

ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE TELECOMUNICACIONES PARA UNA
MICRORRED AISLADA EN UN ENTORNO RURAL

DAVID RICARDO RODRÍGUEZ POVEDA 20101005089
JORGE ENRIQUE MÉNDEZ CASTILLO 20101005018



UNIVERSIDA DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad de Ingeniería
Bogotá D.C.
2016

ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE TELECOMUNICACIONES PARA UNA
MICRORRED AISLADA EN UN ENTORNO RURAL

DAVID RICARDO RODRÍGUEZ POVEDA 20101005089

JORGE ENRIQUE MÉNDEZ CASTILLO 20101005018

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico

Director

Ing. JULIÁN ROLANDO CAMARGO LÓPEZ

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Proyecto Curricular de Ingeniería Electrónica
Bogotá D.C.
2016

Agradecimientos

A nuestras familias por su continuo apoyo.

A los profesores por su guía durante nuestra formación.

A nuestros amigos por compartir esta experiencia con nosotros.

Jorge y David.

Tabla de contenido

Índices de figuras -----	VI
Índices de tablas -----	IX
Capítulo 1. Presentación-----	1
Introducción-----	1
Planteamiento del problema -----	2
Justificación-----	3
Objetivos -----	4
General -----	4
Específicos -----	4
Capítulo 2. Microrredes -----	5
2.1 Objetivo de una Microrred-----	6
2.2 Tipos y arquitecturas de las Microrredes -----	6
2.3 Sistemas que componen una Microrred -----	8
2.4 Modos de operación -----	9
2.4.1 Modo Conectado-----	9
2.4.2 Modo Aislado -----	9
2.5 Requisitos de una MG-----	10
2.6 Distribución geográfica de las MG-----	10
Capítulo 3. Sistema de telecomunicaciones para una Microrred-----	11
3.1 Topologías del sistema de comunicaciones -----	11
3.1.1 Topología en estrella -----	11
3.1.2 Topología en árbol-----	12
3.2 Requisitos del sistema de telecomunicaciones para la microrred -----	13
3.3 Medios de transmisión -----	14
3.3.1 Medios de transmisión alambrados-----	15
3.3.2 Medios de transmisión inalámbricos -----	16
3.4 Métricas de rendimiento de la red -----	18
3.4.1 Retardo promedio (Delay)-----	18
3.4.2 Tasa media de éxito (Throughput) -----	19
3.4.3 Paquetes perdidos -----	19

3.4.4	BER (Bit Error Rate) -----	19
3.5	Tecnologías de telecomunicaciones -----	20
3.5.1	Tecnologías alámbricas -----	20
3.5.1.1	Ethernet (Estándar IEEE 802.3) -----	20
3.5.2	Tecnologías inalámbricas -----	29
3.5.2.1	ZigBee -----	29
3.5.2.2	WIFI -----	48
Capítulo 4.	Modelo del sistema de telecomunicaciones -----	69
4.1	Entorno de simulación -----	70
4.2	Datos de monitoreo de la microrred -----	71
4.3	Frecuencia de envío de paquetes -----	72
4.4	Escenario y ubicación de los nodos -----	72
4.5	Escenarios inalámbricos -----	73
4.5.1	Estándar IEEE 802.15.4 -----	73
4.5.2	Estándar IEEE 802.11 -----	76
4.5.3	Estándar IEEE 802.3 -----	80
Capítulo 5.	Resultados -----	82
5.1	Estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee) -----	82
5.1.1	Topología en estrella -----	82
5.1.2	Topología en árbol -----	86
5.2	Estándar 802.11 (WiFi) -----	90
5.2.1	Topología en estrella -----	90
5.2.1.1	Tasa de transmisión a 6Mbps -----	90
5.2.1.2	Tasa de transmisión a 54 Mbps -----	93
5.2.2	Topología en Árbol -----	96
5.2.2.1	Tasa de transmisión a 6 Mbps -----	96
5.2.2.2	Tasa de transmisión a 54 Mbps -----	100
5.3	Estándar IEEE 802.3 (Ethernet) -----	104
Capítulo 6.	Conclusiones -----	107
6.1	Trabajo futuro -----	108
Bibliografía	-----	109

Índices de figuras

Figura 1. Ejemplo de una Microrred. [12].-----	5
Figura 2. Microrred con bus en DC [18].-----	6
Figura 3. Microrred con bus AC [18].-----	7
Figura 4. Topología de una microrred con generación distribuida [14].-----	8
Figura 5. Topología en estrella [38].-----	12
Figura 6. Topología en árbol [38].-----	12
Figura 7. Formato de la trama de datos [48].-----	21
Figura 8. Algoritmo CSMA/CD. [48].-----	24
Figura 9. Algoritmo de acceso al medio Full Duplex. [48].-----	26
Figura 10. Codificación Manchester [50].-----	28
Figura 11. Arquitectura ZigBee [54].-----	30
Figura 12. Topologías ZigBee [57].-----	33
Figura 13. Transferencia de datos de un FFD a RFD o FFD a FFD a) Con tramas beacon b) Sin tramas beacon [55].-----	34
Figura 14. Transferencia de datos de un RFD a un FFD o FFD a FFD a) Con tramas beacon b) Sin tramas beacon [55].-----	34
Figura 15. Estructura general del paquete Zigbee [55].-----	35
Figura 16. Estructura de la trama de reconocimiento ACK [59].-----	36
Figura 17. Estructura de la trama Beacon [59].-----	36
Figura 18. Estructura de la trama de datos [59].-----	37
Figura 19. Estructura de la trama de comandos de la capa de enlace [59].-----	37
Figura 20. Formato del campo SFD [57].-----	38
Figura 21. Formato de los campos de la capa MAC [59].-----	39
Figura 22. Estructura del campo Frame Control [57].-----	40
Figura 23. Espaciamiento entre tramas con intercambio de mensajes ACK [59].-----	43
Figura 24. Algoritmo CSMA/CA unslotted [59].-----	45
Figura 25. Esquema de modulación a la frecuencia de 2.45 GHz [55].-----	46
Figura 26. Desfase entre las señales en fase y en cuadratura [57].-----	48
Figura 27. Formato general de la trama MAC [49].-----	49
Figura 28. Campo Frame Control [49].-----	49
Figura 29. Estructura de la trama ACK. -----	51
Figura 30. Espacios entre tramas IFS. -----	52
Figura 31. Escenario de coexistencia de tramas RTS/CTS y la configuración del NAV [49].-----	55
Figura 32. Arquitectura MAC [49].-----	56
Figura 33. Diagrama de flujo del acceso al medio [38].-----	57
Figura 34. Esquema de funcionamiento de PCF [49].-----	58
Figura 35. Ejemplo de crecimiento exponencial de la ventana de contención CW [49].-----	60

Figura 36. Procedimiento de acceso al medio CSMA/CA con backoff pseudoaleatorio.	62
Figura 37. Arquitectura de las capas MAC y física [49].	63
Figura 38. Estructura de la trama PPDU [49].	66
Figura 39. Principio de transmisión OFDM [61].	68
Figura 40. Requerimientos para la medición del desempeño del sistema de comunicaciones de la microrred [42].	70
Figura 41. Estructura general del sistema de comunicaciones con IEEE 802.15.4 en topología estrella.	75
Figura 42. Estructura general del sistema de comunicaciones con IEEE 802.15.4 en topología árbol.	76
Figura 43. Estructura general del sistema de comunicaciones con IEEE 802.11 en topología estrella.	78
Figura 44. Estructura general del sistema de comunicaciones con IEEE 802.15.4 en topología árbol.	79
Figura 45. Estructura general del sistema de comunicaciones con IEEE 802.11 en topología estrella.	81
Figura 46. Delay respecto al número de nodos para ZigBee en topología en estrella.	82
Figura 47. Número de paquetes respecto al número de nodos.	83
Figura 48. Throughput respecto al número de nodos en ZigBee topología estrella.	84
Figura 49. BER con respecto al número de nodos ZigBee topología estrella.	84
Figura 50. Cantidad de fallos respecto a la variación del número de nodos ZigBee estrella	85
Figura 51. Delay promedio respecto a la variación de nodos ZigBee Topología en árbol.	86
Figura 52 Número de paquetes transmitidos total y por ramas respecto a la variación de nodos ZigBee topología árbol.	87
Figura 53. Throughput de la red y por ramas ZigBee topología árbol.	87
Figura 54. BER respecto a la variación de los nodos para los routers ZigBee topología árbol.	88
Figura 55. BER respecto a la variación de los nodos de las ramas ZigBee topología árbol.	89
Figura 56 Número de fallos totales y por ramas ZigBee topología árbol.	89
Figura 57. Delay respecto al número de nodos para WiFi a 6Mbps.	91
Figura 58. Número de paquetes enviados respecto al número d nodos en WiFi a 6Mbps.	91
Figura 59. Throughput de la red respecto al número de nodos en WiFi a 6 Mbps.	92
Figura 60. BER respecto al número de nodos para WiFi a 6 Mbps.	92
Figura 61. Cantidad de fallos reportados respecto al número de nodos para WiFi a 6 Mbps.	93
Figura 62. Delay respecto al número de nodos para WiFien estrella a 54Mbps.	94
Figura 63. Número de paquetes enviados respecto al número de nodos para WiFi en topología en estrella a 54Mbps.	94

Figura 64. Throughput de la red respecto al número de nodos en WiFi a 54 Mbps. -	95
Figura 65. BER respecto al número de nodos para WiFi a 54 Mbps. -----	95
Figura 66. Cantidad de fallos reportados respecto al número de nodos para WiFi a 54 Mbps. -----	96
Figura 67. Delay promedio respecto a la cantidad de nodos en la topología en árbol a 6 Mbps. -----	97
Figura 68. Delay máximo respecto a la cantidad de nodos en la topología en árbol a 6 Mbps. -----	97
Figura 69. Cantidad de paquetes enviados respecto al número de nodos a 6 Mbps.--	98
Figura 70. Throughput respecto al número de nodos para WiFi en topología árbol a 6 Mbps. -----	99
Figura 71. BER respecto al número de nodos en WiFi topología en árbol a 6 Mbps. 99	
Figura 72. Cantidad de fallos con respecto a la cantidad de nodos para WiFi en topología en árbol a 6Mbps. -----	100
Figura 73. Delay promedio respecto a la cantidad de nodos en la topología en árbol a 6 Mbps. -----	101
Figura 74. Delay máximo respecto a la cantidad de nodos en la topología en árbol a 6 Mbps. -----	101
Figura 75. Cantidad de paquetes enviados respecto al número de nodos a 54 Mbps.102	
Figura 76. Throughput respecto al número de nodos para WiFi en topología árbol a 54 Mbps. -----	102
Figura 77. BER respecto al número de nodos en WiFi topología en árbol a 54 Mbps. -----	103
Figura 78. Cantidad de fallos con respecto a la cantidad de nodos para WiFi en topología en árbol a 54 Mbps. -----	103
Figura 79. Delay promedio respecto al número de nodos Ethernet. -----	104
Figura 80. Número de paquetes respecto al número de nodos Ethernet. -----	105
Figura 81. Throughput respecto al número de nodos Ethernet. -----	105

Índices de tablas

Tabla 1. Requerimientos de latencia en la operación de la microrred [36], [37]	14
Tabla 2. Parámetros de línea para líneas de transmisión [40].	16
Tabla 3. Variables MAC modo Half Duplex [49].	23
Tabla 4. Variables MAC del modo Full Duplex.	25
Tabla 5. Alternativas para el medio de transmisión a 10Mbps [38].	27
Tabla 6. Alternativas para el medio de transmisión a 100 Mbps [38]	27
Tabla 7. Frecuencias y tasas de transmisión IEEE 802.15.4 [57]	31
Tabla 8. Campo del preámbulo, longitud y duración [57].	38
Tabla 9. Posibles valores de longitud del campo [57].	39
Tabla 10. Valores del campo Destination Addressing Mode [57].	41
Tabla 11. Variables que intervienen el protocolo CSMA/CA.	43
Tabla 12. Secuencia chip para cada símbolo [57].	47
Tabla 13. Sensibilidad Mínima del receptor.	64
Tabla 14. Parámetros según tasa de transmisión [49].	67
Tabla 15. Parámetros de tiempo en OFDM [49].	68
Tabla 16. Datos gestionados en la microrred	72
Tabla 17. Parámetros del modelo Zigbee	74
Tabla 18 Parámetros del enlace para modelo operando a 6Mbps	77
Tabla 19 Parámetros del enlace para modelo operando a 54Mbps	77
Tabla 20 Parámetros del enlace IEEE 802.3	80
Tabla 21 Tabla de resultados ZigBee estrella	85
Tabla 22. Resultados ZigBee topología árbol	90
Tabla 23 Resultado simulación Ethernet	106

Capítulo 1. Presentación

Introducción

El sistema de generación energética que alimenta a los hogares, las industrias y demás sistemas eléctricos que a diario se emplean alrededor del mundo plantean una serie de inconvenientes como el acceso a lugares inhóspitos, la generación de gases que aumentan el problema creciente del efecto invernadero, al modelo de un sistema centralizado de la energía, problemas de congestión del flujo de la energía eléctrica, y a un sinnúmero más de dificultades que convergen simultáneamente en el usuario final. Es por esta razón que recientemente muchos países han invertido millones de dólares en la investigación y el desarrollo de sistemas de generación distribuida para que sean más amigables con el usuario y que de manera inteligente mejoren la confiabilidad y la eficiencia energética con la que hasta ahora se cuenta. De esta manera, las microrredes eléctricas, que sin dejar de lado el sistema eléctrico tradicional, se han convertido en una solución que permite organizar mejor el sistema de distribución, convirtiéndose así en el sistema eléctrico del futuro.

La autonomía de una microrred se apoya en el sistema de telecomunicaciones que le permita entregar datos del comportamiento de las partes que la componen de manera que se provea de estabilidad, por lo que la entrega de información en tiempo real se hace un factor fundamental. En consecuencia, los parámetros que intervienen en un buen desempeño del sistema de comunicaciones son, entre otros, la topología de la red, su ubicación geográfica, la tecnología implementada para la transmisión de datos, con el fin de garantizar confiabilidad, escalabilidad, robustez y comunicación bidireccional con retrasos máximos tolerables.

Este trabajo presenta una propuesta metodológica para la evaluación del desempeño de la red de comunicaciones en una microrred rural aislada variando como parámetro de entrada la cantidad de nodos que lo conforman y midiendo parámetros de salida tales como la pérdida de paquetes (packet loss), el throughput, la tasa de error de bit (BER), el retardo promedio (delay) y el número de paquetes entregados en cada caso. La propuesta abarca la comparación de dos tecnologías inalámbricas (WiFi y ZigBee) y una alambrada (Ethernet) en base a los estándares IEEE 802.11, 802.15.4 y 802.3 respectivamente, mediante el modelamiento de la capa física y la capa de enlace para cada caso, combinando topologías de configuración en árbol y estrella para inferir cuál de ellas se adapta mejor a los requisitos planteados en un sistema de distribución energética con microrredes.

Planteamiento del problema

Las SmartGrid (SG) representan la nueva tendencia en la generación y distribución de la energía eléctrica en el siglo XXI [1] por sus grandes prestaciones tanto al usuario final, como con los proveedores del servicio, en cuanto a costos, calidad, eficiencia del sistema, cuidado al medio ambiente, entre otros [2], [3]. Es el mecanismo por el cual se logra una mayor integración de las fuentes de energía alternativas con la red eléctrica convencional.

Para lograr el objetivo de la SmartGrid, la red eléctrica se divide en varios sectores espaciales para tener en cuenta las características y restricciones propias de un determinado sector. Por ejemplo su topografía o clima, haciendo más fácil el trabajo de manejo y control sobre la red [4]. A esta división, de manera general, se le denomina MicroGrid (MG) o microrred. Cada Microrred por lo tanto, tiene las mismas características que la SmartGrid, y funciona en dos modos de operación diferentes: El modo aislado y el modo conectado [5]. El modo aislado corresponde cuando la MG es desconectada de la SG y trabaja de forma independiente. El modo conectado es cuando la SG provee o extrae energía de la microrred [5].

Una Microrred está compuesta por un gran número de dispositivos eléctricos encargados de realizar la medición de variables eléctricas, además de la conexión o desconexión de fuentes o cargas, en nodos claves de la red de energía, de tal forma que se logre obtener información precisa, en tiempo real, sobre el estado de la red y tomar las acciones de control correspondientes para el sistema. [2]–[6]. Por lo tanto es necesaria la implementación de una infraestructura de comunicación, y sistemas de control y almacenamiento que den el soporte necesario para la realización de este objetivo.

Aunque en la bibliografía se encuentran trabajos relacionados con la distribución y la implementación de microrredes, estos se enfocan en los sistemas de control y medición, dejando de lado el sistema de comunicaciones, un factor determinante para alcanzar un buen desempeño en una microrred [7]. Si bien en algunos trabajos se implementa un protocolo de comunicaciones para la gestión de los datos, dentro de la bibliografía que se encontró, en ninguno de ellos se dedican a comparar varias tecnologías para saber cuál de todas estas se adapta mejor a la microrred. Es por este motivo que surge la pregunta clave que se pretende desarrollar a lo largo de esta investigación: suponiendo intervalos de tiempo fijos para el envío de flujo constante de datos, ¿cuál es el estándar de comunicaciones que mejor se adapta a una microrred aislada en un entorno rural?

Así, la solución propuesta comprende la generación de una infraestructura de telecomunicaciones robusta, capaz de garantizar la conexión de varios nodos de la red en una MG de baja tensión operando en modo aislado. Para este propósito se realizará una revisión detallada de los sistemas de comunicaciones inalámbricos y alámbricos, topologías y organización de los datos adquiridos para su posterior análisis y control de la MG.

Justificación

Una Microrred vista como un conjunto de generadores, dispositivos de almacenamiento y cargas, tiene como característica principal un comportamiento dinámico, debido a que en cualquier instante de tiempo puede haber una conexión, desconexión de una fuente o una carga o un dispositivo de almacenamiento particular de la red [8], [9].

En conjunto con lo anterior, la toma de decisiones para la MG depende del conocimiento del estado actual de la Microrred, llevado a cabo por una serie de sensores que monitorean las variables relevantes de los nodos de la red, como también del estado de las otras MGs adyacentes y de las disposiciones generales de la SmartGrid en un instante determinado.

Por lo tanto la operación de una MG se realiza de forma controlada y coordinada soportado en el sistema de telecomunicaciones [10] que permite un intercambio de información entre las diversas capas que conforman la red con los centros de gestión y control, logrando así un sistema robusto, con gran rendimiento y alta eficiencia [11]. El sistema de telecomunicaciones debe ser confiable, seguro y robusto, capaz de soportar la conexión de varios nodos, con un retraso máximo de la información constante en toda su infraestructura [2], [3].

La implementación de una MG representa un gran aporte al cuidado del medio ambiente, puesto que pone en marcha la aplicación de las fuentes de energía renovables, aumentando la eficiencia de la red eléctrica y reduciendo el uso de las fuentes de energía a base del carbón, la emisión de gases de efecto invernadero como también la destrucción del medio ambiente.

Dentro de los múltiples beneficios que trae consigo la implementación de la MG, se encuentra la reducción de costos tanto a los usuarios como a las empresas generadoras de energía, debido al aumento en la eficiencia en la distribución de la energía, además de poder controlar, y autoabastecer el propio consumo por parte de los usuarios.

Este proyecto de investigación hace parte del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Objetivos

General

Realizar un modelo de un sistema de telecomunicaciones que transfiera datos de control e instrucciones a los equipos de conversión en una Microrred en modo aislado para un entorno rural.

Específicos

- Identificar los requerimientos de operación en una Microrred en modo aislado que debe satisfacer un sistema de Telecomunicaciones.
- Evaluar las tecnologías de telecomunicaciones que satisfacen los requerimientos de operación en una Microrred en modo aislado.
- Diseñar y simular las redes de telecomunicaciones a partir de tecnologías alámbricas e inalámbricas que realice la transferencia de datos de control en una Microrred en modo aislado.
- Evaluar y comparar el funcionamiento de cada una de las redes de telecomunicaciones simuladas en base a las exigencias de la Microrred.

Capítulo 2. Microrredes

Una Microrred (MG) es un sistema de distribución de potencia eléctrica de baja a media tensión o de energía calorífica en un área local. Está conformada por fuentes de generación distribuida (al menos una), sistemas de almacenamiento, inversores y cargas controlables agrupadas típicamente en una arquitectura radial [12], [13]. (Figura 1). Los inicios de esta tecnología se remontan a la década de los 90 como respuesta a la alimentación eléctrica de pueblos aislados o consumos puntuales que necesitan de una fuente eléctrica [14].

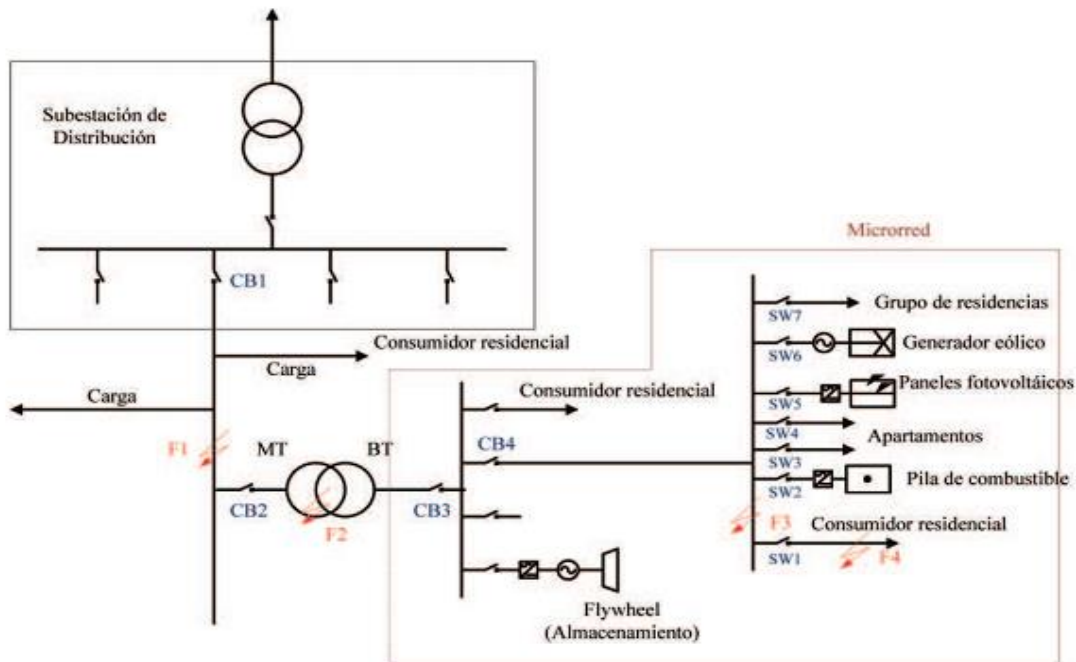


Figura 1. Ejemplo de una Microrred.[12].

La inclusión de las microrredes permite que se dé paso a la generación distribuida (GD), que es la generación que se basa en fuentes de energía renovable y ciclos combinados. Alcanzan un tamaño desde las decenas de KW a la escala de MW dependiendo de su infraestructura y ubicación [15]. Algunas de las tecnologías más características corresponden a los generadores eólicos, paneles fotovoltaicos, la energía de las olas y las mareas, centrales mini-hidráulicas, centrales de biomasa, ciclos combinados industriales y domésticos, micro-turbinas de gas, pilas de combustible, motores Stirling, entre otros [12]. La GD en conjunto con los sistemas de almacenamiento y cargas controlables da lugar al concepto de “gestión de demanda” y expanden el concepto de GD al de recursos distribuidos (RD).

La infraestructura eléctrica desplegada en los Estados Unidos fue concebida hace más de cien años y hoy en día se ha vuelto relativamente ineficiente y vulnerable, a diferencia de la

generación distribuida que evita tanto las pérdidas del 6.5% debidas a la distribución y la transmisión de la energía, como la vulnerabilidad de la transmisión y distribución de nodos y enlaces [16].

2.1 Objetivo de una Microrred

Las Microrredes tienen como objetivo mejorar la eficiencia, confiabilidad, calidad y seguridad del sistema eléctrico siendo capaz de tomar las decisiones económico-ambientales más adecuadas para el transporte o distribución, generación y almacenamiento de energía [17]. Ofrece ventajas tanto a los consumidores como a las compañías eléctricas, minimizando la congestión de la red eléctrica y el consumo global de energía, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero, la dependencia de los combustibles fósiles y las pérdidas eléctricas por su proximidad al consumidor y el gasto económico al integrar las infraestructuras eléctricas convencionales con las de generación distribuida y permitirle al consumidor generar la energía eléctrica para su propio consumo y entregar los excedentes a la red.

Otra ventaja muy importante es que brinda el servicio eléctrico a poblaciones, que dada su ubicación, tiene difícil acceso a la red eléctrica convencional.

2.2 Tipos y arquitecturas de las Microrredes

Si bien la clasificación y arquitectura de las microrredes está sujeta a una gran cantidad de factores, como el tipo, calidad y cantidad de las fuentes generadores, la distribución física y eléctrica de la microrred y el tipo de cargas que esté alimentando, se puede concebir una clasificación general refiriéndose a la forma de onda que se provee a las cargas, es decir, si se trata de una generación de onda de corriente directa (DC), o, de corriente alterna (AC) [18], como se muestra en la figura 2 y 3 respectivamente. Dentro de las microrredes AC, se presentan diversas posibilidades de clasificación en función del nivel de tensión al que se opere, así como si es sistema es monofásico o trifásico.

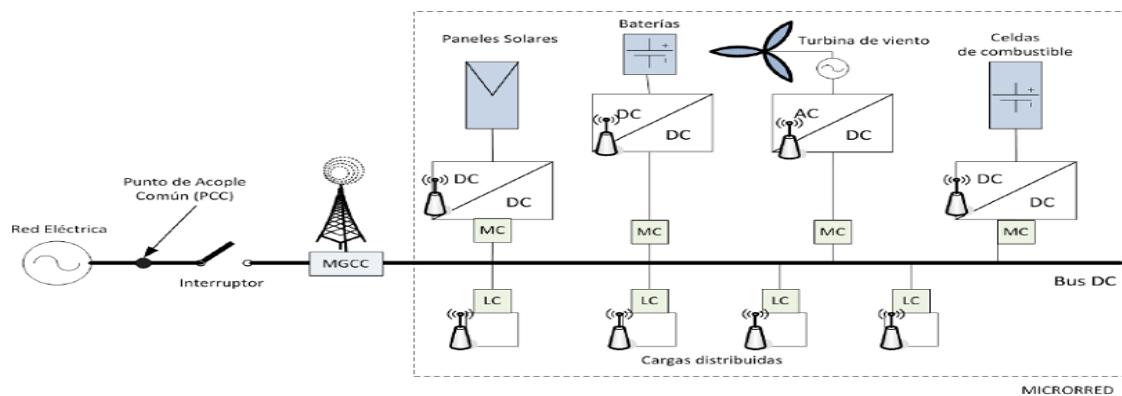


Figura 2. Microrred con bus en DC [18].

Aunque para microrredes en ambientes locales, de uso residencial y comercial, es más eficiente el uso de microrredes de corriente directa, por el hecho de que la mayoría de las cargas requieren de energía DC para su funcionamiento, actualmente la mayoría de las microrredes desplegadas son de tipo AC por cuatro principales razones. La primera de ellas es porque el cambio de tensión es simple y barato, lo que permite que el transporte de la energía en largas distancias sea barato y eficiente. La segunda razón es que el costo de motores AC es más económico respecto a sus contrapartes DC. La tercera es por que soporta mejor las posibles ampliaciones y por ultimo admite fácilmente nuevas incorporaciones de generación [14], [16].

Por lo tanto, el uso de microrredes tipo DC es más usado en sistemas pequeños, con una cantidad de usuarios no muy amplia ni distante entre ellos, mientras las de tipo AC se usa para abastecer a un mayor número de usuarios y con mayor dispersión geográfica [14].

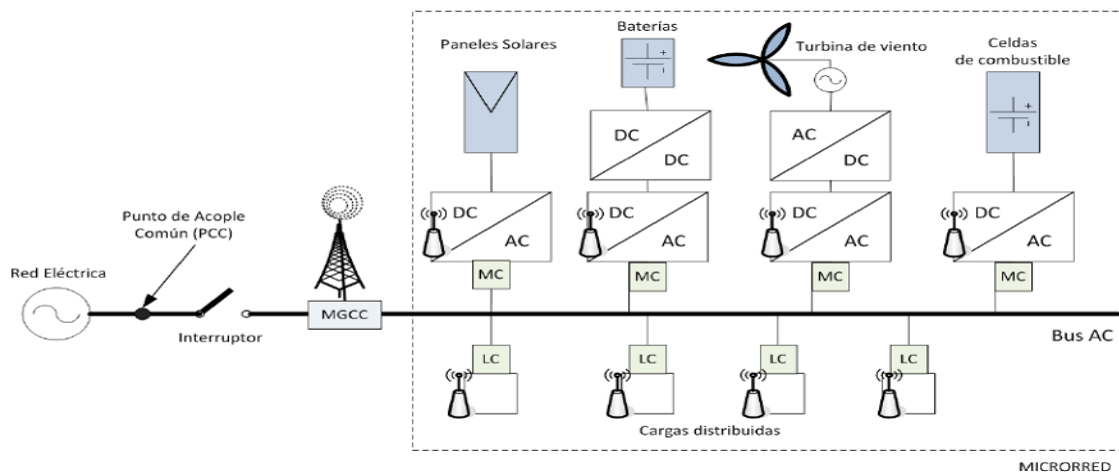


Figura 3. Microrred con bus AC [18].

