitales.** La red de observación satelital incluye los satélites de órbita polar y geoestacionarios, normalmente esta equipados con sensores visibles e infrarrojo

#### 4.5.2. Industriales y vehículos

La calidad del aire, especialmente en la tendencia de ciudades más industrializadas y con una población de automóviles en rápido crecimiento, es degradante. El monitoreo continuo puede tomar medidas para reducir la contaminación y los compuestos tóxicos en el aire y evitar una mayor degradación de su calidad. En centrales hidroeléctricas y para refrigerar reactores nucleares, el agua es una de las sustancias más comunes que debemos administrar. En aplicaciones de gestión de inundaciones, represas hidroeléctricas, infraestructura de agua de la ciudad y otras aplicaciones de monitoreo ambiental, la gran distancia entre los puntos de medición determina que los ingenieros y científicos utilicen sistemas autónomos de adquisición de datos inalámbricos de baja potencia que sean independientes de un suministro de energía permanente, son problemáticas donde las WSN se han aplicado satisfactoriamente [93].

Las WSN en el área de vehículos permiten monitorear en tiempo real la densidad del tráfico, la congestión vial, el transporte público y la disponibilidad de estacionamiento para realizar la visión de una ciudad más inteligente, el monitoreo puede realizarse por medio de nodos fijos, sin embargo, las líneas de investigación han propuesto el uso de automóviles estacionados como una alternativa a costosas implementaciones de unidades. Esto permite aplicaciones para mejorar el flujo vehicular como en los sistemas EVP [94].

La función principal de los sistemas de prevención vehicular de emergencia (Emergency Vehicle Preemption, EVP) es volver a priorizar las intersecciones de tráfico señalizado. El proceso de cambio de prioridades permite que los vehículos de emergencia (VE) (por ejemplo, ambulancias, bomberos y policía) tengan el derecho de paso en las intersecciones de tránsito. Este procedimiento de prioridad de emergencia es imprescindible para proporcionar un viaje seguro y la llegada rápida de vehículos eléctricos a sus destinos. En los Estados Unidos existen redes implementadas que han reducido las fallas en VE. Otra ventaja de los sistemas EVP es la reducción del tiempo de viaje a su destino. Esta vez tiene un impacto importante especialmente en el caso de rescatar condiciones médicas críticas y salvar vidas [95].

### 4.5.3. Domótica y salud

El aumento de las aplicaciones de Internet de las cosas (IoT), como las ciudades inteligentes y la domótica, ha llevado el concepto de IoT de la imaginación a la realidad a una escala masiva. Sin embargo, más áreas de aplicación de misión crítica como la energía, la seguridad y la atención de la salud no solo exigen conectividad de baja potencia, sino también un rendimiento altamente confiable y garantizado. Se ha resuelto estos requisitos en condiciones controladas, como entornos urbanos e interiores, sin embargo, para abordar los mismos obstáculos en un entorno más desafiante y dinámico es mucho más complicado.

En entornos donde la infraestructura es escasa, como zonas rurales o remotas, se están trabajando para dar soluciones ad-hoc especializadas, sin infraestructura, que proporcionan conectividad de salto múltiple de largo alcance a sensores y actuadores remotos [96].

El sistema de monitoreo de cuidado de la salud con sensor es la tecnología más exigente del sector de cuidado de la salud. Es una gran demanda monitorear individuos. Se vuelve necesario en la sociedad ya que el número de pacientes en clínicas y hospitales crece continuamente. Esta supervisión bajo demanda se ve facilitada por las redes de sensores inalámbricos (WSN). Esta monitorización se realiza tanto en el hogar del paciente como en el entorno hospitalario. Para un diagnóstico adecuado de los pacientes, es necesaria información confiable sobre la salud del paciente [97].

El Sistema de Automatización del Hogar (Home Automation System, HAS) es una extensión de las actividades actuales realizadas dentro del hogar y se puede desarrollar fácilmente hoy día, gracias a los poderosos dispositivos computacionales y la red de sensores inalámbricos (WSN). En el sistema domótico (HAS), se utilizan diferentes tecnologías como WiFi, Bluetooth y ZigBee para la comunicación, y diferentes dispositivos como teléfonos inteligentes, tabletas y computadoras portátiles para el control [98].

En [99] propone el diseño de un sistema que permite a los usuarios monitorear e interactuar remotamente con los nodos del sensor en el sistema usando su teléfono inteligente. El sistema propuesto se centra en cómo WSN puede proporcionar seguridad para un hogar inteligente (cerraduras de puertas electrónicas y sistemas de conteo de personas que controlan la activación / desactivación de luces) y acceso remoto a la WSN.

# Capítulo 5

## Enrutamientos

### 5.1. Características de enrutamiento

Uno de los aspectos más complejos y cruciales del diseño de redes es el encaminamiento, la función primordial de una red es aceptar paquetes procedentes de una estación emisora y enviarlos hacia una estación destino, para ello se debe determinar una ruta o camino a través de la red, siendo posible generalmente la existencia de más de uno. Los requisitos de esta función comprenden [100] :

- Exactitud
- Simplicidad
- Robustez
- Estabilidad
- Imparcialidad
- Optimización
- Eficiencia

Las primeras dos características se refiere a una toma de decisiones despreciar elementos innecesarios y fidelidad en la información. La robustez está relacionada con la habilidad de la red para enviar paquetes de alguna forma ante la aparición de fallos localizados y sobrecargas [100].

La robustez puede implicar cierta inestabilidad, las técnicas que reaccionan ante condiciones cambiantes presentan una tendencia no deseable a reaccionar demasiado lento ante determinados eventos o a experimentar oscilaciones inestables de un extremo a otro, también existe un compromiso entre imparcialidad y el hecho de que el enrutamiento trate de ser óptimo y finalmente, una técnica de encaminamiento implica cierto coste de procesamiento en cada nodo y, en ocasiones, también un costo en la transmisión, impidiéndose en ambos casos el funcionamiento eficiente de la red, este costo debe ser inferior a los beneficios obtenidos por el uso de una métrica razonable tal como la mejora de la robustez o imparcialidad [100].

Existen 5 elementos de técnicas de enrutamiento en redes.

- Criterios de funcionamiento

- Instante de decisión
- Lugar de decisión
- Fuente de información de la red
- Tiempo de actualización de la información de la red

### **5.1.1. Criterios de funcionamiento**

La elección de una ruta se fundamenta generalmente en algún criterio de funcionamiento, el más simple consiste en elegir el camino con menor número de saltos a través de la red, este es un criterio que se puede medir fácilmente y que debería minimizar el consumo de recursos de la red, una generalización del criterio de menor número de saltos lo constituye el encaminamiento de mínimo costo, en este caso se asocia un costo a cada enlace y, para la comunicación entre 2 estaciones conectadas, se elige aquella ruta a través de la red que implique el costo mínimo. Las decisiones de enrutamiento se realizan de acuerdo con algún criterio de funcionamiento.

- Dos cuestiones importantes de esta decisión son el instante temporal y el lugar en que se toma la decisión.

### **5.1.2. Instante de decisión**

El instante de decisión viene determinado por el hecho de que la decisión del enrutamiento se hace en base a un paquete o a un circuito virtual, cuando la operación interna de la red es mediante paquetes, la decisión de enrutamiento se toma de forma individual para cada paquete, en el caso de circuito virtual, la decisión sólo se realiza en el momento en que se establece un circuito virtual dado, de modo que, en el caso más sencillo, todos los paquetes siguientes que usan ese circuito virtual siguen la misma ruta. En redes más complejas, la red puede cambiar dinámicamente la ruta asignada a un circuito virtual particular en respuesta a condiciones cambiantes [100].

### **5.1.3. Lugar de decisión**

El término lugar de decisión hace referencia al nodo o nodos en la red responsables de la decisión del enrutamiento, el más común es el enrutamiento distribuido, en el que cada nodo de la red tiene la responsabilidad de seleccionar un enlace de salida sobre el que llevar a cabo el envío de los paquetes a medida que éstos se reciben, en el enrutamiento centralizado la decisión se toma por parte de algún nodo designado al respecto como puede ser una estación base, el peligro de esta última aproximación es que el fallo de la estación base puede bloquear el funcionamiento de la red; así, aunque la aproximación distribuida puede resultar más compleja es también más robusta.

### **5.1.4. Fuente de información de la red**

La mayor parte de las estrategias de enrutamiento requieren que las decisiones se tomen en base al conocimiento de la topología de la red, la carga y el costo de los enlaces, existen algunas estrategias como la de inundaciones y el enrutamiento aleatorio no hacen uso de ninguna información para la transmisión de los paquetes.

En los enrutamientos distribuidos, en el que la decisión de enrutamiento se toma en cada uno de los nodos, éstos hacen uso de información local como es el costo asociado a los

distintos enlaces de salida; también pueden utilizar información de los nodos adyacentes, tal como la congestión experimentada en cada nodo. Finalmente, existen algoritmos de uso común que permiten al nodo obtener información de todos los nodos de una potencial ruta de interés, en el caso del enrutamiento centralizado, la estación central hace uso generalmente de información procedente de todos los nodos.

### 5.1.5. Tiempo de actualización de la información de la red

El tiempo de actualización de la información es función de la fuente de información y de la estrategia de encaminamiento, es claro que si no se usa información no existe actualización. Si sólo se utiliza información local, la actualización es esencialmente continua, debido a que un nodo individual conoce siempre sus condiciones locales actuales. Para el resto de las categorías como nodos adyacentes y todos los nodos, el tiempo de actualización depende de la estrategia de enrutamiento, para una estrategia de enrutamiento estático la información no se actualiza nunca, mientras que para una técnica adaptable la actualización se lleva a cabo periódicamente a fin de posibilitar la adaptación de la decisión de encaminamiento a las condiciones cambiantes de la red.

Cabe mencionar, cuanto mayor sea la información disponible y más frecuentemente se actualice, más probable será que las decisiones de encaminamiento tomadas por la red sean buenas, eso sí, teniendo presente que la transmisión de esta información consumirá recursos de red.

### 5.1.6. Parámetros de medición del rendimiento (Métrica)

El rendimiento se mide sobre la base de algunos parámetros que se describen a continuación [101]:

#### 5.1.6.1. Retardo medio de extremo a extremo

El retardo promedio de extremo a extremo indica cuánto tiempo tardará un paquete en viajar desde el origen hasta el nodo de destino. Incluye retrasos debido al descubrimiento de rutas, la puesta en cola, el retraso de propagación y el tiempo de transferencia. Esta métrica es útil para comprender el retraso causado al descubrir la ruta desde el origen hasta el destino.

Retardo medio de extremo a extremo =  $e/P$

- $e = T_d - T_s$
- $T_d =$  Tiempo cuando el paquete recibido en el destino
- $T_s =$  tiempo cuando el paquete creado por la fuente
- $P =$  Paquetes Totales

#### 5.1.6.2. Rendimiento

Se define como la cantidad total de datos que un receptor recibe del remitente dividido por el tiempo que le toma al receptor obtener el último paquete. En realidad, es la medida de la rapidez con la que podemos enviar paquetes a través de la red.

## 5.2. Protocolos de enrutamiento

Los estudios sobre diversos aspectos de los Protocolos de enrutamiento han sido un área activa de investigación durante muchos años. Básicamente, los protocolos de enrutamiento se pueden clasificar de manera general en tres tipos como protocolos proactivos, protocolos reactivos y protocolos híbridos.

### 5.2.1. Enrutamiento proactivos

En los protocolos de enrutamiento proactivos, cada nodo mantiene continuamente rutas actualizadas a todos los demás nodos de la red, la información de enrutamiento se transmite periódicamente a través de la red para mantener la consistencia de la tabla de enrutamiento, por lo tanto, si ya existe una ruta antes de que llegue el tráfico, la transmisión se produce sin demora, de lo contrario, los paquetes de tráfico deben esperar en la cola hasta que el nodo reciba la información de enrutamiento correspondiente a su destino. Sin embargo, para una topología de red altamente dinámica, los esquemas proactivos requieren una cantidad significativa de recursos para mantener la información de enrutamiento actualizada y confiable. Algunos Protocolos de enrutamiento proactivo son DSDV, enrutamiento Bellman Ford y enrutamiento dijkstra [41–43, 101].

#### 5.2.1.1. Bellman Ford

El algoritmo de Bellman-Ford determina la ruta más corta desde un nodo origen hacia los demás nodos para ello es requerido como entrada un grafo cuyas aristas posean pesos. La diferencia de este algoritmo con los demás es que los pesos pueden tener valores negativos ya que Bellman-Ford me permite detectar la existencia de un ciclo negativo [43, 100].

**Primer paso:** el algoritmo Bellman-Ford genera un broadcast para conocer la cantidad de nodos, pesos y topología de la red como se muestra en la Figura 5.1.

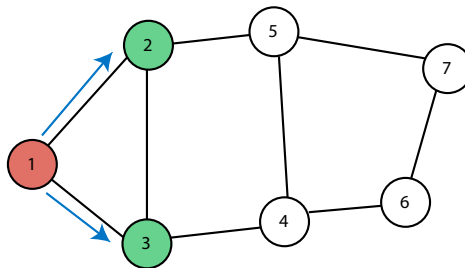


Figura 5.1: Broadcast del algoritmo Bellman-Ford

**Segundo paso:** se obtiene el peso entre el nodo 1 y 2, el nodo 2 reenvía el paquete discriminando al nodo que lo envió como se muestra en la Figura 5.2

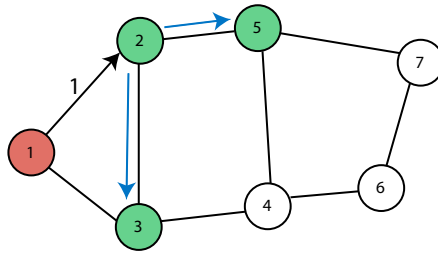


Figura 5.2: Seguimiento del Bellman-Ford

**Tercer paso:** sucesivamente se repite el mismo procedimiento hasta conocer la red completa como en las Figuras 5.3, 5.4 y 5.5.

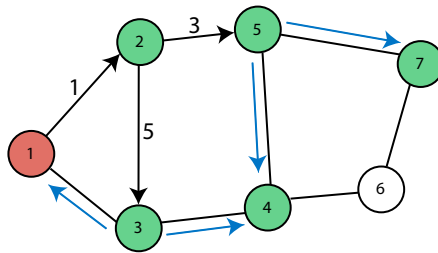


Figura 5.3: Seguimiento del Bellman-Ford

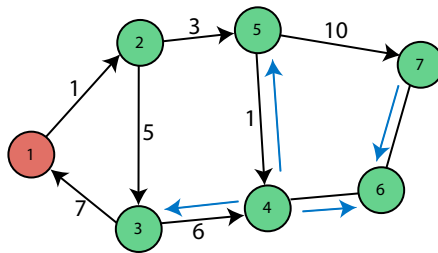


Figura 5.4: Seguimiento del Bellman-Ford

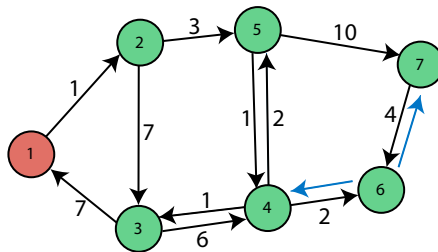


Figura 5.5: Seguimiento del Bellman-Ford

Una vez terminado el reconocimiento de la red, se puede apreciar en la Figura 5.6 que existen nodos donde los enlaces no son unidireccionales.

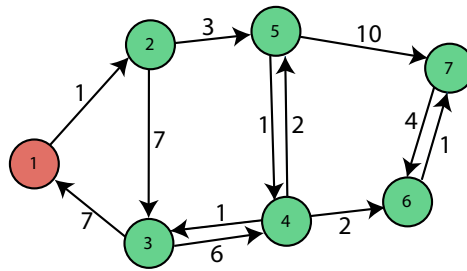


Figura 5.6: Descubrimiento de la red

En la Figura 5.7 se observa el uso del algoritmo donde genera la ruta con menor costo desde el nodo origen 1 al nodo destino 7.

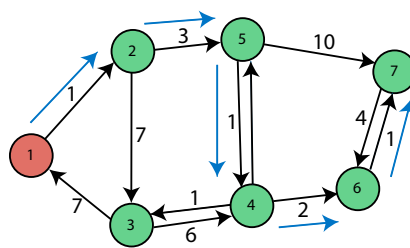


Figura 5.7: Algoritmo Bellman-Ford

### 5.2.1.2. DSDV

DSDV se basa en el algoritmo Bellman Ford y desarrollado por Charles E. Perkins y Pravin Bhagwat en 1994. En DSDV, los paquetes se transmiten entre nodos móviles utilizando tablas de enrutamiento que se almacenan en un nodo móvil. Cada tabla de enrutamiento, en cada uno de los nodos móviles, contiene una lista de todos los destinos disponibles y el número de saltos para cada uno. Cada entrada de la tabla de ruta está etiquetada con un número de secuencia (SN) que se origina en el nodo de destino como se muestra en la Tabla 5.1 [43, 101, 102].

Tabla 5.1: Tabla de DSDV

Destino	Siguiente Salto	Numero de Saltos	SN
1	1	0	A01
2	2	1	B02
3	3	1	C03
4	3	2	D04
5	2	2	E05
6	3	3	F06
7	2	3	G07

Para lograr la consistencia en la red basada en topología que cambia dinámicamente, cada nodo móvil transmite actualizaciones periódicamente y se actualizan las tablas de enrutamiento. La información de enrutamiento se anuncia mediante un broadcast de los paquetes que se transmiten de forma periódica e incremental a medida que se detectan cambios topológicos como se muestra en la Figura 5.8.

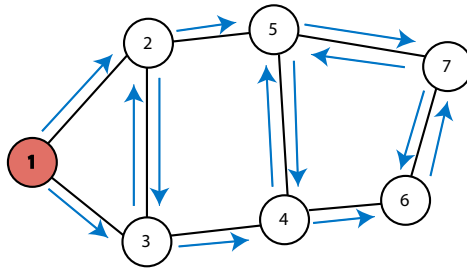


Figura 5.8: Broadcast

En el ejemplo de la Figura 5.9 se busca la comunicación entre el nodo origen 1 y el nodo destino 7.

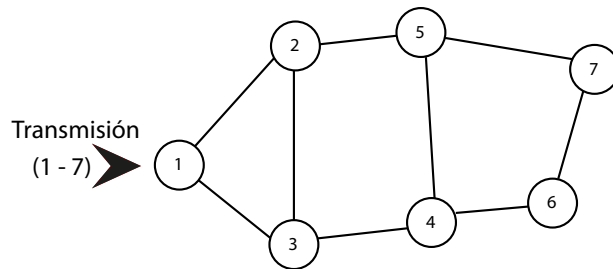


Figura 5.9: Transmisión

Por medio de las actualizaciones periódicas para el llenado de tablas se puede generar el enrutamiento tomando como criterio la menor cantidad de saltos entre el nodo origen y el nodo destino como se muestra en la Figura 5.10.

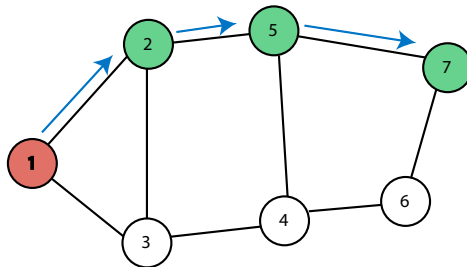


Figura 5.10: Enrutamiento DSDV

### 5.2.2. Enrutamiento reactivos

En los protocolos reactivos, un nodo inicia un descubrimiento de ruta a través de la red, solo cuando desea enviar paquetes a su destino, para este propósito, un nodo inicia un proceso de descubrimiento de ruta a través de la red, este proceso se completa una vez que se determina una ruta o se han examinado todas las permutaciones posibles, una vez que se ha establecido una ruta, se mantiene mediante un proceso de mantenimiento de la ruta hasta que el destino se vuelve inaccesible a lo largo de cada ruta desde la fuente o hasta que la ruta ya no sea deseada [44, 45, 101].