La arquitectura de la microrred se compone de dos partes, la arquitectura de generación y la de consumo. En cuanto a la generación existen dos arquitecturas: la generación distribuida y la generación centralizada. En la primera las fuentes de energía están distribuidas a lo largo de microrred configuradas en forma radial o de anillo. Un ejemplo de esta arquitectura se muestra en la figura 4.

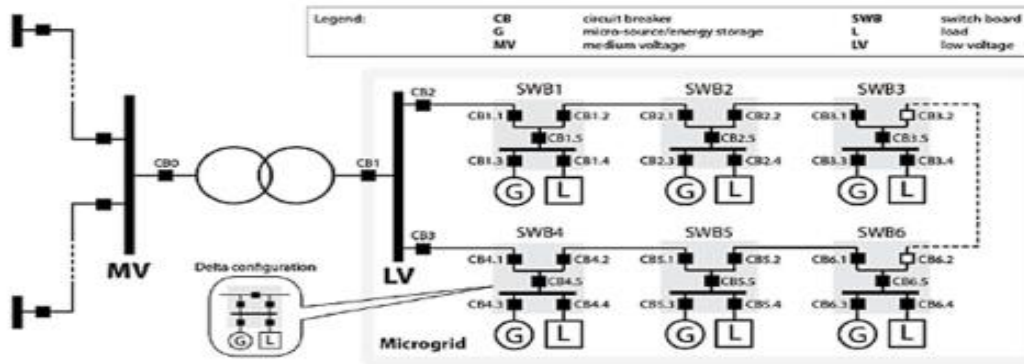


Figura 4. Topología de una microrred con generación distribuida [14].

La microrred con generación centralizada, las fuentes se encuentran ubicadas lo más centrado posible con relación a la distribución eléctrica de la red, de tal forma que las distancias del suministro eléctrico sean lo más cortas posibles, reduciendo así el coste de instalación [14].

La arquitectura de consumo hace referencia a la forma como se distribuye la energía a partir de la fuente de suministro a la carga. Hay tres tipos: radial, en anillo y en malla. El sistema radial es aquel donde el flujo de corriente tiene un simple camino sin retorno desde la fuente de generación hacia la carga. En cuanto al sistema en anillo, es aquel en el que se provee más de una trayectoria entre la fuente y la carga, el flujo de corriente empieza desde la fuente de generación y recorre el área a abastecer y regresa al nuevamente al punto de generación. Por ultimo las redes en malla están conformadas por redes radiales y en anillo entrelazadas [14].

La arquitectura más frecuente en las microrredes son las de distribución radial [12], [19].

2.3 Sistemas que componen una Microrred

Para lograr estas funcionalidades, se hace necesaria la interacción entre diferentes sistemas o entidades como un sistema de medición, un sistema de control o gestión y un sistema de telecomunicaciones sobre la microrred.

El sistema de medición está conformado por sensores, medidores inteligentes y colectores de información encargados de obtener información a partir de las variables relevantes de la red como la tensión, corriente, potencia entre otros[20]. Algunos ejemplos que se encuentran en la literatura plantean una infraestructura de medición avanzada (AMI por sus siglas en inglés) con el uso de sistemas SCADA o de PMU's.

Para el sistema de control o gestión cuya función es coordinar las interfaces de potencia de la MG, se plantean tres posibles arquitecturas: un control centralizado, donde existe un elemento central que recibe toda la información del estado actual de la red y con base en

esta información toma decisiones sobre los equipos de protección. En el control distribuido no es necesario un elemento central y la toma de decisiones se realiza de forma autónoma por cada uno de los elementos teniendo en cuenta la información de su propio estado y la de los demás. Por último, otro posible sistema corresponde a un híbrido entre las dos arquitecturas, donde las funciones de control y gestión son compartidas y designadas a cada uno de acuerdo a ciertas prioridades y respuesta en la ejecución [11], [12]

El intercambio de información entre las diferentes entidades que conforman la red eléctrica con los puntos de gestión y control, se encuentran soportados por el sistema de telecomunicaciones, que debe tener ciertas características para cumplir con los requerimientos impuestos a la MG sin comprometer la confiabilidad y eficiencia del sistema. Siempre hay algún compromiso entre la confiabilidad y la eficiencia, y dentro de sus límites y restricciones ambos deben estar optimizados [21].

2.4 Modos de operación

La MG tiene dos modos de operación: el modo aislado y el modo conectado.

2.4.1 Modo Conectado

En el modo conectado, el sistema principal de energía a través de un transformador de potencia u otro elemento satisface las demandas energéticas del área local donde está ubicada o por el contrario extrae energía de esta.

2.4.2 Modo Aislado

En el modo aislado, La microrred está desconectada del sistema eléctrico y provee energía a partir de sus propias fuentes y sistemas de almacenamiento. El paso del modo aislado al modo conectado o viceversa, es la operación más crítica que tiene la MG, porque debe sincronizar de forma precisa sus fuentes de energía con la frecuencia y voltaje de la red eléctrica al pasar de un modo a otro y lograr estabilizarse.

Este tipo de operación de la MG usualmente se encuentra en campos de aplicación como la aviación, industria automotriz, marina, y en general en áreas rurales que no disponen de un fácil acceso [22].

2.5 Requisitos de una MG

De acuerdo con los objetivos y los modos de operación, la MG debe cumplir con ciertos requisitos para garantizar un flujo confiable de energía [5] Como:

- Capacidad para detectar, analizar y responder ante una falla.
- Capacidad de incluir al consumidor dentro de la operación de la red.
- Ser altamente confiable para satisfacer las necesidades del consumidor.
- Capacidad de actuar sobre los generadores, elementos almacenadores y cargas de acuerdo a las necesidades y estado del sistema.
- Capacidad de crecimiento y adaptación a nuevas tecnologías.
- Capacidad de resistir ataques físicos y cibernéticos.

Estas características y requerimientos plantean nuevos retos tecnológicos ante los nuevos condicionantes en las operaciones, como la existencia de flujos bidireccionales de energía por la presencia de generación en media y baja tensión, los modos de operación en isla o conectado, cambios en la topología de la MG debido a las conexiones y desconexiones de generadores, dispositivos de almacenamiento y cargas, intermitencia de algunas fuentes de generación como los paneles fotovoltaicos que dependen del clima y la reducción de los tiempos máximos permisibles para despejar faltas tanto en la red de media tensión como en la de baja tensión llevan a pensar en sistemas adaptativos de protección y gestión con el objeto de mantener la estabilidad en las MG's, puesto que los sistemas habituales de protección basados en descargadores de tensión para responder a sobretensiones transitorias y fusibles o limitadores de corriente para responder ante fallas no garantizan todos los requerimientos [12].

2.6 Distribución geográfica de las MG

La ubicación espacial de las microrredes puede ser de dos tipos: la rural y la urbana. Por lo tanto, dependiendo de la zona en que se despliegue la microrred, es factible que se aproveche mayormente el uso de ciertos modos de generación de energía con respecto a otros. Por ejemplo, Colombia cuenta con una geografía en que en algunas zonas tanto la radiación solar, como la generación hidroeléctrica y la eólica son más intensas que en otras, de modo que es indispensable conocer las condiciones climáticas del lugar en que se piense implementar la MG.

En Colombia, en la última década del siglo XXI se ha impulsado la investigación, el estudio y el desarrollo de propuestas tecnológicas que provean a poblaciones aisladas de energía eléctrica a partir de fuentes alternativas de energía que perduren en el tiempo, de

bajos costos y que satisfagan la demanda energética creciente del país. Por tal razón, la ley 1715 de 2014 tiene por objeto promover la implementación de energías limpias en el sistema energético nacional y la inclusión de dichas tecnologías a aquellas zonas no interconectadas y de difícil acceso [23].

Para satisfacer las necesidades anteriormente mencionadas, una alternativa es la generación hidroeléctrica a partir de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), cuyo principal objetivo es proveer de energía a zonas aisladas a las que resulta complejo conectar a través del sistema eléctrico nacional principal. [23].

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) presenta una serie de mapas en donde se puede evidenciar por departamentos, la disponibilidad de recursos renovables para generación de energía (hidroeléctrica, biomasa, eólica y radiación solar). Esta entidad ha realizado un estudio, en conjunto con Colciencias y la Universidad Javeriana, en el que se presentan un conjunto de mapas con información de aspectos sociales, económicos y ambientales en referencia a la distribución energética por departamentos en la superficie nacional. De aquí, se puede evidenciar que muchas poblaciones aisladas aún se encuentran en condición de desabastecimiento de fluido eléctrico, tal y como se puede observar en el mapa en [23], y por consiguiente, zonas en donde fácilmente se pueden implementar microrredes que aseguren la provisión del servicio energético.

Capítulo 3. Sistema de telecomunicaciones para una Microrred

3.1 Topologías del sistema de comunicaciones

La topología de la red es la representación geométrica de los enlaces y la configuración de conexiones entre nodos. Para redes alámbricas es posible encontrar cinco tipos de topologías: en malla, en estrella, en árbol, en bus y en anillo. Para el caso de redes inalámbricas las topologías se reducen a la de estrella, árbol y malla.

3.1.1 Topología en estrella

La topología en estrella, es una arquitectura centralizada, en la cual los nodos están conectados únicamente a un nodo central o concentrador. Los nodos no están conectados entre sí y toda comunicación se establece únicamente con el nodo central. Un ejemplo de esta topología se muestra en la figura 5.

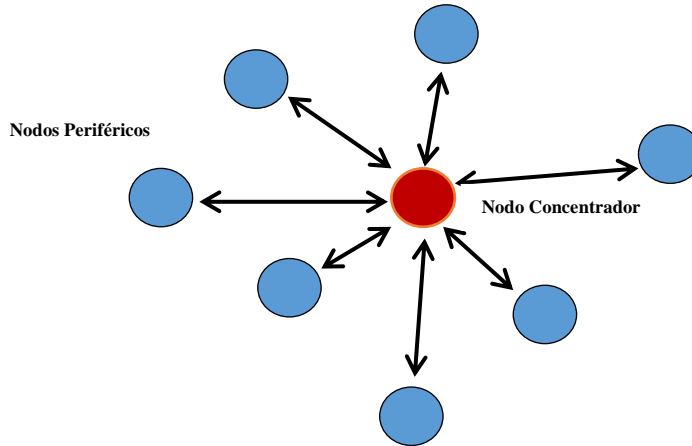


Figura 5. Topología en estrella [38].

3.1.2 Topología en árbol

La topología en árbol, es una arquitectura jerarquizada que consiste en la unión de varias topologías en estrella. Existe un concentrador central pero los nodos en árbol no están directamente conectados a este, la mayoría se conectan a un concentrador secundario, que a su vez, se conecta al concentrador central como se muestra en la figura 6.

La topología en árbol está compuesta por varias ramas, que son las extensiones de la red generados por los concentradores secundarios, que corresponden a los puntos amarillos de la figura 6. Cada concentrador secundario que extienda la red, genera una mayor profundidad en la rama, por ejemplo en la figura 6, se dice que la profundidad de la red es de dos. Por último, los nodos que están conectados a los concentradores secundarios en cualquier profundidad se dice que corresponden a las hojas de las ramas.

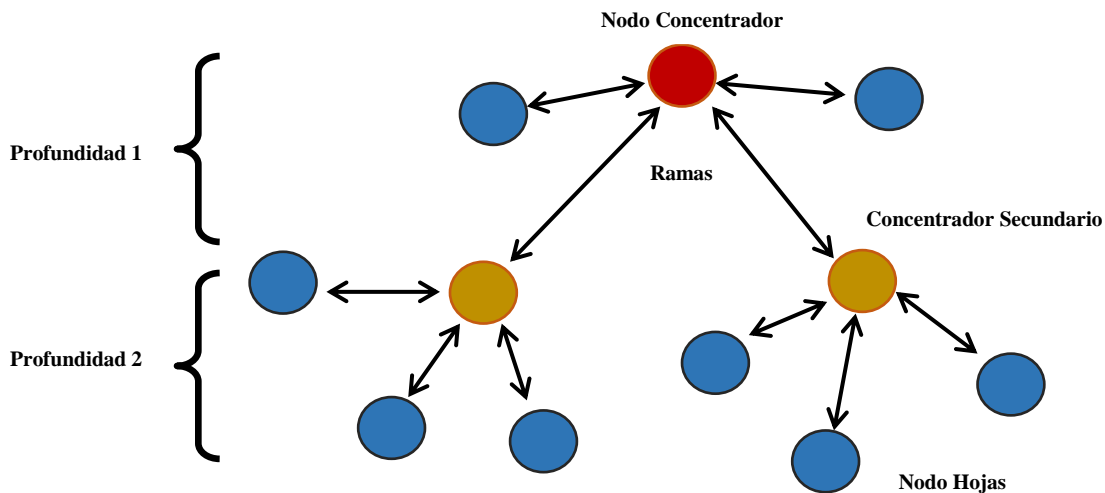


Figura 6. Topología en árbol [38].

3.2 Requisitos del sistema de telecomunicaciones para la microrred

Las microrredes varían de acuerdo a la arquitectura, escala física y estrategias de control; y dada la gran variedad de algoritmos, sensores y tecnologías que se pueden emplear para su construcción, los requerimientos del sistema de telecomunicaciones pueden diferir de una microrred a otra. [11].

Dada esta dificultad para definir dichos requerimientos, varios autores concuerdan en las características principales que debe cumplir el sistema de comunicaciones para una MG. Estas corresponden a que el sistema debe ser seguro, restringiendo el acceso y lectura de la información a usuarios no autorizados; confiable, garantizando que el sistema realizará su función por un período de tiempo especificado y bajo las condiciones indicadas; robusto, añadiendo redundancia al sistema; escalable, permitiendo el ingreso de nuevos nodos a la red, que soporte comunicación bidireccional y con un retraso máximo de la información en toda su infraestructura [2], [3], [24].

Por otro parte, establecer los parámetros de desempeño del sistema de telecomunicaciones resulta difícil por el hecho de que su infraestructura se basa principalmente en la estructura de la MG y su sistema de control, [25] y dado que no hay un esquema generalizado sobre que diseño o tecnología usar en cada uno de estos sistemas, se abre paso a una gran cantidad de posibilidades. Respecto a este problema, instituciones como el IEEE o el NIST han realizado un esfuerzo en cuanto a desarrollar una guía o estándar que permita la convergencia entre los diferentes esquemas y tecnologías realizando los planteamientos y definiciones necesarias para permitir la interoperabilidad entre estos, con las características que deben satisfacer. Entre estos se encuentran por ejemplo el estándar IEEE 1547 [24], y la publicación 1108 de NIST [26].

Varios autores han iniciado su investigación sobre el sistema de telecomunicaciones planteando un esquema de MG con su modelo de control, observando la incidencia que tienen algunos parámetros del sistema de comunicaciones como el retardo promedio (delay) en el desempeño y respuesta de los sistemas frente alguna actividad como en el cambio del modo aislado a conectado. Otros investigadores tienen un enfoque diferente e inician su investigación a partir de algunos estándares existentes creados para sistemas que se asemejan a los requerimientos y comportamientos de la MG, como por ejemplo el estándar IEC 61850 para las comunicaciones en una subestación [27], con algunos esquemas de adquisición de datos como SCADA o PMU y evaluando que tecnologías o protocolos de comunicación inalámbricas o alámbricas se acoplan mejor al dichos sistemas.

Es importante notar que aunque gran parte de estos estudios resaltan la importancia que tiene el sistema de comunicaciones, los parámetros son frecuentemente omitidos [7], [28] y aunque esto añade más dificultad al momento de cuantificarlos, de estas investigaciones se pueden extraer cuales son los parámetros importantes a tener en cuenta. Entre estos parámetros se encuentran el retardo promedio (Delay) estudiado en [10], [11], [29]–[31]; la frecuencia de envío de datos o tasa de muestreo en [11], [32]; la pérdida de paquetes en

[10], [11]; el throughput en [20], [24], [31]; el medio con la potencia de transmisión, la tasa de error e interferencia en [33], [34]; el protocolo de acceso al medio [20]; la topología en [35], donde también se realiza una comparación entre tecnologías y por último el tamaño de los datos que debe manejar el sistema.

En la tabla 1, se muestran los tiempos de retardos requeridos según la aplicación dentro de la microrred.

Aplicación	Tamaño típico /Bytes	Tasa de muestreo	Latencia
AMI			2s a 15 s
Respuesta a la demanda			500 ms a varios minutos
Conocimiento del comportamiento en área amplia			20 ms a 200 ms
Recursos de energía distribuida y almacenamiento			20 ms a 15 s
Transporte Eléctrico			2 s a 5 min
Gestión distribuida			100 ms a 2s
Aislamiento adaptativo	4 a 157	0.1 s	<0.1s
Predictivo bajo la pérdida de frecuencia en la carga	4 a 157	0.1 s	<0.1
Control de la estabilidad del voltaje en área amplia	4 a 157	0.5 s a 5 s	< 5 s
Control de fallas en cascada		0.5 s a 5 s	< 5 s
Monitorización de la oscilación de la potencia local	> 52	0.1 s	< 30s
Oscilación de la potencia de área amplia		0.1 s	< 0.1 s
Monitorización de la estabilidad del voltaje local		0.5 s a 5 s	< 30 s
Estimación del estado basado en PMU		0.1 s	< 0.1 s
Estimación dinámica del estado		0.02 s a 0.1 s	< 0.1 s
Estimación del estado asistida por PMU		30 s a 2 min	< 2 min

Tabla 1. Requerimientos de latencia en la operación de la microrred [36], [37]

3.3 Medios de transmisión

El medio, en un sistema de transmisión de datos, se conoce como el camino físico entre el transmisor y el receptor, a través del cual se envían los datos [38]. Dependiendo del sistema que se esté implementando, el medio puede ser diferente en cada caso; si es por ejemplo, una transmisión de datos guiada, las ondas electromagnéticas pueden viajar a través de

cable coaxial, par trenzado, guía de onda rectangular o fibra óptica. Si por el contrario, es una transmisión inalámbrica, pueden viajar a través del aire, el agua o el espacio exterior.

3.3.1 Medios de transmisión alambrados

Los medios de transmisión guiados son cualquier sistema de conductores, semiconductores, o la combinación de ambos, que pueden emplearse para transmitir información, en la forma de energía eléctrica o electromagnética, entre dos puntos [39]. Los medio guiados tiene la particularidad que solo puede enlazar un punto fuente con un solo punto destino. Entre los medios más comunes se encuentran el par trenzado, el cable coaxial, las guías de ondas y la fibra óptica.

De acuerdo a la geometría, frecuencia de operación y materiales de construcción, las líneas de transmisión como el par trenzado o el cable coaxial, se pueden modelar a partir de cuatro parámetros primarios de la línea correspondientes a la resistencia en serie por unidad de longitud, inductancia en serie por unidad de longitud, capacitancia en paralelo por unidad de longitud y conductancia en paralelo por unidad de longitud obtenidos de la teoría electromagnética. Algunos parámetros para las líneas más comunes se muestran en la tabla 2.

Conocidos estos cuatro parámetros de la línea, y considerando que dichos parámetros se encuentran distribuidos uniformemente a lo largo de la línea, es posible determinar la relación que existe entre las ondas de voltaje y corriente que viajan a través de ella, además de la velocidad con que lo hacen. A partir de esta relación se identifica la constante de propagación de la línea y su impedancia característica (Ecuaciones 1 y 3 respectivamente).

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (1)$$

Donde:

- γ : Constante de propagación de la línea.
- R: Resistencia en serie por unidad de longitud
- L: inductancia en serie por unidad de longitud
- G: Conductancia en paralelo por unidad de longitud
- C: Capacitancia en paralelo por unidad de longitud
- ω : Frecuencia angular.

La constante de propagación γ , es un número complejo y se expresa como (ecuación 2):

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2)$$

Donde la parte real α , indica la atenuación de la onda de voltaje o corriente conforme se propaga por la línea en nepers por metro y β , la parte imaginaria, indica la rapidez del cambio de fase de la onda conforme se propaga en radianes por metro [39].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R+j\omega L)}{(G+j\omega C)}} \quad \Omega \quad (3)$$

De la ecuación 3, a medida que aumenta la frecuencia de operación la impedancia característica Z_0 tiende al valor de:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \Omega \quad (4)$$

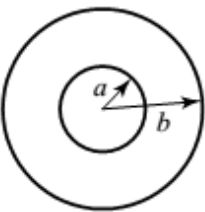
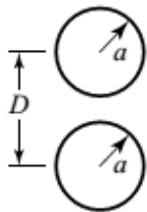
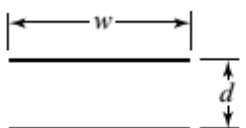
	COAX	TWO-WIRE	PARALLEL PLATE
			
L	$\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$	$\frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{D}{2a} \right)$	$\frac{\mu d}{w}$
C	$\frac{2\pi\epsilon'}{\ln b/a}$	$\frac{\pi\epsilon'}{\cosh^{-1}(D/2a)}$	$\frac{\epsilon' w}{d}$
R	$\frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$	$\frac{R_s}{\pi a}$	$\frac{2R_s}{w}$
G	$\frac{2\pi\omega\epsilon''}{\ln b/a}$	$\frac{\pi\omega\epsilon''}{\cosh^{-1}(D/2a)}$	$\frac{\omega\epsilon'' w}{d}$

Tabla 2. Parámetros de línea para líneas de transmisión [40].

3.3.2 Medios de transmisión inalámbricos

Los medios de transmisión inalámbricos corresponden básicamente a la transmisión a través del aire, usando para ellos una gran diversidad de antenas [39]. La propagación

inalámbrica se caracteriza porque sus ondas de radio pueden seguir tres posibles trayectorias: la superficial, la aérea o la trayectoria de línea de horizonte visual [38].

La trayectoria superficial es aquella en la que las ondas electromagnéticas son radiadas siguiendo más o menos la curvatura de la tierra, con la característica de que pueden alcanzar grandes distancias, siendo incluso mayores que en la línea de vista.

En la trayectoria aérea, las ondas radiadas por la antena transmisora se reflejan en la capa ionizada de la atmósfera alta (la ionósfera). Aunque dicho así, pareciera que la onda se refleja en la ionósfera, como si se tratara de una superficie reflectante, el efecto, en realidad, es refractario [38].

En vista de que a frecuencias de propagación superiores a 30 MHz, las ondas de radio no se refractan en la ionósfera, se da paso a la trayectoria de línea de horizonte visual, o también conocida como línea de vista. En esta implementación, las antenas emisora y receptora deben estar alineadas de manera que estas tengan una área visual efectiva.

En toda transmisión de ondas electromagnéticas a través de la atmósfera se presentan problemas de dispersión debidas a la distancia y a la frecuencia de la portadora de la señal, por lo que la antena receptora percibirá menor potencia en la señal entrante entre más alejada esté del transmisor. Incluso si no hay más impedimentos en la transmisión, la señal conforme viaja a través del espacio, deberá repartirse a través de un área cada vez mayor. Esta atenuación se conoce como pérdidas del espacio libre y se representan mediante la ecuación de Friis, con la que supone que el enlace está libre de obstáculos y que el índice de reflexión es despreciable [41].

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (5)$$

En donde:

- P_r : potencia de la señal en la antena receptora.
- P_t : potencia de la señal en la antena transmisora.
- G_t : ganancia supuesta por la antena transmisora.
- G_r : ganancia supuesta por la antena receptora.
- d : distancia entre el transmisor y el receptor.
- λ : longitud de onda.

Aunque la ecuación de Friis describe un presupuesto de potencia, en los sistemas digitales se hace necesario poder medir la calidad del canal para saber si un sistema puede ser implementado sin comprometer la correcta recepción de los datos. Este parámetro es en general una relación de señal a ruido, que en sistemas analógicos se conoce como SNR. En

sistemas digitales, por su parte, se maneja el parámetro de la tasa de energía de bit respecto a la densidad espectral de ruido.

La razón por la que los sistemas de comunicaciones digitales y analógicos usan parámetros diferentes para describir la medición de la calidad del enlace, es porque el primer sistema supone el uso señales de potencia, mientras que los sistemas digitales requieren que la señal se divida en períodos de ventanas de tiempo que implican el uso de señales de energía. La ecuación para el cálculo de la relación de energía de bit respecto a la densidad espectral de ruido se presenta a continuación [42] :

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{dB} = EIRP_{dBm} + G_{r,dBi} - PL_{dB}(d) - L_{s,dB} - N_{0,\frac{dBm}{Hz}} - R_{b,dB-\frac{b}{s}} \quad (6)$$

Fuera del desvanecimiento debido a la propagación, las ondas que viajan a través de la atmósfera, a menudo se presentan con obstáculos en su camino que hacen que la señal se refleje en ellos, de manera que al receptor llegarán varias señales iguales retrasadas las unas de las otras en el tiempo. A este fenómeno se le conoce como multitrayectoria y es bastante común en redes de telefonía móvil.

3.4 Métricas de rendimiento de la red

La calidad del servicio (QoS por sus siglas en inglés) establece los parámetros o métricas de una red de comunicaciones que miden la calidad y disponibilidad del sistema y de acuerdo a estos, se garantiza o no, que el sistema es capaz de cubrir las necesidades de una aplicación en específico [43], [44].

Algunos de estos parámetros se muestran a continuación. Cabe destacar que dependiendo de la aplicación un parámetro puede resultar más relevante que otro.

3.4.1 Retardo promedio (Delay)

Es el espacio de tiempo entre el envío de un paquete o mensaje y su recepción por parte del destinatario (ecuación 7). Para su correcta medición se deben sumar todos los tiempos en que el mensaje dura ser procesado por los nodos intermedios en la transmisión. La ecuación 8 hace referencia al delay promedio de la red, al tener en cuenta, el delay de todos los paquetes recibidos correctamente [45], [46].

$$Delay_{paquete} = Tiempo_{recibido} - Tiempo_{transmitido} \quad (7)$$

$$Delay_{promedio} = \frac{\sum Delay\ de\ los\ paquetes\ recibidos}{Numero\ total\ de\ paquetes\ recibidos} \quad (8)$$

3.4.2 Tasa media de éxito (Throughput)

Es la tasa media de éxito de la entrega de mensajes en un canal de comunicaciones. Está definido como el número total de bits de información exitosamente enviados sobre el tiempo que tardo el sistema en transmitir esa información [46], como se muestra en la ecuación 9.

$$Throughput = \frac{TIP * \sum PEE}{TDS} \text{ bps} \quad (9)$$

Donde:

- PEE = Paquete exitosamente enviado
- TIP = Tamaño de la información de cada paquete, sin tener en cuenta los bits de encabezado que añade los protocolos del modelo OSI.
- TDS = Tiempo de simulación.

3.4.3 Paquetes perdidos

Corresponde a la sumatoria del número de paquetes descartados o que no fueron transmitidos correctamente por el sistema. Este parámetro también se puede observar como un porcentaje si se tiene en cuenta la cantidad de paquetes transmitidos como se observa en la ecuación 10 [44].

$$PaquetesPerdidos = \frac{Numero\ de\ paquetes\ perdidos}{Numero\ de\ paquetes\ transmitidos} * 100\% \quad (10)$$

3.4.4 BER (Bit Error Rate)

Se define como el número de bits recibidos de forma incorrecta respecto al total de bits enviados durante un intervalo de tiempo (ecuación 11) [38].

$$BER = \frac{\sum bits\ erroneos}{\sum bits\ transmitidos} \quad (11)$$

3.5 Tecnologías de telecomunicaciones

3.5.1 Tecnologías alámbricas

3.5.1.1 Ethernet (Estándar IEEE 802.3)

Ethernet es un estándar definido por el IEEE 802.3 que establece las características y particularidades de cableado y señalización del nivel físico, los formatos de la trama de datos y el control de acceso al medio del nivel de enlace para redes alámbricas LAN (*Local Area Network*) y MAN (Metropolitan Area Network) [38], [47] del modelo OSI a distintas tasas de transmisión (10Mbps, 100 Mbps, 1000Mbps, 10 Gbps , 40 Gbps y 100 Gbps) y medios de propagación (cable coaxial, par trenzado y fibra óptica).

Capa de enlace

La capa de enlace del estándar especifica el formato de la trama de datos en conjunto con el protocolo de acceso al medio.

Trama de datos

La estructura de paquete de datos está compuesta por siete campos como se muestra en la figura 7, correspondientes al campo del preámbulo, SFD, dirección de fuente, dirección de destino, tipo y longitud, Datos y FCS.

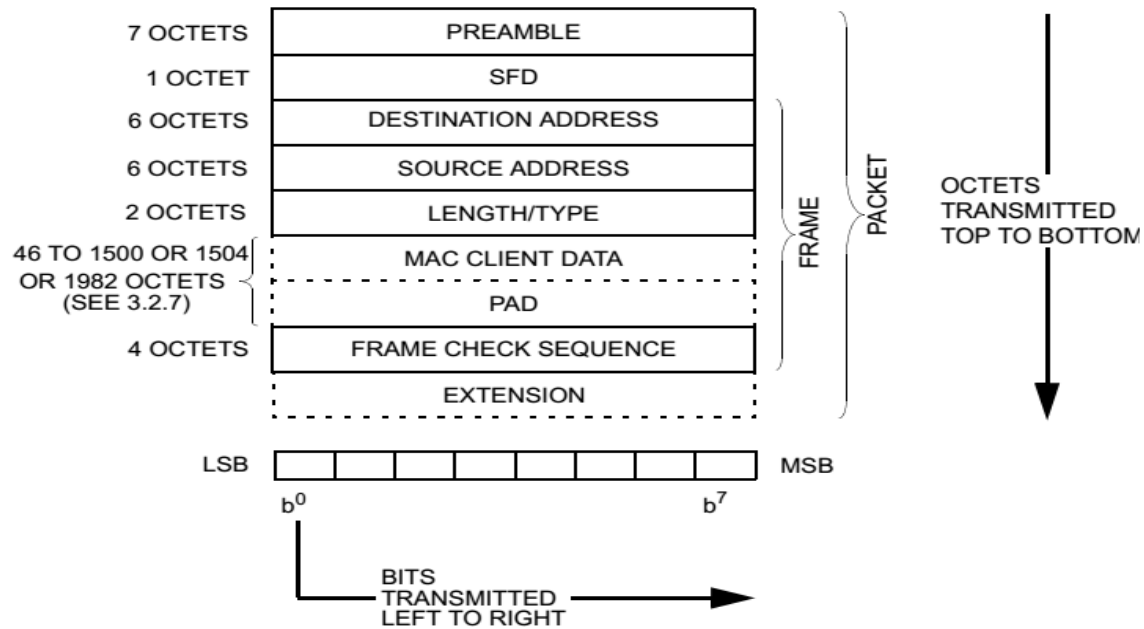


Figura 7. Formato de la trama de datos [48].

Campo preámbulo

Consiste es una secuencia intercalada de unos y ceros de siete bytes de longitud, que se envían al inicio del paquete y cuyo propósito es sincronizar el receptor con el flujo de bits entrantes.

La secuencia de bits corresponden a 10101010 10101010 10101010 10101010 10101010 10101010 10101010 transmitidos de izquierda a derecha empezando por el uno y terminando en cero.

Campo SFD

Es un campo de un byte de longitud de secuencia 10101011 e indica al receptor el final del campo preámbulo y el inicio real de la trama, brindando la posibilidad de encontrar el primer bit del resto de la trama [38].

Campo dirección de destino

Es un campo de seis bytes de longitud e indica la dirección o direcciones de los nodos a quien va dirigida la trama. Estas direcciones pueden ser para un receptor individual, grupal o global (dirección de broadcast).

Campo dirección fuente

Es un campo de seis bytes de longitud e indica la dirección del nodo que origino la trama.

Campo longitud/Tipo

Este campo de dos bytes de longitud tiene dos significados dependiendo de su valor numérico. Si el valor que toma este campo es menor o igual a 1500 entonces el campo Longitud/Tipo indica el número de bytes contenidos en el campo de datos. Si el valor de este campo es mayor o igual a 1536 entonces el campo Longitud/tipo indica que protocolo esta encapsulado en la carga de datos del paquete. [48]

Campo datos

Es el campo donde se encuentra la información encapsulada de las capas superiores. Tiene una tamaño máximo de 1500 bytes y mínimo de 46 bytes. En el caso de que el tamaño de este campo sea menor al mínimo requerido para la correcta operación del protocolo, se añade el campo PAD al final del mismo de tal forma que se complete la cantidad de bytes mínima (512 bites).

Campo FCS

El campo de comprobación de secuencia de la trama tiene una longitud de cuatro bytes y contiene el código de redundancia cíclica de 32 bit calculado sobre todos los campos del paquete exceptuando el preámbulo y el campo SFD para la identificación de errores.

Protocolo de acceso al medio

El estándar soporta dos modos de operación de control de acceso al medio: *Half Duplex* y *Full Duplex*. En el modo de operación *Half Duplex* el nodo puede enviar y recibir datos pero no de forma simultánea. En el modo *Full Duplex* la recepción y transmisión de datos puede ocurrir de forma simultánea.

Half Duplex

En este modo de operación los nodos comparten el medio de transmisión y acceden al él usando el algoritmo CSMA/CD (Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Detección de Colisiones). La comunicación bidireccional es realizada por el rápido intercambio de tramas y su operación es posible sobre todos los medios físicos soportados siendo requerido en aquellos que no soportan transmisión simultánea [48].

El algoritmo CSMA/CD toma los siguientes pasos (figura 8):

1. El nodo arma la trama con todos sus campos y verifica que el tamaño del paquete sea el mínimo necesario para el correcto funcionamiento del protocolo, posteriormente escucha el medio. Si encuentra el medio libre, transmite; en otro caso se aplica el paso 2. Una vez el nodo empieza a transmitir y supera el tiempo necesario para que la información de canal ocupado llegue a todos los nodos se dice que tiene oficialmente el medio.
2. Si el medio se encuentra ocupado, continua escuchando hasta que el canal se libere, en cuyo caso transmite luego de esperar un tiempo llamado *InterpacketGap*.
3. Si el nodo detecta una colisión durante la transmisión, se transmite una señal pequeña de interferencia llamada *Jam* para asegurarse de que todos los nodos escuchen la colisión. A continuación el nodo deja de transmitir.
4. Después de la emisión de la señal de interferencia, el nodo espera una cantidad aleatoria de tiempo conocida como backoff, intentando transmitir de nuevo a continuación (volviendo al paso 1). Si siguen ocurriendo colisiones el periodo de tiempo aleatorio aumenta hasta un número determinado de intentos donde eventualmente se tenga éxito en la transmisión o se abandonen los intentos por sobrecarga del medio.

Las variables involucradas en el algoritmo se muestran en la tabla 3 de acuerdo con el medio y la tasa de transmisión involucrada en el proceso.

Parameters	MAC data rate			
	Up to and including 100 Mb/s	1 Gb/s	10 Gb/s	40 Gb/s and 100 Gb/s
slotTime	512 bit times	4096 bit times	not applicable	not applicable
interPacketGap ^a	96 bits	96 bits	96 bits	96 bits
attemptLimit	16	16	not applicable	not applicable
backoffLimit	10	10	not applicable	not applicable
jamSize	32 bits	32 bits	not applicable	not applicable
maxBasicFrameSize	1518 octets	1518 octets	1518 octets	1518 octets
maxEnvelopeFrameSize	2000 octets	2000 octets	2000 octets	2000 octets
minFrameSize	512 bits (64 octets)	512 bits (64 octets)	512 bits (64 octets)	512 bits (64 octets)
burstLimit	not applicable	65 536 bits	not applicable	not applicable
ipgStretchRatio	not applicable	not applicable	104 bits	not applicable

Tabla 3. Variables MAC modo Half Duplex [49].

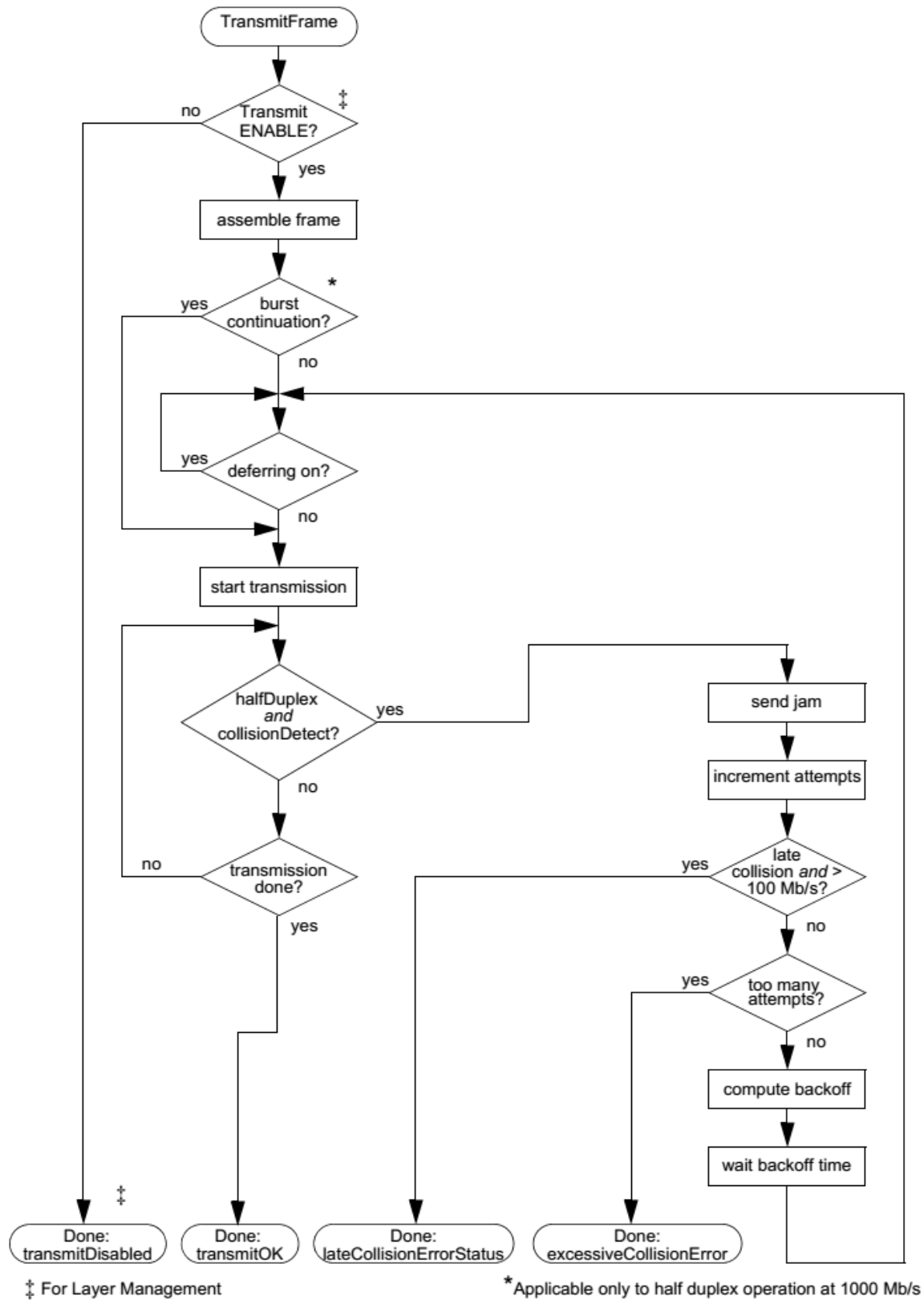


Figura 8. Algoritmo CSMA/CD. [48].

Full Duplex

Por otra parte en el modo *Full Duplex*, el nodo puede enviar y recibir datos de forma simultánea y la comunicación entre los nodos es punto a punto en un canal dedicado, por lo tanto no es necesario la implementación del algoritmo CSMA/CD. La configuración más común para un modo de operación en *Full Duplex* consiste en la topología en estrella con un puente central conocido como switch, conectando cada nodo a un puerto del switch [48].

El modo en full dúplex solo puede ser usado cuando se cumplen los siguientes requisitos:

- El medio físico es capaz de soportar transmisión y recepción de forma simultanea sin interferencia.
- Hay exactamente dos nodos conectados con un enlace punto a punto *Full Duplex*. Debido a que no existe contienda por el medio, el algoritmo de CSMA/CD es innecesario.
- Ambas dispositivos sobre la LAN son capaces y están configurados para operar en el modo *Full Duplex*.

Las transmisiones pueden ser iniciadas en cualquier instante de tiempo sujeto solamente a la congestión de la capa física y al tiempo entre paquetes (*InterpacketGap*) necesario para la recuperación del medio y del receptor.

En este modo, el nodo ignora cualquier señal generada por la capa física indicando una colisión de paquetes. El nodo siempre será capaz de transmitir sin contención por el medio, por lo tanto no hay necesidad de reprogramar las transmisiones. El algoritmo se ilustra en la figura 9.

Las variables involucradas en el proceso se muestran en la tabla 3.

Parameters	Values
interPacketGap	96 bits
maxBasicFrameSize	1518 octets
maxEnvelopeFrameSize	2000 octets
minFrameSize	512 bits (64 octets)

Tabla 4. Variables MAC del modo Full Duplex.

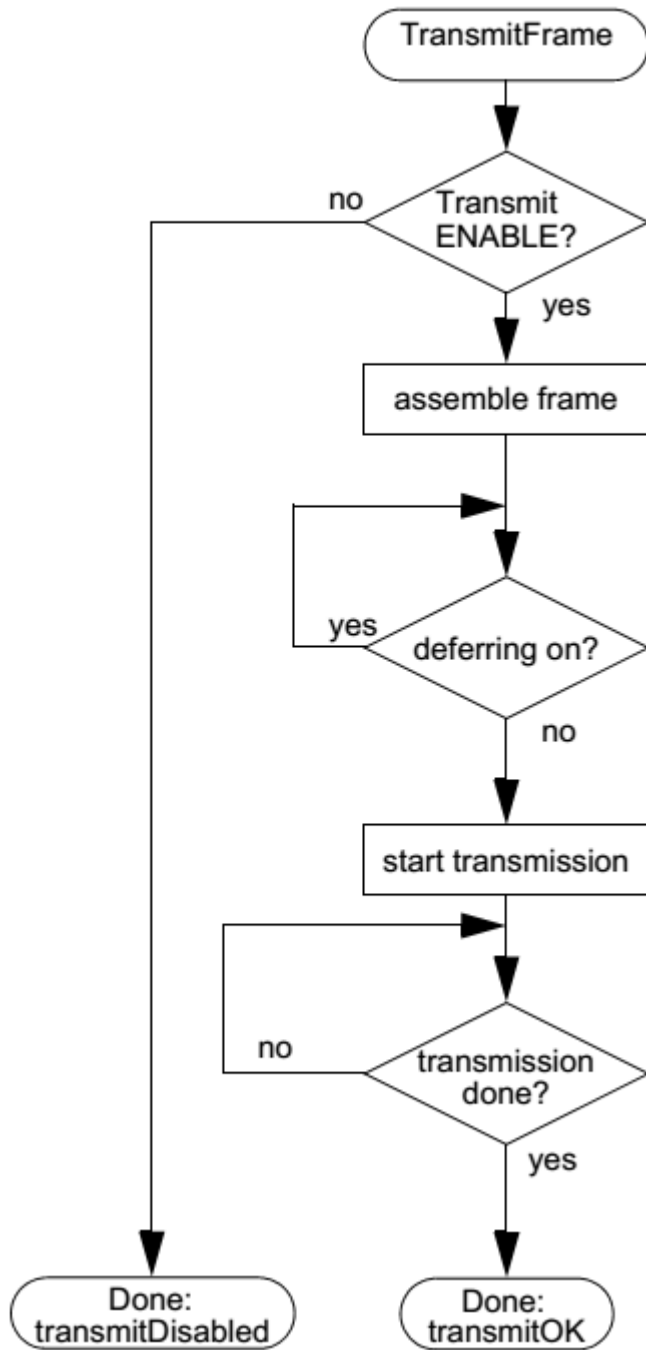


Figura 9. Algoritmo de acceso al medio Full Duplex. [48].

Capa Física

El comité IEEE 802.3 ha sido el más activo en la definición de distintas configuraciones físicas alternativas y ha desarrollado una notación concisa con el fin de distinguir las diferentes implementaciones disponibles como [38]:

<Velocidad de transmisión en Mbps><Método de señalización><Longitud máxima del segmento en centenas de metros o si no se especifica corresponde al medio de transmisión>

La tabla 4 y la tabla 5 resumen algunas opciones y ejemplifica el método de notación empleado mostrado anteriormente.

	10BASE5	10BASE2	10BASE-T	10BASE-FP
Medio de transmisión	Cable coaxial (50 ohm)	Cable coaxial (50 ohm)	Par trenzado no apantallado	Par de fibra óptica a 850 nm
Técnica de señalización	Banda base (Manchester)	Banda base (Manchester)	Banda base (Manchester)	Manchester/on-off
Topología	Bus	Bus	Estrella	Estrella
Longitud máxima del segmento (m)	500	185	100	500
Nodos por segmento	100	30	—	33
Diámetro del cable (mm)	10	5	0,4 a 0,6	62,5/125 μ m

Tabla 5. Alternativas para el medio de transmisión a 10Mbps [38].

	100BASE-TX		100BASE-FX	100BASE-T4
Medio de transmisión	2 pares, STP	2 pares, UTP categoría 5	2 fibras ópticas	4 pares, UTP categoría 3, 4 o 5
Técnica de señalización	MLT-3	MLT-3	4B5B, NRZI	8B6T, NRZ
Velocidad de transmisión	100 Mbps	100 Mbps	100 Mbps	100 Mbps
Longitud máxima del segmento	100 m	100 m	100 m	100 m
Cobertura de la red	200 m	200 m	400 m	200 m

Tabla 6. Alternativas para el medio de transmisión a 100 Mbps [38]

Codificación Manchester

Es un tipo de codificación de línea que se usa para todos los sistemas de transmisión del estándar IEEE 802.3 operando a una tasa de transmisión de 10 Mbps [50]. El sistema

combina la señal del reloj con los bit's de datos formando símbolos binarios. Cada símbolo binario que tiene la duración de un periodo de bit, es dividido en dos partes, siendo contrarias las polaridades de cada una de las mitades. La señal de un uno lógico está conformada por una polaridad baja en la primera mitad y una polaridad alta en la segunda mitad. La señal de un cero lógico está conformada por una polaridad alta en la primera mitad y baja en la segunda mitad como se muestra en la figura 10. La señal de datos y la señal de reloj están relacionadas por medio de una función XOR.

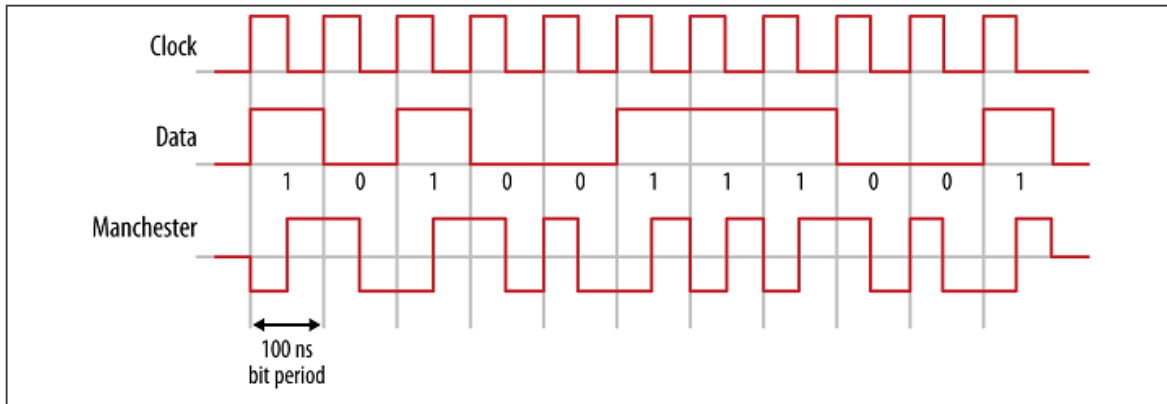


Figura 10. Codificación Manchester [50].

Señal eléctrica

La señal con codificación Manchester es transmitida sobre el par trenzado con un voltaje diferencial que se debe encontrar en el rango de 2.2 V a 2.8 V y -2.2 V a -2.8 V [48].

El rango del voltaje para que el receptor sea capaz de reconocer la señal debe estar en un rango superior o igual a 300 mV. Este nivel de voltaje ayuda a prevenir y limitar las señales inducidas por el ruido eléctrico o la interferencia entre los pares de hilos, al igual que limita la distancia del enlace debido a la atenuación de la señal [50].

Switch

Un Switch es un dispositivo lógico que funciona en la capa de enlace del modelo OSI. Su función principal es la interconexión entre dispositivos Ethernet, enlazando el tráfico llevado por redes individuales a redes más grandes o simplemente enlazando los dispositivos pertenecientes a una red LAN.

El direccionamiento del tráfico está basado en el aprendizaje de direcciones MAC. El Switch solo tiene acceso a la información de la capa MAC de la trama que llega a sus

puertos (figura 7), por lo tanto el Switch asocia la dirección MAC del dispositivo con el puerto en el que se encuentra conectado en una base de datos.

Cada puerto del Switch contiene una memoria que almacena la trama antes de ser enviada a otro puerto, este mecanismo es llamado *store and forward*. Una vez llega la trama a un puerto, es revisada para asegurarse que tenga el tamaño adecuado y no tenga errores en el valor del CRC. Este mecanismo aumenta la seguridad en la red, descartando las tramas con información errónea.

La latencia que agrega este mecanismo dependerá del tamaño de la trama. Entre más grande sea la trama, mayor latencia agrega el dispositivo debido a la lectura que debe hacer sobre la información. Esta desventaja es mejorada por otro mecanismo llamado *cut-Through* en donde solo le lee la información perteneciente al campo de direcciones para direccionar la trama al puerto de salida correspondiente. La desventaja de este mecanismo es que no se tiene seguridad sobre la fiabilidad de la trama, por ejemplo una trama con la información alterada producto de una colisión puede ser direccionada.

El comportamiento del Switch se evalúa dentro de un rango de métricas que incluyen el máximo ancho de banda o capacidad de conmutación de paquetes, el número máximo de direcciones MAC que puede almacenar y la máxima tasa de paquetes por segundo de paquetes que puede enviar por sus puertos.

3.5.2 Tecnologías inalámbricas

3.5.2.1 ZigBee

ZigBee es un estándar desarrollado por ZigBee Alliance, que corresponde a una organización sin ánimo de lucro y de libre ingreso formado en 2002,[51], [52]. Donde se definen un conjunto de protocolos y estándares de comunicaciones para una red inalámbrica con características como bajo costo, baja tasa de transmisión, bajo consumo, menor complejidad para el usuario, flexible, confiable, robusto, con conexiones multipunto, baja interferencia con otros dispositivos inalámbricos y conexión directa con sensores, medidores y actuadores [53].

Dentro de sus aplicaciones se encuentran en su mayoría las que hacen uso de baterías, monitoreo, como el cuidado de la salud, control remoto, casas inteligentes, internet de las cosas, redes de sensores, automatización, juguetes y productos electrónicos de consumo.[54]

La arquitectura ZigBee está basada en el modelo OSI [55]. La capa física y la capa de enlace se encuentran definidas bajo las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas. En cuanto a las capas de red, seguridad y aplicación se definen bajo el estándar de ZigBee Alliance como se muestra en la figura 11 [54], [55].

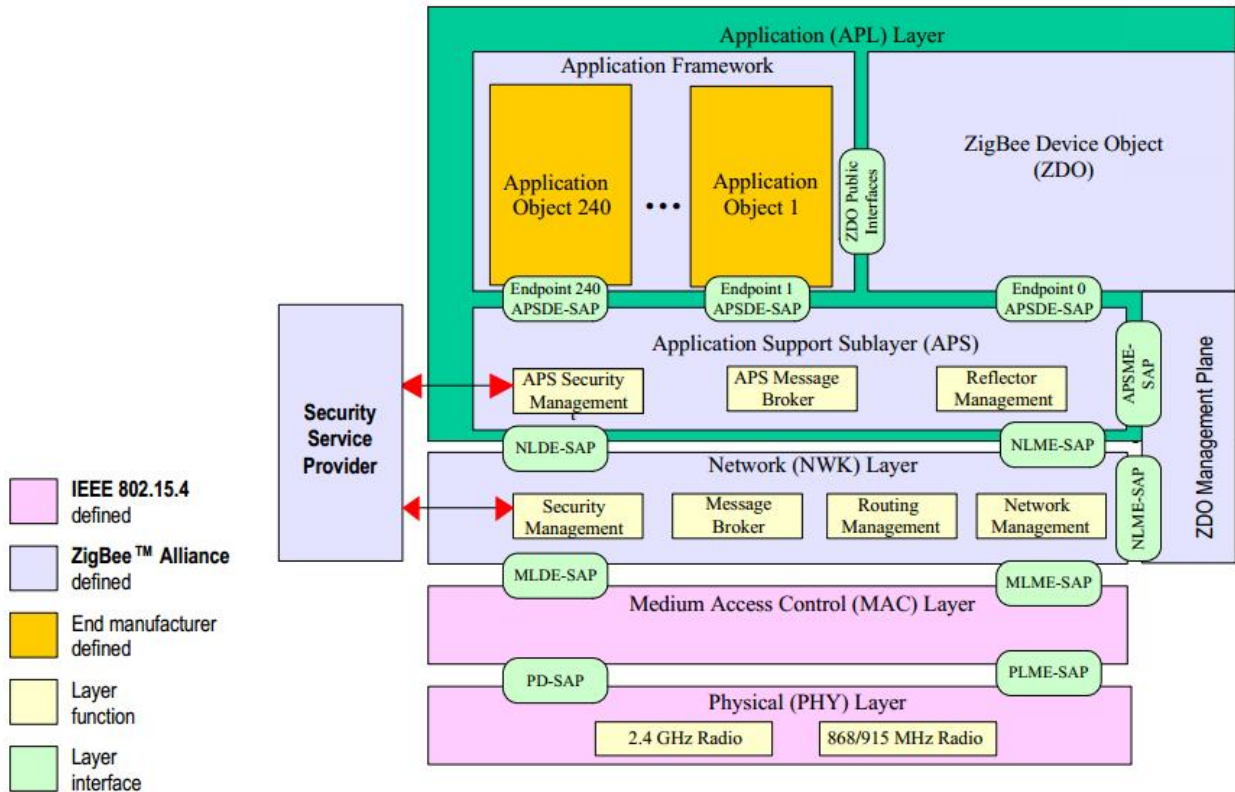


Figura 11. Arquitectura ZigBee [54].

Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 fue desarrollado por el comité de estándares IEEE 802 y publicado inicialmente en el año 2003, aunque ha contado con varias modificaciones ampliando sus capacidades de operación como las tasas de transmisión para ciertas frecuencias de operación, así como los esquemas de modulación entre otros,[56]. Este estándar fue desarrollado de forma independiente al estándar de ZigBee, por lo tanto es de libre uso para otros dispositivos que hagan uso de un protocolo distinto en las capas superiores. Aunque cada dispositivo ZigBee debe hacer uso del estándar IEEE 802.15.4 para garantizar la interoperabilidad entre los distintos fabricantes.

Algunas de las características que ofrece el estándar IEEE 802.15.4 en cuanto a la capa física y de enlace se encuentran [57]:

- Operación en las bandas de frecuencia de licencia libre de 868MHz a 868.6 MHz, 902 MHz a 928 MHz y 2400MHz a 2483.5 MHz.
- Inclusión de las bandas de 314 MHz a 316 MHz, 430MHz a 434 MHz y 779 MHz y 787 MHz para China y 950 MHz a 956 MHz para Japón.
- Operación en estrella o peer to peer.

- Direccionamiento de 16 bits, o direccionamiento extendido de 64 bits.
- Asignación opcional de espacios de tiempo garantizados para la comunicación (GTS).
- Control de acceso al medio por medio del protocolo CSMA/CA slotted o unslotted.
- Procedimiento de reconocimiento (ACK) para la transferencia confiable de datos.
- Bajo consumo de potencia.
- Detección de energía (ED).
- Indicación de la calidad del enlace (LQI).
- Selección del canal de frecuencia.
- Sincronización de la red por medio de tramas beacon.

Los dispositivos compatibles al estándar deben ser capaces de operar en una de las frecuencias y tasas de transmisión que se muestran en la tabla 6. Esta tabla, corresponde a la modificación del estándar del año 2011.