En los esquemas reactivos, los nodos mantienen las rutas hacia destinos activos. Se necesita una búsqueda de ruta para cada destino desconocido. Por lo tanto, en teoría, la sobrecarga de comunicación se reduce a expensas de la demora debido a la investigación de rutas. Algunos protocolos reactivos son el protocolo de enrutamiento AODV y DSR [44].

### 5.2.2.1. AODV

AODV es un protocolo de enrutamiento reactivo. Por lo tanto, las rutas se determinan solo cuando es necesario, cada vez que un enrutador o nodo AODV recibe una solicitud para enviar un mensaje, verifica la existencia de la ruta en su tabla de enrutamiento. Cada entrada de la tabla de enrutamiento consta de la dirección de destino, la dirección del siguiente salto, la SN de destino y el conteo de saltos, si existe una ruta, el enrutador simplemente reenvía el mensaje al siguiente salto, de lo contrario, guarda el mensaje en una cola de mensajes y luego inicia una solicitud de ruta para determinar una ruta como se puede observar en la Figura 5.11 y 5.12 [45,101,102].

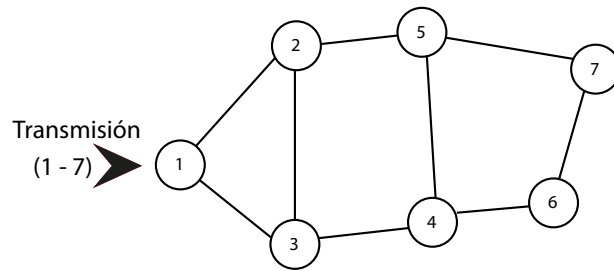


Figura 5.11: Transmision

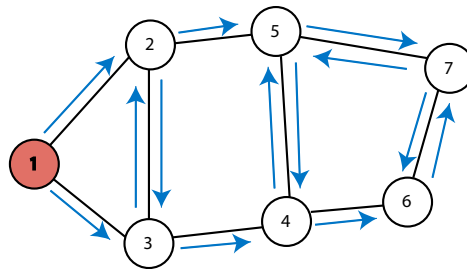


Figura 5.12: Broadcast

Al recibir la información de enrutamiento, actualiza su tabla de enrutamiento y envía los mensajes en cola como en la Figura 5.13. Los nodos AODV utilizan cuatro tipos de mensajes para comunicarse entre sí. Los mensajes de solicitud de ruta (RREQ) y respuesta de ruta (RREP) se utilizan para el descubrimiento de ruta. Los mensajes de error de ruta (RERR) y los mensajes de HELLO se utilizan para el mantenimiento de la ruta.

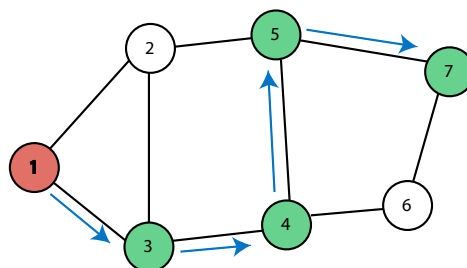


Figura 5.13: Enrutamiento AODV

### 5.2.3. Enrutamiento híbridos

El Protocolo de enrutamiento híbrido es un protocolo de enrutamiento de red que combina las características del Protocolo de enrutamiento reactivo y el Protocolo de enrutamiento proactivo, se utiliza para determinar rutas de destino de red óptimas e informar modificaciones de datos de topología de red [46].

Sus características son las siguientes:

- Requiere menos memoria y capacidad de procesamiento.
- Integra ventajas de enrutamiento reactivo y proactivo.
- Sirve los nodos activados mediante inundación reactiva.

## 5.3. Enrutamiento geograficos

El enrutamiento geográfico, también llamado enrutamiento basado en la posición, permite encontrar rutas de un nodo origen (O) a un nodo destino (D) tomando como criterio la distancia que existe entre los nodos de la red, los principales enrutamientos geográficos son Greedy Forward Routing y Face Routing [103].

### 5.3.1. Enrutamiento Greedy Forwarding

Greedy Forward es un algoritmo de enrutamiento muy simple pero uno de los más poderosos [104], se puede determinar en 3 pasos, primer paso (O) obtiene las coordenadas de (D) y la distancia que existe entre ellos, segundo paso genera un broadcast para conocer sus nodos vecinos (N) y obtener sus coordenadas físicas, tercer paso compara las distancias de N a D y selecciona la de menor distancia y que sea menor a la distancia entre O y D, el siguiente nodo vuelve a realizar estos pasos hasta que se alcance D. .

La ventaja fundamental de Greedy Forwarding es que solo se necesita conocer a los vecinos inmediatos para el envío. En redes multisalto el número de vecinos dentro del rango es sustancialmente menor que el número total de nodos en la red. Esta ventaja también supone un inconveniente: hay topologías de red en las que la única ruta para alcanzar el destino requiere que el paquete se mueva temporalmente a un nodo más alejado del destino geográficamente, en la Figura 5.14 se muestra el funcionamiento del enrutamiento Greedy Forwarding [105].

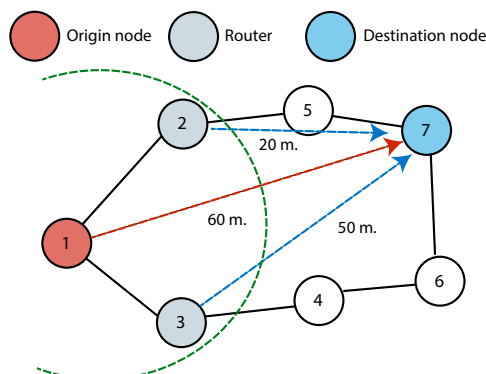


Figura 5.14: Enrutamiento Greedy Forwarding

Para que todos los nodos conozcan la posición de sus vecinos se utiliza un algoritmo de señalización. Cada nodo envía periódicamente un mensaje en broadcast que contiene su propio identificador (por ejemplo, su dirección IP) y su posición. La posición consiste en dos coordenadas: x e y. Si no se reciben mensajes de un vecino durante un intervalo de tiempo predefinido, el nodo asume que el vecino ha dejado de funcionar o se ha salido del rango y lo elimina de su tabla de vecinos. La elección de este intervalo para que las tablas de vecinos se mantengan actualizadas correctamente depende de la movilidad de la red y del radio de cobertura de los nodos, en la Figura 5.15 se observa cuando existe un bucle en el enrutamiento.

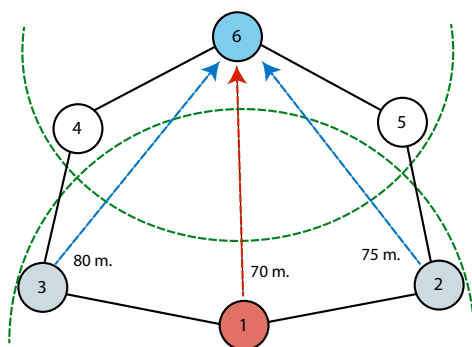


Figura 5.15: Enrutamiento Greedy Forwarding Error

El nodo “1” recibe un paquete cuyo destino es el nodo “6”. Se presenta la distancia entre el nodo “1” y el nodo “6”. Aunque existen dos caminos posibles para alcanzar el destino (“1-3-4-6” y “1-2-5-6”), el algoritmo no reenviará el paquete porque la distancia entre el destino y los nodos “2” y “3” es mayor que la distancia entre el destino y el nodo “1”, es decir, el nodo “1” es un mínimo local debido a su proximidad al nodo “6”.

### 5.3.2. Enrutamiento Face Routing

A diferencia del Greedy Forward Routing, el Face Routing en sí mismo se puede garantizar en un gráfico plano construido con varios métodos existentes. Hay diferentes variantes de enrutamiento de caras, se diferencian principalmente en la decisión acerca de cuándo y qué cara para atravesar a continuación [103]. En Face Routing tradicional se basa en la regla de la mano derecha, el nodo origen (O) genera una línea recta hacia el nodo destino (D) y enruta la información hacia el enlace a favor de las manecillas del reloj, cada nodo realizara la misma acción sin tomar en cuenta los enlaces que corten a la línea recta entre el O y D, se repetirá hasta que el mensaje llegue a D, en la Figura 5.16 se observa el funcionamiento del enrutamiento Face Routing.

La problemática de este enrutamiento se observar en la Figura 5.17 al no poder diferenciar bucles.

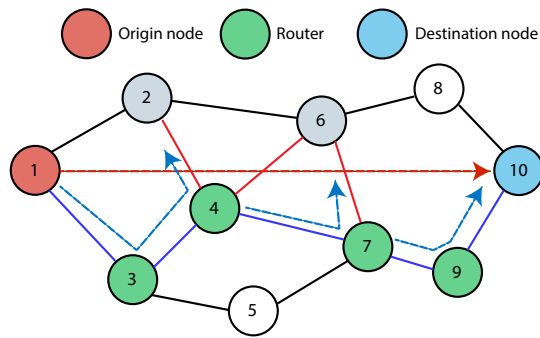


Figura 5.16: Enrutamiento FaceRouting

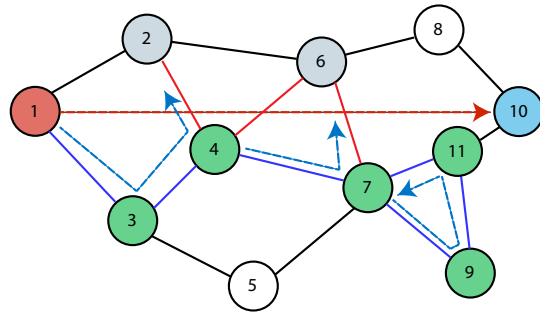


Figura 5.17: Enrutamiento FaceRouting

### 5.3.3. Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)

Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) consiste en la combinación de dos métodos para el reenvío de paquetes : Greedy Forwarding, que se utiliza siempre que sea posible, y Face Routing, que se utiliza en las regiones en las que no se puede utilizar Greedy Forwarding.

Se observa en los enrutamiento antes vistos y otras variantes como [106], [107], [108], que el enrutamiento comienza con el conocimiento de las coordenadas de nodo destino, sin embargo en la realidad es necesario realizar ciertas tareas para obtener estos datos, como por ejemplo en [46] la red decreta un nodo como nodo sumidero, este nodo se encarga de obtener las coordenadas físicas de todos los nodos de la red, una opción es realizar un broadcast de la red.

### 5.3.4. Propuesta de enrutamiento

Este trabajo propone un protocolo de enrutamiento geográfico que utilice el mismo broadcast para el conocimiento de las coordenadas física de los nodos de la red, permita al nodo sumidero obtener además los enlaces y sus pesos tomando como criterio exponente de pérdidas por propagación, con esta información el nodo sumidero realiza un algoritmo de kruskal y cuando se produce una demanda de transmisión en el nodo origen consultara con el nodo sumidero.

Primer paso: el nodo sumidero genera un broadcast para obtener las coordenadas físicas de los nodos, sus enlaces con los nodos vecinos y el peso de esos enlaces, se observa en la Figura 5.18.

Segundo paso: el nodo sumidero utiliza la información obtenida para realizar el algoritmo de Kruskal permitiéndole interconectar todos los nodos de la red por medio de los enlaces con mayor calidad y eliminando bucles, se puede observar en la Figura 5.19.

Tercer paso: Cuando se genera una demanda de transmisión el nodo origen solicita la ruta al nodo sumidero, se muestra en la Figura 5.20.

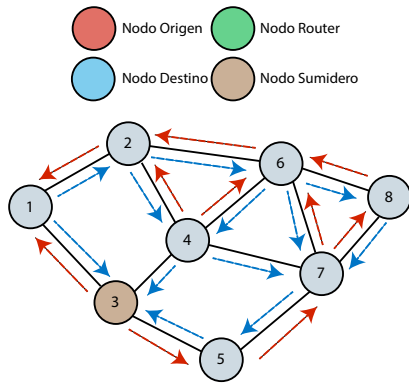


Figura 5.18: Primer paso del enrutamiento propuesto.

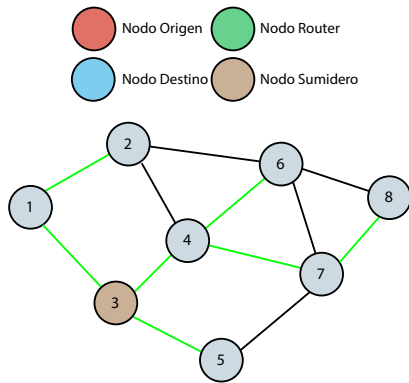


Figura 5.19: Segundo paso del enrutamiento propuesto.

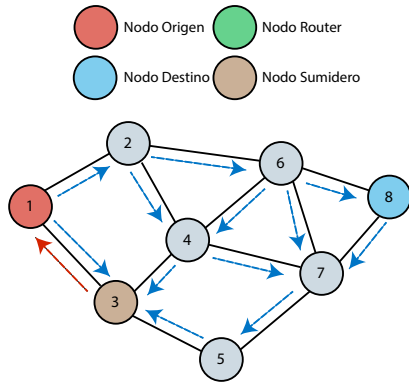


Figura 5.20: Tercer paso del enrutamiento propuesto.

Cuarto paso: Se genera el enrutamiento al nodo destino con la ruta con la mejor calidad, se observa su comportamiento en la Figura 5.21.

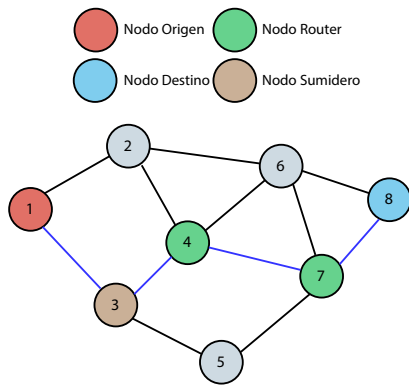


Figura 5.21: Cuarto paso del enrutamiento propuesto.

# Capítulo 6

## Plataforma de simulación

En este capítulo se desarrolla la metodología de trabajo utilizada para realizar una plataforma en Matlab que permita comprobar el funcionamiento del enrutamiento propuesto, del enrutamiento Greedy Forwardin y del enrutamiento Face Routing.

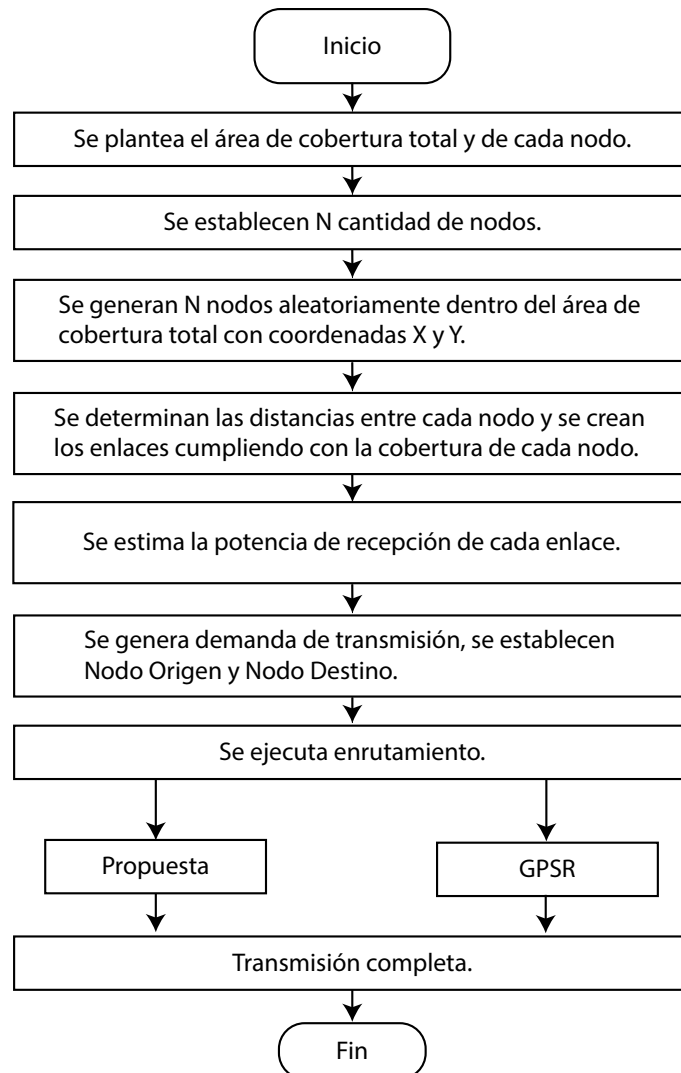


Figura 6.1: Diagrama de bloques del plataforma.

## 6.1. Parámetros de diseño

Se desarrollo una plataforma utilizando el software de Matlab que tiene las siguientes características:

- **Área:** Genera un área de forma cuadrada de tamaño variable que limita la red.
- **Nodos:** Genera N cantidad de nodos de forma aleatoria con coordenadas X y Y.
- **Cobertura:** Permite variar la cobertura de los nodos y el descubriendo de la topología de la red.

La red establece 4 tipos de nodos: Nodo Origen (O), Nodo Router, Nodo Destino (D) y Nodo Sumidero.

- **Nodo Origen:** Nodo donde se origina la demanda de transmisión.
- **Nodo Router:** Permite retransmitir la información, generando un camino entre el O y D.
- **Nodo Destino:** Nodo al que va dirigida la información.
- **Nodo Sumidero:** Nodo que almacena la información de la red.

Para el peso en cada enlace se tomó como referencia el exponente de pérdidas por propagación, se define en la siguiente manera:

$$P_{SRx} = \frac{P_{STx}}{d^u} \quad (6.1)$$

- $P_{SRx}$  : Indicador de Potencia de la señal de recepción o RSSI.
- $P_{STx}$  : Potencia de la señal de transmisión es constante de 2.5mW.
- $d$  : Distancia física entre nodos.
- $u$  : Exponente de pérdidas por propagación.

Los valores de  $P_{SRx}$  son obtenidos por el módulo XBee y la distancia física por los módulos de GPS, debido a ello la única incógnita es el exponente de pérdidas de propagación, despejando de la ecuación 6.1 se obtiene:

$$d^u = \frac{P_{STx}}{P_{SRx}} \quad (6.2)$$

Se obtiene el logaritmo de ambos lados.

$$\log(d^u) = \log\left(\frac{P_{STx}}{P_{SRx}}\right) \quad (6.3)$$

Utilizando las propiedades de los logaritmos para simplificar la ecuación.

$$u \log(d) = \log(P_{STx}) - \log(P_{SRx}) \quad (6.4)$$

Despejando la ecuación para obtener u.

$$u = \log\left(\frac{\log(P_{STx}) - \log(P_{SRx})}{\log(d)}\right) \quad (6.5)$$

Se busca conseguir exponente de pérdidas por propagación con la distancia medida y el RSSI medido, permitiendo obtener la calidad del enlace, mientras mayor sea exponente de pérdidas por propagación peor es la calidad del enlace.

En las Figuras 6.3 y 6.2 se encuentra el caso donde:

- $P_{SRx1} = P_{SRx2}$
- $P_{STx1} = P_{STx2}$
- $d1 = 2*d2$

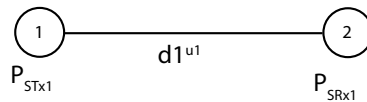


Figura 6.2: Ejemplo de ecuación 1.

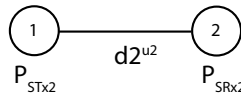


Figura 6.3: Ejemplo de ecuación 2.

Se puede observar en las Figura 6.3 y Figura 6.2 obtienen la misma  $P_{SRx1}$  con distancias muy diferentes, resolviendo en 6.5 se obtiene  $u1 = 2*u2$ , se puede concluir que el enlace de la 6.3 es de mejor calidad que 6.2.

## 6.2. Definición de los algoritmos

En esta sección se desglosa el funcionamiento de cada algoritmo de enrutamiento geográfico con un diagrama de bloques.

### 6.2.1. Greedy Forwarding

El enrutamiento geográfico Greedy Forwarding se enfoca en las distancias de sus nodos vecinos para tomar la decisión de direccionamiento, este enrutamiento no garantiza la entrega de paquetes, cuando los nodos vecinos no cumplen con el criterio de menor distancia al nodo destino, se muestra su diagrama de bloques en la Figura 6.4.