Frecuencia / MHz	Banda de frecuencia / MHz	Tasa de chip	Modulación	Tasa de bit/kbps	Tasa de símbolos	Símbolos
780	779-787	1000	OQPSK	250	62.5	16-ary ortogonal
780	779-787	1000	MPSK	250	62.5	16-ary ortogonal
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binario
	902-928	600	BPSK	40	40	Binario
868/915 (Opcional)	868-868.6	400	ASK	250	12.5	20 bit PSSS
	902-928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (Opcional)	868-868.6	400	OQPSK	100	25	16-ary ortogonal
	902-928	1000	OQPSK	250	62.5	16-ary ortogonal
950	950-956	-	GFSK	100	100	Binario
950	950-956	300	BPSK	20	20	Binario
2450 DSSS	2400-2483.5	2000	OQPSK	250	62.5	16-ary ortogonal

Tabla 7. Frecuencias y tasas de transmisión IEEE 802.15.4 [57]

Tipos de dispositivos ZigBee

El estándar cuenta con dos tipos de dispositivos: FFD (Full Function Devices) y RFD (Reduced Function Devices). Un dispositivo con la configuración FFD es capaz de realizar todas las funciones disponibles del estándar y realizar cualquier función dentro de la red. Por otra parte un dispositivo con la configuración RFD tiene limitadas las funciones que puede realizar, tanto en la red que participa como en las funciones disponibles del estándar. Un dispositivo RFD se considera normalmente como un esclavo, o como un nodo final dentro de la red [55], [58].

Un dispositivo tipo FFD puede establecer una comunicación con otro dispositivo tipo FFD o con uno tipo RFD, pero un nodo RFD solo puede comunicarse con un FFD funcionando como coordinador o coordinador PAN de la red.

Roles dentro de la red ZigBee

El estándar propone tres tipos de roles: Coordinador PAN o coordinador de la red, coordinador o router y dispositivo final. Un nodo con características del tipo RFD solo puede ejercer el rol de dispositivo final, en cambio un nodo configurado como FFD puede ser cualquiera de los tres.

El dispositivo que cumple la función de coordinador PAN corresponde al primer nodo FFD que logra acceder al medio y comunicarse, y es el único que puede cumplir esta función dentro de toda la red. Algunas de las funciones principales del coordinador PAN son:

- Establecer la configuración inicial de la red.
- Asignar una única dirección a cada dispositivo de la red de 16 bits o 64 bits.
- Establecer el identificador PAN de la red.
- Inicializar, terminar y reenviar los mensajes a través de la red.
- Sincronizar otros dispositivos asociados a la red.

En cuanto a las funciones que cumple el coordinador o router dentro de la red son:

- Sincronizar otros dispositivos asociados a la red.
- Reenviar los mensajes a través de la red.
- Expandir la red a partir de las configuraciones iniciales.

Un nodo con configuración RFD, no tiene otras funcionalidades específicas dentro de la red, además de transmitir datos de acuerdo con la aplicación específica que haga parte.

Topologías de la red ZigBee

El estándar ZigBee soporta dos configuraciones de red o topologías, en estrella y en malla. Debe existir al menos un dispositivo tipo FFD que funcione como coordinador PAN para la creación de la red. La topología en estrella está conformada por nodos periféricos que solo se comunican con un nodo central o coordinador PAN. El coordinador PAN está representado por un dispositivo FFD. Los nodos periféricos son representados por dispositivos tipo RFD e incluso también por FFD.

En cuanto a la topología en malla, todos los nodos se pueden comunicar entre sí, por tanto la mayoría de dispositivos que participan en esta topología corresponden a FFD ya que permiten el reenvío de mensajes y conformar nuevos enlaces de la red con otros dispositivos incluso con dispositivos RFD como se muestra en la figura 12. En este caso el nodo RFD solo se podrá comunicar con un único nodo FFD. [55].

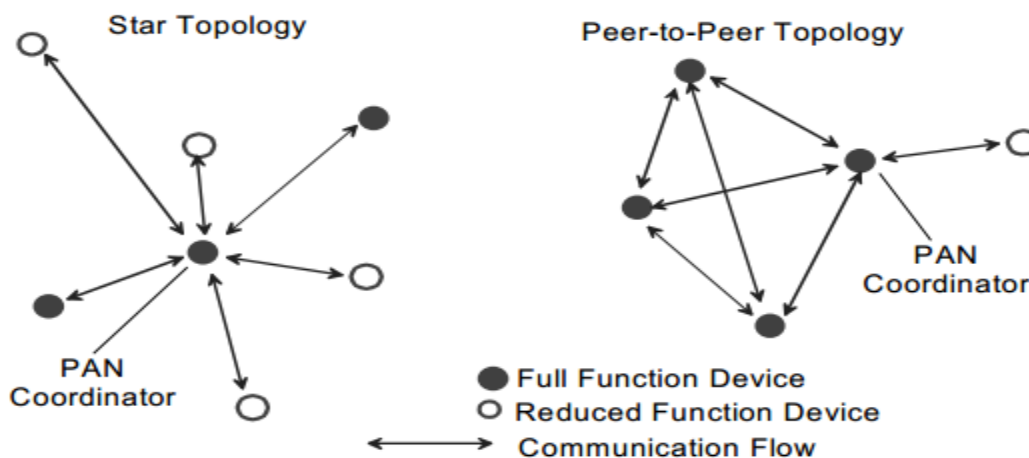


Figura 12. Topologías ZigBee [57].

Capa de enlace

De acuerdo a la topología de la red y a la configuración de la misma, establecida por el coordinador PAN al momento de iniciar la red, el acceso al medio se realiza de dos formas: Periodos libres de contiendas (Contention Free Periods, CFP) y Periodos de acceso por contiendas (Contention Access Period, CAP). En el CAP el acceso al medio se realiza por medio del protocolo CSMA/CA, y en él el coordinador PAN puede sincronizar los periodos de contienda por medio de tramas *Beacon*, con lo que el protocolo ahora pasa a llamarse CSMA/CA slotted o ranurado, en caso de que no se hagan uso de estas tramas los nodos que quieran acceder al medio realizan el protocolo CSMA/CA unslotted o no ranurado en cualquier instante de tiempo.

En los CFP, el coordinador PAN establece un periodo de tiempo para que un nodo en particular envíe los datos, y para ello utiliza las tramas *Beacon* para sincronizar la red. Este

periodo de tiempo se llama *guaranteed time slot* (GTS) y en él no se realiza el mecanismo de CSMA/CA.

Trasferencia de datos entre dispositivos ZigBee

Se establecen tres tipos de transferencia de datos que se pueden dar entre dispositivos. La primera corresponde a la interacción de un FFD a un RFD como se ilustra en la figura 13. La segunda corresponde de un RFD a un FFD como se muestra en la figura 14 y por último la transmisión de datos de dos FFD figuras 13 y 14.

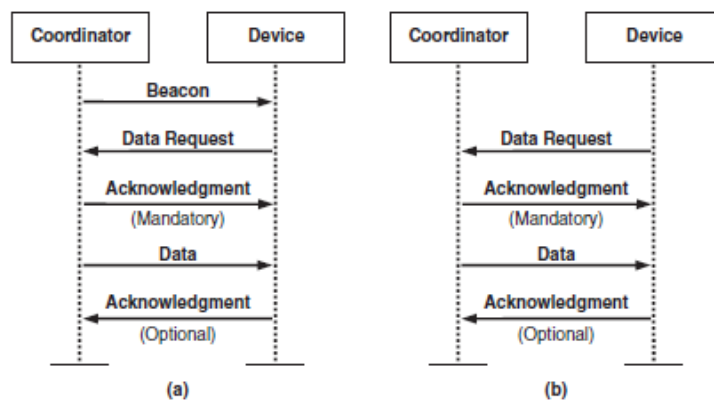


Figura 13. Transferencia de datos de un FFD a RFD o FFD a FFD a) Con tramas beacon b) Sin tramas beacon [55].

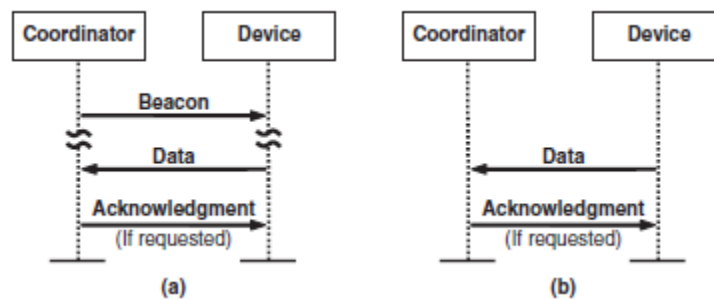


Figura 14. Transferencia de datos de un RFD a un FFD o FFD a FFD a) Con tramas beacon b) Sin tramas beacon [55].

Tipos de tramas

La transmisión de información y comandos entre dispositivos se da en forma de tramas. La imagen de la figura 15, muestra la estructura general de una trama, apreciándose el encapsulamiento de la información entre las capas del estándar ZigBee. El campo SHR corresponde al preámbulo que son los bits de sincronismo para el receptor. En cuanto a los

campos PHR, MHR, NHR y AHR hacen referencia a los encabezados de las capas física, de enlace, de red y de aplicación respectivamente. Los campos Payload son la carga útil o información de cada capa, la cual se van almacenando en las capas inferiores del estándar.

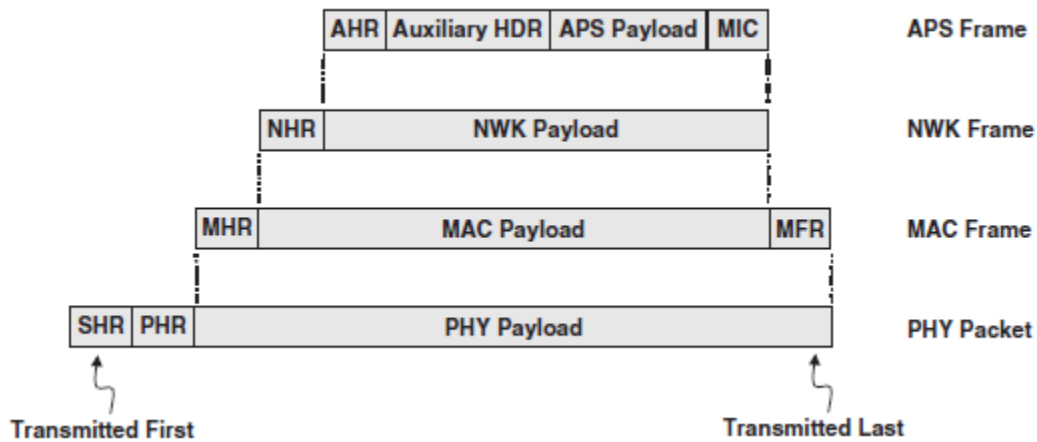


Figura 15. Estructura general del paquete Zigbee [55].

El estándar cuenta con cuatro tipos de tramas con propósitos específicos dentro del funcionamiento de la red. Estos corresponden a la trama de reconocimiento o ACK (figura 16), la trama de sincronización con la red o trama Beacon (figura 17), la trama de datos (figura 18) y la trama de comandos (figura 19).

La estructura de la trama de reconocimiento, figura 16, tiene como función confirmar la recepción exitosa de la trama de datos al transmisor. La capa de enlace se compone de dos partes, el encabezado MHR y la secuencia de verificación de trama MFR, con un tamaño de cinco octetos que conforman la carga de capa física.

La capa física se compone de tres partes, el preámbulo, *Preamble Sequence*, y los bits que indican el final del preámbulo y el inicio de la trama de datos, *SFD Start of Frame Delimiter*, el encabezado de la trama física, PHR, y la carga compuesta por la información proveniente de las capas superiores, PHY Payload, PSDU.

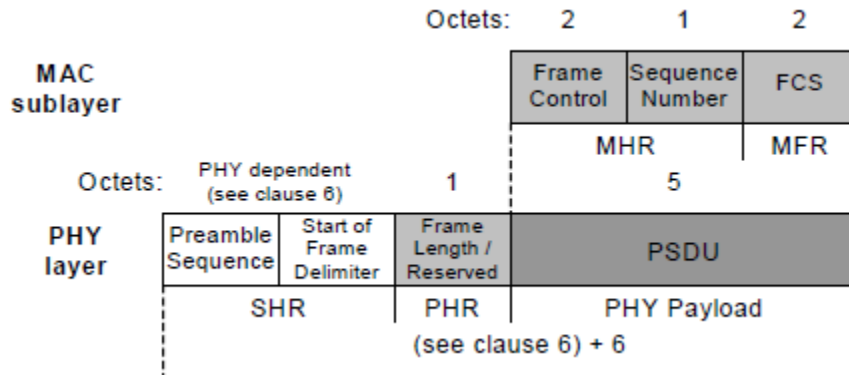


Figura 16. Estructura de la trama de reconocimiento ACK [59].

La trama Beacon que se ilustra en la figura 17, tiene como función realizar la sincronización de los dispositivos asociados a la red, como también indicar a uno de estos dispositivos que el coordinador tiene información pendiente para entregarle, figura 3, o que tiene asignado un periodo de libre acceso al medio GTS.

La capa MAC de la trama Beacon la compone el encabezado MHR con la información de control que define el tipo de trama, el direccionamiento y otras banderas de control, *Frame Control*. El número de secuencia con el identificador de la trama, *Sequence Number*. El campo con la información de direccionamiento, *Addressing Fields*, y un encabezado auxiliar con la información requerida para brindar seguridad al procesamiento, *Auxiliary Security Header*. La carga, *MAC Payload*, donde se encuentra el campo con la información de los intervalos de tiempo en que se realizan los envíos, *Superframe Specification*, el campo GTS que es usado para indicar si este intervalo de tiempo es usado para enviar o transmitir, *GTS Fields*. El campo de dirección de los dispositivos con archivos pendientes para transmitirles, *Pending Address Fields*, y el campo de la carga en el caso de que se requiera transmitir datos de capas superiores en la transmisión, *Beacon Payload*. Por último el campo MFR que corresponde a la secuencia de verificación de la trama, *FCS*. Todos estos campos componen la carga para la capa física.

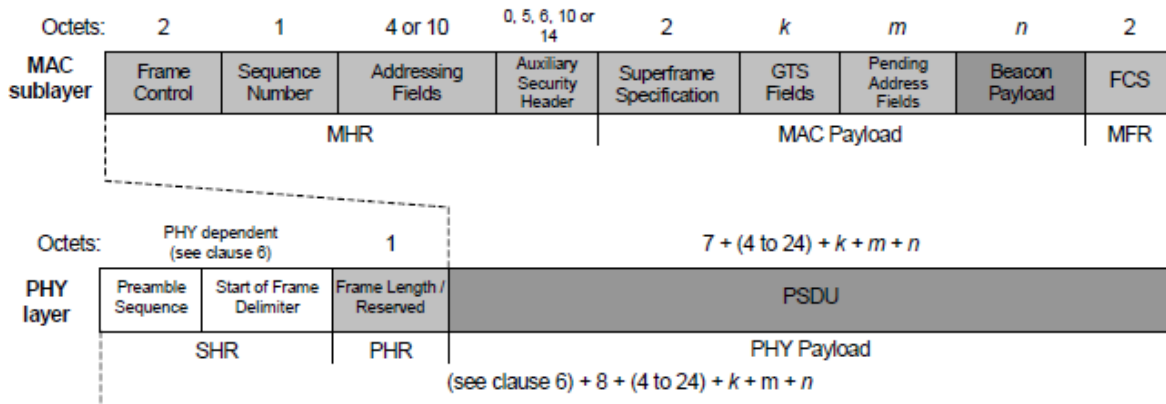


Figura 17. Estructura de la trama Beacon [59].

La estructura de la trama de datos se muestra en la figura 18. Tiene como función transmitir la información proveniente de las capas superiores. Los campos de la capa MAC son similares a los descritos en la trama Beacon con la diferencia de que no se usan los campos de la especificación de la supertrama, el campo GTS y el campo con las direcciones pendientes. Los datos de las capas superiores se encuentran almacenados en la carga de la capa de enlace, *Data Payload*.

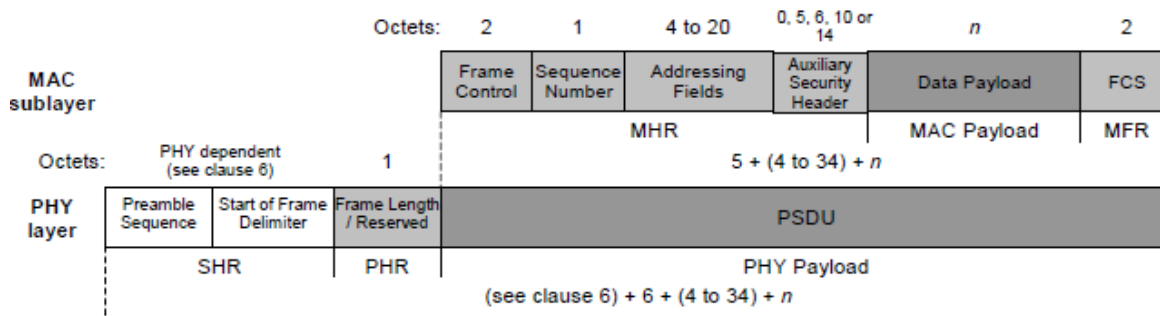


Figura 18. Estructura de la trama de datos [59].

La trama de comandos mostrada en la figura 19, permite enviar notificaciones, peticiones y respuestas al coordinador como al nodo de la red según sea el caso. Por ejemplo la petición de asociación a una red o la notificación de la disociación de la misma. Esta información se encuentra en los campos de tipo de comando, *Command Type*, y la información asociada al tipo de comando, *Command Payload*.

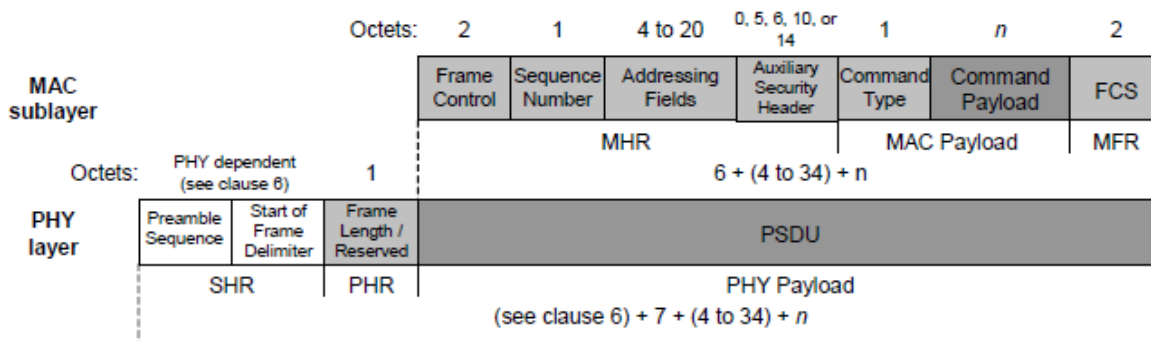


Figura 19. Estructura de la trama de comandos de la capa de enlace [59].

Campos de la trama Física

Como se muestra de la figura 15 a la figura 17, la trama de la capa se compone de tres bloques: SHR, PHR y PHY Payload, con un tamaño máximo de 127 Bytes u octetos que conforman la trama PPDU.

Segmento SHR

El bloque SHR esta compuesto por el campo del preambulo y el campo SFD.

Campo preámbulo

El campo del preámbulo es usado para que el receptor se sincronice con el flujo de bits de la trama entrante. Su longitud depende de la frecuencia y de la modulación empleada, como se muestra en la tabla 2, y corresponden a ceros binarios excepto por los dispositivos que utilicen las modulación ASK.

PHY	Length		Duration (uS)
868–868.6 MHz BPSK	4 octets	32 symbols	1600
902–928 MHz BPSK	4 octets	32 symbols	800
868–868.6 MHz ASK	5 octets	2 symbols	160
902–928 MHz ASK	3.75 octets	6 symbols	120
868–868.6 MHz O-QPSK	4 octets	8 symbols	320
902–928 MHz O-QPSK	4 octets	8 symbols	128
2400–2483.5 MHz O-QPSK	4 octets	8 symbols	128

Tabla 8. Campo del preámbulo, longitud y duración [57].

Campo SFD

Es un campo que indica la culminación del preámbulo y advierte el inicio del flujo de bits de datos. Tiene una longitud de 8 bits excepto para los dispositivos con modulación ASK y está formada por la secuencia de bit de la figura 20.

Bits: 0	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	1	0	1

Figura 20. Formato del campo SFD [57].

Segmento PHR

Está conformado por una secuencia de ocho bits, cuyos primeros siete bits de izquierda a derecha contienen información sobre la longitud o tamaño del segmento PHY Payload y el último bit tiene un uso reservado. En la tabla 3, se muestra un resumen de los valores correspondientes a este campo.

Valores de la longitud de la trama(Bytes o octetos)	PHY Payload
0 a 4	Reservado
5	Trama ACK
6 a 8	Reservado
9 a 127	Cualquier otro MPDU(Datos, Beacon..)

Tabla 9. Posibles valores de longitud del campo [57].

Campos de la trama MAC

La capa MAC está compuesta por tres segmentos que conforman la trama MPDU (figura 21). Estos corresponden a los segmentos MHR, MAC Payload y MFR, cuyos campos pueden variar o cambiar de acuerdo al tipo de trama a transmitir (ACK, Beacon, Datos o Comandos) o configuración de la red.

Octets: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10/ 14	variable	2
Frame Control	Sequence Number	Destination PAN Identifier	Destination Address	Source PAN Identifier	Source Address	Auxiliary Security Header	Frame Payload	FCS
		Addressing fields						
MHR							MAC Payload	MFR

Figura 21. Formato de los campos de la capa MAC [59].

Segmento MHR

Está compuesto por los campos de control, numero de secuencia, datos de direccionamiento y la información relacionada con la seguridad de los datos como se muestra en la figura 11. Dependiendo de la configuración de la red, el tamaño de este segmento puede llegar a ser de 37 octetos o bytes.

Campo Frame Control

Este campo tiene un tamaño de 2 octetos y contiene la información el tipo de trama que representa así como las banderas de control para que se realice una adecuada lectura de la información de la trama. El formato del campo Frame Control se ilustra en la figura 22.

Bits: 0-2	3	4	5	6	7-9	10-11	12-13	14-15
Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	Ack. Request	PAN ID Compression	Reserved	Dest. Addressing Mode	Frame Version	Source Addressing Mode

Figura 22. Estructura del campo Frame Control [57].

Los primeros tres bits del campo, denominados *Frame Type*, como se ilustra en la figura 22, contienen la información sobre qué tipo de trama se está transmitiendo: Beacon, Datos, ACK o un comando MAC.

El siguiente bit, *Security Enabled*, se configura en uno, si la trama va a estar protegida por la capa MAC, en otras palabras, este bit habilita o deshabilita el campo *Auxiliary Security Header* del segmento MHR de la capa MAC.

El bit 4, llamado *Frame Pending*, toma el valor de uno, si el coordinador PAN, o coordinador tiene datos penitentes para transmitirle a otro dispositivo, como se observa en la figura 13.

El bit 5, *ACK Request*, se le asigna el valor de uno, en el caso de que se requiera él envío de la trama ACK para la verificación de los datos del receptor hacia el emisor. En el caso contrario se debe asignar el valor de cero.

El bit 6, correspondiente a *PAN ID Compression*, especifica si en la capa MAC envía únicamente la dirección PAN de destino en el caso de que se tenga acceso tanto a la dirección fuente como la dirección de destino. En caso contrario o que no se tengan las dos direcciones este bit debe ser cero.

Los tres bits del siete al nueve no tienen uso y se encuentran reservados. En cuantos a los bits diez y once corresponden al modo de direccionamiento del destino, *Destination Addressing Mode*, y determinan la longitud de la dirección como se muestra en la tabla 9.

Valores del modo de direccionamiento ($b_1 b_0$)	Descripción
00	Los campos del identificador PAN y direcciones no están presentes
01	Reservado
10	Direccionamiento con 16 bits
11	Direccionamiento extendido de 64 bits

Tabla 10. Valores del campo Destination Addressing Mode [57].

El campo de la versión de la trama (*Frame Version*), tiene dos bits de longitud correspondientes a los bits doce y trece. Su función es indicar la versión del estándar 2003 o más actual. En el primer caso se le asigna el valor 00 y 01 para la versión actual, los demás casos son de uso reservado para posteriores actualizaciones.

Por último los bits catorce y quince correspondientes al modo de direccionamiento de la fuente (*Source Addressing Mode*) y tienen la misma configuración que se muestra en la tabla 4.

Campo Número de secuencia

Este campo tiene un octeto de longitud y tiene como función comparar e identificar la correspondencia entre varias tramas como por ejemplo una trama de datos con una trama de reconocimiento ACK o una trama de comandos. [59]

Hay dos tipo de números de secuencia, la primera corresponde al identificador de las tramas beacon (*Beacon Sequence Number BSN*) y es usado solo para las tramas tipo Beacon y el segundo al identificador de las tramas de datos (*Data Sequence Number DSN*) usado en cualquier otro tipo de tramas. Su valor inicial es aleatorio y aumenta en uno para después de cada transmisión. [55]

Campo identificador PAN de destino

Especifica un único identificador PAN para el destinatario de la trama. Su longitud es de dos octetos en el caso de estar presente y cero en caso contrario. Si a este campo se le asigna la dirección 0xffff se debe tomar como un identificador valido y corresponde al identificador PAN de difusión o broadcast. [59].

Campo identificador PAN de fuente

Especifica un único identificador PAN del emisor de la trama. Su longitud es de dos octetos en caso de estar presente y cero en caso contrario. Su valor es determinado para un nodo al momento de asociarse a una PAN.

Campos dirección fuente y destino

Corresponde a la dirección de destino y fuente y su longitud puede ser de dos octetos o ocho octetos de acuerdo a la configuración establecida en el campo de la trama de control (*Frame Control*). El valor 0xffff para la dirección destino debe ser entendida como la dirección de difusión o broadcast.

Campo de encabezado auxiliar de seguridad

Es un campo auxiliar de longitud variable entre cero, cinco, seis, diez y catorce octetos. Contiene información perteneciente al nivel y el tipo de seguridad usada para proteger la trama MAC.

Segmento MAC Payload

Está compuesto por el campo MAC Payload y contiene la información de las capas superiores. Su longitud es variable de acuerdo al tamaño que tomen los campos del anterior segmento.

Segmento MFR

Está compuesto únicamente por el campo FCS de dos octetos de longitud. Contiene el código de 16 bits ITU-T CRC y es calculado sobre los segmentos MHR y MAC Payload de la trama MAC para la identificación de posibles errores.

Periodo IFS

El espaciamiento entre tramas (*Interframe Spacing*) es el periodo de tiempo que el transmisor debe esperar para transmitir dos tramas consecutivas o corresponde al periodo de tiempo que necesita el receptor para procesar la información de una trama antes de que llegue la siguiente.

Dependiendo si la longitud de la trama MAC (MPDU) es menor o igual a la constante *aMaxSIFSFrameSize* que corresponde a dieciocho bytes, el periodo IFS puede tomar dos valores: espaciamiento entre tramas corto (SIFS, Short Interframe Spacing) para tramas MAC menores o iguales a dieciocho bytes y espaciamiento entre tramas largo (LIFS, Long Interframe Spacing) si las tramas MAC son mayores a dieciocho octetos.

El tamaño del periodo SIFS y el periodo LIFS es de doce y cuarenta símbolos respectivamente. El proceso de espaciado se muestra en la figura 23. El tiempo t_{ACK} corresponde al tiempo máximo que el transmisor espera por la trama ACK, si supera este tiempo el emisor interpretara que no se recibió correctamente la trama. Ecuación 12.

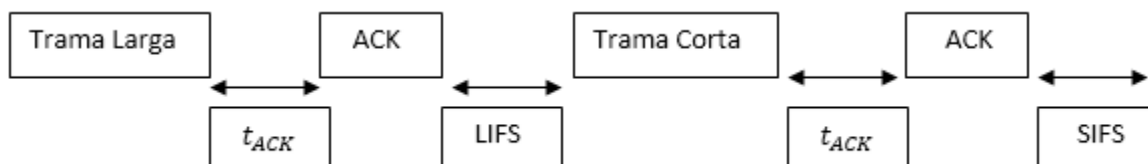


Figura 23. Espaciado entre tramas con intercambio de mensajes ACK [59].

Protocolo CSMA/CA

El estándar IEEE 802.15.4 adopta como método de control de acceso al medio el protocolo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) o acceso múltiple con detección de portadora y prevención de colisiones. Como se expuso anteriormente, el estándar tiene dos versiones del protocolo: CSMA/CA *unslotted* y CSMA/CA *slotted*. El algoritmo que se ilustra en la figura 24 corresponde al protocolo CSMA/CA *unslotted*, y en él intervienen cinco variables cuyos valores se muestran la tabla 10.

Variable	Valor
NB (Number of Back offs)	0 (inicial)
BE (Back off exponent)	3 (inicial)
macMaxBE	5
aUnitBackoffPeriod	20 símbolos
macMaxCSMABackoff	4

Tabla 11. Variables que intervienen el protocolo CSMA/CA.

El proceso del algoritmo empieza con la inicialización de las variables NB a cero y BE con el valor macMinBE. La variable NB (Numero de Backoffs) tiene como función contar el número de veces que el nodo realiza la espera o cuenta regresiva por el canal libre, en tanto BE (Exponente de Back off) determina el rango de valores de la cuenta regresiva o Backoffs.

Una vez inicializados estos valores, se procede a realizar la cuenta regresiva o el periodo de espera que equivale a tomar un valor entero aleatorio en el rango de cero a $2^{BE} - 1$ y multiplicarlo por la unidad de Backoff. La unidad de back off es muy importante debido a que el algoritmo se encuentra sincronizado con este valor.

Una vez la cuenta regresiva llega a cero, el dispositivo inicia la lectura del medio para verificar si este se encuentra ocupado por otro dispositivo que este transmitiendo en ese momento o por el contrario se encuentra libre. Si el nodo encuentra que el medio se encuentra libre se empieza el proceso de transmisión de la trama de datos. Si por el contrario se encuentra el medio ocupado, se aumenta en uno la variable NB y el valor de BE va a ser el resultado de tomar el valor mínimo entre $BE + 1$ y la constante *macMaxBE*. Luego se pregunta si el número de intentos de acceder al medio ha superado el valor máximo dado por la constante *macMaxCSMABackoff*. De resultar correcta la afirmación, se procede a reportar un fallo en el intento de transmisión a las capas superiores del estándar y descartar la trama de datos. Si la afirmación es falsa, se vuelve a realizar el periodo de espera con la cuenta regresiva.

Existen cuatro ocasiones en la que el estándar permite el acceso al medio sin la realización del protocolo CSMA/CA. La primera consiste en la transmisión de tramas Beacon, la segunda corresponde a los periodos libres de contienda cuando a un nodo se le asigna un periodo de tiempo para transmitir o GTS, la tercera ocurre en la transmisión de tramas ACK y por último después de recibir una trama ACK de una trama de petición de datos como se muestra en la figura 23.

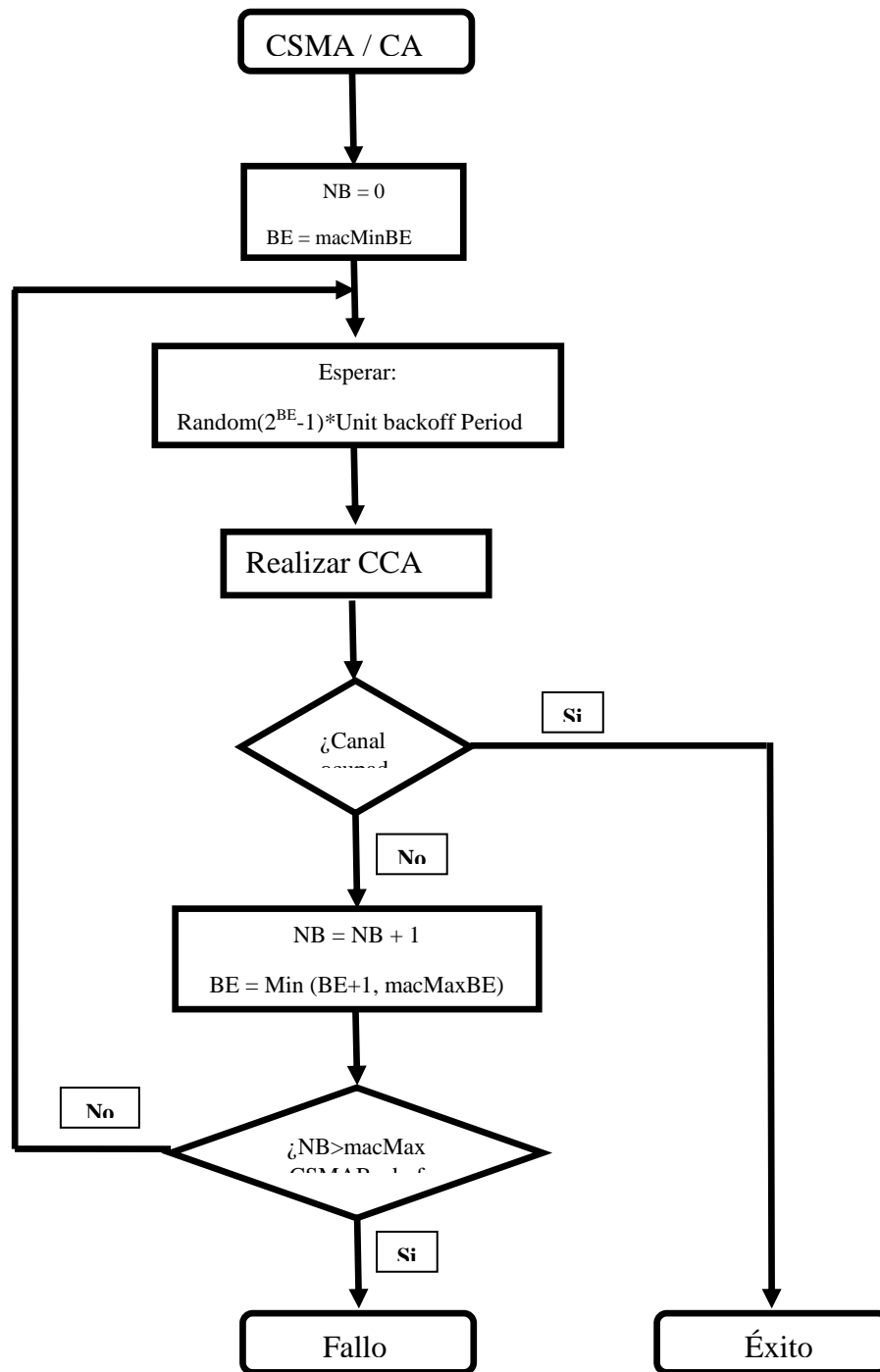


Figura 24. Algoritmo CSMA/CA unslotted [59].

Luego de que el nodo haya accedido al medio y enviado la trama exitosamente, esperará por la trama ACK, figura 23, (si la configuración de la red obliga la transmisión de la trama de reconocimiento), un tiempo máximo dado por la variable *macAckWaitDuration* (ecuación 12). Si cumplido el tiempo el transmisor no recibe la trama, interpretara que la información no llego correctamente al receptor e intentara reenviar de nuevo la información.

$$macAckWaitDuration = aUnitBackoffPeriod + aTurnaroundTime + phySHRDuration + ceiling(6 * phySymbolsPerOctec) \quad (12)$$

Una variable perteneciente a la capa mac que queda por fuera del algoritmo CSMA/CA descrito anteriormente corresponde a *macMaxFrameRetries* (equivale a 3). Esta variable especifica el máximo número de intentos permitidos para volver a transmitir luego de una transmisión fallida. Es decir, una vez el algoritmo CSMA/CA haya tenido éxito en acceder al medio y enviar la trama, el dispositivo tiene un máximo de tres intentos de volver a acceder al medio y transmitir si encuentra que la transmisión ha sido fallida, antes de que se reporte el fallo a las capas superiores y se descarte el paquete [59].

Capa Física

El estándar define para la frecuencia de 2.45 GHz el esquema de modulación O-QPSK – DSSS con las siguientes características:

- Tasa de transferencia de 250 Kbps
- Tasa de símbolo de 62.5 KSymbol/s
- Tasa de Chip de 2000 Kchip/s
- 16 canales disponibles en la banda de 2400MHz con 2MHz de ancho de banda.

El esquema de modulación se muestra en la figura 25 y se compone de tres bloques principales: Traslado de bit a símbolo, traslado de símbolos a chip y por último el bloque de modulación OQPSK.

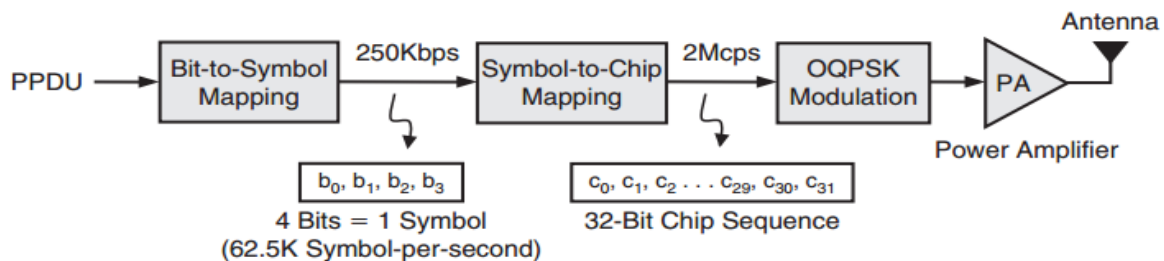


Figura 25. Esquema de modulación a la frecuencia de 2.45 GHz [55].

La secuencia de la trama de datos (PPDU) se divide en grupos de cuatro bits para formar un símbolo, cada símbolo tiene una duración de dieciséis microsegundos. Este grupo de cuatro bits corresponden a los cuatro bits menos significativos de un byte y a los cuatro bits más significativos del mismo hasta completar todo el paquete de datos.

Cada combinación de cuatro bits o posible símbolo se le asigna una secuencia única de 32 bits. Esta secuencia de 32 bits se le llama *secuencia chip* o *secuencia de ruido pseudoaleatorio* (PN por sus siglas en inglés). La secuencia chip para cada símbolo se encuentra en la tabla 11.

Símbolo (Decimal)	Símbolo (Binario)	Secuencia Chip
0	0000	11011001110000110101001000101110
1	0001	11101101100111000011010100100010
2	0010	00101110110110011100001101010010
3	0011	00100010111011011001110000110101
4	0100	01010010001011101101100111000011
5	0101	00110101001000101110110110011100
6	0110	11000011010100100010111011011001
7	0111	10011100001101010010001011101101
8	1000	10001100100101100000011101111011
9	1001	10111000110010010110000001110111
10	1010	01111011100011001001011000000111
11	1011	00000111101110001100100101100000
12	1100	00000111011110111000110010010110
13	1101	01100000011101111011100011001001
14	1110	10010110000001110111101110001100
15	1111	11001001011000000111011110111000

Tabla 12. Secuencia chip para cada símbolo [57].

La secuencia chip representando a cada símbolo es modulada sobre la portadora usando OQPSK con *half sine pulse shaping*. La modulación se compone de dos señales en fase (I) y en cuadratura (Q). Los chips pares son modulados sobre la señal en fase y los impares sobre la señal en cuadratura. El desfase entre las dos señales se realiza retrasando la señal Q con respecto a la señal I por un valor de T_c como se muestra en la figura 26. El valor de T_c es el inverso de la tasa de chips.

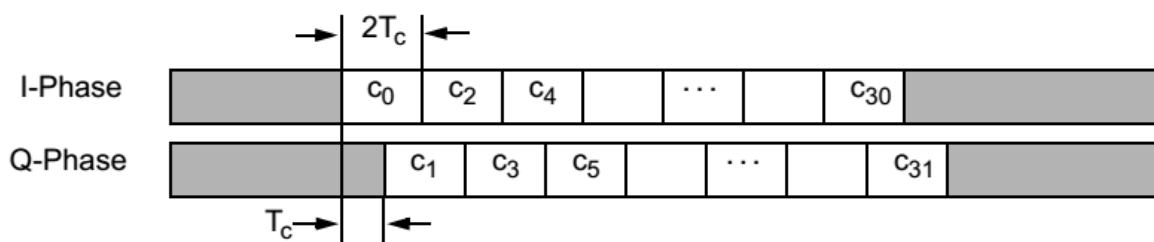


Figura 26. Desfase entre las señales en fase y en cuadratura [57].

Potencia de transmisión y sensibilidad del receptor

La potencia de transmisión debe ser al menos de -3 dBm siendo típicos valores de transmisión de 0 dBm. En cuanto a la sensibilidad, el receptor debe ser capaz de obtener una sensibilidad de -85 dBm o mejor.

Cambio del modo Tx a Rx y del modo Rx a Tx

El estándar define un tiempo máximo en que el dispositivo debe ser capaz de pasar del modo de transmisión al modo de recepción. Este tiempo debe ser menor o igual a la constante *aTurnaroundTime* que equivalen a doce símbolos (192 μ s).

3.5.2.2 WIFI

El estándar IEEE 802.11, que se ocupa de la capa física y de enlace de WiFi, es un tecnología para redes inalámbricas desarrollado en el año 1997 que inicialmente empezó a desplegarse con bajas velocidades de 1Mbps y 2Mbps operando en la banda gratuita de 2.4 GHz, pero que con el pasar de los años se ha venido expandiendo tan rápidamente que incluso sus inventores nunca creyeron posible tanta acogida, tanto así, que a día de hoy alcanza velocidades de hasta 54Mbps operando tanto en la frecuencia de 2.4 GHz como en la de 5 GHz. Es por esto que hoy día cuando se habla de redes de área local inalámbricas, inmediatamente el concepto del estándar IEEE 802.11 aparece, ya que estas redes son fáciles de implementar y usar [60].

Wifi es una marca de la Alianza Wi-Fi, quienes son los encargados de revisar y certificar los productos que soportan su protocolo.

Capa de enlace

Estructura de las tramas

Para que todos los nodos operando bajo el estándar IEEE 802.11 puedan comunicarse e identificar la información que las tramas contienen, se deben seguir ciertos parámetros para formar la estructura de los paquetes que se envíen dentro de la red. Los nodos pertenecientes a la BSS deben ser capaces de decodificar los paquetes que estas reciban,

manteniendo correcta la secuencia de verificación de trama (FCS por sus siglas en inglés), y de interpretar los campos correspondientes a las cabeceras MAC [49].

La estructura general de la trama MAC se ilustra en la figura 27.

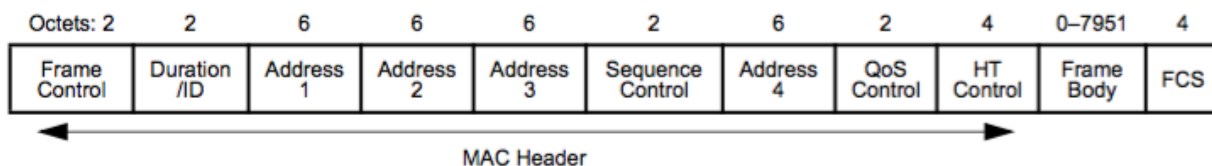


Figura 27. Formato general de la trama MAC [49].

Todas las tramas MAC comprenden un formato de campos fijos, algunos de ellos obligatorios y otros opcionales. Los primeros tres campos (Frame Control, Duration/ID y Address 1) y el último (secuencia de verificación de trama, FCS) deben estar presentes en todas las tramas y constituyen su estructura mínima. Los campos Address 2, Address 3, Sequence Control, Address 4, QoS Control y HT Control son campos que solo están presentes en algunos tipos y subtipos de tramas.

Campo Frame Control

El campo Frame Control es aquel encargado de proveer a las STAs la información de la estructura del paquete que viene añadido al encabezado en cuestión. En la figura 28 se muestra la estructura bit a bit del campo Frame Control.

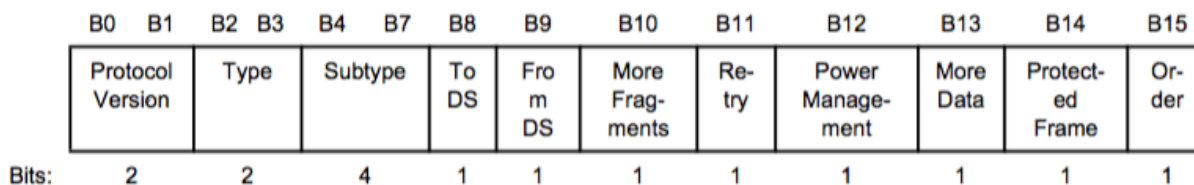


Figura 28. Campo Frame Control [49].

Por un lado, el subcampo Protocol Version es el que indica la variante del protocolo que está usando la trama en cuestión.

Cabe mencionar que existen tres tipos de tramas: tramas de control, de administración y de datos. Los campos Type, de 2 bits de longitud, y Subtype, de 4 bits de longitud, en conjunto identifican el tipo de trama que está siendo enviada.

Los campos To DS y From DS (de 1 bit de longitud cada uno) en conjunto se encargan de indicar el tipo de destino y de fuente que está usando la trama.

El campo More Fragments de longitud de 1 bit, se configura en 1 cuando la trama en cuestión tiene más fragmentos para formar la MSDU correspondiente.

El campo Retry se usa para indicar si la trama, que puede ser de administración o de datos, es una retransmisión de una trama anterior. Para indicar tal situación, este campo se pone a 1.

El campo Power Management se encarga de indicar el modo de administración de energía de una STA. Este campo puede ser un campo reservado, o puede permanecer constante en la secuencia de intercambio de los paquetes.

El campo More Data se usa para indicarle a la STA, actuando bajo el modo PS (Power Save), que no se ponga en modo reposo porque hay más tramas en cola por recibir.

El campo Protected Frame es el encargado de indicar si el cuerpo del paquete ha sido procesado por algún tipo de algoritmo de encriptación. Es de longitud de 1 bit y se pone a 1 cuando los datos están encriptados.

El campo Order se usa para indicarle al nodo de un proceso de orden de trama y se establece por capas superiores. Normalmente, este bit siempre está puesto a 0. Este campo es de longitud de 1 bit.

Campo Duration/ID

Este campo es de longitud de 16 bits y se usa para indicar al nodo la cantidad de tiempo que va a durar en enviarse todo el paquete que está añadido al encabezado MAC en cuestión. El valor contenido varía según los campos Type y Subtype presentes en el Frame Control [49]. Para el caso en el que se esté utilizando PCF y mientras se esté en el período libre de contención, el campo Duration/ID se establece en un valor fijo de 32678. Si por ejemplo, son paquetes enviados por nodos que no están usando QoS, el valor de este campo se establece según el tipo de trama como se define en el estándar.

Campo Address

Dependiendo de los bits ToDS y FromDs definidos en el campo Frame Control, una trama puede contener hasta 4 direcciones, así:

Address 1 siempre es la dirección de destino del paquete. Si ToDS está puesto en 1, entonces se refiere a la dirección del Access Point; en caso de que no, la dirección destino será el nodo final.

Address 2 siempre es la dirección fuente del paquete. Si FromDS está puesto en 1, entonces se refiere a la dirección del Access Point; en caso de que no, la dirección fuente es el nodo origen.

Address 3 es en la mayoría de los casos la dirección faltante en la información de las direcciones. Si por ejemplo, el bit FromDS está en 1, este campo se llena con la información de la dirección del nodo fuente. Si ToDS está en 1, address 3 es la dirección destino.

Address 4 se usa para casos especiales en que un DS inalámbrico se usa y la trama está siendo transmitida de un Access Point a otro. Para estos casos, tanto el bit ToDS como el bit FromDS, están puestos en 1.

Cada campo Address está representado por 48 bits. Las direcciones MAC pueden ser una de dos tipos: direcciones individuales o direcciones grupales. Las direcciones individuales son las designadas a un nodo particular perteneciente a la red. Por otro lado, las direcciones grupales pueden ser direcciones multicast (un grupo específico de nodos dentro de la red), o direcciones broadcast (todos los nodos pertenecientes a la red) [49].

Campo FrameBody

El campo Frame Body es de longitud variable. Bien puede contener una MSDU o fragmentos de la misma. La longitud mínima de este campo es de 0 bytes, y la longitud máxima está definida por la longitud MSDU máxima soportada, más cualquier sobrecarga de datos debida a alguna encriptación que se esté implementando.

Campo FCS

El campo FCS está designado para la detección de errores en la trama mediante el uso de una verificación por redundancia cíclica de 32 bits. Esta verificación está implementada para confirmar cualquier error dentro de cualquier campo de la trama MAC, bien sea dentro del encabezado, como dentro del cuerpo del paquete [49].

Trama ACK

La trama ACK es la que envía el nodo receptor como respuesta a una STA que recién le envió un paquete, para confirmar que los datos se recibieron correctamente. La estructura de la trama ACK se define como en la figura 29.

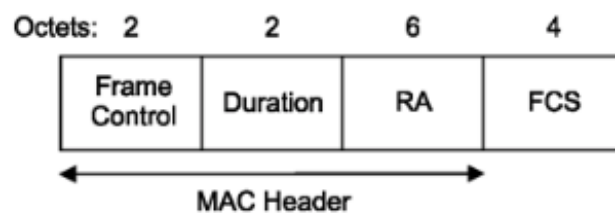


Figura 29. Estructura de la trama ACK.

La longitud de la trama ACK es de 112 bits, de los cuales 80 corresponden al encabezado MAC así: el campo Frame Control (16 bits); el campo Duration (16 bits); el campo RA, al que se copia la información del campo Address 2 de la trama que recién se recibió; y un campo FCS para detección de errores.

Las tramas SIFS se usan, entonces, para realizar el envío de tramas de alta prioridad, como tramas ACK, paquetes CTS, o para responder a un llamado de polling. La ecuación definida por la capa física para el tiempo SIFS está descrito mediante la Ecuación (13).

$$aSIFSTime = aRxRFDelay + aRxPLCPDelay + aMACProcessingDelay + aRxTxTurnaroundTime. \quad (13)$$

PIFS

El PIFS es usado por el coordinador, o Access Point (AP), para ganar el acceso al canal antes de que lo haga cualquier otro nodo y así coordinar el tráfico dentro de la red. Se usa cuando se opera bajo el modo PCF. [61]

La ecuación descrita para calcular el tiempo PIFS se define mediante la Ecuación (14).

$$PIFS = aSIFSTime + aSlotTime \quad (14)$$

DIFS

El espacio entre tramas DCF es aquel con menor prioridad entre los demás espaciamentos del canal y se usa cuando un nodo pretende enviar un paquete y detecta que el medio está libre para la transmisión. Una STA debe esperar por lo menos un tiempo DIFS para poder entrar a la ventana de contención y posteriormente, a acceder al canal para el envío de los datos. Se usa para casos en que la transmisión es asíncrona [49], [61].

La ecuación para calcular el tiempo DIFS está descrito por la ecuación (15).

$$DIFS = aSIFSTime + 2 * aSlotTime \quad (15)$$

EIFS

El EIFS es el tiempo más largo de todos y se usa antes del envío de un paquete cuando un nodo ha detectado un error en la transmisión de sus paquetes, bien sea porque la capa física ha detectado un fallo en el reporte de la primitiva PHY-RXEND.indication o porque se ha generado un error en la secuencia para comprobación de errores, FCS [49], [61].

La ecuación para calcular el tiempo EIFS está descrito por la ecuación (16).

$$EIFS = aSIFSTime + DIFS + ACKTxTime \quad (16)$$

RIFS

El tiempo entre tramas reducido RIFS es incluso más corto que el EIFS y se usa cuando se requiere transmisión de varios paquetes seguidos por parte de un mismo nodo transmisor, de modo que aumenta el throughput de la red y, por lo tanto, su eficiencia. El valor del RIFS lo define la capa física mediante la característica aRIFS PHY. [49].

RTS/CTS

Aunque DCF indica que debe implementarse el protocolo de acceso al medio como prevención ante las colisiones que puedan presentarse dentro de la red, muchas veces los nodos dentro de una BSS deben enviar grandes paquetes que hacen que las colisiones aumenten en gran medida, sin mencionar los problemas debidos a nodos ocultos y a nodos expuestos que el protocolo de acceso al medio CSMA/CA no puede mitigar por sí mismo. Es por esto que se hace necesario un mecanismo que prevea todas estas situaciones y controle el flujo de datos de la BSS de modo que se eviten al máximo las colisiones.

Un método para reducir la ocurrencia de las colisiones se basa en el envío de tramas cortas de control previo a la transmisión de los paquetes. Bajo este supuesto, los nodos que pretenden enviar información deben primero enviar una trama *request to send* (RTS) al coordinador, con la que informan al AP que tienen datos para enviar y que necesitan autorización para hacerlo. Dentro de la trama RTS se encuentra información que incluye la dirección fuente, la dirección destino y la duración de la transmisión, incluyendo el tiempo que demora el envío de la trama en cuestión y su confirmación ACK [61].

Una vez el coordinador ha recibido la autorización para enviar un paquete, este responderá con otra trama de control llamada *clear to send* (CTS por sus siglas en inglés) indicando que el nodo puede iniciar la transmisión. En caso tal de que la STA no reciba la autorización para el inicio de la transmisión, asumirá que hubo una colisión y luego de un período aleatorio de backoff, volverá a enviar el RTS. Si por el contrario, la fuente recibe el paquete CTS, enviará al destino una confirmación de que lo recibió correctamente y proseguirá a enviar los datos.

El intercambio de paquetes RTS/CTS hace que los demás nodos puedan actualizar su vector de adjudicación del canal, de modo que pueden establecer su valor extrayendo cualquiera de los dos campos de duración de cualquiera de los dos paquetes de control; cabe diferenciar que los valores dispuestos en cada campo de cada una de las tramas no son los mismos, porque por ejemplo, para el caso del RTS, debe incluirse el tiempo que implica el intercambio de la trama CTS. Sin embargo, si un nodo ha actualizado su valor del NAV según el campo de duración de un paquete RTS y después de todo, nunca se inició una transmisión por parte de la STA que envió la petición (si no lo indica la primitiva PHY-

RXSTART.indication por un período de tiempo definido por el estándar), esta podrá reiniciar el valor del NAV [49].

Este mecanismo de intercambio de paquetes de control es una manera de distribución del asignamiento del medio a las STAs en la BSA que aunque no es inmune a las colisiones, es menos propensa al manejar tamaños de paquetes cortos que de por sí implican menos probabilidades de colisiones. Por otro lado, el hecho de que se use este mecanismo elimina el problema del nodo oculto, ya que así un nodo esta fuera del rango de área de cubrimiento de cualquier otra, el coordinador con su respuesta CTS informa a todos los nodos que se va a usar el medio y su mecanismo CS virtual se encargará de evitar que intente acceder al canal.

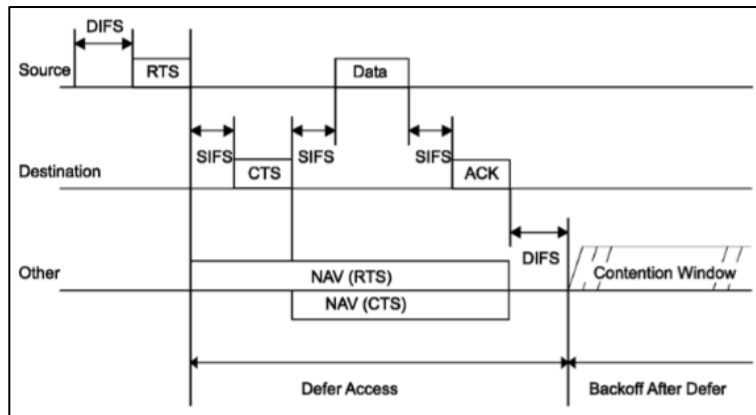


Figura 31. Escenario de coexistencia de tramas RTS/CTS y la configuración del NAV [49].

Aunque el uso de RTS y CTS conlleva varias ventajas, al añadir tramas de control dentro del tráfico de la red, esto añade sobrecarga de ineficiencia y por lo tanto disminuye el throughput. Es por esta razón que no siempre se justifica el uso de este mecanismo, en especial para paquetes que son cortos [49]. El uso de RTS/CTS se regula mediante un atributo ajustable llamado dot11RTSThreshold para indicar el tamaño del paquete desde el cual se usará el intercambio de tramas de control RTS y CTS. Cisco, por ejemplo, establece el valor por defecto de este atributo en 2312 bytes [60].

Acceso al medio

El acceso al medio que describe el estándar IEEE 802.11 opera bajo las llamadas funciones de coordinación. La arquitectura MAC se basa en la función de distribución coordinada DCF, servicio en el que se fundamentan PCF (Función de coordinación puntual), HCF (Función de coordinación híbrida) y MCF (Función de coordinación en malla).

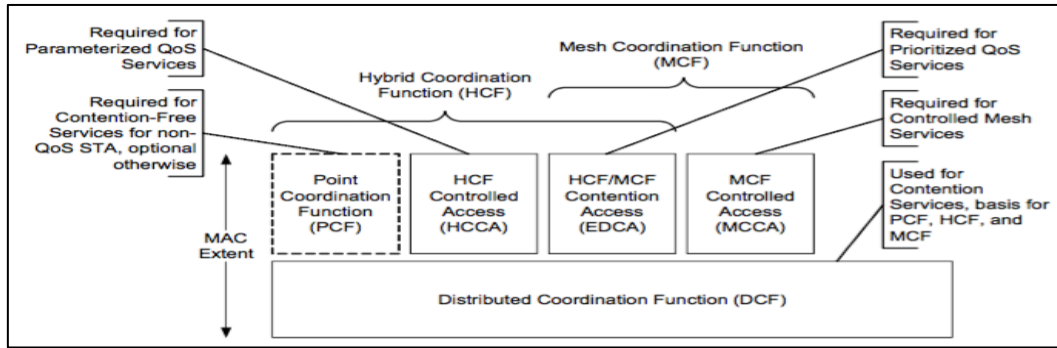


Figura 32. Arquitectura MAC [49].