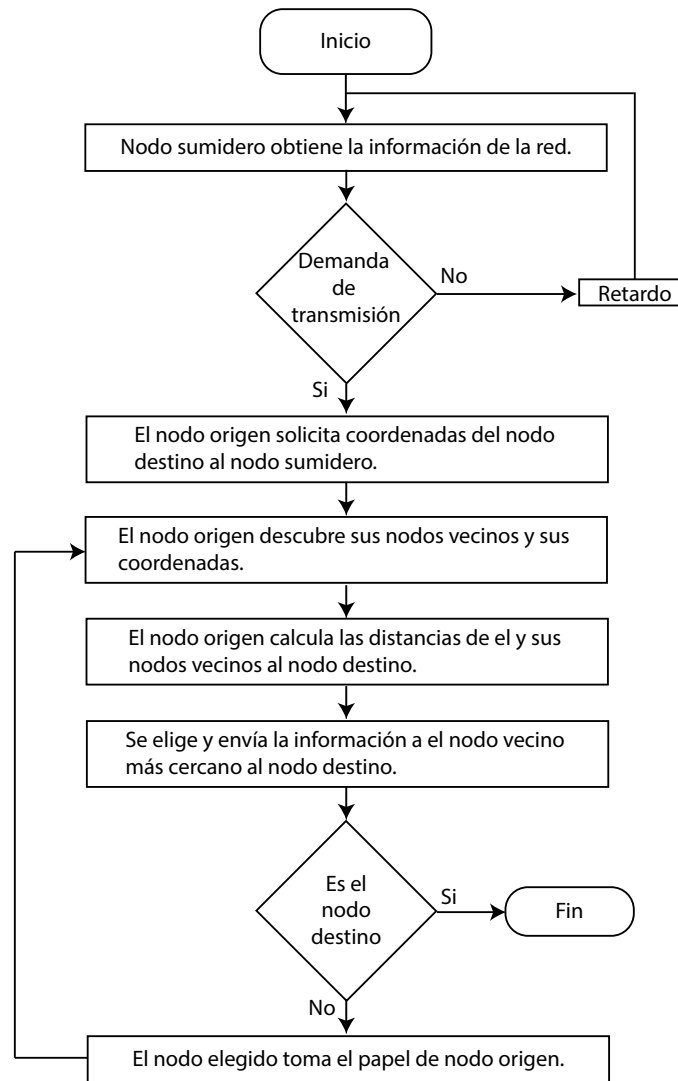


Figura 6.4: Diagrama de bloques del enrutamiento Greedy.

### 6.2.2. Face Routing

El enrutamiento geográfico Face Routing se enfoca en el enlace entre nodo origen y nodo destino, genera una línea entre ellos y tomando como criterio los enlaces anteriores calcula el siguiente enlace a favor de las manecillas del reloj, este enlace no debe cruzar la línea entre nodo origen y nodo destino, se puede apreciar su diagrama de bloques en la Figura 6.5.

### 6.2.3. Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)

El enrutamiento geográfico GPSR es la combinación del Greedy y Face Routing, este enrutamiento da prioridad al enrutamiento Greedy, sin embargo, si este enrutamiento no se puede realizar utiliza el enrutamiento Face Routing para generar el siguiente salto donde se volverá a realizar el algoritmo, en la Figura 6.6 se muestra su diagrama de bloques.

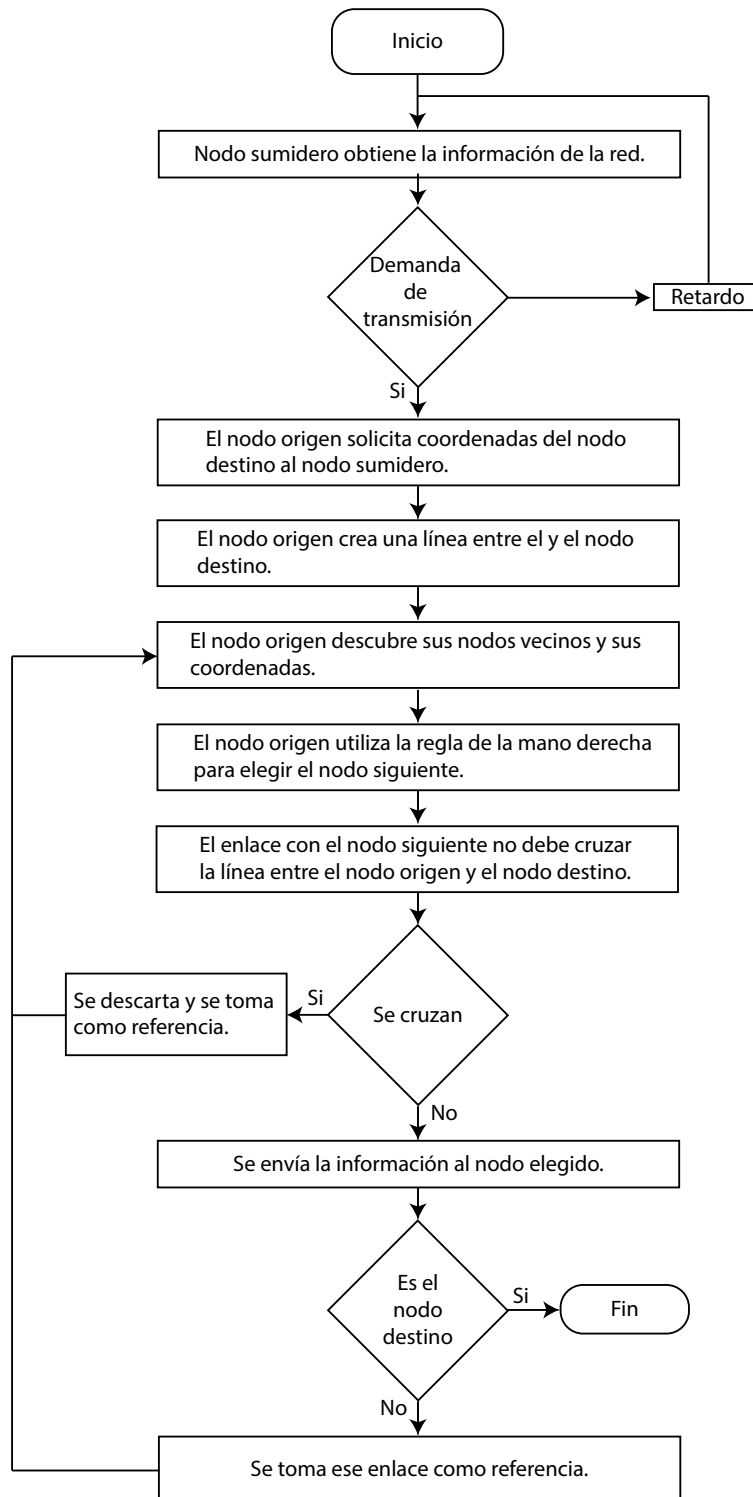


Figura 6.5: Diagrama de bloques del protocolo Face.

#### 6.2.4. Propuesta

El enrutamiento geográfico propuesto en este trabajo plantea aprovechar los medios utilizados por los enrutamientos anteriores para obtener las coordenadas físicas y la calidad de los enlaces de los nodos de la red, con esta información realiza el algoritmo Kruskal para relacionar todos los nodos de la red por medio de los enlaces con menor peso, por ende, de mayor calidad, en la Figura 6.7 se aprecia su forma de trabajo.

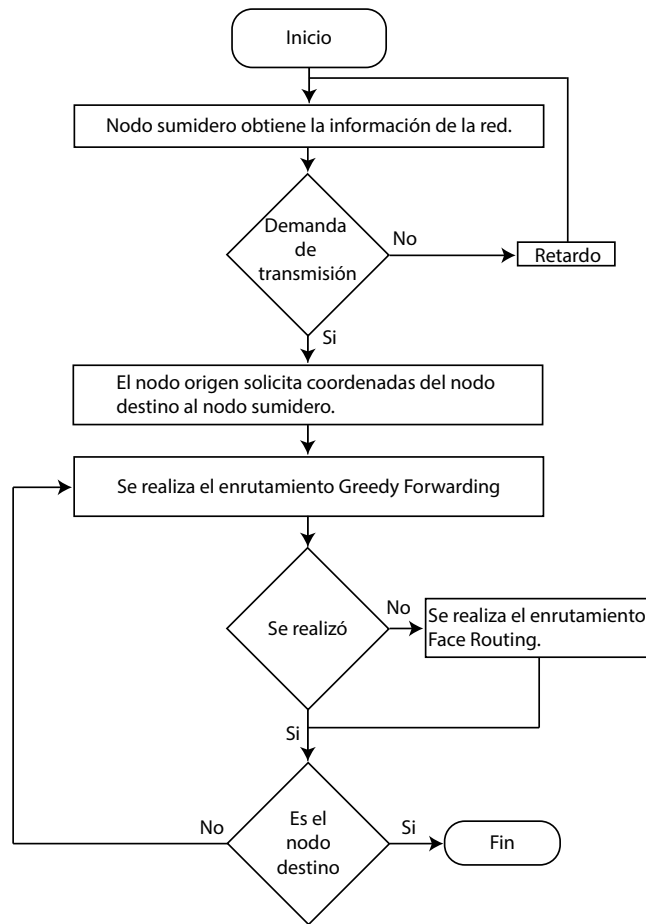


Figura 6.6: Diagrama de bloques del protocolo GPSR.

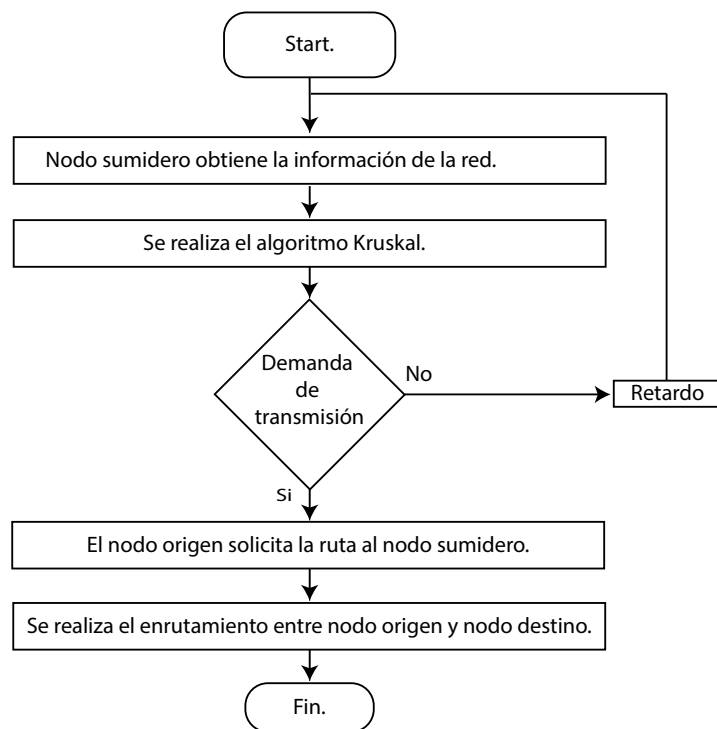


Figura 6.7: Diagrama de bloques del protocolo propuesto.

### 6.2.4.1. Algoritmo de Kruskal

Se desarrollo el algoritmo Kruskal, dicho algoritmo es un algoritmo gráfico que puede generar el árbol mínimo de la red [109], su idea básica es: relacionar todos los vértices de la red cuya suma de sus aristas es la de menor peso, puede ser resuelto como se muestra en la Figura 6.8.

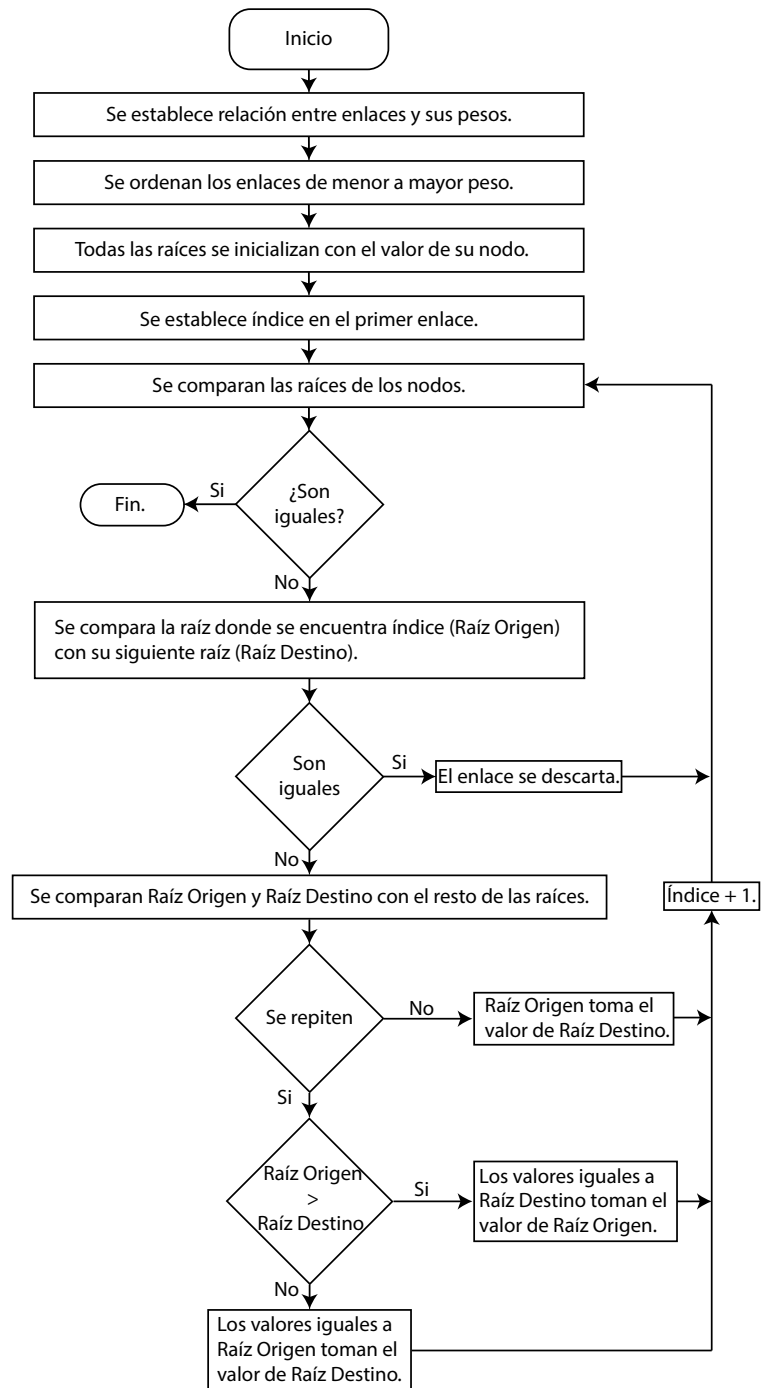


Figura 6.8: Diagrama de bloques del algoritmo de Kruskal.

## 6.2.5. Gráficas de los algoritmos

### 6.2.6. Bellman-Ford

Con respecto a la información anterior sobre enrutamiento se procedió a simular el algoritmo Bellman-Ford, debido a que la mayoría de los enrutamientos proactivos de la actualidad tienen su base en este algoritmo.

En este caso se tomó una topología fija con nodos estáticos y costos de enlaces fijos para realizar la simulación, en la Figura 6.9 se puede apreciar la red.

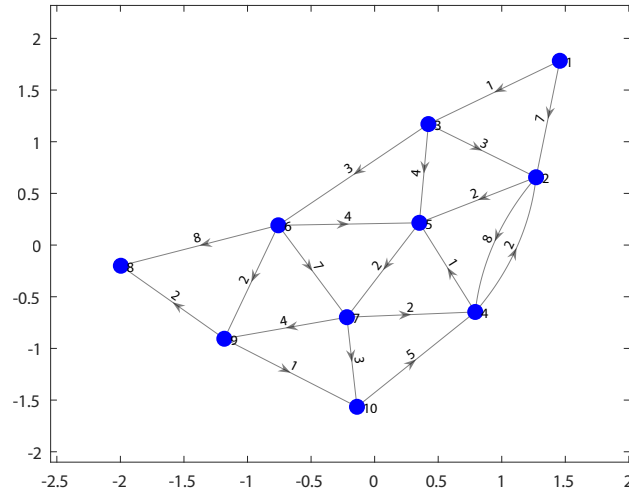


Figura 6.9: Topología de la red

Se realizaron pruebas en la comunicación entre los nodos para confirmar que realizaba el enrutamiento tomando como criterio el costo del enlace y no la cantidad de saltos en este caso, por ejemplo en la Figura 6.10 se realizó el enrutamiento entre el nodo 1 y el nodo 7.

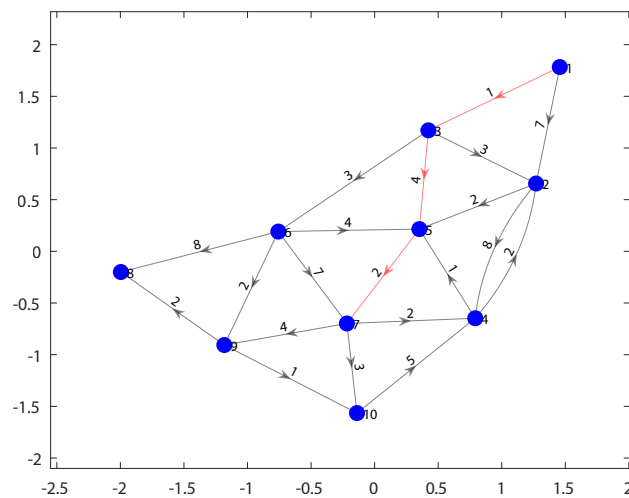


Figura 6.10: Comunicación entre nodo 1 y nodo 7

En la Figura 6.11 se realizó el enrutamiento entre el nodo 1 y el nodo 8.

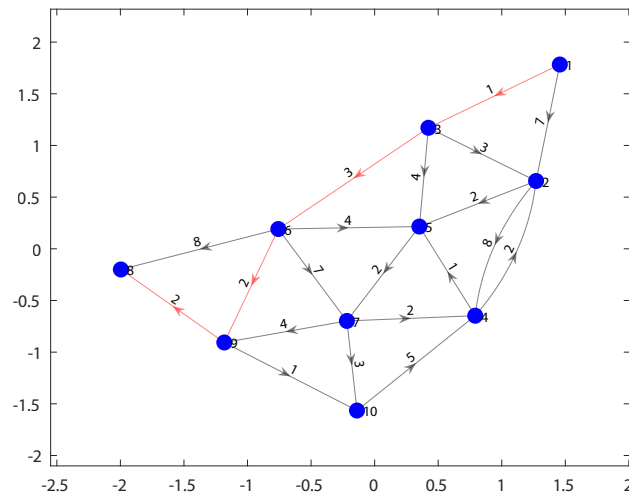


Figura 6.11: Comunicación entre nodo 1 y nodo 8

En la Figura 6.12 se realizó el enrutamiento entre el nodo 1 y el nodo 10, se puede comprobar tomando en referencia la Figura 6.10, donde el nodo 10 está a un salto del nodo 7. Sin embargo, es mayor el costo al seguir dicha ruta, con esto se comprueba que el enrutamiento está tomando como criterio los costos de enlaces.

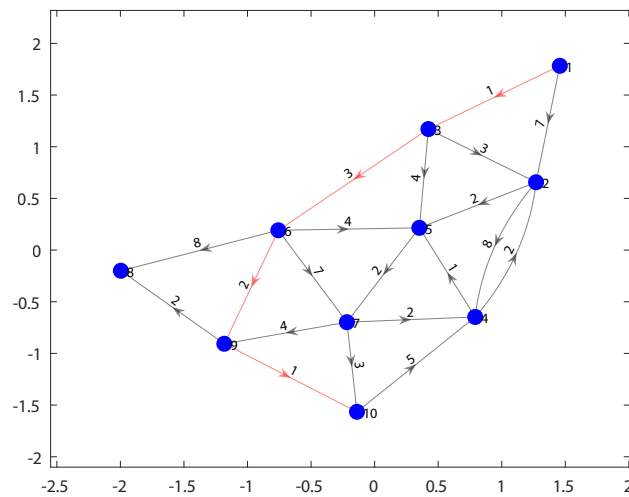


Figura 6.12: Comunicación entre nodo 1 y nodo 10

Así mismo, se simuló un enrutamiento con una topología fija y nodos estáticos con el criterio de la menor cantidad de saltos como se muestra en la Figura 6.13 en comparación con lo ilustrado en la Figura 6.10.