DCF

La función de distribución coordinada es el mecanismo básico y obligatorio de acceso al canal que deben soportar todos los nodos operando bajo el estándar. Su funcionamiento se basa en lo que se conoce como el protocolo de acceso al medio con prevención de colisiones (CSMA/CA).

A diferencia de Ethernet y su respectivo protocolo de acceso al medio CSMA/CD, el proceso en el que se basa DCF consiste en prevenir la ocurrencia de colisiones al sensar el estado de disponibilidad del canal cuando un nodo pretende iniciar una transmisión. Esta prevención de colisiones es la parte clave de la función de distribución coordinada porque al no contar con un enlace full-duplex que permita la transmisión y recepción de datos simultáneamente, como ocurre en el caso de Ethernet, no hay una manera de detectar colisiones tan pronto estas ocurren. Por otro lado, al estar operando bajo un escenario de un medio inalámbrico, no se puede asumir que todos los nodos escuchan a las demás cuando alguna ocupa el canal (principal requerimiento del sistema de detección de colisiones) [62].

Para asegurar el correcto funcionamiento de DCF, los nodos se coordinan a través de espacios de tiempo entre tramas (IFS) que aseguran prioridades en diferentes situaciones para los nodos pertenecientes a la BSS.

En primera instancia, cuando una STA pretende acceder al canal para transmitir, debe cerciorarse de que el medio esté libre por un tiempo igual al IFS para poder iniciar. Si es así, puede transmitir inmediatamente. Si por el contrario, el medio está ocupado, el nodo entonces pausará el conteo descendiente de backoff que esté realizando y procederá a esperar el tiempo que vaya a tardar la transmisión que está en proceso.

Una vez que la transmisión en curso haya finalizado, los demás nodos por consiguiente ya habrán decrementado su contador de NAV a cero y reanudarán su conteo descendiente de backoff, sondeando nuevamente la disponibilidad del canal, esperarán el tiempo IFS que corresponda y entonces intentarán acceder al medio para dar curso a la transmisión en cola.

Cuando un nodo logra transmitir un paquete, este queda a la espera de la confirmación ACK correspondiente para cerciorarse de que se recibieron correctamente los datos. Dado el caso de que el nodo envía el paquete al coordinador y nunca recibe la confirmación de vuelta, pasado el tiempo SIFS, la STA asumirá que hubo un error en la transmisión y reajustará el valor de CW según corresponda (en caso de que no se haya alcanzado la cantidad máxima de intentos de envío). Luego, espera un tiempo EIFS e intenta acceder nuevamente al medio para retransmitir la trama, repitiéndose todo el proceso nuevamente.

El proceso general descrito anteriormente en el que se basa DCF para la transmisión de los datos se muestra en la figura 32.

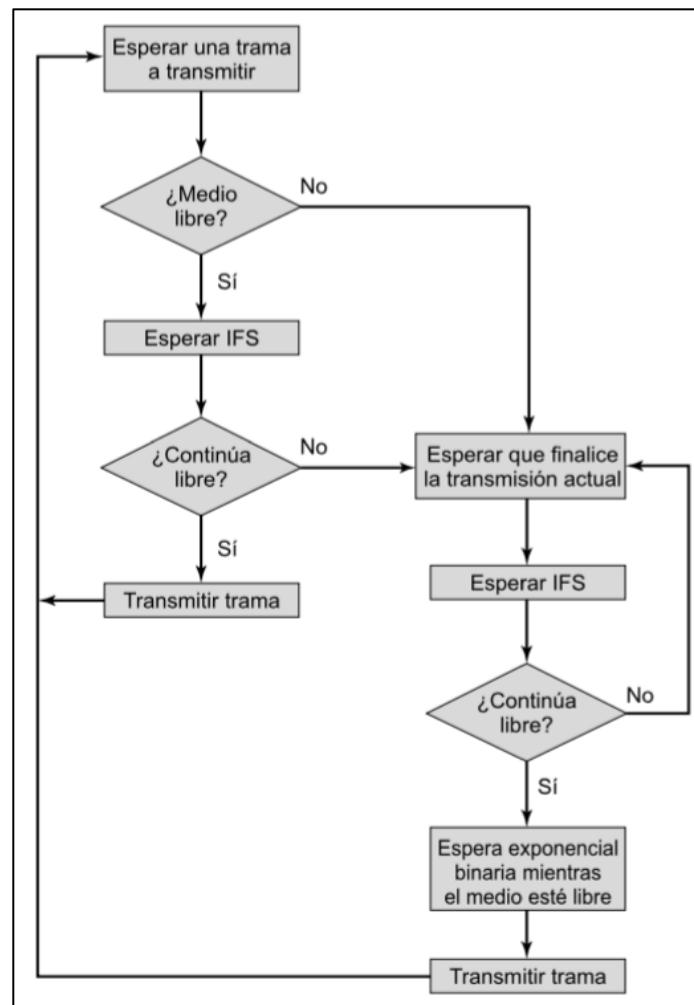


Figura 33. Diagrama de flujo del acceso al medio [38].

PCF

La función de coordinación puntual PCF, es un método de acceso centralizado que trabaja en conjunto con DCF en donde todo el tráfico es manejado por un nodo central, o AP. Para asegurar la prioridad de PCF sobre DCF, el AP es provisto de un período interframe

llamado PIFS que es más corto que el DIFS, de modo que una vez se inicia la supertrama, el AP accede antes que cualquier otro dispositivo al canal y así bloquea todo el tráfico asíncrono de la red [38].

Cuando se usa PCF, debe dejarse un espacio para el acceso a STAs que no estén soportados bajo este tipo de función puntual, sino que usen la contención a través de DCF. Para hacer esto posible, se usa la supertrama, en donde el AP, que accede primero al medio a través del PIFS, deja un tiempo para que los demás nodos puedan hacerlo. Cuando un AP determina que el canal está libre por un tiempo mayor o igual a PIFS, el AP envía un trama Beacon conteniendo un elemento CF Parameter Set y un elemento DTIM [38].

El período de la ventana de tiempo en que los nodos operando bajo PCF envían los datos, se conoce como *período libre de contención* (CFP por sus siglas en inglés) y se inicia una vez el AP ha logrado ocupar el canal. La duración de tiempo de la ventana libre de contención es definido por el administrador de la red y se especifica en el parámetro CFPMaDuration, del que todos los nodos dentro de la BSS se basan para establecer su valor del NAV [62]. Todos los nodos que no sean el CP, deben actualizar el valor del NAV de acuerdo a un parámetro llamado CFPDurRemaining que se especifica dentro del elemento CF Parameter Set de cada trama Beacon libre de errores que la STA reciba [49].

Durante PCF, el PC mantiene una lista de clientes registrados (Nodos CF-pollable) y les da espacios a cada uno para que inicien la transmisión de los datos según él lo indique. Por otro lado, en caso de que el AP intente acceder al medio al inicio de una nueva supertrama, y no pueda acceder inmediatamente, la longitud de la siguiente supertrama se verá afectada y por lo tanto, será más corta, asegurando así que no se aumente el retraso del envío de los paquetes de los demás nodos operando bajo DCF. Análogamente, en caso de que todo el tráfico se envíe antes de que acabe el tiempo máximo del período libre de contención, se indica a través del parámetro CF-End que se acabó el período CPF, luego se inicia inmediatamente el período de contención y se actualiza el NAV de todos los nodos [38], [49].

El esquema de funcionamiento de un período de una supertrama se ilustra en la figura 33.

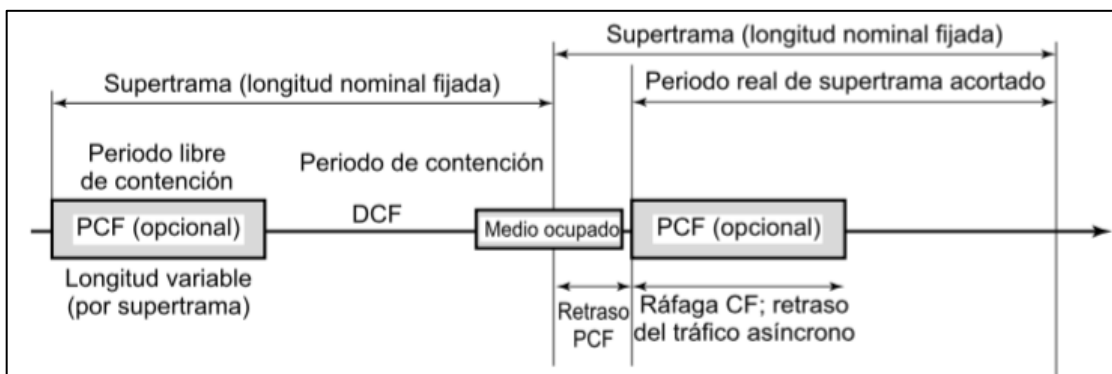


Figura 34. Esquema de funcionamiento de PCF [49].

Cabe mencionar que gran parte de los fabricantes no soportan el protocolo PCF porque este hace que el throughput dentro de la BSS disminuya al hacer que aumente la carga de la red, y por lo tanto, no está ampliamente desplegado [62].

CSMA/CA

Dentro de las redes LAN descritas en el marco de estudio que aquí se presenta, se tienen varios nodos cuyo propósito es transmitir la información a un nodo central, nodo a donde llega todo el tráfico de la microrred. Emerge entonces el problema de multiacceso a un canal por medio del cual se transmitirá la información y la necesidad de introducir un algoritmo cuyo objetivo principal sea coordinar el flujo de datos proveniente de cada uno de los nodos transmisores con la mínima cantidad de fallos posible. Este algoritmo, perteneciente a la capa de enlace de datos, es conocido como Acceso Múltiple de Detección de Portadora con Prevención de Colisiones CSMA/CA [47] y se usó para modelar la capa MAC según lo descrito en el estándar IEEE 802.11.

Todos los nodos operando bajo el estándar IEEE 802.11 deben regirse según la función de coordinación distribuida (DCF), y en conjunto con el algoritmo CSMA/CA y una distribución aleatoria de tiempo de backoff, se coordinan los tiempos en los que los nodos pueden acceder al medio para transmitir la información al coordinador de la microrred. Cuando un nodo transmisor pretende el medio, invocando el mecanismo *Carrier Sense*, debe asegurarse que el canal dure libre por lo menos un tiempo de entre tramas DIFS y ahí sí podrá continuar el proceso para iniciar la transmisión de las tramas MSDU. Una vez el nodo se ha asegurado que ningún otro nodo está transmitiendo durante este período, se inicia un tiempo aleatorio de Backoff definido por la ecuación (17) que se encargará de llevar el número de colisiones a la mínima cantidad posible, ya que es cuando los nodos transmisores intentan acceder al medio, que se presenta la mayor probabilidad de ocurrencia de colisiones [49].

$$\text{Backoff Time} = \text{Random} * \text{aSlotTime} \quad (17)$$

En donde *Random* es un valor pseudoaleatorio dependiente de un número entero asignado a un parámetro llamado ventana de contención, CW por sus siglas en inglés, de acuerdo a la cantidad de veces que un nodo en cuestión ha fallado intentando acceder al medio (figura 34). El segundo parámetro, *aSlotTime*, es un parámetro definido por un servicio primitivo de la capa física llamado PLME-CHARACTERISTICS equivalente a 20 μs .

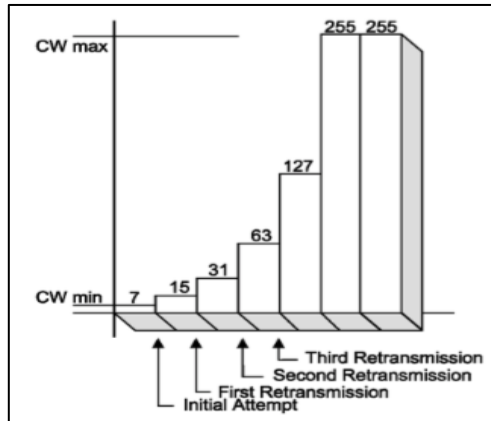


Figura 35. Ejemplo de crecimiento exponencial de la ventana de contención CW [49].

El mecanismo Carrier Sense (abreviado como CS), por su lado, reporta a la capa MAC el estado de disponibilidad del canal, y si bien la respuesta es que este se encuentre ocupado o desocupado, se establecen procesos para cada uno de los dos casos. Para indicar la disponibilidad del canal, el estándar define dos tipos de mecanismos de CS, el físico y el virtual. El primero es provisto por la capa física mediante el parámetro indicativo PHY-CCA.indication y se establece según se detectan niveles de energía por encima de un umbral en el medio inalámbrico [62]. Por otro lado, el mecanismo CS virtual es provisto por la capa MAC y se conoce como NAV (Navigation Allocation Vector). Este vector es un contador interno en cada nodo que se encarga de predecir el tiempo del tráfico en que el canal continuará ocupado por otro nodo y su valor se fija según el campo Duration/ID presente en el encabezado de los paquetes que están siendo transmitidos a través del medio inalámbrico [63].

Una vez se ha definido un valor inicial para el período de Backoff en el nodo, el contador de intervalos de backoff empieza a decrecer una unidad en períodos de tiempo *aSlotTime* hasta que llegue a cero, momento en que podrá proceder a acceder al canal y transmitir los datos en caso de que el mecanismo de Carrier Sense lo permita, indicando que el canal está disponible para el envío. En caso tal de que no sea así, y el canal se encuentre nuevamente ocupado, el nodo procederá entonces a ajustar el NAV (Navigation Allocation Vector) y posteriormente a esperar el tiempo que este le indique, decreciendo el contador hasta que llegue a cero y se asegure que el nodo transmisor ha acabado su proceso de envío. Luego, se volverá a reanudar el procedimiento, asegurándose que el nodo pueda transmitir los datos transcurrido un tiempo DIFS y el correspondiente tiempo pseudoaleatorio de backoff, partiendo desde el valor en que quedó el contador antes de que el mecanismo CS detectara que el canal no estaba disponible. [63]

Si un nodo pudo transmitir exitosamente los paquetes que pretendía y si la trama indica que requiere un reconocimiento ACK, el nodo receptor después de esperar un tiempo entre tramas SIFS y una vez se haya generado la primitiva PHY-RXStart, sin importar el estado de disponibilidad del canal, procederá a transmitir la trama ACK para indicarle a al nodo transmisor que los paquetes se recibieron correctamente. El tiempo SIFS es el menor de todos los espacios entre tramas (IFS), esto para prevenir que los demás nodos, que tienen

que esperar por la disponibilidad del canal por tiempos más largos, puedan acceder al canal y así se garantiza que se pueda completar la transmisión de los paquetes. [49]

Por otro lado, si un nodo ha enviado el paquete y después de esperar un intervalo de tiempo ACKTimeout no llega su confirmación mediante la trama de reconocimiento ACK, la STA entonces reportará un error y aumentará la ventana de contención que genera el período de backoff siempre y cuando CW sea menor que el parámetro aCWMin, o, de lo contrario, el nodo procederá a descartar el paquete y continuará el proceso de acuerdo a las siguientes tramas que disponga para enviar [49], [64].

Un diagrama de flujo que detalla paso a paso el procedimiento de control de acceso al medio de la capa MAC se muestra en la figura 35.

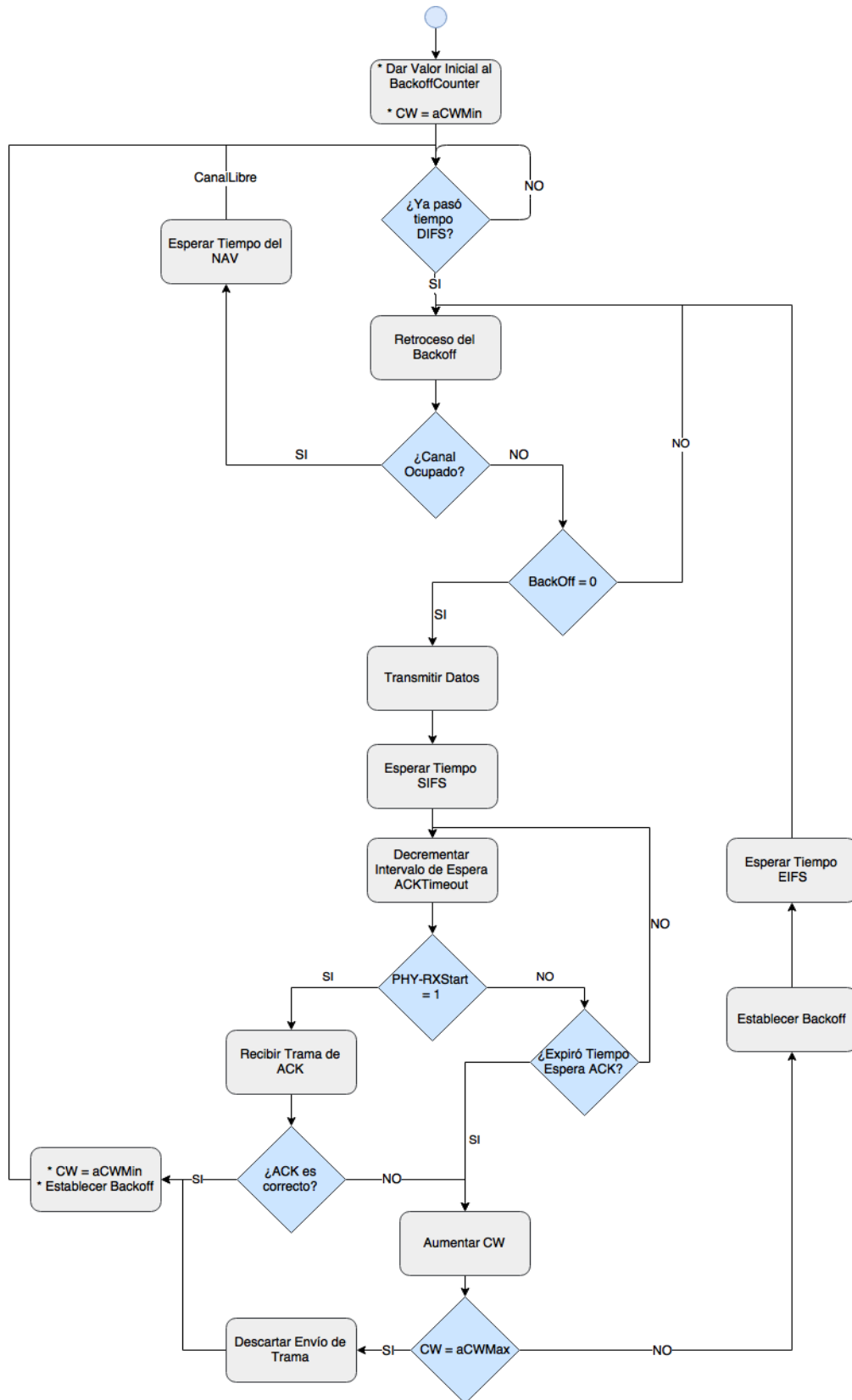


Figura 36. Procedimiento de acceso al medio CSMA/CA con backoff pseudoaleatorio.

Capa Física

La arquitectura de la capa física está dividida en dos subcapas diferentes. La primera de ellas es conocida como PLCP (Physical Layer Convergence Procedure), y la segunda es la PMD (Physical Medium Dependant). La PLCP está diseñada para comunicar la PMD con la capa MAC, por lo que esta añade un preámbulo y un encabezado propio de la capa física a la trama MAC, para ayudar a sincronizar los paquetes entrantes a los nodos dentro de la red. Ahora bien, cuando una trama proveniente de la capa MAC se deja a la capa física y se añaden tales campos al paquete, este ahora se conoce como PSDU, para referirse a los servicios provistos por la capa física. Por otro lado, la PMD, bajo la dirección de la PLCP, es la encargada de hacer posible la transmisión y recepción de PSDUs entre nodos, facilitando las modulaciones y demodulaciones de los paquetes a través del medio RF. [63]

La estructura de las tramas provistas por la PDU permite la transferencia asíncrona de PSDUs entre nodos dentro de la red.

La arquitectura de la capa física se ilustra en la figura 36.

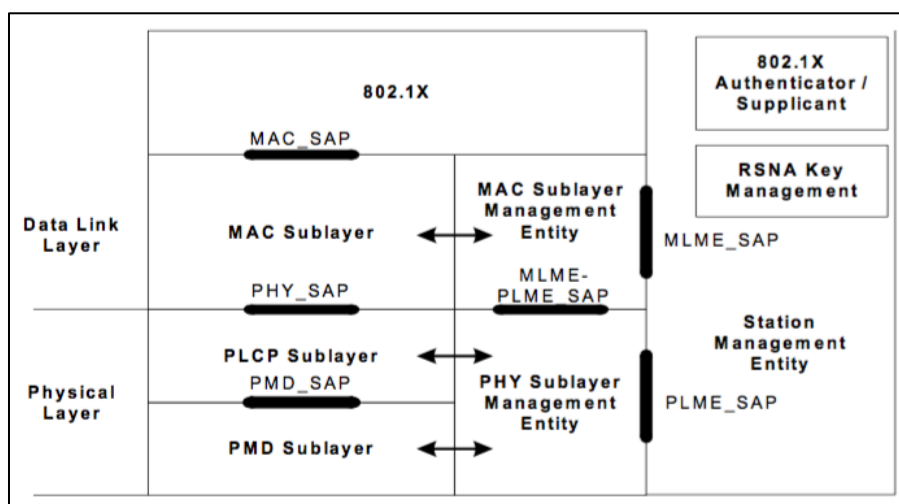


Figura 37. Arquitectura de las capas MAC y física [49].

El estándar especifica que la potencia de transmisión de un nodo debe ser de 0.1W y la sensibilidad mínima de una STA receptora depende de la tasa de transmisión bajo la que esté operando la red, según lo describe la tabla 1

Modulación	Tasa de codificación	Sensibilidad Mínima (espaciamiento de 20 MHz)	Sensibilidad Mínima (dBm)(espaciamiento de 10 MHz)	Sensibilidad Mínima (dBm) (espaciamiento de 5 MHz)
BPSK	1/2	-82	-85	-88
BPSK	3/4	-81	-84	-87
QPSK	1/2	-79	-82	-85
QPSK	3/4	-77	-80	-83
16-QAM	1/2	-74	-77	-80
16-QAM	3/4	-70	-73	-76
64-QAM	2/3	-66	-69	-72
64-QAM	3/4	-65	-68	-71

Tabla 13. Sensibilidad Mínima del receptor.

Inicialmente, cuando se concibe el estándar IEEE 802.11 en el año 1997, este fue pensado para soportar tres tipos diferentes de capa física:

- Enlace de capa física de espectro ensanchado Frequency-hopping (FH) operando dentro de la banda ISM de 2.4 GHz.
- Enlace de capa física de espectro ensanchado Direct-sequence (DS) operando dentro de la banda ISM de 2.4 GHz.
- Capa física de luz infrarroja (IR). Caso para el que no hay infraestructura comercial desplegada por su funcionamiento en banda base.

Luego, más adelante, se desplegaron tres especificaciones más para la capa física:

- IEEE 802.11a: multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM).
- IEEE 802.11b: secuencia directa de alta velocidad (HR/DS o HR/DSSS).
- IEEE 802.11g: tasa extendida de 802.11b (ERP).

Carrier Sense

El Carrier Sense es el mecanismo mediante el cual los nodos pueden determinar el estado de disponibilidad actual del canal. Existen dos técnicas:

- Physical carrier sense (Capa física)
- Virtual carrier sense (Capa MAC)

El mecanismo físico, por su lado, es aquel encargado de sondear los niveles de energía del medio inalámbrico en la frecuencia de operación del nodo, y, comparándolo con un umbral, anuncia a la capa MAC con un parámetro indicativo llamado PHY-CCA.indication si hay alguna transmisión en curso. Aunque el mecanismo físico provee un método para establecer la disponibilidad del canal con cada trama transmitida, al estar en un escenario inalámbrico, la información prevista por el mecanismo físico no es suficiente y es por eso que se hace necesario que otro proceso informe al nodo el tiempo que el medio estará reservado por parte del nodo que esté ocupando el canal [64].

Nace entonces el mecanismo virtual de carrier sense, o vector de adjudicación del canal NAV (Network Allocation Vector). El NAV es el encargado de predecir el tráfico futuro de la red mientras el canal vaya a estar ocupado y se concibe como un contador interno de cada STA que mientras sea mayor que 0, indicará que el canal está ocupado. Todos los nodos dentro de una BSA (Basic Service Area) idealmente escuchan las tramas enviadas por sus pares, y, de las cabeceras de las tramas MAC, extraen un campo llamado Duration/ID, campo que lleva la información para estimar el tiempo, en microsegundos, de la adjudicación del canal requerido para completar el envío del paquete al que pertenece la trama en cuestión. Los nodos fijan el valor del NAV en el equivalente de tiempo que se espera que se desocupe el canal y luego, un *timer* empieza a decrecer hasta que llegue a 0, momento en que se reporta que el canal se ha desocupado [63], [64].

DSSS y HR/DSSS

Esta técnica de transmisión de datos usada por la capa física se basa en su predecesor DSSS, que consiste en una modulación que bien puede ser binaria (DBPSK), o en cuadratura de fase (DQPSK), permitiendo tasas de transmisión de datos de 1 Mbps y de 2 Mbps respectivamente. Por su parte, la secuencia directa de espectro ensanchado (DSSS) usa un espaciado de 5MHz entre canales y con una codificación mediante los llamados chips, se logra hacer robusto contra el ruido y la interferencia en el espectro en el que se envían los datos.

A diferencia de DSSS, HR/DSSS introduce lo que se conoce como modulación de código de claves complementarias (CCK, por sus siglas en inglés) que permite que se obtengan tasas de transmisión de 5.5 Mbps y de 11Mbps. Para el caso en que se logra un throughput de 5.5 MHz, se transmiten 4 bits por símbolo, a diferencia del uso de 8 bits por símbolo, caso para el que se alcanza un throughput de 11 Mbps.[49]

La capa física del estándar IEEE 802.11b usa DSSS y HR/DSSS para alcanzar las tasas de transmisión soportadas. Por otro lado, la capa MAC del estándar, para ambos casos de los modelos de la capa física, es la misma. [61]

OFDM

La técnica de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) es un método de transmisión de datos en el que una señal modulada, con portadora a cierta frecuencia central, y un ancho de banda determinado, se divide en varias subportadoras, cada una con un ancho de banda más pequeño. El objetivo de emplear esta técnica es para que la señal tenga una mejor respuesta en frecuencia.

Con el uso de OFDM, el estándar garantiza tasas de transmisión de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps, dentro de las cuales las tasas de 6, 12 y 24 Mbps son obligatorias en su implementación. Este sistema hace uso de 52 subportadoras que pueden estar moduladas mediante BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM, dependiendo en la tasa de transmisión bajo la que se esté operando y de un código de corrección de errores hacia delante (codificación convolucional) que se usa con tasas de codificación de 1/2, 2/3, o 3/4, según corresponda [49]. Aunque bajo la operación de un espaciamiento de 20MHz entre portadoras de frecuencias ortogonales se logran las tasas de transmisión anteriormente mencionadas, el estándar provee las opciones “*half-clocked*” y “*quarter-clocked*” a través del cuales se alcanzan tasas de transmisión diferentes. *Half-clocked* provee tasas de transmisión de 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 y 27 Mbps, en donde las frecuencias de las portadoras se encuentran distanciadas a 10 MHz. Por otro lado, *quarter-clocked* provee tasas de transmisión de 1.5, 2.25, 3, 4.5, 6, 9, 12 y 13.5 Mbps, en donde las frecuencias de las portadoras se encuentran distanciadas a 5 MHz [49].

Formato Trama PLCS

En la figura 37 se muestra el formato de la trama PLCP que la PHY debe seguir.

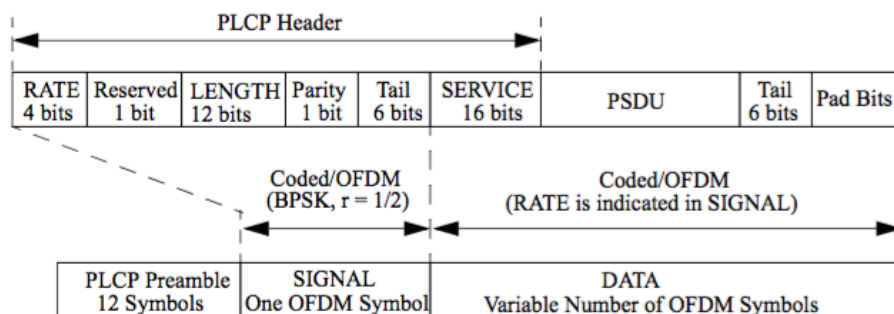


Figura 38. Estructura de la trama PDU [49].