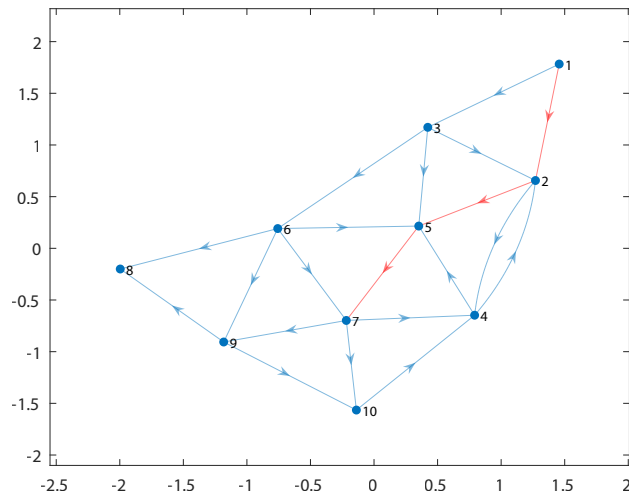


Figura 6.13: Comunicación entre 1 y nodo 8

### 6.2.7. Propuesta

Los resultados de la propuesta de este trabajo en simulación se muestran a continuación, las pruebas se realizaron con la cantidad de 10 y 100 nodos en la red.

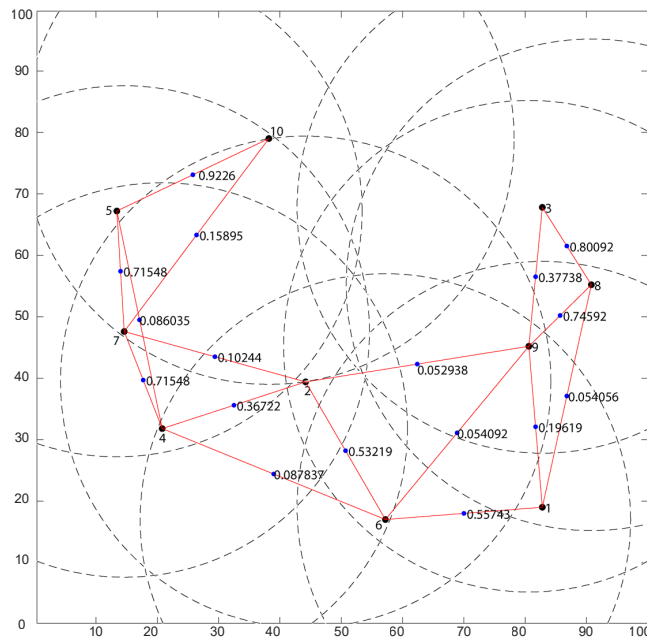


Figura 6.14: Simulación con la cantidad de 10 nodos con topología original.

La Figura 6.14 muestra la topología generada por 10 nodos ubicados aleatoriamente dentro de un área de 100 m. x 100 m. y una cobertura de 30 m., estos parámetros están en relación 10 a 1 y son configurables.

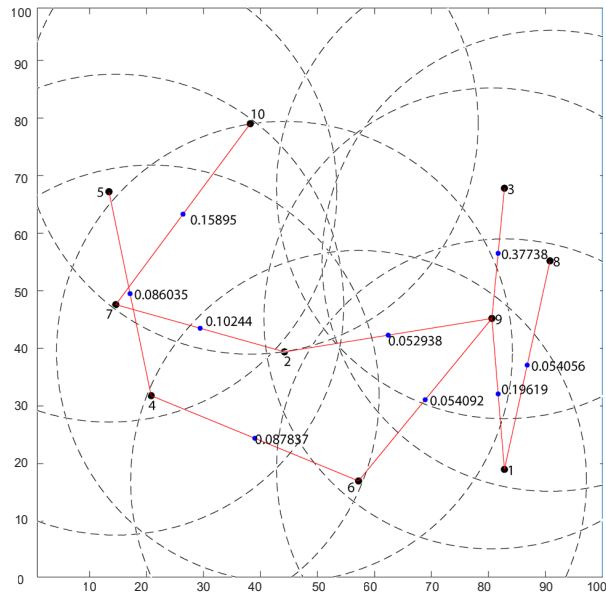


Figura 6.15: Simulación con la cantidad de 10 nodos utilizando el algoritmo Kruskal.

En la Figura 6.15 se muestra la topología resultante al realizar el algoritmo Kruskal y se puede comprobar que los enlaces resultantes son los de menor peso.

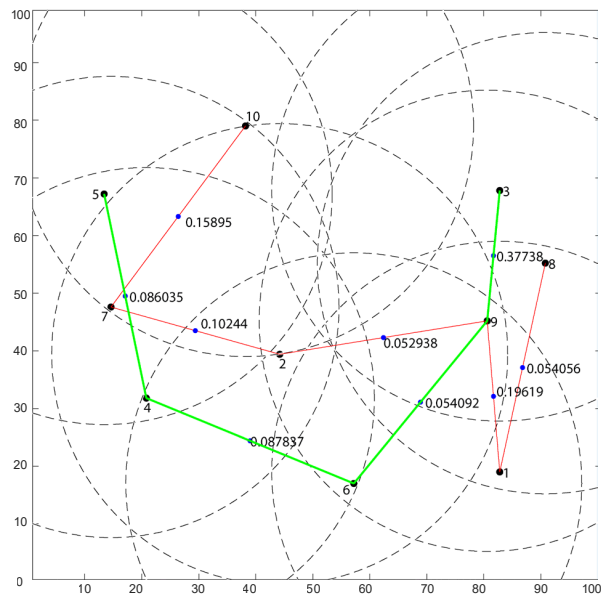


Figura 6.16: Simulación con la cantidad de 10 nodos realizando enrutamiento.

En la Figura 6.16 se muestra la ruta que deberá tomar la información al generar demanda de transferencia de información entre el nodo 5 y 3.

De la misma manera se realizaron pruebas con la cantidad de 100 nodos en un área de 50 m. por 50 m. y una cobertura de 10m.

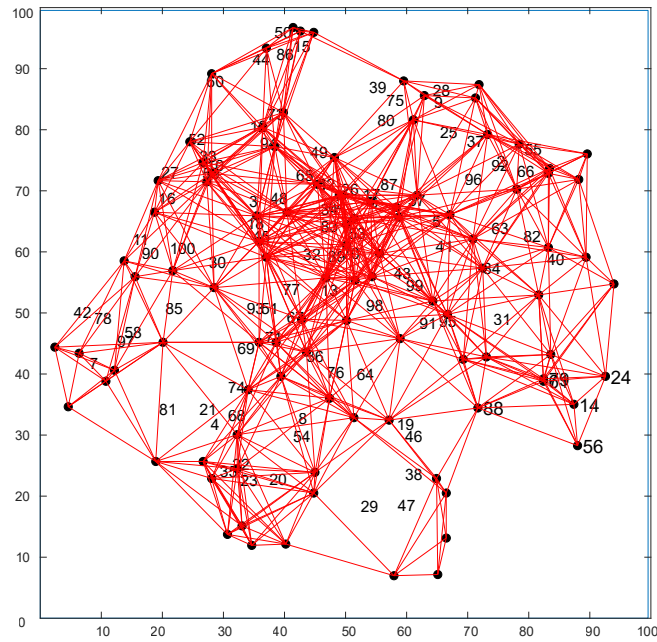


Figura 6.17: Simulación con la cantidad de 100 nodos con topología original.

En la figura Figura 6.17 se puede apreciar la topología generada por la cantidad de 100 nodos ubicados aleatoriamente, permitiendo generar un punto para apreciar de mejor manera el trabajo del algoritmo de kruskal.

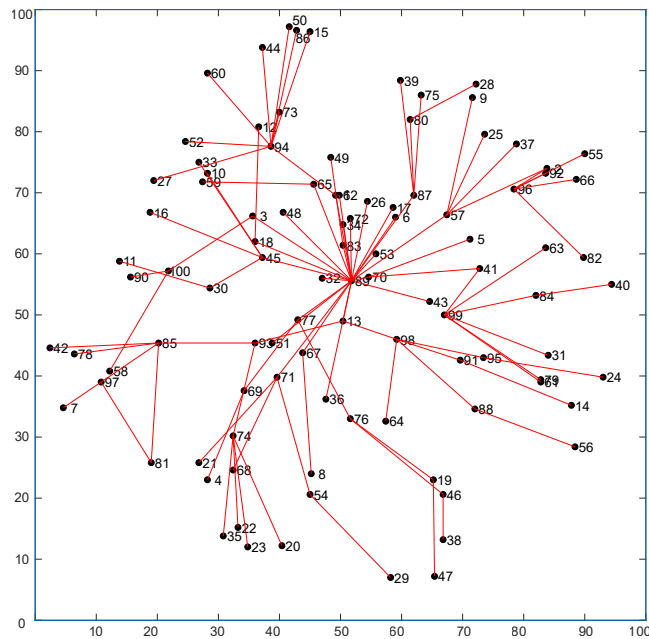


Figura 6.18: Simulación con la cantidad de 100 nodos utilizando el algoritmo Kruskal.

Al comparar la Figura 6.17 y Figura 6.18 se puede apreciar el funcionamiento del algoritmo de kruskal.



La Figura 6.20 muestra los retrasos obtenidos al llevar a cabo la propuesta de enrutamiento, generando 2 transmisiones simultáneas (T1 y T2) con los nodos de origen y destino asignados pseudoaleatoria mente donde los nodos origen no pueden ser iguales, los resultados obtenidos se compararon con el rendimiento del enrutamiento GPSR obtenido con la misma plataforma y las mismas características.

Se puede concluir que el enrutamiento geográfico propuesto de este trabajo garantiza una ruta desde un nodo de origen a un nodo de destino que se encuentre dentro de la red; mediante el algoritmo de Kruskal, se eligen los enlaces con mejor calidad para interconectar todos los nodos de la red, a diferencia de los enrutamientos geográficos por distancia que no tienen en cuenta la calidad del enlace, este enrutamiento puede generar mayor número de saltos. Sin embargo, al optar por los enlaces de mayor calidad se busca evitar los enlaces con baja probabilidad de transmisión y retransmisiones permitiendo reducir el retraso en la transmisión. Por lo tanto, mejora el rendimiento de la red sin necesidad de modificar su infraestructura, con solo modificar su criterio de enrutamiento logra reducir el retardo de transmisión y mejorar el rendimiento de la red.

El criterio propuesto para relacionar la calidad del enlace por medio del RSSI y la distancia entre los nodos permite conocer con mayor aproximación la calidad del enlace a diferencia de tomar como criterio solo el RSSI.

# Capítulo 7

## Implementación de un sistema de adquisición, captura y análisis de datos

En la implementación se determinaron con base en la información antes vista las partes de sistema de geolocalización y sistema de comunicación como se muestra en la Figura 7.1, se realizan pruebas individuales para la comunicación entre sistema embebido - sistema de geolocalización y sistema embebido - sistema de comunicación.

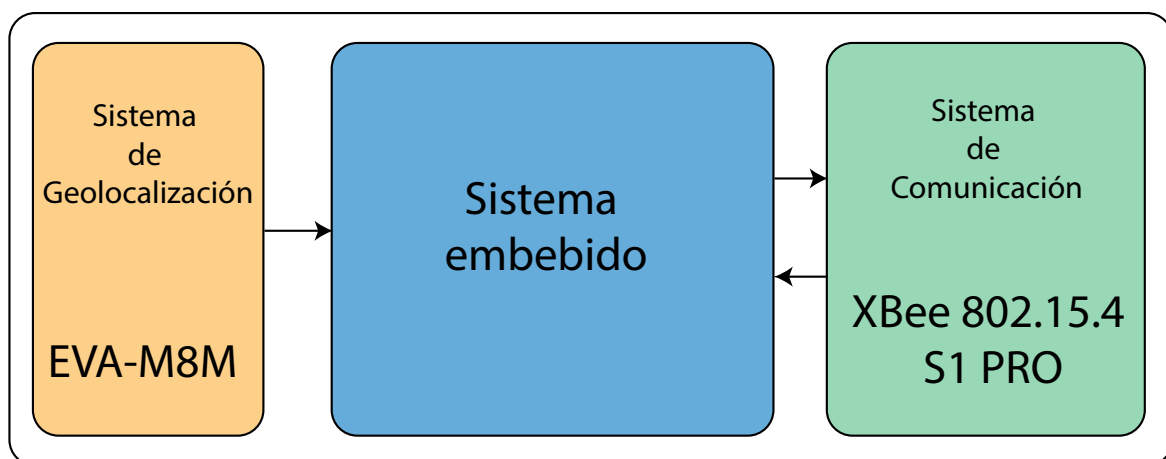


Figura 7.1: Nodo

En la Figura 7.2 se puede apreciar un diagrama de bloques representando la comunicación entre el sistema embebido y sistema de comunicación.

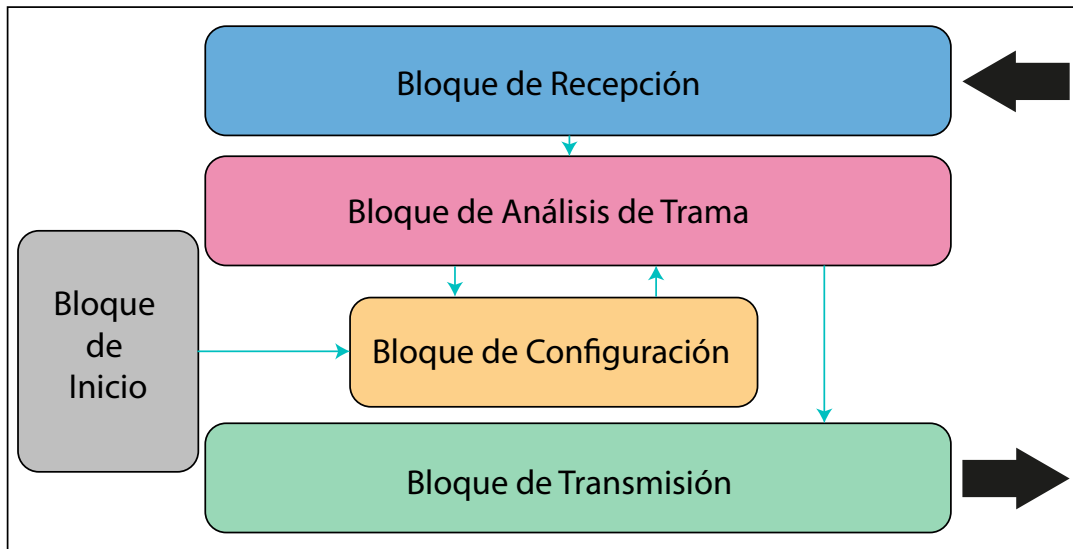


Figura 7.2: Diagrama de bloques de comunicación

### 7.1. Bloque de inicio

En el bloque de inicio se encontrarán las configuraciones por default que todos los nodos tendrán para poder inicializar la red y que logren cumplir con las características de una red con una topología malla.

### 7.2. Bloque de configuración

En este bloque se encontrarán las 3 posibles configuraciones de los nodos que permite la tecnología ZigBee, que son estación base, router y dispositivo final, al alternarlas se busca una red reconfigurable y genere robustez.

### 7.3. Bloque de recepción

Para la realización de este bloque es necesario conocer la composición de las tramas que provee el dispositivo XBee, en la Figura 7.3 se muestra la estructura de la trama de recepción de datos.

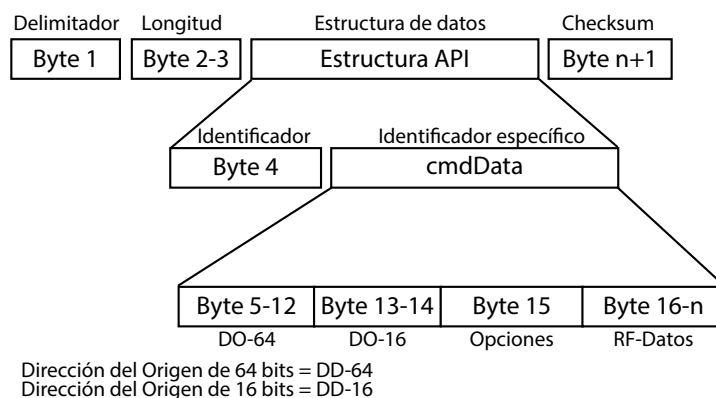


Figura 7.3: Estructura de la trama de recepción de datos

El bloque de recepción es el encargado de recibir la información proveniente del sistema de comunicación y facilitársela al bloque de análisis de trama, en la Figura 7.4 se observa su diagrama de bloques.

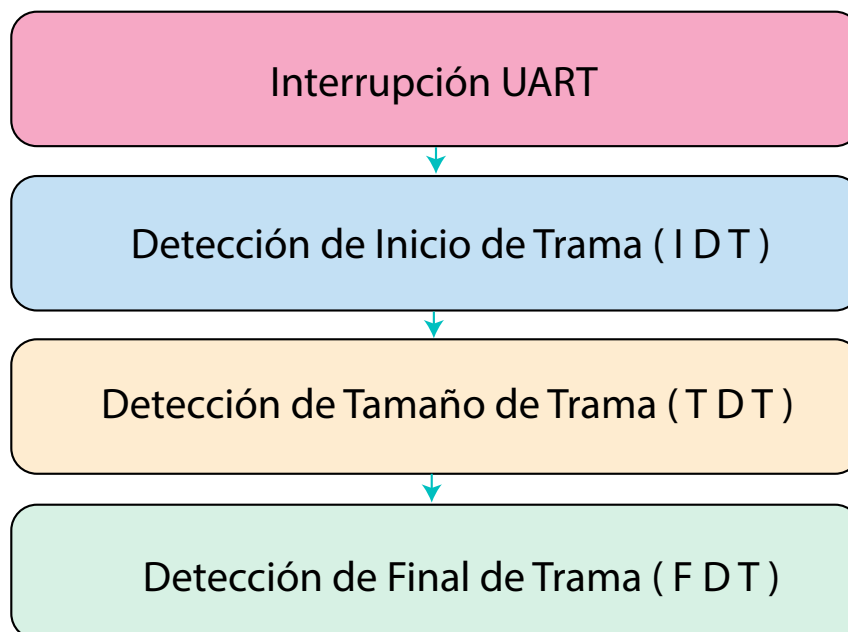


Figura 7.4: Bloque de recepción

## 7.4. Bloque de análisis de trama

En este bloque se recibe la información obtenida por el bloque de recepción y es el encargado de descomponer la trama y tomar las decisiones pertinentes en base a los criterios del enrutamiento, para enviar las tareas debidas a los bloques de configuración y de transmisión.

Existen 3 tipos de tramas de recepción y se diferencian en el byte 4 de la trama:

- **Trama de estatus:** Se observa un 0x8B en el byte 4, esta trama permite conocer el estado de la transmisión, si se recibe un 0x00 en el byte 9 significa que el paquete fue entregado.
- **Trama de recepción:** Se observa un 0x90 en el byte 4, es la trama de información y permite conocer la dirección del origen de la trama.
- **Trama de respuesta de AT mode:** Se observa un 0x88 en el byte 4, permite obtener información del dispositivo XBee como su dirección serial baja (serial low, SL) o la intensidad con la que se recibió la última transmisión en dBm.

A continuación, se muestra un diagrama de bloques de los criterios necesarios para analizar la información recibida.

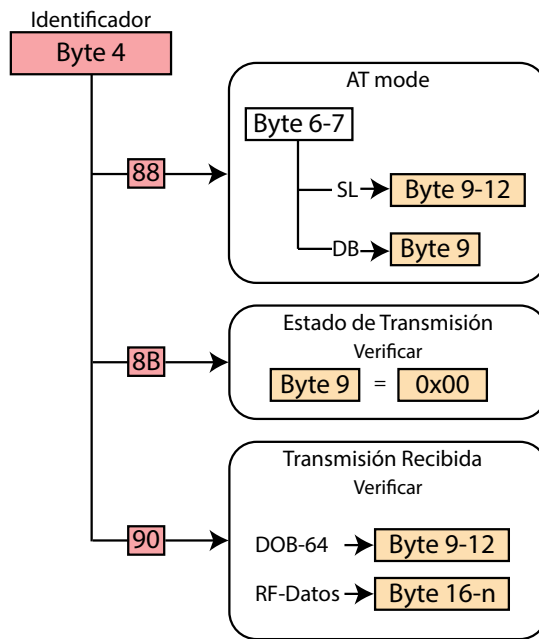


Figura 7.5: Análisis de trama recibida

## 7.5. Bloque de transmisión

En la Figura 7.6 se aprecia el bloque de transmisión que se encarga de transformar la información que se desea enviar en un formato llamado trama necesario para que el sistema de comunicación pueda descifrarlo y se genere la comunicación.

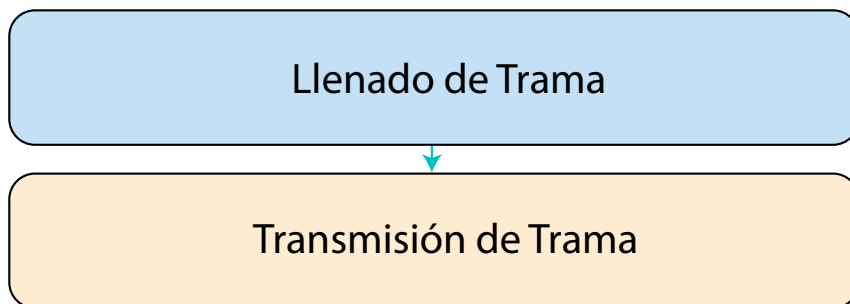


Figura 7.6: Bloque de transmisión

El bloque de transmisión permite 2 tipos de tramas, trama de transmisión y trama de AT mode, cada trama tiene diferente cmdData como se puede apreciar en la Figura 7.7 y Figura 7.8.

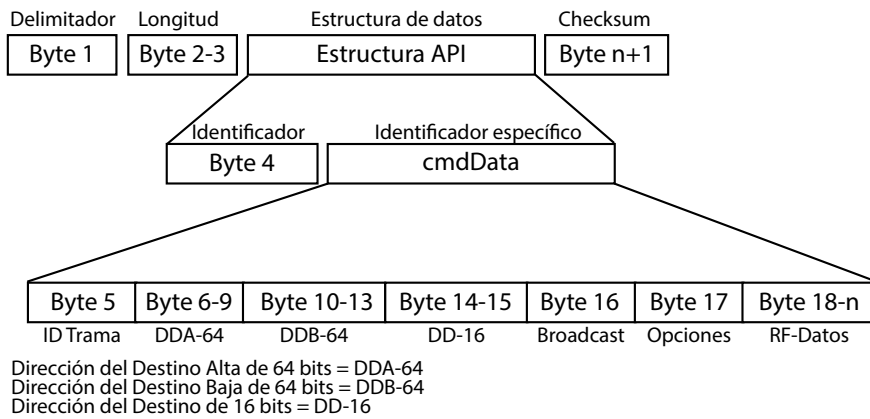


Figura 7.7: Estructura de trama de transmisión

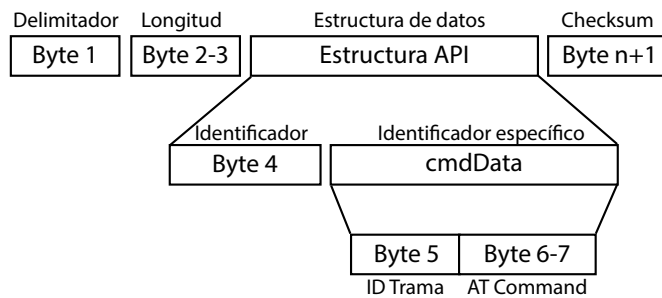


Figura 7.8: Estructura de trama de AT mode

Se puede apreciar al comparar la Figura 7.7 y Figura 7.8, donde la estructura de las tramas difiere en el tamaño de cmdData, la estructura de la trama AT mode es significativamente más pequeña que la trama de transmisión, debido que no es necesario ninguna dirección y los AT Commands son máximo de 2 bytes a diferencia de los RF-Datos que permiten hasta 69 bytes.

La trama de transmisión permite 2 modalidades, broadcast y direccionamiento. Al modificar los bytes de DDA-64 y DDB-64 permite alternar entre estas 2 modalidades, en las Figuras 7.9 y 7.10 se muestra un ejemplo de cada modalidad de trama.

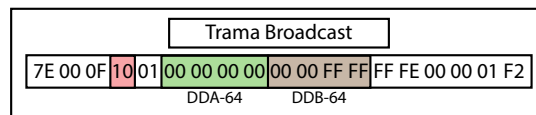


Figura 7.9: Análisis Broadcast

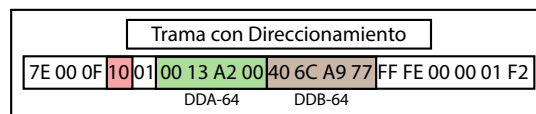


Figura 7.10: Análisis Direccionamiento

## 7.6. Sección de ubicación de la implementación del algoritmo propuesto

En esta sección se abordara la implementación del algoritmo de enrutamiento, este algoritmo se llevara acabo en el bloque de análisis donde además del encabezado del protocolo ZigBee las tramas tendrán dentro de los datos un encabezado para conocer la función que deberán desempeñar.

## 7.7. Pruebas

Se utilizó el dispositivo XBee S1, en la Figura 7.11 se presentan sus características.

Specification	XBee
Indoor/urban range	Up to 100 ft (30m)
Outdoor RF line-of-sight rang	Up to 300 ft (90m)
Transmit power output	1 mW (0dBm)
RF data rate	250,000 b/s
Receiver sensitivity	-92 dBm (1% packet error rate)

Figura 7.11: Características del módulo XBee S1

Los dispositivos XBee presentan la ventaja de tener una plataforma llamada XCTU, que permite observar el funcionamiento del dispositivo y sus tramas de comunicación. En esta plataforma se puede modificar el firmware y los parámetros del dispositivo XBee.

En la Figura 7.12 se muestra el firmware y los parámetros utilizados para el dispositivo XBee S1.

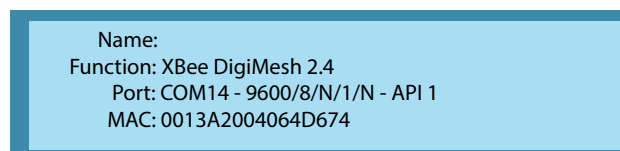


Figura 7.12: Firmware utilizado.

Se utilizó el firmware XBee DigiMesh 2.4, debido a que se acopla a las necesidad de la red permitiendo configurar todos los dispositivos como routers, en la Figura 7.13 se muestra los parámetros del módulo XBee S1 .

En la tecnología ZigBee es necesario configurar todos los dispositivos de la red con el mismo canal y la misma ID de red, de lo contrario no se podrán comunicar entre sí, el dispositivo XBee S1 permite su mayor potencia de 1mW.

Se realizaron pruebas en la plataforma XCTU para conocer el comportamiento de las tramas de dispositivo XBee S1.

CH Operating Channel	C
ID Network ID	3332
PL TX Power Level	Highest [4] = 0 dB

Figura 7.13: Parámetros del módulo XBee S1.

A continuación, se muestran el desglose de cada trama y su tipo.

En la Figura 7.14 se muestra la ID, el tamaño y el tipo de trama generada, para esta trama se seleccionó una modalidad broadcast, en la Figura 7.15 se puede apreciar el desglose de la trama.

ID	Length	Frame
→ 0	15	Transmit Request

Figura 7.14: Trama de transmisión en XCTU.

<b>Transmit Request</b>	7E 00 0F 10 01 00 00 00 00 00 00 FF FF FE 00 00 31 C2
<b>Start delimiter</b>	7E
<b>Length</b>	00 0F (15)
<b>Frame type</b>	10 (Transmit Request)
<b>Frame ID</b>	01 (1)
<b>64-bit dest. address</b>	00 00 00 00 00 00 FF FF
<b>16-bit dest. address</b>	FF FE
<b>Broadcast radius</b>	00 (0)
<b>Options</b>	00
<b>RF data</b>	1
<b>Checksum</b>	C2

Figura 7.15: Trama de transmisión con modalidad broadcast.

El protocolo ZigBee en la capa de acceso nos responde con una trama de estatus, dicha trama se puede apreciar en la Figura 7.17 y su desglose en la Figura 7.16.

ID	Length	Frame
← 1	7	Transmit Status

Figura 7.16: Trama de estatus en XCTU.

<b>Transmit Status</b>	7E 00 07 8B 01 FF FE 00 00 00 76
<b>Start delimiter</b>	7E
<b>Length</b>	00 07(7)
<b>Frame type</b>	8B (Transmit Status)
<b>Frame ID</b>	01 (1)
<b>16-bit dest. address</b>	FF FE
<b>Tx. retry count</b>	00 (0)
<b>Delivery status</b>	00 (Success)
<b>Discovery Status</b>	00 (No discovery overhead)
<b>Checksum</b>	76

Figura 7.17: Trama de estatus



Se realizó la comprobación del direccionamiento con XBee S1 utilizando un microcontrolador, un XBee se conectó a la plataforma XCTU para el monitoreo, dicho dispositivo genera una trama broadcast con el mensaje "HOLA MUNDO" para conocer sus dispositivos vecinos, los dispositivos vecinos le contestan con una trama de transmisión direccionada con el mensaje "HOLA", en las Figuras 7.20 y 7.21 se aprecian las tramas en la plataforma XCTU.

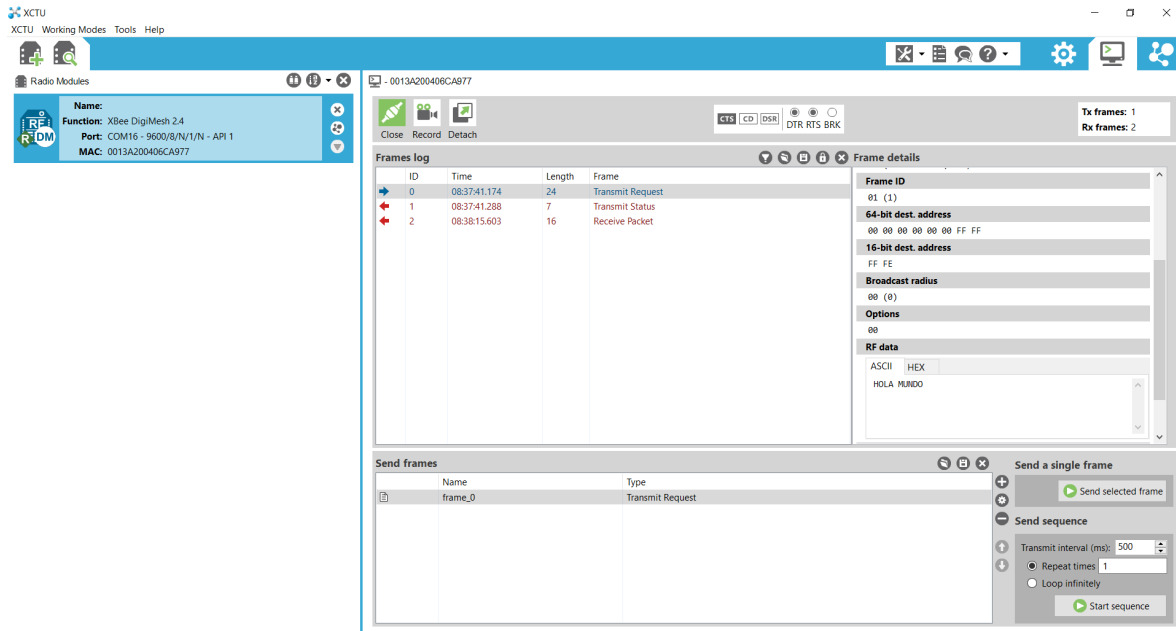


Figura 7.20: Trama broadcast "HOLA MUNDO".

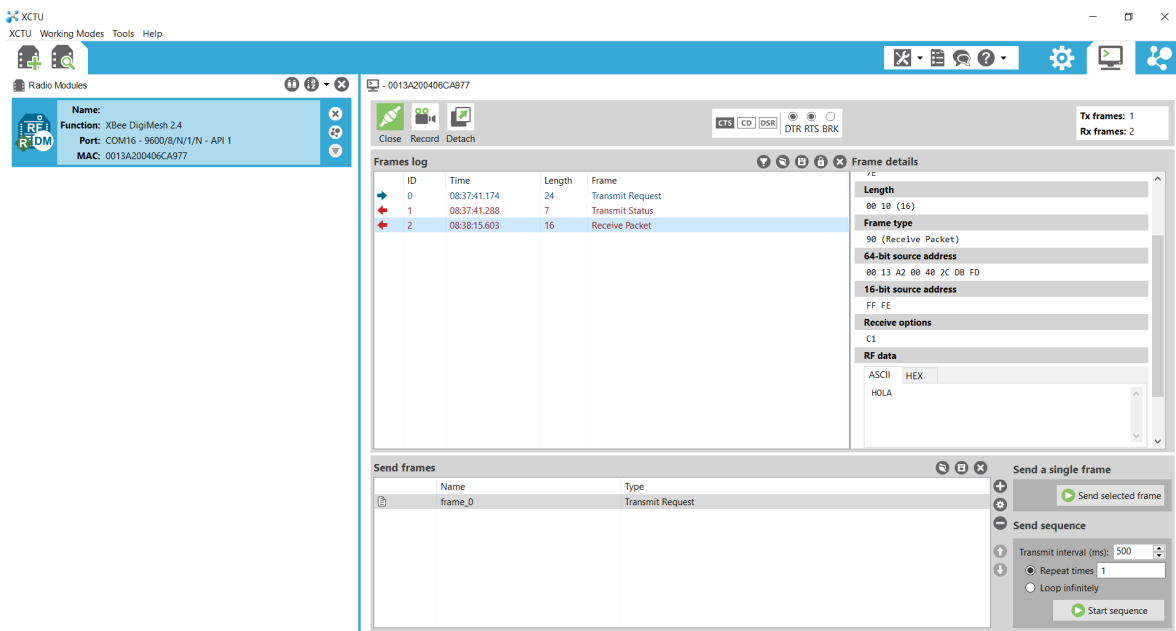


Figura 7.21: Trama de transmisión "HOLA".

## 7.8. Diseño y construcción de Nodos.

Se diseñó y construyó los circuitos impresos PCB llamados nodo de comunicaciones para el desarrollo de una red de comunicación conformada por 5 nodos. Para la validación del enrutamiento propuesto.

Para el diseño de la tarjeta de circuito impreso PCB de un nodo fue necesario conocer y cumplir con las especificaciones del microcontrolador PIC24FJ256GA406 dadas en [26], se muestra en la Figura 7.22 los pines del microcontrolador.

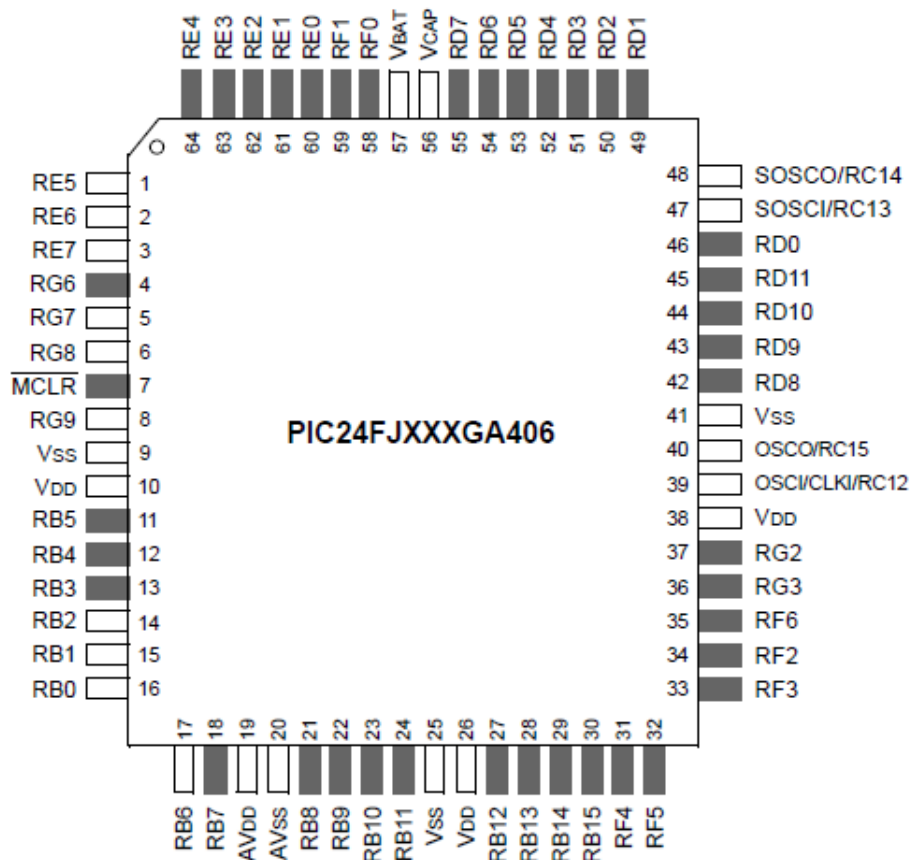


Figura 7.22: Pines del microcontrolador PIC26FJ256GA406.

Se tomo en cuenta el circuito recomendado de [26] que permita un funcionamiento eficaz con el mínimo de dispositivos, el microcontrolador cuenta con 4 puertos de alimentación que pueden ser alimentados por la misma fuente de 3.7V y con periféricos configurables en cada pin. En la Figura 7.23 se puede observar circuito mínimo y a continuación los elementos utilizados.

- C1, C6:  $0.1\mu\text{F}$ , 20V
- C7:  $10\mu\text{F}$ , 6.3V
- R1:  $10\text{k}\Omega$

- R2: 100Ω a 470Ω

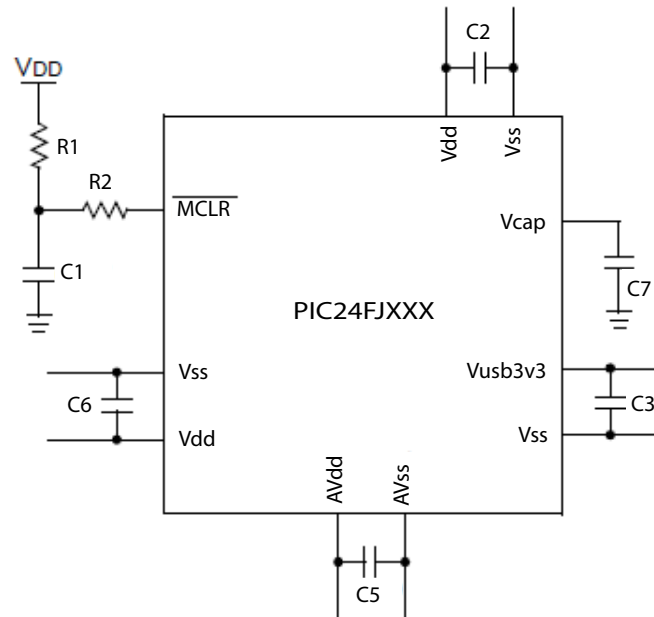


Figura 7.23: Circuito mínimo.

De [26] se seleccionaron los pines MCLR, PGC1 y PGD1 responsable de la programación, se determinaron los pines para USART1, USART2 y SPI1 que permiten la comunicación con el módulo de transmisión, el módulo de geolocalización y el módulo de sensado, en la Figura 7.24 se muestra la configuración de pines del microcontrolador.