Como se observa en la figura 2, la subcapa PLCP añade un preámbulo y un encabezado PLCP a los datos provenientes de la capa MAC dentro del cual se encuentra el campo RATE, que provee la información de la tasa de transmisión en la que se configuró el envío de la trama, un bit reservado, un campo LENGTH encargado de indicar la cantidad de bytes que contiene la PSDU, un bit de paridad al que se añaden 6 bits en el campo Tail.

En términos de modulación, el campo SIGNAL (conformado por RATE, el bit reservado, LENGTH, el bit de paridad y Tail) es un símbolo OFDM que se modula mediante BPSK y se codifica con una tasa de codificación de 1/2.

Por otro lado, el preámbulo añadido por la subcapa PLCP se forma mediante un intervalo de guarda GI, 10 repeticiones de una “secuencia corta de entrenamiento” y dos repeticiones de una “secuencia larga de entrenamiento” [49].

Para alcanzar las tasas de transmisión soportadas por el estándar, se cuentan con varios datos dependientes de la tasa de transferencia, según lo describe la tabla 13.

Tipo de modulación	Tasa de codificación	Bits codificados por subportadora (NBPSK)	Bits codificados por símbolo OFDM (NCBPS)	Datos por cada símbolo OFDM (NDBPS)	Tasa de transmisión (separación de 20MHz por canal)	Tasa de transmisión (separación de 20MHz por canal)	Tasa de transmisión (separación de 20MHz por canal)
BPSK	1/2	1	48	24	6	3	1.5
BPSK	3/4	1	48	36	9	4.5	2.25
QPSK	1/2	2	96	48	12	6	3
QPSK	3/4	2	96	72	18	9	4.5
16-QAM	1/2	4	192	96	24	12	6
16-QAM	3/4	4	192	144	36	18	9
64-QAM	2/3	6	288	192	48	24	12
64-QAM	3/4	6	288	216	54	27	13.5

Tabla 14. Parámetros según tasa de transmisión [49].

Los parámetros de tiempo utilizados por la capa física con OFDM se enseñan en la tabla 14.

Parámetro	Valor (espaciamiento de 20MHz)	Valor (espaciamiento de 10MHz)	Valor (espaciamiento de 5MHz)
Número de subportadoras de datos (NSD)	48	48	48
Número de subportadoras piloto (NSP)	4	4	4
Número total de subportadoras (NST)	52 (NSD + NSP)	52 (NSD + NSP)	52 (NSD + NSP)
Espaciamiento entre subportadoras (ΔF)	0.3125 MHz	0.15625 MHz	0.078125 MHz
T Preámbulo	16 μs	32 μs	64 μs
Duración de GI	0.8 μs	1.6 μs	3.2 μs
Intervalo del símbolo OFDM	4 μs	8 μs	16 μs
Duración de la secuencia corta de entrenamiento	8 μs	16 μs	32 μs
Duración de la secuencia larga de entrenamiento	8 μs	16 μs	32 μs

Tabla 15. Parámetros de tiempo en OFDM [49].

Antes de que la señal se vea modificada por el OFDM, el estándar define una serie de procedimientos de tratamiento de la señal. Este procedimiento se ilustra en la figura 38.

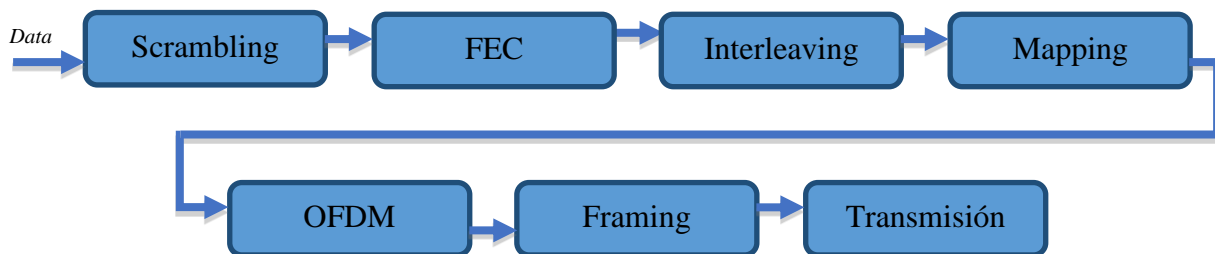


Figura 39. Principio de transmisión OFDM [61].

El primer proceso al que se someten los datos es a un reordenamiento a través de un *scrambler* síncrono de 127 bits de longitud. Luego, un codificador convolucional se encarga de codificar los datos a una tasa de codificación $R=1/2$, $2/3$ o $3/4$, según corresponda la tasa de transmisión a la que se esté operando. Posteriormente, los datos pasan un proceso de intercalamiento entre ellos para asegurar que los bits codificados adyacentes, primero, queden en subportadoras no adyacentes, y segundo, sean mapeados

alternadamente en bits más y menos significativos de la constelación. Este proceso de interleaving se define por un par ecuaciones, que se aplican en el receptor y en el transmisor. Luego, los datos se mapean según el modulador que corresponda a la tasa de transmisión que se esté utilizando (según lo describe la tabla 1). Luego, la secuencia de bits modificados se divide en varias subportadoras a través del OFDM, se añaden los campos requeridos por la capa PLCP para formar las tramas y posteriormente, estas se transmiten.

Capítulo 4. Modelo del sistema de telecomunicaciones

La microrred para la cual se modela el sistema de telecomunicaciones aquí propuesto, se plantea en un área rural aislada del departamento de Vichada, que se caracteriza por tener bajo acceso a la red eléctrica nacional. En esta zona, los niveles de ozono son lo suficientemente altos a lo largo del año para instalar un panel solar y además, la energía del viento es suficiente para poder instalar una turbina eólica que alimente la microrred.[23]

El sistema de comunicaciones se modela a través de dos tecnologías inalámbricas en topologías estrella y de árbol, y una alambrada en topología en estrella. Se escogen estas topologías porque la microrred aislada propone un control centralizado de los datos y estas son las topologías típicas en estos escenarios [28]. Por otro lado, la topología en malla no se tiene en cuenta porque en este estudio se modela únicamente la capa física y la capa de enlace para cada una de las topologías, de modo que la inclusión de una topología en malla implicaría el modelamiento de capa de red, que está fuera del alcance del proyecto.

De acuerdo a [42], una red de comunicaciones como se muestra en la figura 40, se modela por medio de tres bloques correspondientes al modelo de capa de física, de enlace y de propagación. La configuración y características del modelo de la capa física y de enlace se establecen de acuerdo a la tecnología de comunicación a evaluar. Por otra parte, la aplicación que requiera del soporte del sistema de comunicación establece ciertos requerimientos de entrada al modelo de la capa de enlace como el número de nodos, el tamaño del paquete de datos y su frecuencia de envío; Y de acuerdo a las características del entorno en el que se llevará a cabo la comunicación se establecen las características del modelo de propagación.

Cada bloque del modelo determina un conjunto de variables internas, según las entradas establecidas por la tecnología de comunicaciones, aplicación y entorno, que interactúan con los demás bloques dando como resultado un análisis de la cobertura [42]. Por ejemplo como se muestra en la figura 40, el entorno como entrada al modelo de propagación junto con la distancia del enlace tiene como resultado establecer las pérdidas del medio, este valor junto con la probabilidad de interrupción determinan la distancia máxima del enlace y el SNR que son entradas para el modelo de capa de enlace y capa física respectivamente.

A partir de estas variables internas como externas, el sistema responde con un conjunto de métricas o requerimientos de salida para el estimar el comportamiento de la tecnología en una aplicación de la microrred según el entorno en que esta se encuentre. Estos requerimientos de salida como se observa en la figura 40 corresponden al delay, el throughput y la confiabilidad de la red.

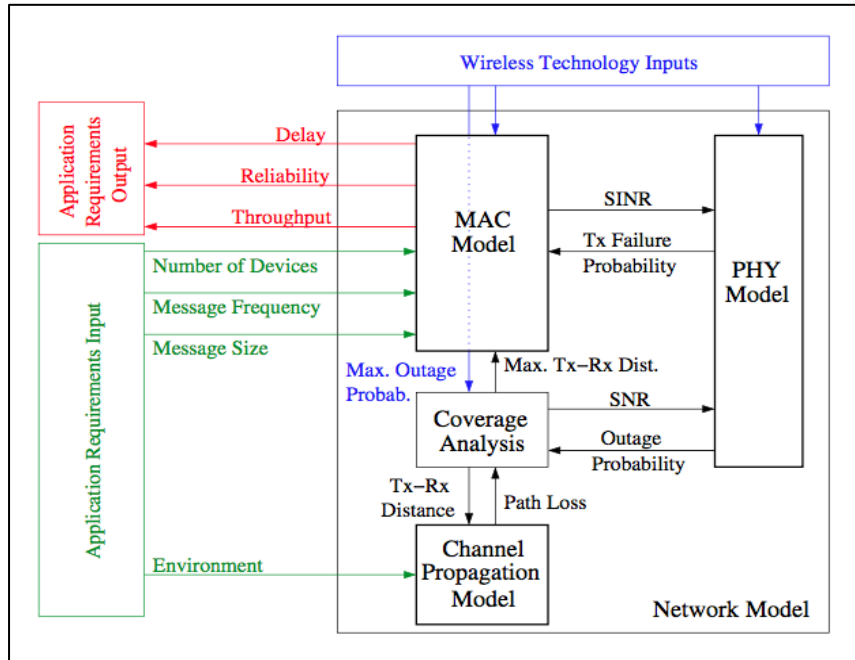


Figura 40. Requerimientos para la medición del desempeño del sistema de comunicaciones de la microrred [42].

En el modelo del sistema de comunicaciones para el monitoreo y gestión de la microrred, se empezará a variar como parámetro de entrada la cantidad de nodos que conformar la red, dejando constantes el tamaño del paquete, los parámetros del medio y la frecuencia de envío del mensaje. Esto para medir los requerimientos de salida del sistema y analizar el desempeño de cada una de las tecnologías.

4.1 Entorno de simulación

Para modelar el sistema de comunicaciones de la microrred se hace uso del entorno de simulación por bloques de Matlab, Simulink. Se utiliza la versión licenciada otorgada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Se elige esta herramienta porque es un sistema robusto, además de que es versátil, ya que provee la opción de crear nuevas funcionalidades que describan detalladamente el sistema que está siendo modelado, fuera de los establecidos en los paquetes que se encuentran por defecto [65]. Por otro lado, la documentación provista por el fabricante es amplia y muchos estudios de investigación se ambientan en este entorno [1], [11]

4.2 Datos de monitoreo de la microrred

Como se mencionó en el apartado 2.5, el objetivo de la microrred es proveer a la red eléctrica de confiabilidad, calidad y eficiencia. Para lograr este cometido, se basa en un sistema de comunicaciones que entrega información crucial de la red a los nodos finales [53], de manera que se gestionen eficientemente los recursos disponibles. Los parámetros que se van a transmitir mediante el sistema de comunicaciones están codificados en ASCII y se ilustran en la tabla 15.

Datos	Formato /Resolución	Tamaño (bits)
Magnitud Voltaje 1	XXX.X	40
Magnitud Voltaje 2	XXX.X	40
Magnitud Voltaje 3	XXX.X	40
Fase Voltaje 1	XXX.X	40
Fase Voltaje 2	XXX.X	40
Fase Voltaje 3	XXX.X	40
Magnitud Corriente 1	XXX.X	40
Magnitud Corriente 2	XXX.X	40
Magnitud Corriente 3	XXX.X	40
Fase Corriente 1	XXX.X	40
Fase Corriente 2	XXX.X	40
Fase Corriente 3	XXX.X	40
Potencia Activa	XXX.X	40
Potencia Reactiva	XXX.X	40
Marca de Tiempo	XX:XX:XX	64
Frecuencia	XX.XX	40
Factor de Potencia	X.XXX	40
Posicionamiento:		0

Latitud	(N ó S) XX.XXXX	64
Longitud	(W ó E) XXX.XXXX	72
Total:		840

Tabla 16. Datos gestionados en la microrred

Los datos que se observan en la tabla 15 son aquellos que cada nodo va a informar al coordinador de la microrred, dentro de los cuales se encuentran los voltajes y las corrientes de cada una de las líneas de la red trifásica, con sus respectivas magnitudes y fases; la potencia reactiva; las marcas de tiempo en las que se toman los datos; la frecuencia de operación de la red eléctrica; y un posicionamiento geográfico. Todos estos parámetros, a excepción de la marca de tiempo, el posicionamiento, la frecuencia y el factor de potencia (que en su caso particular se compone de un dígito entero y tres decimales), se componen de un valor entero y una parte decimal de un dígito y a partir de ellos se arma la trama que se enviará en cada uno de los protocolos implementados, por lo que el cuerpo del paquete será de 840 bits más lo que añade cada una de las tecnologías.

4.3 Frecuencia de envío de paquetes

En la literatura consultada hasta el momento se encuentra que una buena tasa de envío de los datos para la gestión y monitoreo en una microrred están dentro del rango de 10 ms a 1 s, sin embargo, en muchos de ellos se escoge una tasa intermedia de 100 ms [37], [66]. Es por esta razón que para el modelo de la red aquí propuesto, se elige una tasa de envío de los datos sensados por cada nodo de 100 ms.

4.4 Escenario y ubicación de los nodos

La red de comunicaciones de la microrred se esboza con una cantidad impar de nodos que se comunicarán con un concentrador de datos, quien hará que la cantidad total de nodos conformantes de la red sea par. Debido a que se plantea una red de comunicaciones del tamaño de una NAN/FAN, cuyo rango de cubrimiento se encuentra entre 100 m y 10 km [37], los nodos se encontrarán distribuidas dentro de un espacio de 100 m².

Por otro lado, en el caso de las tecnologías inalámbricas, al estar ubicada la microrred sobre un área rural aislada, se plantea un escenario en el que todos los nodos transmisores y receptores tienen línea de vista directa los unos con los otros, de modo que para el enlace de comunicaciones solo se consideran las pérdidas de propagación.

4.5 Escenarios inalámbricos

Se consideran los escenarios inalámbricos porque estos tienen la característica de ser fácilmente expandibles, además de que al utilizar el aire como medio de transmisión, no hay necesidad de cablear los nodos que se conectan a la red [1], [5]. Por otra parte, la instalación de las tecnologías inalámbricas es económica y sencilla, sin mencionar que la movilidad de los dispositivos conectados es posible sin mayores complicaciones.

Ahora bien, se presentan dos tecnologías inalámbricas para simular el sistema de comunicaciones de la microrred: WiFi y Zigbee, cuyas capas física y de enlace están descritas en los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4, respectivamente. El modelado de la red a través de estos estándares se plantean debido a que son los más representativos dentro de las redes HAN/FAN y WAN, [1], [5], [37], [45], ambos operan bajo la banda libre ISM de 2.4 GHz, se adecúan a varios tipos de topologías y disponen de tasas de transferencia bajas que se adaptan al tamaño del paquete pensado para la gestión de la microrred [61].

4.5.1 Estándar IEEE 802.15.4

Por su parte, el estándar IEEE 802.15.4 tiene la particularidad de ser un estándar de bajo costo, bajo consumo de energía y está pensado para las necesidades de usuarios y de aplicaciones, especialmente para aquellas que usan redes basadas en sensores. Soporta, además, servicios como seguridad y expansión, por lo que ha sido ampliamente desplegado en una cantidad de aplicaciones de gran relevancia, tales como militares, ambientales, de industria, comerciales y a nivel de hogar. [61].

Por las razones mencionadas anteriormente, IEEE 802.15.4 se acomoda perfectamente a los requerimientos de la red de comunicaciones de la microrred (sección 3.2), por lo que se procede a implementar la capa física y de enlace para así medir su desempeño.

4.5.1.1 Parámetros del modelo

Teniendo en cuenta la sección de la capa física de Zigbee, los parámetros con que se configuraron los nodos en el modelo son:

PARÁMETRO	VALOR
Potencia de transmisión	0 dBm
Sensibilidad del receptor	-85 dBm
Ganancia de antena transmisora	2.15 dBi
Ganancia de antena receptora	2.15 dBi
Pérdidas de espacio libre	80.22 dB

Eb/No	35.8453 dB
Tasa de transmisión	250Kbps
Acceso al medio	CSMA/CA Unslotted
Tiempo de envío	100 ms ± 20 ms
Distancia del enlace	100 m
Tiempo de simulacion	100 s

Tabla 17. Parámetros del modelo Zigbee

Se usa como acceso al medio el *CSMA/CA unslotted*, ya que este garantiza un mejor uso del canal, además de permitir una fácil expansión de la red y al no tener que sincronizarse cada cierto período de tiempo, asegura un mayor ahorro de energía que para el caso *CSMA/CA slotted* [55], [67].

4.5.1.2 Tamaño del paquete

Se usa el direccionamiento de 16 bits, debido a que es una sola red, según se menciona en [55]. Teniendo en cuenta la imagen de la figura 18, el tamaño del paquete es de 952 bits, distribuidos así: 840 bits de datos, 8 bits de encabezado de la capa física y 104 bits de encabezado debidos a la capa MAC.

4.5.1.3 Topología Estrella

Para medir el desempeño de la red de comunicaciones implementando el estándar IEEE 802.15.4, la cantidad de nodos se varía, iniciando con una configuración en que la red tiene 3 nodos de monitoreo hasta llegar a 27 nodos. En todos los casos hay un coordinador que concentra todos los datos.

Como se menciona en [55], el protocolo de acceso al medio de la capa de enlace es susceptible a experimentar el efecto del nodo oculto y el nodo expuesto, por lo que en el modelo se implementa un nodo oculto. Como solo se modela una red y todos los nodos se comunican directamente con el coordinador, en este caso el escenario en el que se presenta el nodo expuesto, no aplica.

El modelo general de la red se presenta en la figura 41.

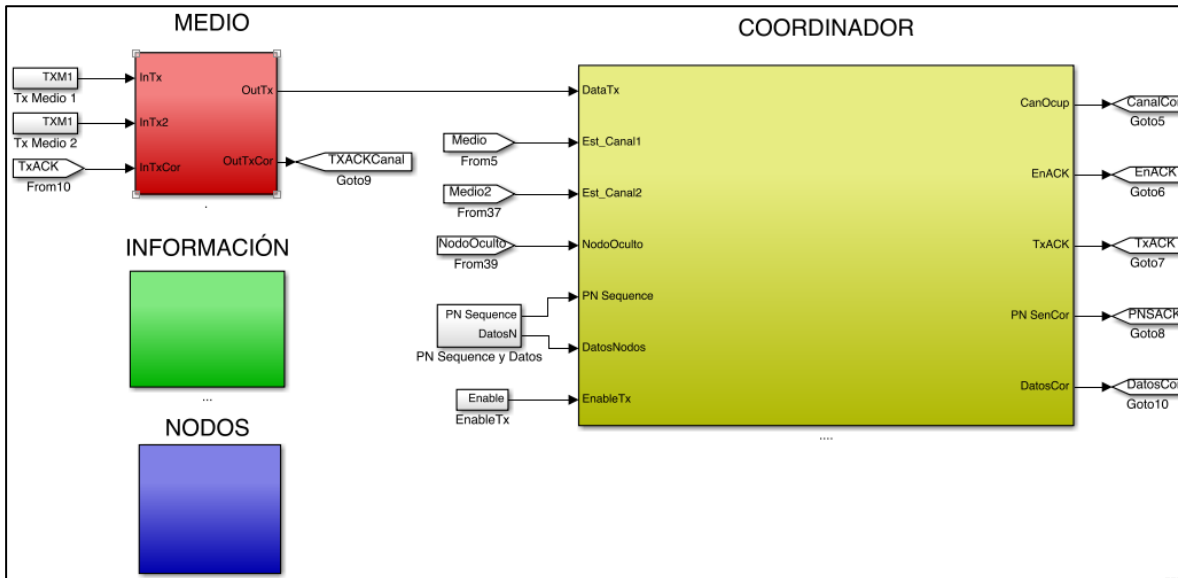


Figura 41. Estructura general del sistema de comunicaciones con IEEE 802.15.4 en topología estrella.

En la figura 41 se pueden distinguir 4 grandes recuadros: *medio*, *información*, *coordinador* y *nodos*. El bloque correspondiente a *medio*, incluye dentro los parámetros que agregan desvanecimiento y ruido blanco gaussiano a las señales que están siendo transmitidas. *Información*, por su parte tiene los parámetros importantes que están midiendo continuamente los valores del desempeño del sistema de comunicaciones (delay, throughput, paquetes perdidos, paquetes enviados, entre otros). *Coordinador*, tiene el modelamiento de la capa física y de enlace del concentrador de datos. Y por último, *nodos* tiene dentro la cantidad de nodos que apliquen para la simulación que se esté realizando, estando descrito cada uno por su capa física y su capa de enlace correspondiente.

4.5.1.4 Topología en árbol

Para el modelo de la topología en árbol, el sistema de comunicaciones se modela a través de tres ramas, cada una de las cuales tiene una cantidad impar de nodos que se comunican con un router, quien retransmitirá los datos al coordinador. Para esta topología, cabe destacar que la distribución espacial de los nodos sigue estando dentro de 100 metros cuadrados, pero esta vez para cada rama, de manera que entre un nodo y el coordinador central de la red, se encuentra una distancia de 200 m.

Para la simulación del efecto del nodo oculto, este se simula únicamente en una de las ramas y así, se puede comparar el efecto que tiene este fenómeno respecto a las ramas que no.

La cantidad de nodos varía igualmente de manera impar, iniciando con un total de nueve nodos transmisores (tres nodos por rama), hasta una configuración en que se tiene un total de 27 nodos, distribuidos entre sus tres ramas.

4.5.2.1 Parámetros del modelo

Teniendo en cuenta la sección de la capa física de WiFi, los parámetros con que se configuraron los nodos en el modelo son:

<i>PARÁMETRO</i>	<i>VALOR</i>
Espaciamiento entre canales	20 MHz
Sensibilidad del receptor	-82 dBm
Potencia del transmisor	100 mW
Ganancia de antena receptora	2.15 dBi
Ganancia de antena transmisora	2.15 dBi
Pérdidas de espacio libre	80.22 dB
Eb/No	49.5951dB
Tipo de acceso al medio	DCF
Método de transmisión	OFDM
Frecuencia de reenvío	100 ms \pm 10 ms
Distancia del enlace	100 m
Tiempo de simulación	100 s

Tabla 18 Parámetros del enlace para modelo operando a 6Mbps

<i>PARÁMETRO</i>	<i>VALOR</i>
Espaciamiento entre canales	20 MHz
Sensibilidad del receptor	-65 dBm
Potencia del transmisor	100 mW
Ganancia de antena receptora	2.15 dBi
Ganancia de antena transmisora	2.15 dBi
Pérdidas de espacio libre	80.22 dB
Eb/No	40.0527 dB
Tipo de acceso al medio	DCF
Método de transmisión	OFDM
Frecuencia de reenvío	100 ms \pm 10 ms
Distancia del enlace	30 m
Tiempo de simulación	100 s

Tabla 19 Parámetros del enlace para modelo operando a 54Mbps

4.5.2.2 Tamaño del paquete

Teniendo en cuenta las imágenes de las figuras 27 y 38, el tamaño del paquete es de 1440 bits, distribuidos así: 105 bytes de datos, 35 bytes de la capa física y 40 bytes de encabezado debidos a la capa MAC.

throughput, paquetes perdidos, paquetes enviados, entre otros). *Receptor access point*, tiene el modelamiento de la capa física y de enlace del concentrador de datos. Y por último, *nodos* tiene dentro la cantidad de nodos que apliquen para la simulación que se esté realizando, estando descrito cada uno por su capa física y su capa de enlace correspondiente.

4.5.2.4 Topología en árbol

Para el modelo de la topología en árbol implementando el estándar IEEE 802.11, el sistema de comunicaciones se modela a través de tres ramas, cada una de las cuales tiene una cantidad impar de nodos que se comunican con un router, quien retransmitirá los datos al coordinador. Para esta topología, cabe destacar que la distribución espacial de los nodos sigue estando dentro de 100 metros cuadrados, pero esta vez para cada rama, de manera que entre un nodo y el coordinador central de la red, se encuentra una distancia de 200 m para una tasa de 6 Mbps y 30 m para la tasa de 54 Mbps.

La cantidad de nodos varía igualmente de manera impar, iniciando con un total de nueve nodos transmisores (tres nodos por rama), hasta una configuración en que se tiene un total de 21 nodos, distribuidos entre sus tres ramas.

La estructura general de la topología en árbol implementada se muestra en la figura 44.

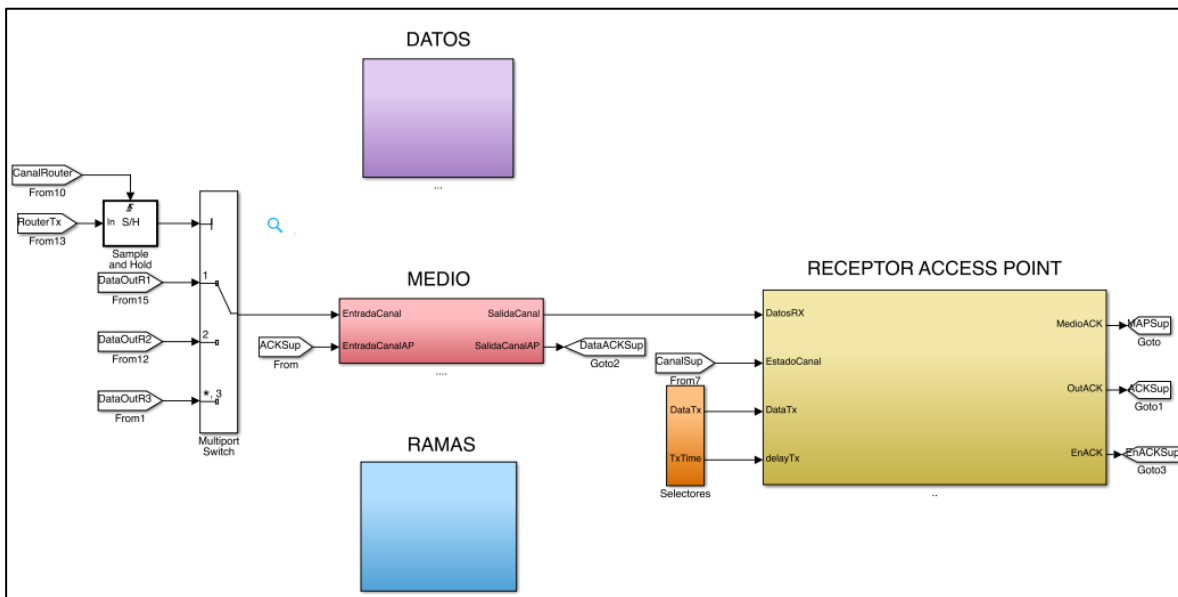


Figura 44. Estructura general del sistema de comunicaciones con IEEE 802.15.4 en topología árbol.

De la figura 44 se distinguen tres 4 grandes bloques, *ramas*, *datos*, *medio* y el *receptor access point*. *Datos*, *medio* y *receptor access point* tienen las mismas funciones que en el caso de la topología en estrella, mientras que *ramas* tiene dentro cada una de las ramas, con sus respectivos nodos comunicándose con el router correspondiente.

4.5.3 Estándar IEEE 802.3

El estándar IEEE 802.3 es una tecnología madura, en continuo desarrollo y ampliamente usado en aplicaciones que requieren de alta seguridad, de manera que en comparación con las tecnologías inalámbricas ofrece mayor dificultad de acceso a los datos para aquellos usuarios no autorizados [50]. Por otro lado, en la literatura consultada sobre el sistema de comunicaciones para microrredes, Ethernet es referenciado frecuentemente debido a que ofrece diferentes tasas de transmisión y latencias pequeñas lo que la hace adecuada para satisfacer los requerimientos de la microrredes.

Para el caso del modelamiento de la red de comunicaciones con el estándar IEEE 802.3, se plantea únicamente la topología en estrella. Aquí, la implementación de la topología en árbol no se encuentra indispensable debido a que la red está compuesta por una cantidad pequeña de nodos y además la distancia de los nodos al coordinador no es muy grande, siendo suficiente el uso de solo switch para la interconexión de todos los nodos.

4.5.3.1 Parámetros del modelo

Teniendo en cuenta la sección de la capa física de Ethernet, los parámetros con que se configuraron los nodos en el modelo son:

PARÁMETRO	VALOR
Umbral de recepción	300 mV
Voltaje de transmisión	Voltaje diferencial $\pm\{2.2V$ a $2.8V\}$
Atenuación	6.5 dB
Medio	Par trenzado CAT 5
Tipo de acceso al medio	Full dúplex
Tasa de transmisión	10 Mbps
Codificación de datos	Manchester
Distancia del enlace	100 m
Tiempo de simulación	100 s

Tabla 20 Parámetros del enlace IEEE 802.3

Se configura el tipo de acceso al medio como full dúplex dado que se establece una comunicación punto a punto con el coordinador por medio de una switch garantizando que no va a ver pérdida de paquetes debido a colisiones, característica relevante para el buen funcionamiento de la microrred además de ser el esquema de acceso más ampliamente utilizado [50].