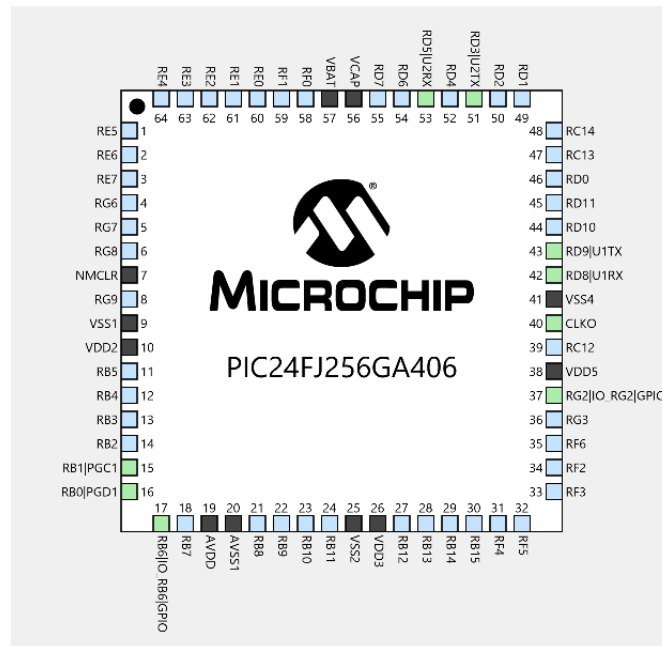


Figura 7.24: Selección de pines del microcontrolador PIC26FJ256GA406.

Una vez que se conoce el circuito mínimo para su funcionamiento y se tienen determinados los pines de comunicación con los módulos se realizó el diseño del diagrama esquemático.

co del nodo en el software Altium Designer, fue necesario construir los esquemáticos de cada elemento del nodo.

Se generó una librería llamada Componentes con los dispositivos necesarios para realizar el diseño del diagrama esquemático del nodo. Los componentes se muestran en la Figura 7.25.

Lista de materiales			
Dispositivo	Designador	Descripción	Cantidad
Cap	C1,C2,C4,C5,C6,C7	Capacitor	6
LED	D1	Led	1
MicroUSB	J1	Adaptador MicroUSB	1
Header 2	P3	Header 2-Pines	1
Header 3	P4	Header 3-Pines	1
Header 5	P1	Header 5-Pines	1
Header 6	P2	Header 6-Pines	1
Res	R1,R2	Resistencia	2
Switch	S1,S2	Push Bottom	2
PIC24FJ256	U1	Microcontrolador	1
Xbee	U2	Transmisor	1
NEO 6M	U3	GPS	1
Sensor	U4	Sensor	1
Regulador	U5	Regulador	1

Figura 7.25: Lista de materiales utilizados.

Utilizando la librería Componentes se procedió a realizar el diagrama esquemático del nodo, el software Altium Designer permite generar el circuito impreso con base en el esquemático, en la Figura 7.26 se muestra el esquemático y en la Figura 7.27 se aprecia el diseño completo de la tarjeta de circuito impreso de un nodo.

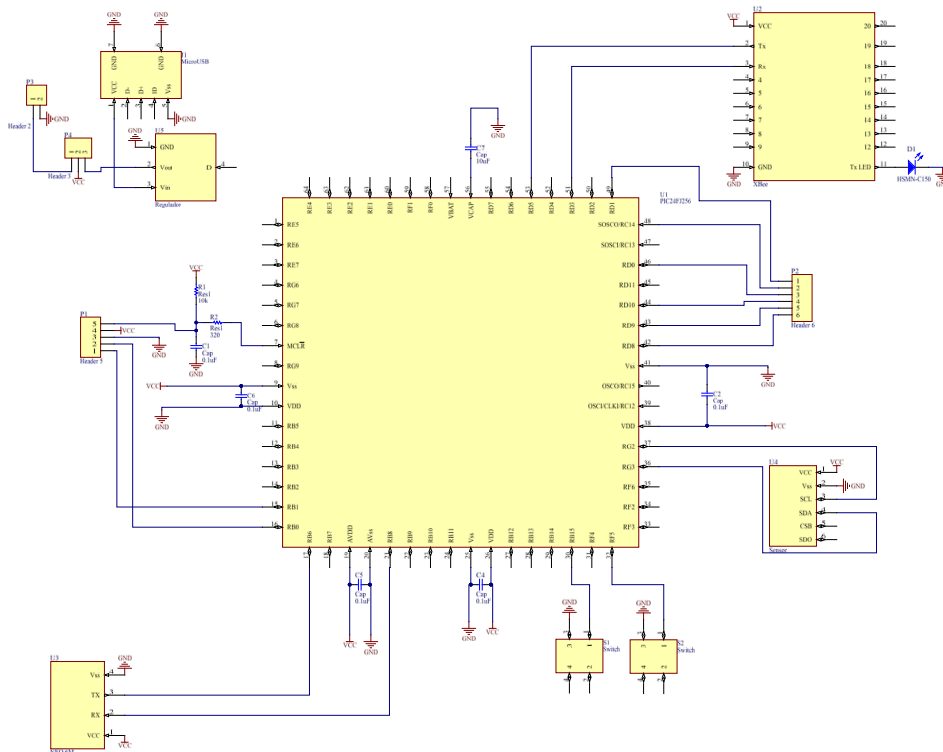


Figura 7.26: Esquemático del nodo.

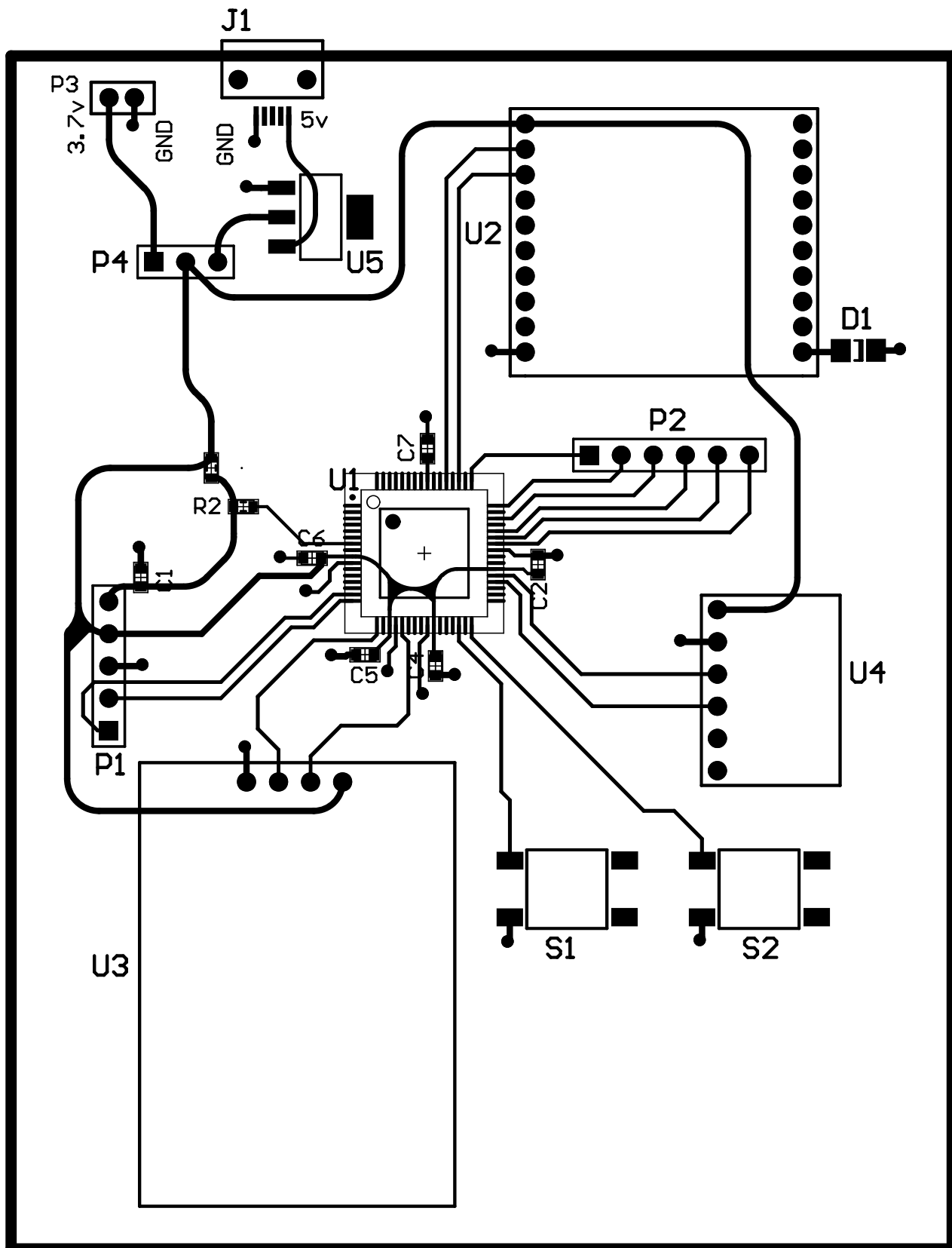


Figura 7.27: Tarjeta de circuito impreso PCB.

Realizado el diseño de la tarjeta de circuito impreso PCB de un nodo se procedió a la construcción de 5 tarjetas e implementar una pequeña red con topología MESH que permita la evaluación de protocolos de enrutamiento, dando como resultado el rendimiento de los mismos, en la Figura 7.28 y Figura 7.29 se presenta un nodo terminado.

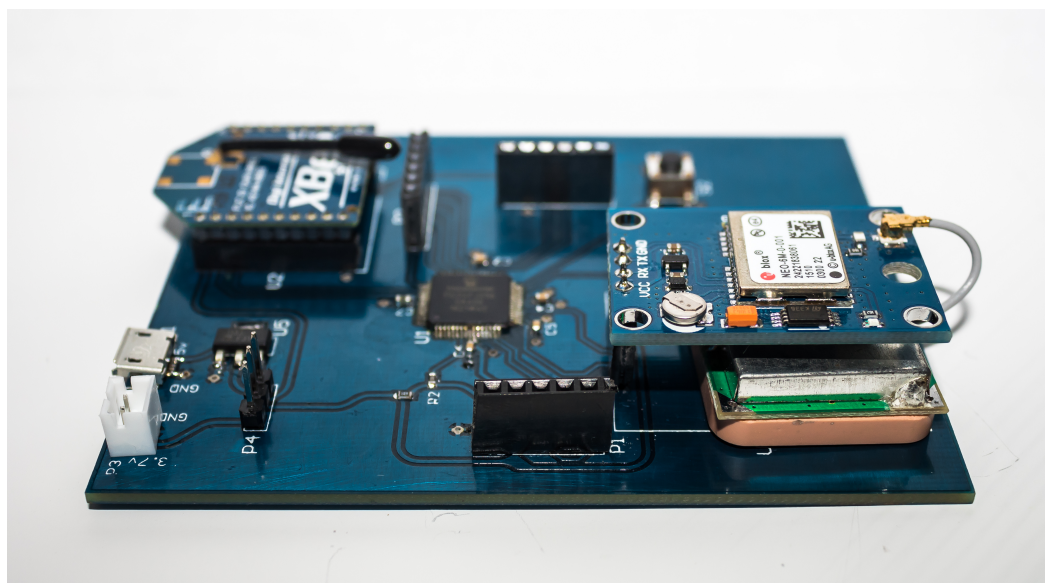


Figura 7.28: Nodo.

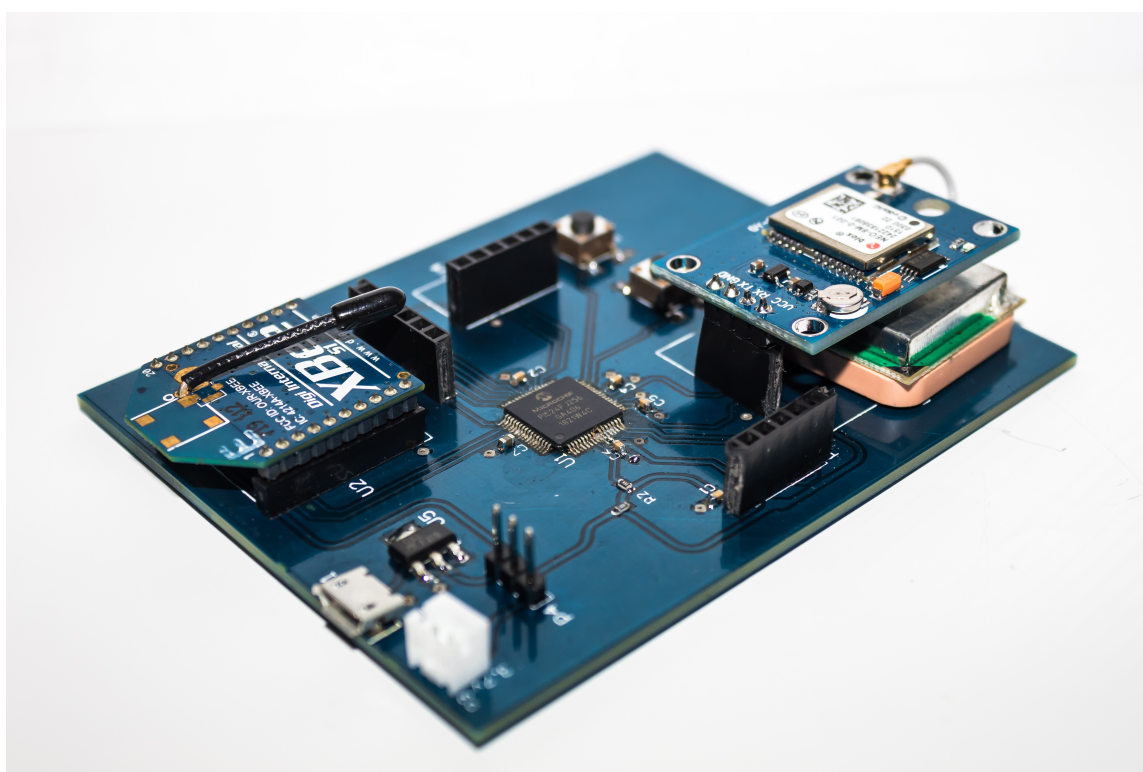


Figura 7.29: Nodo.

### 7.8.1. Desarrollo de red.

Para la implementación se opto por generar una red de 5 nodos con la plataforma de simulación mencionada en el capítulo anterior, de la red obtenida se escogieron 3 escenarios de topologías diferentes que permitan verificar el funcionamiento de los 5 nodos construidos, en las Figuras 7.30, 7.31 y 7.32 se muestran las 3 topologías seleccionadas.

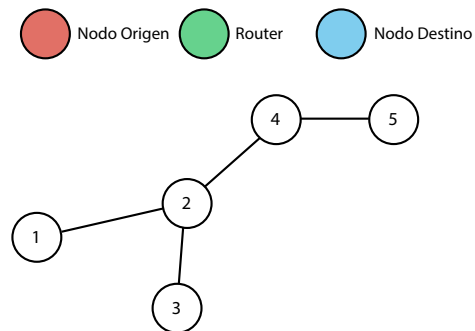


Figura 7.30: Topologia1.

Indicador	Número de saltos	Salto 1	Salto 2	Salto 3	Salto 4
Nodo 1	1	2	0	0	0
Nodo 2	3	1	3	4	0
Nodo 3	1	2	0	0	0
Nodo 4	2	2	5	0	0
Nodo 5	1	4	0	0	0

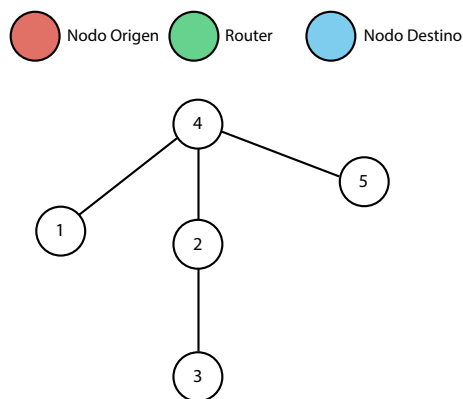


Figura 7.31: Topologia2.

Indicador	Número de saltos	Salto 1	Salto 2	Salto 3	Salto 4
Nodo 1	1	4	0	0	0
Nodo 2	2	3	4	0	0
Nodo 3	1	2	0	0	0
Nodo 4	3	1	2	5	0
Nodo 5	1	4	0	0	0

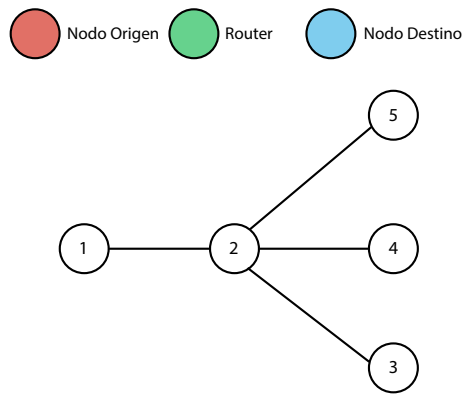


Figura 7.32: Topología3.

Indicador	Número de saltos	Salto 1	Salto 2	Salto 3	Salto 4
Nodo 1	1	2	0	0	0
Nodo 2	4	1	3	4	5
Nodo 3	1	2	0	0	0
Nodo 4	1	2	0	0	0
Nodo 5	1	2	0	0	0

A los 5 nodos de la red les fue precargadas las 3 topologías seleccionadas, así como la posibilidad de ser Nodo Origen, Router o Nodo Destino con los siguientes algoritmos.

#### Algoritmo Nodo Origen

- 1.- Determinar Nodo Origen y Nodo Destino.
- 2.- Determinar tipo de topología.
- 3.- Determinar Vector Nodo Origen (VNO) y Vector Nodo Destino (VND).
- 4.- Comparar VNO con VND.
- 5.- Si no hay igualdad se determina el siguiente salto como nodo origen y vuelve a comparar.
- 6.- Se obtiene la ruta de nodo origen a nodo destino.
- 7.- Se construye trama con la ruta.
- 8.- Se envía trama al módulo XBee.
- 9.- Se espera respuesta del módulo XBee y confirmación.
- 10.- De no haber confirmación se reenvía trama al módulo XBee.

#### Algoritmo Router o Nodo Destino

- 1.- Detecta Trama.
- 2.- Recibe Trama del módulo XBee.
- 3.- Obtiene los datos de la trama.
- 4.- Analiza si es el Nodo Destino o es necesario retransmitir los datos.
- 5.- **If** Es el Nodo Destino. **Then**
- 6.- Enciende Led Nodo Destino.
- 7.- **Else** Modifica el índice de saltos.
- 8.- Enciende Led Nodo Router.
- 9.- Se construye trama con la ruta modificada.
- 10.- Se envía trama al módulo XBee.
- 11.- Se espera respuesta del módulo XBee y confirmación.

12.- De no haber confirmación se reenvía trama al módulo XBee.

Por medio del software Hercules se realizó comunicación por USART hacia el Nodo 1 configurándose como Nodo Origen y asignándole el Nodo 5 como Nodo Destino, en la Figura 7.33 se muestra la comunicación por el software Hercules.



Figura 7.33: Software Hercules.

En la Figura 7.34 se muestra la conexión del nodo1.



Figura 7.34: Nodo Origen.

Se realizaron pruebas manteniendo constante el Nodo Origen y Nodo destino y alterando entre las 3 diferentes topologías, en el Nodo Origen se le asigno la trama 151, el primer dígito representa el inicio de la trama de órdenes, el segundo dígito representa el Nodo Origen, el tercer dígito representa el Nodo Destino, el cuarto dígito representa la topología que se usara y el último dígito representa el fin de la trama de órdenes, donde en la implementación el Led Rojo determina los Routers y el Led Verde determina el Nodo Destino.

Prueba 1: En la Figura 7.35 se muestra la ruta obtenida por el enrutamiento, con nodo origen 1, nodo destino 5 y utilizando la topología 1, en la Figura 7.36 se observa que la red implementada sigue la ruta determinada por la topología 1.

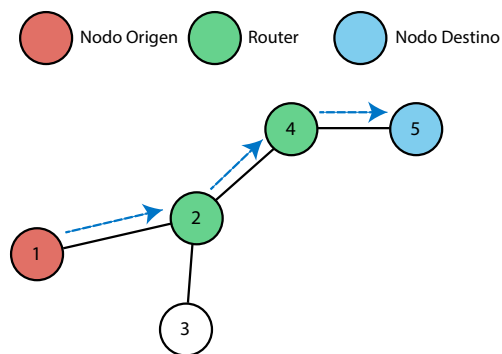


Figura 7.35: Topología1.

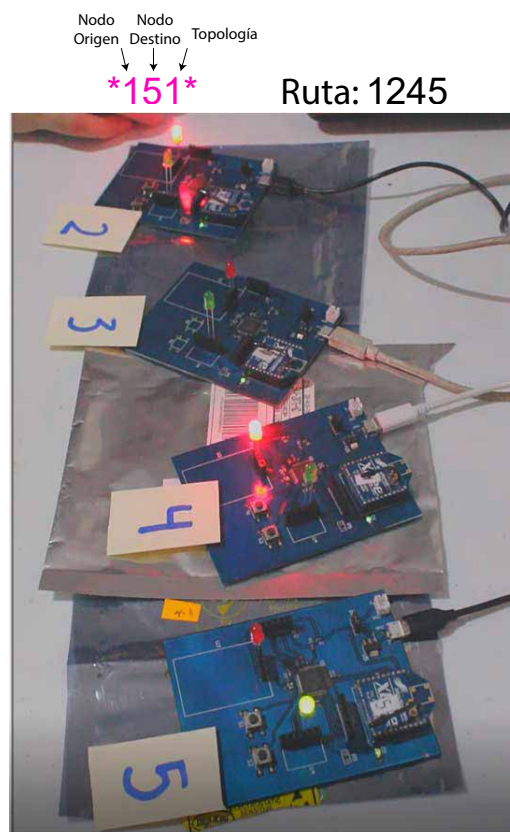


Figura 7.36: Prueba con Topología1.

Prueba 2: En la Figura 7.37 se muestra la ruta obtenida por el enrutamiento, con nodo origen 1, nodo destino 5 y utilizando la topología 2, en la Figura 7.38 se observa que la red implementada sigue la ruta determinada por la topología 2.

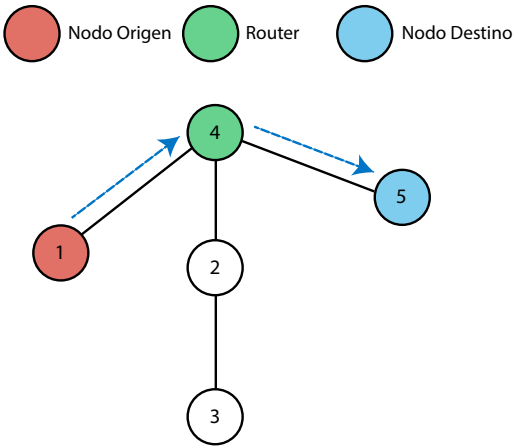


Figura 7.37: Topología2.

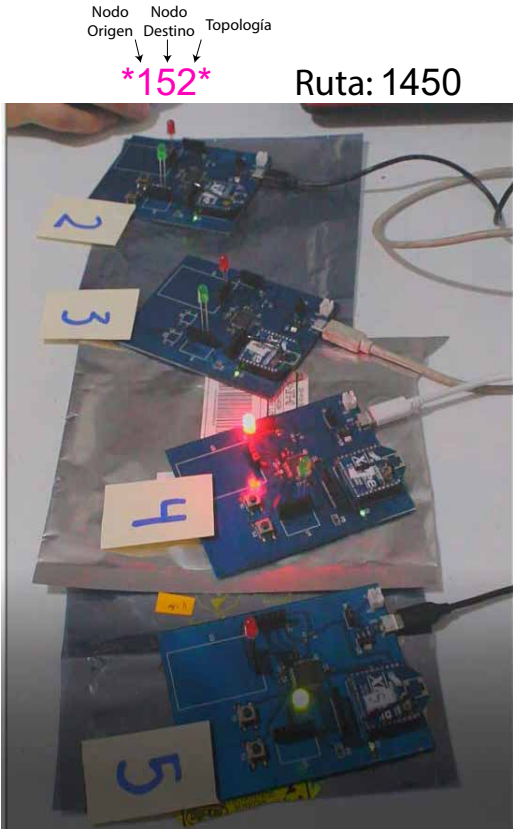


Figura 7.38: Prueba con Topología2.

Prueba 3: En la Figura 7.39 se muestra la ruta obtenida por el enrutamiento, con nodo origen 1, nodo destino 5 y utilizando la topología 3, en la Figura 7.40 se observa que la red implementada sigue la ruta determinada por la topología 3.

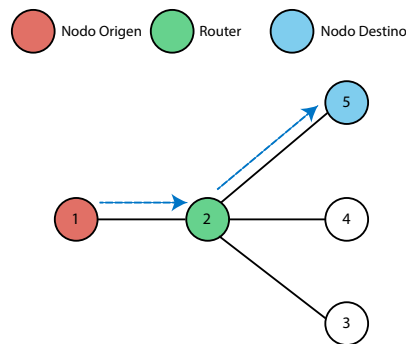


Figura 7.39: Topología3.

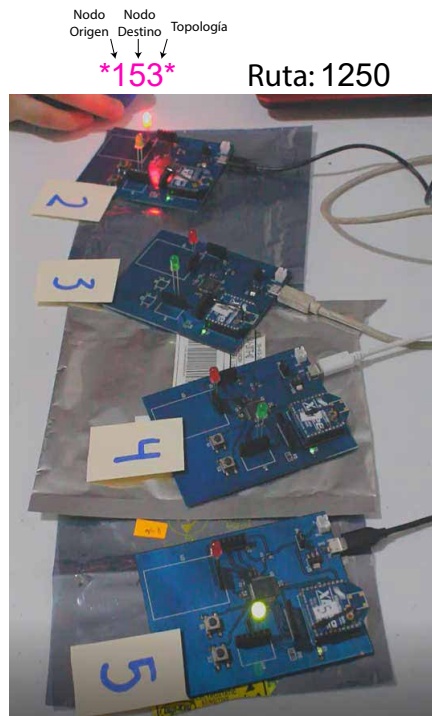


Figura 7.40: Prueba con Topología3.

Con los resultados obtenidos en Fig.7.36, Fig.7.38 y Fig.7.40 se puede observar que las 5 tarjetas PCB construidas cumplen su funcionamiento al crear una red de comunicación de 5 nodos, al mantener fijo el Nodo Origen y Nodo Destino y solo variar la topología permite apreciar las diferentes rutas que siguen para llegar al nodo destino, el enrutamiento es ejecutado aun cuando todos los nodos se pueden ver entre ellos, se sigue la ruta obtenida por la topología seleccionada y alcanza el Nodo Destino, al no tener módulos GPS, se procedió a emular el funcionamiento y el movimiento de los nodos con los escenarios obtenidos por la plataforma de simulación creada.

# Conclusiones

A lo largo de este trabajo se diseñó e implementó una red de comunicaciones para evaluar el funcionamiento del enrutamiento propuesto. Como resultado final, se obtuvo una plataforma de simulación y una red de comunicación formada por 5 nodos. La plataforma de simulación está basada en el software MATLAB, en donde es posible realizar algoritmos que simulen el comportamiento del medio. Con el análisis realizado en el capítulo 1 y 2, permitió seleccionar el protocolo de comunicación ZigBee, debido a que genera redes de comunicación de topología Malla tolera realizar enrutamientos, además con el análisis del protocolo ZigBee se caracterizó el comportamiento de la capa física y acceso al medio, con ello la simulación contempla el retardo por transmisión y colisiones de transmisiones. Con el análisis del capítulo 5 y capítulo 7, permitió establecer la métrica del enrutamiento propuesto al tener en cuenta los criterios de evaluación y requisitos necesarios del enrutamiento, además de conocer las características de módulos XBee, los cuales toman en consideración como métrica el RSSI. En base a los resultados obtenidos de la simulación se puede concluir que el enrutamiento geográfico propuesto de este trabajo garantiza una ruta desde un nodo de origen a un nodo de destino que se encuentre dentro de la red; mediante el algoritmo de Kruskal, se eligen los enlaces con mejor calidad para interconectar todos los nodos de la red, a diferencia de los enrutamientos geográficos por distancia que no tienen en cuenta la calidad del enlace, este enrutamiento puede generar mayor número de saltos. Sin embargo, al optar por los enlaces de mayor calidad se busca evitar los enlaces con baja probabilidad de transmisión y retransmisiones permitiendo reducir el retraso en la transmisión. Por lo tanto, mejora el rendimiento de la red sin necesidad de modificar su infraestructura, con solo modificar su criterio de enrutamiento logra reducir el retardo de transmisión y mejorar el rendimiento de la red. El criterio propuesto para relacionar la calidad del enlace por medio del RSSI y la distancia entre los nodos permite conocer con mayor aproximación la calidad del enlace a diferencia de tomar como criterio solo el RSSI. Con los resultados obtenidos en la implementación se puede observar que las 5 tarjetas PCB construidas cumplen su funcionamiento al crear una red de comunicación de 5 nodos, al mantener fijo el Nodo Origen y Nodo Destino y solo variar la topología permite apreciar las diferentes rutas que siguen para llegar al nodo destino, el enrutamiento es ejecutado aun cuando todos los nodos se pueden ver entre ellos, se sigue la ruta obtenida por la topología seleccionada y alcanza el Nodo Destino, al no tener módulos GPS, se procedió a emular el funcionamiento y el movimiento de los nodos con los escenarios obtenidos por la plataforma de simulación creada. Al probar que el enrutamiento propuesto logra disminuir el retardo en redes de comunicación, esto da pie a lograr aumentar el rendimiento de redes de comunicación sin necesidad de modificar su infraestructura, permitiendo emigrarlo a cualquier red de comunicación donde los nodos contemplen módulos GPS, que gracias al avance tecnológico la mayoría de los dispositivos electrónicos actuales tienen integrado uno.

# Apéndice A

## Congresos

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, se realizaron dos artículos para presentación en congresos internacionales y un artículo para presentación en congreso nacional. Los tres fueron aceptados y presentados.

- Artículo 1. Evaluación del desempeño de una estrategia de enrutamiento, publicado en el 2019 Congreso Internacional de Investigación de Academia Journals, en Puebla, México. Del 15 al 16 de agosto de 2019. ISSN: 1946-5351 Vol. 11, No 6, 2019 online.
- Artículo 2. On the Monte Carlo Simulation to Evaluate the GPSR performance, publicado en el 2019 Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET, organizado en co-patrocinio técnico por la Sección Morelos del Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica IEEE-Sección Morelos, en Cuernavaca, Morelos, México. Del 2 al 4 de octubre de 2019. ISBN: 978-607-95255-9-0.
- Artículo 3. Analysis of the Performance of a Network of Unmanned Vehicles Considering Quality Criteria, publicado en el 2019 Congreso Nacional de Control Automático, en Puebla, México. Del 23 al 25 de octubre del 2019. ISBN: En espera.

# Apéndice B

## Estancia

Se realizó una estancia de investigación en Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV) Ciudad de México, México. En un periodo con duración de tres meses (1 de abril de 2019 al 30 de junio de 2019) con el proyecto Implementación de la propuesta enrutamiento, bajo la supervisión Dr. Domingo Lara Rodríguez, Investigador de la Sección de Comunicaciones. Esta estancia me sirvió para el diseño y construcción de las 5 tarjetas PCB necesarias para realizar una red de comunicaciones.

# Bibliografía

- [1] M. Castillejo Erviti, “Agricultura de precisión mediante redes inalámbricas de sensores,” 09 2013, eSCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN.
- [2] C. L. Arancibia and C. C. Vasquez, “Estandar de comunicacion inalambrica bluetooth,” 07 2012, uNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA.
- [3] D. d. S. R. Carlos Alberto Ortega Huembes and L. E. U. Sequeira, “Zigbee: El nuevo estandar global para la domotica e inmotica,” 07 2008, universidad Nacional de Ingenieria Facultad de Electrotecnia y Computacion.
- [4] S. Buettrich and A. E. Pascual, “Topología e infraestructura básica de redes inalámbricas,” 07 2007.
- [5] J. SALAZAR, “Redes inalámbricas,” tECHpedia.
- [6] E. M. T. y Raül V. Lerma-Blasco, “Despliegue de redes inalámbricas,” the MCGRAW HILL Companies.
- [7] U-Blox, “u-blox gnss module overview,” <https://www.u-blox.com/en>.
- [8] G-TOP, “Globaltop gnss product comparison table,” <http://gpsworld.com/tag/globaltop/>.
- [9] Linx, “Gps and gnss module overview guide.”
- [10] U-Blox, “High precision gnss, adr/udr and timing modules.”
- [11] U. Blox, “Eva-m8 series,” <https://www.u-blox.com/en>.
- [12] P. v. d. V. M. J. H. J. N. T. N. Michael Johnson, Michael Healy and E. Lewis, “A comparative review of wireless sensor network mote technologies,” department of Electronic and Computer Engineering, University of Limerick, Ireland.
- [13] M. S. Sachin Gajjar, Nilav Choksi and K. Dasgupta, “Design, development and testing of wireless sensor network mote.”
- [14] T. V. S. Ram Prasad Narayanan and V. V. Vineeth, “Survey on motes used in wireless sensor networks: Performance and parametric analysis,” 04 2016.
- [15] M. A. M. S. B. F. Karray, M. W. Jmal and A. M. Obeid, “A review on wireless sensor node architectures,” international Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN).

- [16] S. R. N. S. Mridula Maurya, "Current wireless sensor nodes (motes): Performance metrics and constraints," international Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE).
- [17] T. INSTRUMENTS, "Cc2420 2.4 ghz ieee 802.15.4 zigbee ready rf transceiver," <http://www.ti.com/>.
- [18] C. P. from TEXAS INSTRUMENTS, "Cc2500 low cost low power 2.4 ghz rf transceiver," <http://www.ti.com/>.
- [19] T. INSTRUMENTS, "Cc2480 z accel 2.4 ghz zigbee processor," <http://www.ti.com/>.
- [20] ATMEL, "Atmel rf230 datasheet," <http://www.microchip.com/>.
- [21] D. I. Inc., "Xbee/xbee-pro rf modules," <http://www.zigbee.org/>.
- [22] ATMEL, "Atmega2801 datasheet," <http://www.microchip.com/>.
- [23] A. ATMEGA, "Atmega2801 datasheet," <http://www.microchip.com/>.
- [24] T. INSTRUMENTS, "Msp430f1611 datasheet."
- [25] T. I., "Msp430f2274 datasheet," <http://www.ti.com/>.
- [26] MICROCHIP, "Pic24fj256ga406 datasheet," <http://www.microchip.com/>.
- [27] S. K. Rajat Talak and E. Modiano, "Minimizing age-of-information in multi-hop wireless networks," 10 2017.
- [28] B. C. M. I. Jiyang Wu, Member and M. Wang, "Improving multipath video transmission with raptor codes in heterogeneous wireless networks," 02 2018.
- [29] S. A. Hosseini and S. S. Panwar, "Restless streaming bandits: Scheduling scalable video in wireless networks," 10 2017, department of Electrical and Computer Engineering, NYU Tandon School of Engineering.
- [30] F. X. Chao Fang and X. Jin, "A survey of information-centric wireless networks," department of Electrical and Computer Engineering, NYU Tandon School of Engineering.
- [31] C. V. J. Alonso-Zárate and L. A. E. Kartsakli, A. Cateura, "Saturation throughput analysis of a passive cluster-based medium access control protocol for ad hoc wireless networks."
- [32] R. A. I. U. R. S. W. K. Arslan Musaddiq, Yousaf Bin Zikria, "Congestion control routing using optimal channel assignment mechanism in wireless mesh network," department of Information and Communication Engineering, Yeungnam University, South Korea.
- [33] A. M. Mashraqi and T. Erlebach, "Delay and interference aware metric in multi-channel wireless mesh network."
- [34] S. M. K. M Pavan Kumar Reddy and B. R. Tamma, "Enhancing channel assignment performance in wireless mesh networks through interference mitigation functions."

- [35] W. Masri and Z. Mammeri, "Qos mapping in tdma tree based clustered wsn between accuracy, density and bandwidth," iRIT – Paul Sabatier University Toulouse, France.
- [36] M. O. Tarek Azizi, Rachid Beghdad, "Bandwidth assignment in a cluster-based wireless sensor network," proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol II.
- [37] W. M. . Z. Mammeri, "Mapping density to bandwidth in tree-based wireless sensor networks."
- [38] P. M. S.-J. L. An (Jack) Chan, Kai Zeng and S. Banerjee, "Metrics for evaluating video streaming quality in lossy ieee 802.11 wireless networks," department of Computer Science, University of California, Davis, CA.
- [39] N. S. M. Altamash Sheikh and S. Afroz, "A study of quality of service in network mobility (nemo) using qualnet 7.0."
- [40] P. Z. Chunhui Feng and Q. Yang, "Quality of information maximization for wireless sensor networks with heterogeneous traffic," state Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an, Shaanxi, China.
- [41] M. A. Q. Mohd. Imran, "Evaluation study of performance comparison of topology based routing protocol; aodv and dsdv in manet," department of Computer Engineering, Zakir Hussain College of Engineering and Technology, Aligarh Muslim University, Aligarh-202002, India.
- [42] V. P. J. Shilpa M. Satre, "Qos-oriented adaptive expedient broadcast routing for hybrid wireless network," lecturer, Assistant Professor, Computer Engineering Department, Saraswati College of Engineering Kharghar Navi-Mumbai, India.
- [43] X. Tai, H. Sun, Q. Guo, and Z. Li, "A distributed power routing method between regional markets based on bellman-ford algorithm," 2017, 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2).
- [44] A. Sharma and R. Kumar, "Performance comparison and detailed study of aodv, dsdv, dsr, tora and olsr routing protocols in ad hoc networks."
- [45] M. R. Teddy Mantoro, "Performance analysis of aodv and dsdv using sumo, move and ns2."
- [46] P. N. Ashish Nanda and X. He, "Geo-location oriented routing protocol for smart dynamic mesh network," school of Computing and Communications, Faculty of Engineering and IT University of Technology, Sydney, Australia.
- [47] P. Montanana, *Redes de comunicaciones*. RedIRIS, 2009.
- [48] G. S. P. BRAGANZA, "Estudio tecnico comparativo de redes lan alamblicas e inalamblicas," 11 2009, pONTIFICA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR, FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA DE SISTEMAS.
- [49] N. Kaur and S. Monga, "Comparisons of wired and wireless networks: A review," 06 2014, kaur et al., International Journal of Advanced Engineering Technology.

- [50] J. J. A. Horno, “Redes de area local inalambricas: Diseno de la wlan de wheelers lane technology college,” 03 2008, uNIVERSIDAD DE SEVILLA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS.
- [51] A. de Innovación y Desarrollo de Andalucía IDEA, “Vigilancia tecnológica estudio sectorial tecnologías inalámbricas,” tECHpedia.
- [52] J. M. Moreno and D. R. Fernández, “Informe tecnico: Protocolo zigbee (ieee 802.15.4),” 06 2007, uNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA.
- [53] J. L. C. Olivares, “Modelo de cobertura para redes inalambricas de interiores,” 05 2009, uNIVERSIDAD DE SEVILLA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS.
- [54] E. T. Anis Koubaa, Mário Alves, “Caracterización del consumo en redes zigbee 802.15.4.”
- [55] G. C. Garrido, “Ieee 802.15.4 for wireless sensor networks: A technical overview,” version: 1.0.
- [56] M. Dipobagio, “An overview on ad hoc networks,” institute of Computer Science (ICS), Freie Universitat Berlin.
- [57] M. P. Padmashree S., “Survey of performance metrics in mobile ad hoc networks,” department of TCE, Don Bosco Institute of Technology, Department of ECE AMC Engineering College.
- [58] T. P. G. G. Bayona, “Redes mesh,” universidad de Almería.
- [59] I. F. AKYILDIZ, “A survey on wireless mesh networks,” 09 2005, gEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- [60] J.-Z. Sun, “Mobile ad hoc networking: An essential technology for pervasive computing,” university of Oulu, Finland.
- [61] L. B. O. Marcelo Zapella and R. Hunt, “Gps and glonass constellations for better time synchronizing realibility.”
- [62] R. DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA, “Sistema de posicionamiento global - gps,” 03 2007.
- [63] H. L. B. Hofmann-Wellenhof and J. Collins, *Global Positioning System Theory and Practice*. Springer-Verlag Wien GmbH.
- [64] G. Xu, *GPS Theory, Algorithms and Applications*. Springer.
- [65] (07 de agosto del 2017) [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov).
- [66] A. S. Grange, “Geolocalizacion,” universidad Catolica Nuestra Senora de la Asuncion Facultad de Ciencias y Tecnologia.
- [67] T. G. Rodríguez and M. E. R. Bernabeu, “Sistema de posicionamiento global (gps).”
- [68] A. L. S. Aransay, “Aplicación de las redes de sensores en el entorno vehicular,” universidad de Vigo: Doctorado en Ingeniería Telemática.

- [69] A. Z. L. C. Chio Cho Nayibe, Tibaduiza Burgos Diego Alexander and C. O. L. Miguel, “Redes de sensores inalámbricos.”
- [70] E. J. G. M. P. D., “Diseno de una red de sensores inalámbricos (wsn) para monitorear parametros relacionados con la agricultura,” facultad de ingeniería eléctrica y electrónica.
- [71] H. C. Priyanka Rawat, Kamal Deep Singh and J. M. Bonnin, “Wireless sensor networks: recent developments and potential synergies,” 04 2013, the Journal of Supercomputing.
- [72] S. J. W. Manisha Bhende and A. Utpat, “A quick survey on wireless sensor networks,” 2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies.
- [73] C. R. A. Victor, A. Khader and A. Mehta, “Build an iee 802.15.4 wireless sensor network for emergency response notification for indoor situations,” 2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies.
- [74] G.R.Sakthidharan and S.Chitra, “A survey on wireless sensor network : An application perspective,” international Conference on Computer Communication and Informatics.
- [75] Crossbow, “Iris datasheet.”
- [76] —, “Mica2 datasheet.”
- [77] C. Technology, “Micaz datasheet.”
- [78] Libelium, “Waspote datasheet,” <http://www.libelium.com/waspote>.
- [79] Shimmer, “Shimmer3 datasheet,” [www.shimmersensing.com](http://www.shimmersensing.com).
- [80] T. INSTRUMENTS, “Ez430 rf2480 demonstration kit,” <http://www.ti.com/>.
- [81] MEMSIC, “Telosb datasheet,” <https://www.memsic.com/>.
- [82] C. P. from TEXAS INSTRUMENTS, “Cc1000 single chip very low power rf transceiver,” <http://www.ti.com/>.
- [83] M. A. E. T. Anis Koubaa, André Cunha, “Tdb: a time division beacon scheduling mechanism for zigbee cluster-tree wireless sensor networks,” 10 2008.
- [84] Y. S. I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci., “Wireless sensor networks: a survey,” broadband and Wireless Networking Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology,.
- [85] D. B. Abdulah Aksamovic, Muris Hebibovic, “Forest fire early detection system design utilising the wsn simulator,” university of Sarajevo, Faculty of Electrical Engineering, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.
- [86] A. N. H. I. M. Y. Ibrahim Mat, Mohamed Rawidean Mohd Kassim, “Iot in precision agriculture applications using wireless moisture sensor network,” mIMOS, Ministry of Science, Technology and Innovation.
- [87] P. A. B. Balaji Bhanu, Mohammed Ali Hussain, “Monitoring of soil parameters for effective irrigation using wireless sensor networks.”

- [88] A. S. M. S. K. B. Supriyo, S.S.Hidayat, "Design of real-time gas monitoring system based-on wireless sensor networks for merapi volcano," i st International Conference on Infonnation Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE).
- [89] P. Miss.Pooja Krishnath Patil, "Structural health monitoring system using wsn for bridges," international Conference on Intelligent Computing and Control Systems.
- [90] K. J. Avinash More, Sharad Wagh, "A test-bed for habitat monitoring system using wi-fi in wireless sensor networks."
- [91] M. Renom, "Principios básicos de las mediciones atmosféricas," fac. de Ciencias-UdelaR.
- [92] G. O. System, "Gos," <http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html>.
- [93] V. S. Suganya E, "Smart vehicle monitoring system for air pollution detection using wsn," international Conference on Communication and Signal Processing, April 6-8, 2016, India.
- [94] S. S. Andre Braga Reis and O. K. Tonguz, "Smarter cities with parked cars as road-side units," iEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS.
- [95] I. Mohamed Masoud, Student Member and I. Saeid Belkasim, Member, "Wsn-ebp: A novel special purpose protocol for emergency vehicle preemption systems."
- [96] K. S. G. V. A. D. F. O. S. L. Glenn Daneels, Esteban Municio and J. Famaey, "Real-time data dissemination and analytics platform for challenging iot environments," 2017 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS).
- [97] M. V. Sudhakar Pandey, Deepika Agrawal, "Improved mrspin for health monitoring."
- [98] P. C. A. C. Pratik Waghmare, Mayur Chandgude, "Survey on: Home automation systems," international Conference on Trends in Electronics and Informatics.
- [99] H. van der Westhuizen G.P. Hancke and T. Ramotsoela, "Smartphone controlled wsn for a smart home," department of Electrical, Electronic and Computer Engineering University of Pretoria.
- [100] W. Stallings, "Comunicaciones y redes de computadores," 6 Edición.
- [101] H. P. A. Surendra H. Raut, "Proactive and reactive routing protocols in multihop mobile ad hoc network."
- [102] P.Parvathi, "Comparative analysis of cbrp, aodv, dsdv routing protocols in mobile ad-hoc networks," fac. de Ciencias-UdelaR.
- [103] Y. Y. Yujun Li and X. Lu, "Rules of designing routing metrics for greedy,face, and combined greedy-face routing," iEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, VOL. 9, NO. 4, APRIL 2010.
- [104] L. P. Gewali and U. Amatya, "Node filtering and face routing for sensor network," 2013 10th International Conference on Information Technology: New Generations.

- [105] H. T. K. Brad Karp, “Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks,” harvard University.
- [106] H. S. Evangelos Kranakis and J. Urrutia., “Compass routing on geometric networks.” in Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry (CCCG’99), pages 51–54, Vancouver, August 1999.
- [107] Y. Z. Fabian Kuhn, Roger Wattenhofer and A. Zollinger, “Geometric ad-hoc routing: Of theory and practice.” in Proceedings of the 22nd ACM International Symposium on the Principles of Distributed Computing (PODC).
- [108] I. K. C. S. F. I. J. S. Fraser Cadger, Member and S. Moffett, “A survey of geographical routing in wireless ad-hoc networks,” IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS and TUTORIALS, VOL. 15, NO. 2, SECOND QUARTER 2013.
- [109] W. Y. C. Y. C. D. Sui Tao, Liu Xiuzhi, “A matlab simulation of the kruskal algorithm for erecting communication network.”
- [110] M. S. Sachin Gajjar, Nilav Choksi and K. Dasgupta, “Comparative analysis of wireless sensor network motes,” international Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN).
- [111] s. D. V.P Jaya Chitra, M.R Swinalatha, “An efficient delay aware multipath gps routing protocol for wireless sensor networks,” mIT Campus,Anna University.
- [112] A. L. Qing Yang, “Gpsfr: Gps-free geographic routing protocol for intelligent vehicles,” mIT Campus,Anna University.
- [113] C. C. Heeyoung JUNG, “Sgdr: A simple gps-based disrupt-tolerant routing for vehicular networks,” mIT Campus,Anna University.
- [114] I. S. Prosenjit Bose, Pat Morin and J. Urrutia, “Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks.” n Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications (DIAL M 99), pages 48–55, Seattle, WA, August 1999.
- [115] W. Y. C. Y. C. D. Sui Tao, Liu Xiuzhi, “A matlab simulation of the kruskal algorithm for erecting communication network.”
- [116] DIGI, “Xbee/xbee-pro s1 802.15.4 (legacy).”

# Evaluación del desempeño de una estrategia de enrutamiento

José Luis Sánchez Chacón<sup>1</sup>, Dra. J. Castañeda-Camacho<sup>2</sup>,  
M.I. José Miguel Hurtado Madrid<sup>3</sup> y Dra. L-Cortez<sup>4</sup>

**Resumen**— Este artículo propone un protocolo de enrutamiento geográfico que permita mejorar el rendimiento de una red. Este enrutamiento obtiene la distancia entre nodos por medio de un dispositivo GPS, se usa distancia como criterio para determinar la relación señal a ruido (signal-to-interference ratio, SIR) del enlace y asignar un costo de este, esta información se compila mediante un sumidero de nodos de la red y un algoritmo de kruskal genera el árbol mínimo de la red. La simulación realizada en la plataforma Matlab se desarrolla teniendo en cuenta el comportamiento de la capa física y la capa de enlace de datos utilizando CSMA / CA del estándar 802.15.4 y proporciona rendimiento de la red al evaluar 2 transmisiones con diferentes nodos de origen. Los resultados muestran que el algoritmo propuesto elimina los bucles, mejora el rendimiento de la red y garantiza la entrega de paquetes a los nodos dentro de la red.

**Palabras clave**—Enrutamiento, Calidad, GPS, CSMA/CA.

## Introducción

El enrutamiento geográfico, también denominado enrutamiento basado en la posición, le permite encontrar rutas desde un nodo de origen (O) a un nodo de destino (D) tomando como criterio la distancia que existe entre los nodos de la red [8], las rutas geográficas principales son Greedy Forward Routing and Face Routing (Yang, and Xianliang 2010), (Brad Karp 2000), (Gewali and Umang 2013).

Se observa en el enrutamiento mencionado anteriormente y otras variantes como (Zhang and Aaron 2003), (Stojmenovic, and Jorge 2006), (Singh, and Jorge 1999), que el enrutamiento comienza con el conocimiento de las coordenadas de D, sin embargo, en realidad, es necesario realizar ciertas tareas para obtener estos datos, como por ejemplo en (Nanda and Xiangjian 2016) la red decreta un nodo como nodo sumidero, este nodo es responsable de obtener las coordenadas físicas de todos los nodos de la red, una opción es realizar una inundación de la red. (Zhang and Aaron 2003).

## Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 se define en la capa física y la capa de enlace de datos en redes inalámbricas de área personal con velocidades de transmisión de datos bajas (Low-Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN) (Anis Koubâa 2005).

La capa física es responsable de la transmisión y recepción de datos utilizando un canal de radio específico y de acuerdo con una técnica de modulación y difusión específica.

IEEE 802.15.4 ofrece tres bandas de frecuencia operativas: 2.4 GHz, 915 MHz y 868 MHz. El protocolo también permite la selección dinámica de canales, una función de exploración que atraviesa una lista de canales compatibles para una baliza, detección de la potencia del receptor y cambio de canal.

La subcapa MAC del protocolo IEEE 802.15.4 proporciona una interfaz entre la capa física y los protocolos de capa superior de LR-WPANs.

La subcapa MAC del protocolo IEEE 802.15.4 utiliza CSMA / CA (Carrier-sense Multiple Access / Containment Avoidance) como un protocolo de acceso de canal, el soporte de períodos sin contienda y basados en la contienda, se caracteriza por adaptarse. Los requisitos de LR-WPAN, por ejemplo, elimina el mecanismo RTS / CTS (utilizado en IEEE 802.11) para reducir la probabilidad de colisiones, debido a que es menos probable que ocurran colisiones en redes de baja velocidad.

La subcapa MAC del protocolo IEEE 802.15.4 admite dos modos de operación que pueden ser seleccionados por el coordinador con ranuras y sin ranuras, en este trabajo se usó el modo sin ranuras porque el enfoque es una red descentralizada.

<sup>1</sup> José Luis Sánchez Chacón es alumno de posgrado de Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

[chacon\\_wheele03@hotmail.com](mailto:chacon_wheele03@hotmail.com) (autor correspondiente)

<sup>2</sup> La Dra. J. Castañeda-Camacho es Académica de Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

[josefinacastaneda@yahoo.com.mx](mailto:josefinacastaneda@yahoo.com.mx)

<sup>3</sup> El M.I. José Miguel Hurtado Madrid es Académico de Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

[miguel.hurtado@correo.buap.mx](mailto:miguel.hurtado@correo.buap.mx)

<sup>4</sup> La Lic. Dra. L-Cortez es Académica de Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

[lcortez@ece.buap.mx](mailto:lcortez@ece.buap.mx)

# On the Monte Carlo Simulation to Evaluate the GPSR performance.

José Luis Sánchez Chacón<sup>1,a</sup>, Dra. J. Castañeda-Camacho<sup>1,b</sup>, M.I. José Miguel Hurtado Madrid<sup>2,c</sup>, Dra. L-Cortez<sup>1,d</sup>,  
Marcelino Luis Guadalupe<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Faculty of Electronics Science.

<sup>2</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Faculty of Computer Science..

<sup>a</sup> *chacon\_wheelg03@hotmail.com*, <sup>b</sup> *josefinacastaneda@yahoo.com.mx*, <sup>c</sup> *miguel.hurtado@correo.buap.mx*, <sup>d</sup> *lcortez@ece.buap.mx*, <sup>e</sup> *marcelino.luis@alumno.buap.mx*

**Abstract**— Geographic routing protocols for wireless sensor networks have received more attention in recent years, the GPSR algorithm is a geographic routing protocol and is the combination of Greedy Forward Routing and Face Routing which are the pillars of geographical routing.

This article proposes a platform to obtain the performance of the geographic routing protocol that uses distance as a criterion for wireless communication networks. The platform allows to generate N nodes and obtain their physical coordinates of each one.

Simulation performed on the Matlab platform is developed considering as the physical layer behavior and the data link layer using CSMA / CA of the 802.15.4 standard and provides network performance by evaluating 2 transmissions with different source nodes.

*Index Terms* -. Geographic routing, distance, GPSR, CSMA/CA.

## 1. Introduction

Geographical routing, also called position-based routing, allows you to find routes from a source node (S) to a destination node (D) taking as criterion the distance that exists between the nodes of the network, the main geographical routes are Greedy Forward Routing and Face Routing [1].

### A. IEEE Standard 802.15.4.

The IEEE 802.15.4 standard is defined in the Physical layer and the data link layer in personal area wireless networks with low data transmission rates (Low-Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN). The physical layer is responsible for the transmission and reception of data using a specific radio channel and according to a specific modulation and diffusion technique. IEEE 802.15.4 offers three operational frequency bands: 2.4 GHz, 915 MHz and 868 MHz. The protocol also allows dynamic channel selection, a scan function that traverses a list of compatible channels for a beacon, detection of receiver power, indication of link quality and channel change. The MAC sublayer of the IEEE 802.15.4 protocol provides an interface between the physical layer and the upper layer protocols of LR-WPANs. The MAC sublayer of the IEEE 802.15.4 protocol uses CSMA / CA (Multiple access by carrier detection / containment avoidance) as a channel access protocol, the support of contention-free and contention-based periods, is characterized by adapting to the LR-WPAN requirements since, for example, it eliminates the RTS / CTS mechanism (used in IEEE 802.11) to reduce the probability of collisions, due to collisions are less likely to occur in low-speed networks. The MAC sublayer of the IEE 802.15.4 protocol supports two operating modes that can be selected by the coordinator that are slotted and not slotted, in this work the non-slotted mode was used because the approach is a decentralized network.

The Fig. 1 shows a flow chart that describes the working mechanism of the CSMA / CA Unslotted.

The Unslotted CSMA/CA mechanism uses two variables to schedule the access to the medium:

- NB is the number of times the CSMA/CA algorithm was required to back off while attempting the access to the current channel. This value is initialized to zero before each new transmission attempt.
- BE is the back off exponent, which is related to how many back off period a device must wait before attempting to assess the channel activity.

The Unslotted CSMA / CA can be summarized in five steps:

- Step 1: Initialization of NB and Be, NB is initialized to 0 and the back off period exponent BE is set to the minimum value of 3. After initialization, the algorithm locates the limit of the next back off period.
- Step 2: Random wait delay to avoid collisions: the algorithm tries to avoid the collision by waiting for a given delay generated randomly in the range of periods  $[0, 2^{BE-1}]$  back off periods.
- Step 3: Clear Channel Assessment (CCA). The CCA should start at a limit of a back off period just after the expiration of the delay timer. If the channel is detected in a busy state, the algorithm goes to step 4, otherwise, that is, the channel is inactive, the algorithm goes to step 5.
- Step 4: Busy channel. if the channel is considered busy, the values of NB and BE are increased by one. However, BE can not exceed MaxBE, which is a constant defined in the standard, and with a default value equal to 5. If the number of retries exceeds *macMaxCSMABackoffs*, whose default value is 5, the algorithm ends with a failure state of access to the channel, otherwise, that is, the number of retries is less than or equal to *macMaxCSMABackoffs*, the algorithm returns to step 2.
- Step 5: The MAC sublayer immediately begins transmitting its current frame just after the CCA procedure evaluates that the channel is inactive.

# Analysis of the Performance of a Network of Unmanned Vehicles Considering Quality Criteria.

José Luis Sánchez Chacón\* Dra. J. Castañeda-Camacho\*\*  
Dr. José Fermi Guerrero-Castellanos\*\*\* Dra. L-Cortez\*\*\*\*  
M.I. José Miguel Hurtado Madrid†

\* *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Faculty of Electronics Science, (e-mail: chacon\_wheelg03@hotmail.com).*

\*\* *(e-mail: josefina.castaneda@correo.buap.mx)*

\*\*\* *(e-mail: fermi.guerrero@correo.buap.mx)*

\*\*\*\* *(e-mail: lcortez@ece.buap.mx)*

† *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Faculty of Computer Science, (e-mail: miguel.hurtado@correo.buap.mx)*

---

**Abstract:** Geographic routing protocols have received more attention in recent years, the GPSR algorithm is a geographic routing protocol and is the combination of forward greedy routing and face routing, which are the pillars of geographic routing.

This article proposes a geographical routing protocol for communication between unmanned vehicles named nodes to improve the performance of the network. This proposal obtains the distance between nodes by means of a GPS device distance is used as a criterion to determine the quality of the link. In the same process a control signal is obtained to validate the stability of the node, using the signal of control and quality of the link to assign a cost of this, this information is compiled by means of a sump of nodes of the network in a way that kruskal algorithm generates the minimum spanning tree of the network. The simulation carried out on the Matlab platform is developed taking into account the behavior of the physical layer and the data link layer using CSMA / CA of the 802.15.4 standard and providing network performance when evaluating 2 transmissions with different origin nodes. The results show that the proposed algorithm eliminates loops, improves the performance of the network and guarantees the delivery of packets to nodes within the network.

*Keywords:* Geographic routing, performance, quality of the link, Kruskal algorithm, control signal.

---

## 1. INTRODUCTION

A routing protocol is needed when a packet needs to be transmitted through different nodes in the network. These protocols find an adequate route for delivering the packets to the correct destination (Garcia-Santiago Alejandro and Mino-Aguilar (2018)).

Geographical routing, also called position-based routing, allows you to find routes from a source node (S) to a destination node (D) taking a criterion the distance that exists between the nodes of the network. The main geographical routes are Greedy Forward Routing and Face Routing (Yujun Li, Yaling Yang, and Xianliang Lu (2010); Brad Karp, H. T. Kung (2000); Laxmi P Gewali and Umang Amatyia (2013)).

It is observed in the aforementioned routing and other variants such as (Prosenjit Bose and Urrutia (2006);

Evangelos Kranakis and Urrutia (1999); Fabian Kuhn and Zollinger (2003)), that the routing begins with the knowledge of the coordinates of destination node; however in reality it is necessary to perform certain tasks to obtain this data , as for example in (Ashish Nanda and He (2016)) the network decrees a node as a sink node, this node is responsible for obtaining the physical coordinates of all the nodes of the network, one option is to broadcast the network.

### 1.1 IEEE Standard 802.15.4

The IEEE 802.15.4 standard is defined in the Physical layer and the data link layer in personal area wireless networks with low data transmission rates (Low-Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN) (Anis Koubâa (2005)).