4.5.3.2 Tamaño del paquete

Teniendo en cuenta la imagen de la figura 7, el tamaño del paquete es de 1048 bits, distribuidos así: 840 bits de datos y 208 bits de encabezado de la capa de enlace. La estructura del encabezado añadido por la capa de enlace se reparte así: 54 bits de preámbulo, 8 bits de SFD, 96 bits de dirección, 16 bits del campo de longitud/tipo y 32 bits de la secuencia de detección de errores.

4.5.3.3 Topología en estrella

Para medir el desempeño de la red de comunicaciones implementando el estándar IEEE 802.3, la cantidad de nodos se varía, iniciando con una configuración en que la red tiene 5 nodos de monitoreo hasta llegar a 17 nodos. En todos los casos hay un coordinador que concentra todos los datos.

El modelo general de la red se presenta en la figura 45.

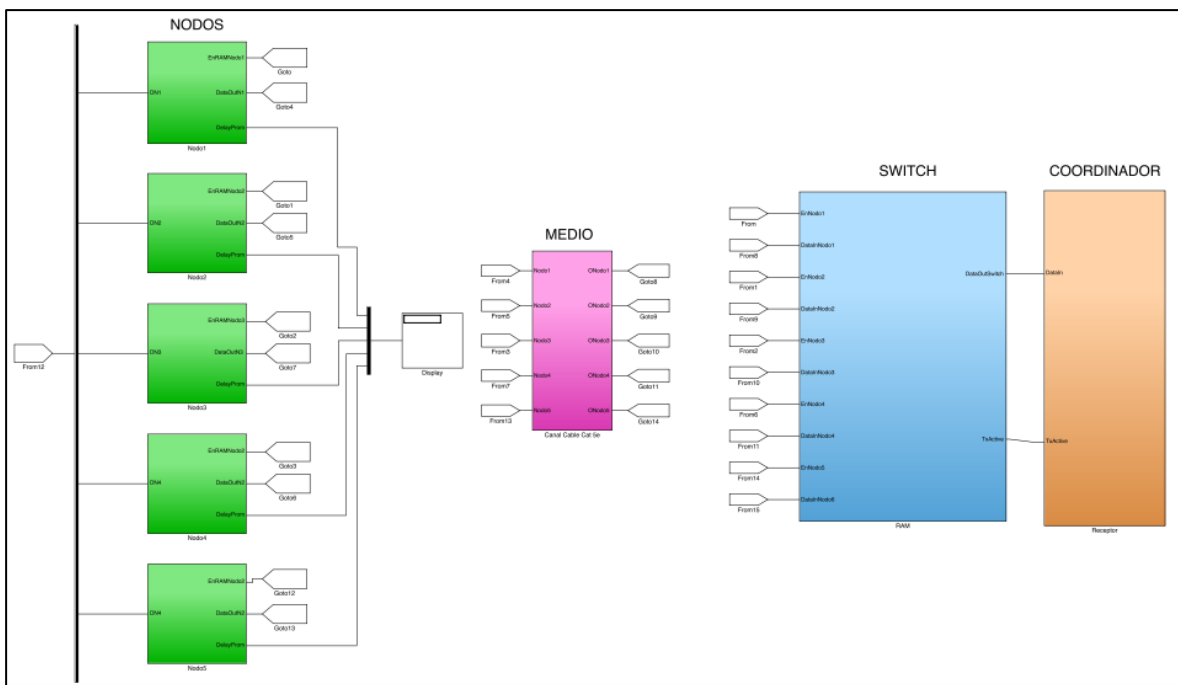


Figura 45. Estructura general del sistema de comunicaciones con IEEE 802.11 en topología estrella.

En la figura 45 se pueden distinguir 4 grandes bloques: *nodos*, *medio*, *switch* y *coordinador*. El bloque correspondiente a *nodos*, incluye dentro la configuración de cada uno de los nodos con su protocolo de acceso al medio y las especificaciones de modulación y transmisión. *Medio*, por su parte simula el escenario del canal en el que se presenta atenuación de la señal debido a la transmisión del paquete a través del cable. El bloque *switch* (sección 3.5.1.1.1.2.1.3) se encarga de dirigir los paquetes provenientes de los nodos hacia el coordinador.

Capítulo 5. Resultados

Con base al escenario y parámetros de la simulación mostrados en el capítulo anterior, se analizan los parámetros de salida para cada caso de estudio.

5.1 Estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee)

5.1.1 Topología en estrella

De acuerdo a los parámetros de simulación de la tabla 16, a continuación se grafican las variables de salida con respecto a la variación de los nodos en la red.

La grafica de la figura 46, se observa el retardo promedio (delay) respecto al número de nodos. El delay se mide a partir de los paquetes que fueron correctamente enviados. En la gráfica se observa que el retardo promedio es independiente de la variación del número de nodos, siendo constante para cada caso alrededor de los 3.5 milisegundos, exceptuando el delay para tres y cinco nodos en el que el delay dio 3.8 milisegundos. Se debe tener en cuenta que el delay solamente mide el tiempo que tarda el nodo en transmitir el paquete una vez accede al medio y es recibido por el receptor como se establece en la ecuación 7, y este debe estar alrededor de un valor fijo establecido por la tasa de transferencia proporcionado por la capa física del estándar, por lo tanto es independiente del número de nodos.

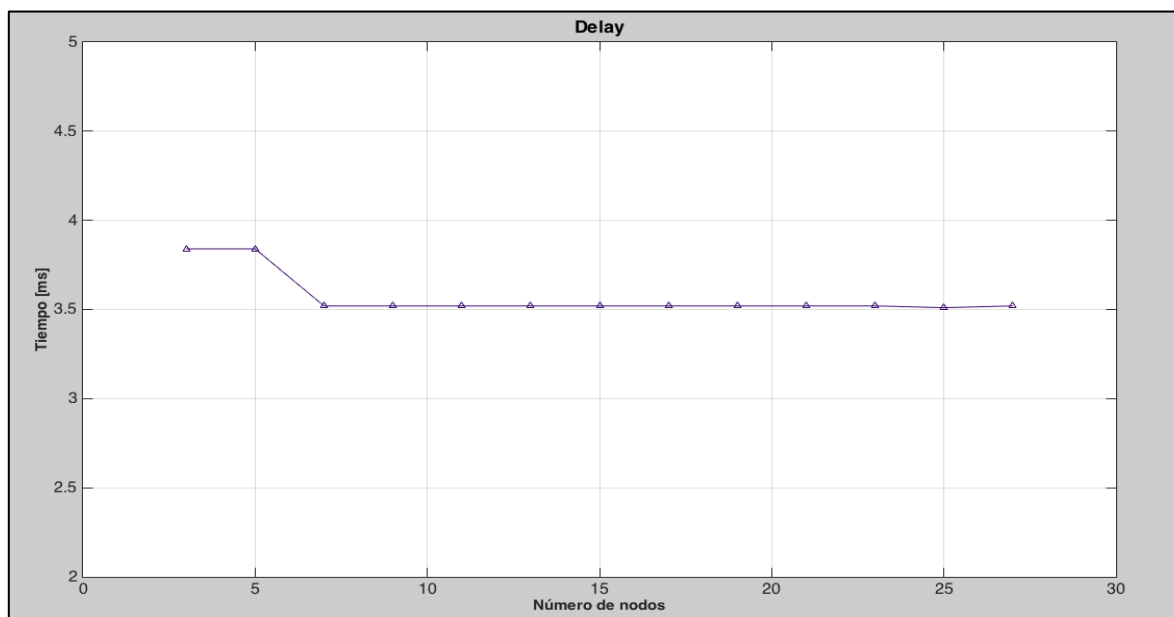


Figura 46. Delay respecto al número de nodos para ZigBee en topología en estrella.

En la gráfica mostrada en la figura 47 se muestra el número de paquetes que fueron recibidos correctamente por el sistema respecto al aumento del número de nodos. En ella, se puede observar un aumento progresivo en la cantidad de paquetes recibidos hasta alrededor de los 13 nodos con 10858 paquetes, y posteriormente el número de paquetes enviados tiende a disminuir con el aumento de los nodos, aunque no de forma significativa. A partir de este punto, el número de paquetes se estabiliza conforme aumenta la cantidad de nodos de la red en 10343 paquetes. Para explicar este comportamiento se debe tener en cuenta que cada nodo tiene una frecuencia de envío de datos de alrededor de 100 milisegundos, y a medida que aumenta el número de nodos, aumenta la posibilidad de que varios nodos encuentren el medio ocupado al realizar la contienda por acceder a este, por lo que cada nodo debe esperar un tiempo mayor para realizar el envío de datos. Por lo tanto, es de esperar que a partir de un número de nodos, dentro de la ventana de tiempo de transmisión, solo se pueda enviar una cantidad de paquetes como máximo.

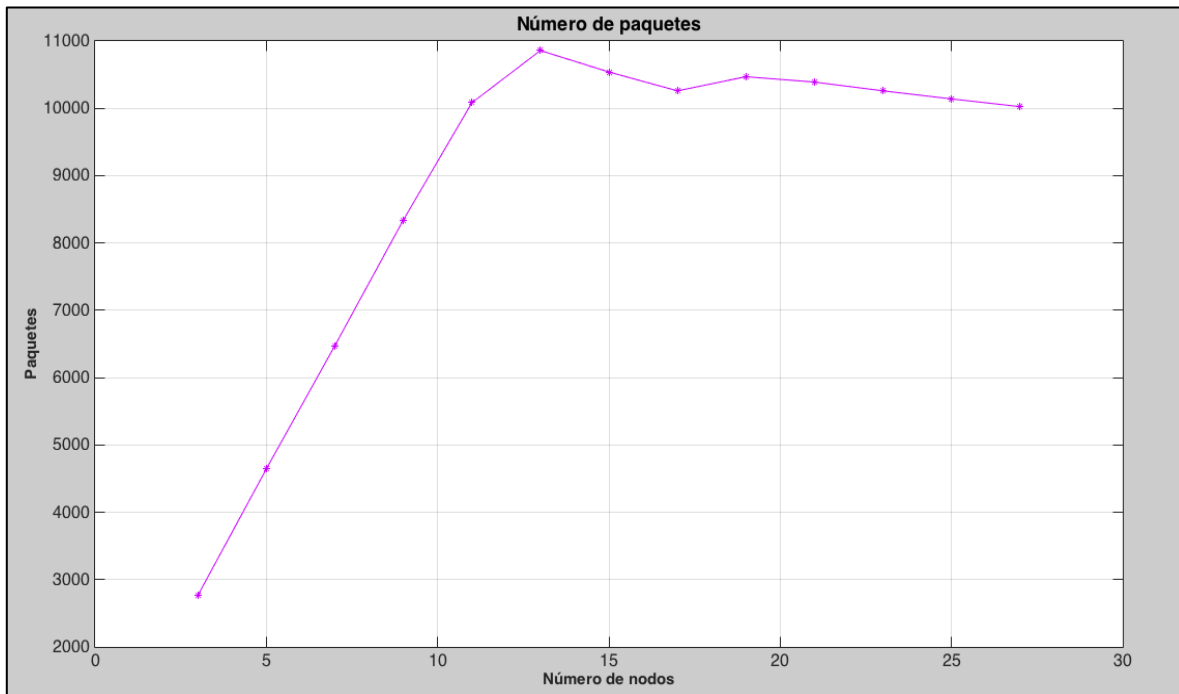


Figura 47. Número de paquetes respecto al número de nodos.

El throughput de la red respecto a la variación del número de nodos se muestra en la figura 48. Esta grafica se encuentra relacionada con el número de paquetes exitosamente enviados por el sistema como se establece en la ecuación 9, por lo tanto exhibe un comportamiento similar al mostrado en la gráfica 47 y es afectado por el mismo fenómeno. En la gráfica se aprecia que el throughput máximo se encuentra a los 13 nodos con 91.207 Kbps para luego estabilizarse alrededor de los 86.884 Kbps.

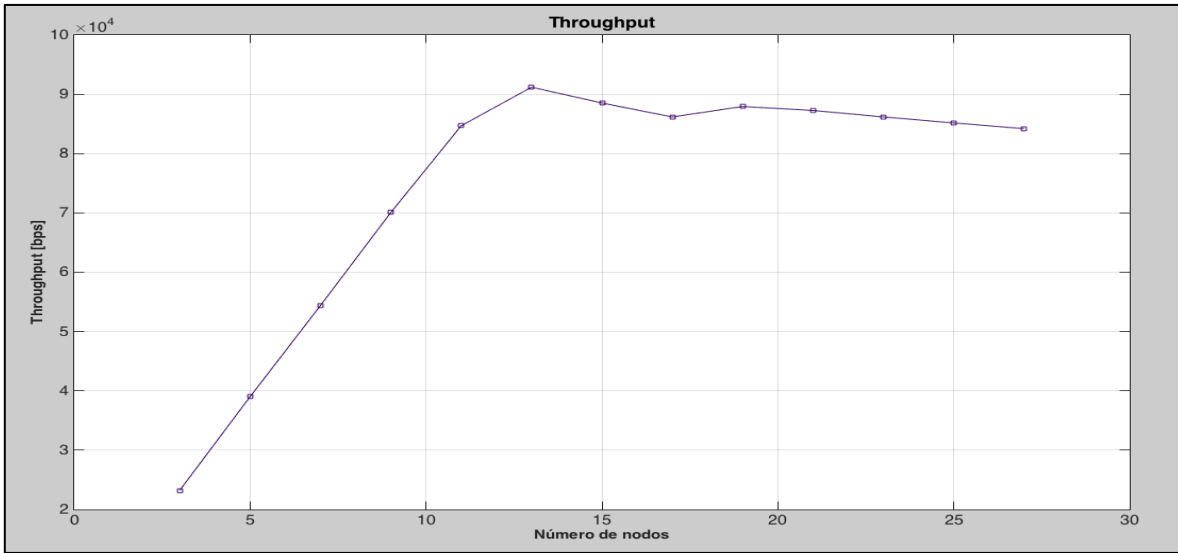


Figura 48. Throughput respecto al número de nodos en ZigBee topología estrella.

La grafica de la figura 49 muestra la tasa de bits erróneos del sistema respecto a la variación en el número de nodos. El BER para figura se encuentra en el rango de $4.11e-7$ a $24e-3$ y en este caso resulta gravemente afectado mostrando una tendencia ascendente conforme se aumenta el número de nodos, observándose valores aceptables para este parámetro hasta los 11 nodos con un valor de BER de $1.18e-3$. Dado que las características del medio para ZigBee no concuerdan con los resultados de esta gráfica, este fenómeno es debido a la incidencia que tiene el nodo oculto en el sistema. Como se explica en las anteriores variables, a medida que aumenta el número de nodos el medio se encuentra mucho más congestionado y la probabilidad de que suceda una colisión entre paquetes aumenta degradando de esta forma el valor del BER.

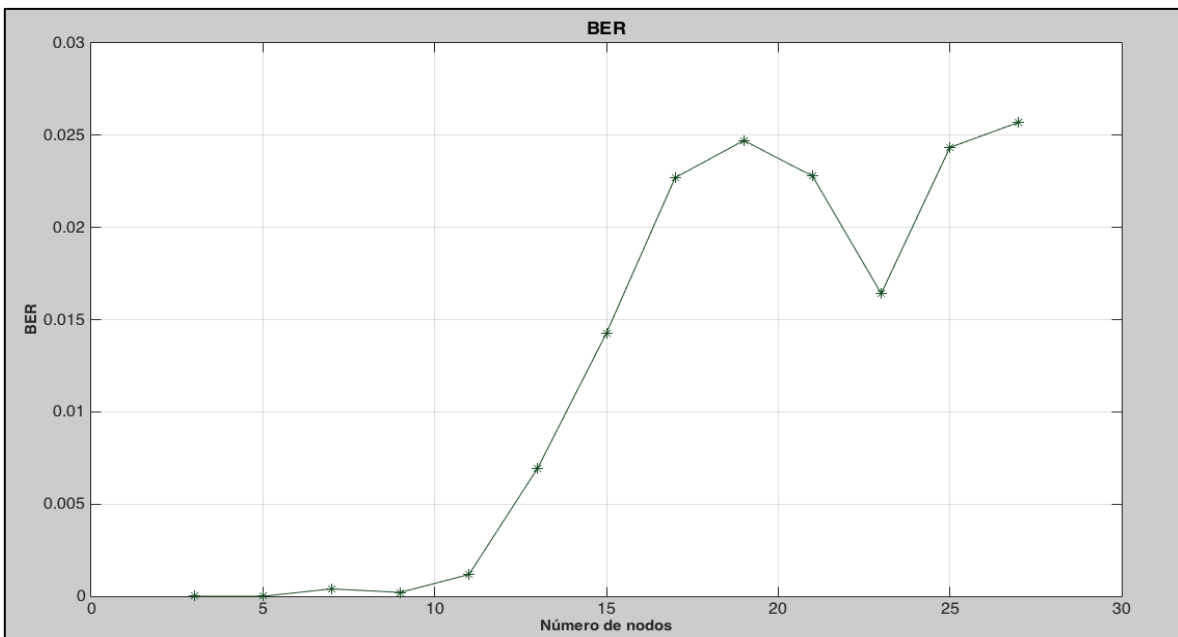


Figura 49. BER con respecto al número de nodos ZigBee topología estrella.

El número de fallos respecto a la variación de la cantidad de nodos se muestra en la figura 50. Los fallos en esta figura corresponden a los paquetes que son descartados por los nodos. En la gráfica se observa que la cantidad de fallos es pequeña, próxima a cero hasta cuando el aumento llega a 11 nodos con 75 fallos, a partir de este punto, la gráfica tiene una tendencia creciente de forma aproximadamente lineal obteniendo un valor de 10000 fallos para 27 nodos. Para analizar el comportamiento exhibido en la gráfica se debe tener en cuenta que el protocolo de acceso al medio del estándar IEEE 802.15.4 establece dos formas en las que un nodo puede descartar una trama y reportar un fallo. Estas ocurren cuando el nodo supera el número de intentos para acceder al medio o el número de retransmisiones de un paquete en el caso de no recibir una trama ACK como se explica en la sección 3.5.2.1 de acceso al medio de ZigBee. A partir del análisis del sistema para las gráficas del BER y del número de paquetes se observa que alrededor de los 11 a los 13 nodos, la red empieza a saturarse y el efecto del nodo oculto a aumentar, propiciando que el número de fallos o paquetes descartados aumente respectivamente como un efecto en cadena.

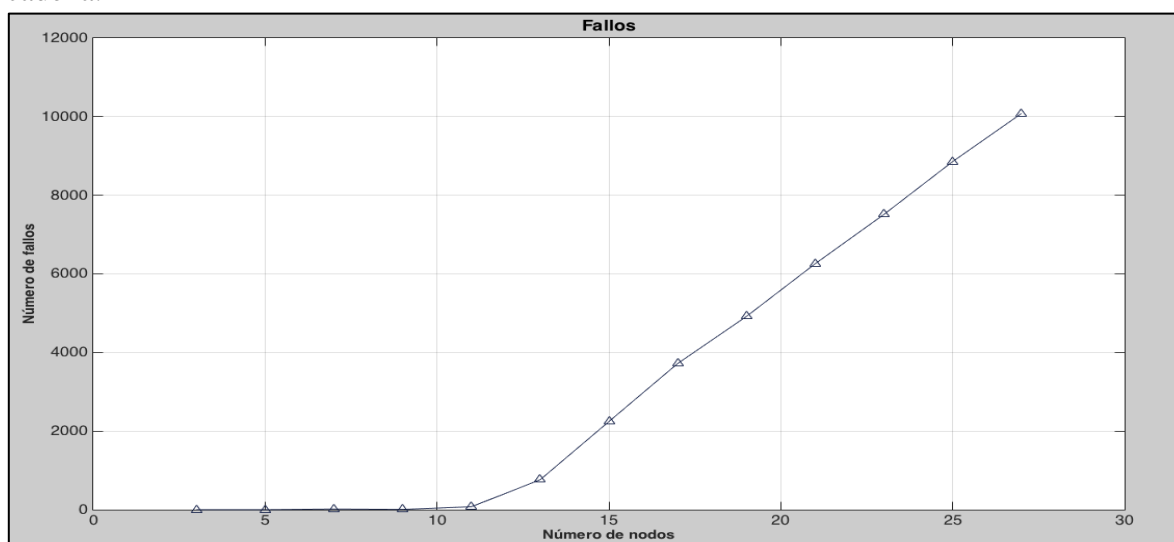


Figura 50. Cantidad de fallos respecto a la variación del número de nodos ZigBee estrella

Nodos	Paquetes	Throughput	Fallos	Colisiones	Delay/ms	Bit Enviados	Bit Erroneos	BER
3	2764	23217,6	0	0	3,84	2432320	0	4,1113E-07
5	4644	39009,6	0	0	3,84	4086720	0	2,447E-07
7	6475	54390	17	0	3,52	5708560	2276	0,0003987
9	8342	70072,8	7	12	3,52	7359440	1534	0,00020844
11	10083	84697,2	75	65	3,52	8906480	10540	0,00118341
13	10858	91207,2	761	506	3,52	9777680	67969	0,00695144
15	10540	88536	2242	1125	3,52	9727049	138800	0,01426949
17	10260	86184	3719	1690	3,52	9635542	218698	0,02269701
19	10470	87948	4916	1850	3,52	9889125	244405	0,02471452
21	10390	87276	6257	2198	3,52	9853841	224510	0,02278401
23	10260	86184	7512	2437	3,52	9767542	160320	0,01641355
25	10140	85176	8857	2665	3,51	9664879	235210	0,02433657
27	10025	84210	10080	2930	3,52	9630891	247505	0,02569908

Tabla 21 Tabla de resultados ZigBee estrella

5.1.2 Topología en árbol

De acuerdo a los parámetros de simulación del capítulo cuatro, a continuación se grafican las variables de salida del sistema respecto a la variación de los nodos en la topología en árbol.

La gráfica de la figura 51 corresponde al delay promedio de la red respecto a la variación del número de nodos. En ella se observa que el retardo se encuentra en el rango de 14.82 ms a 16.47 ms. El valor del retardo tiende a aumentar hasta los 17 nodos, donde el su valor permanece alrededor de los 16 milisegundos. En este caso cada paquete tiene que atravesar un nodo intermedio para llegar al concentrador de datos, y dado que el aumento de nodos conlleva a una mayor congestión en el sistema, el router o nodo intermedio tiene que esperar más tiempo para acceder al medio dado como resultado un aumento en el delay.

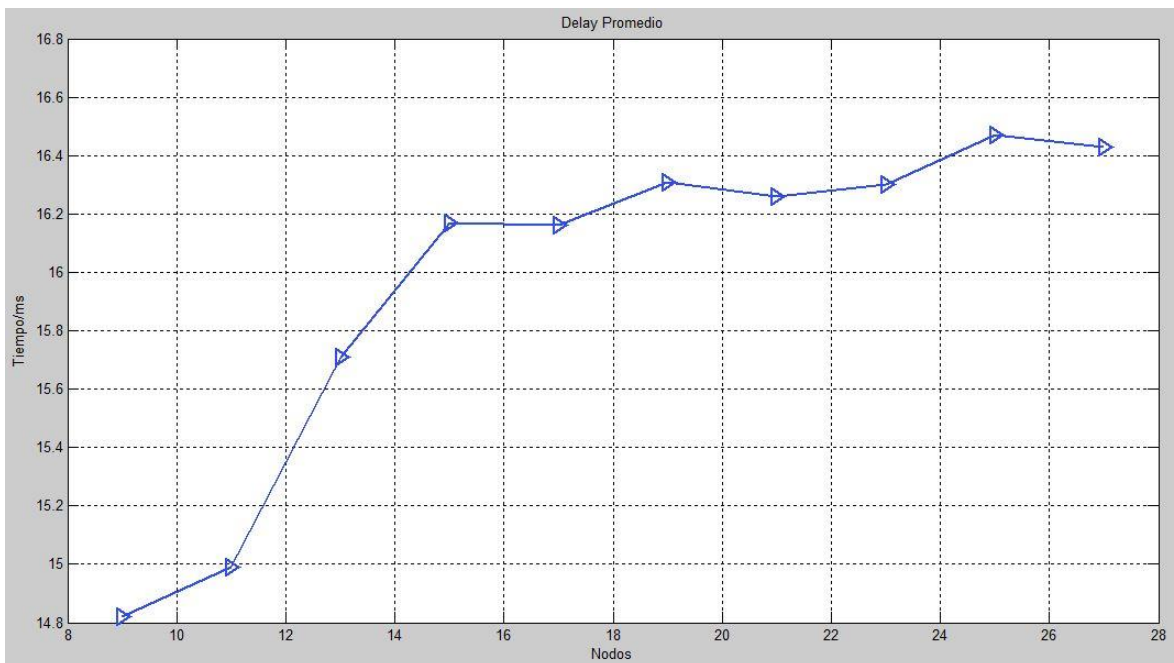


Figura 51. Delay promedio respecto a la variación de nodos ZigBee Topología en árbol.

El número de paquetes enviados correctamente variando el número de nodos del sistema se muestra en la figura 52. En esta grafica se encuentra la cantidad total de paquetes recibidos por el nodo concentrador junto al número total de paquetes enviados por las ramas. Al igual al caso de la topología en estrella, la curva tiende a estabilizarse alrededor de los 12000 paquetes después de pasar por 19 nodos, debido a la congestión del sistema con el aumento de los nodos. Por otra parte, es mismo comportamiento se observa en las curvas pertenecientes a las ramas, en estas, la segunda y tercer rama tienden a estabilizarse alrededor de los 4200 paquetes después de los 17 nodos, a diferencia de la primera rama, que al tener un nodo oculto se puede evidenciar que el número de paquetes enviados disminuye, tendiendo a los 3400 paquetes después de los 15 nodos, teniendo un máximo de 3899 paquetes enviados a los 13 nodos.

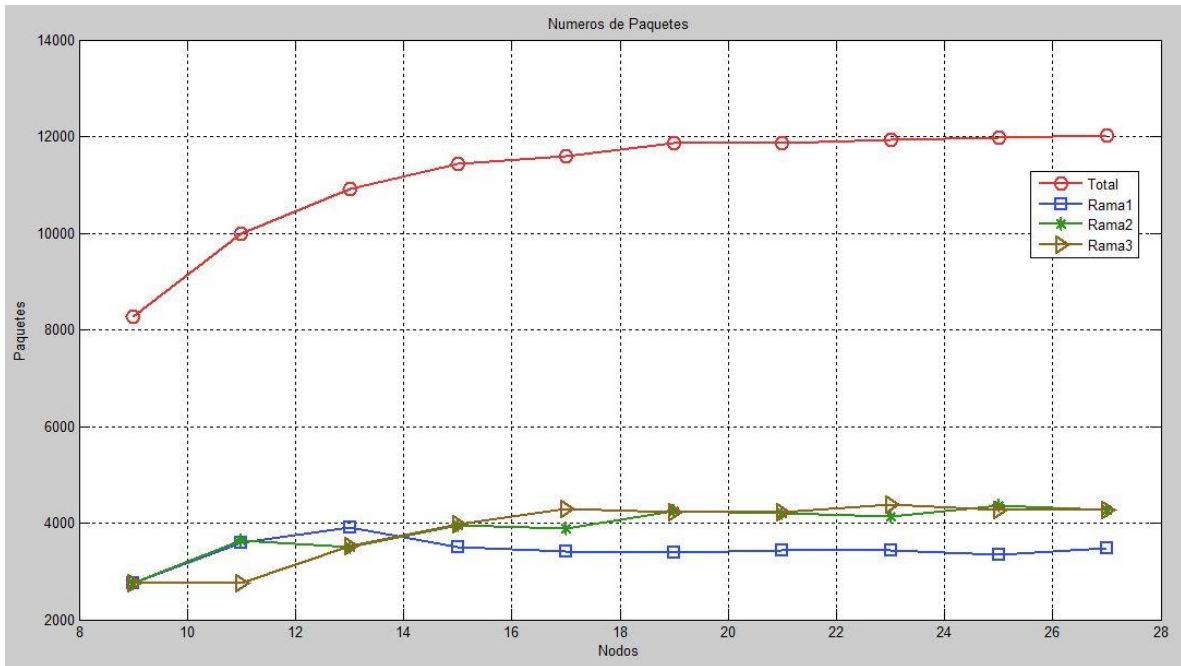


Figura 52 Número de paquetes transmitidos total y por ramas respecto a la variación de nodos ZigBee topología árbol.

El throughput del sistema junto con el de las ramas se muestra en la figura 53. Dado que este valor es directamente proporcional con el número de paquetes enviados presenta el mismo comportamiento de la figura anterior. En grafica de la figura 53, el throughput tiende a estabilizarse después de los 17 nodos con un valor de 100.257Kbps.

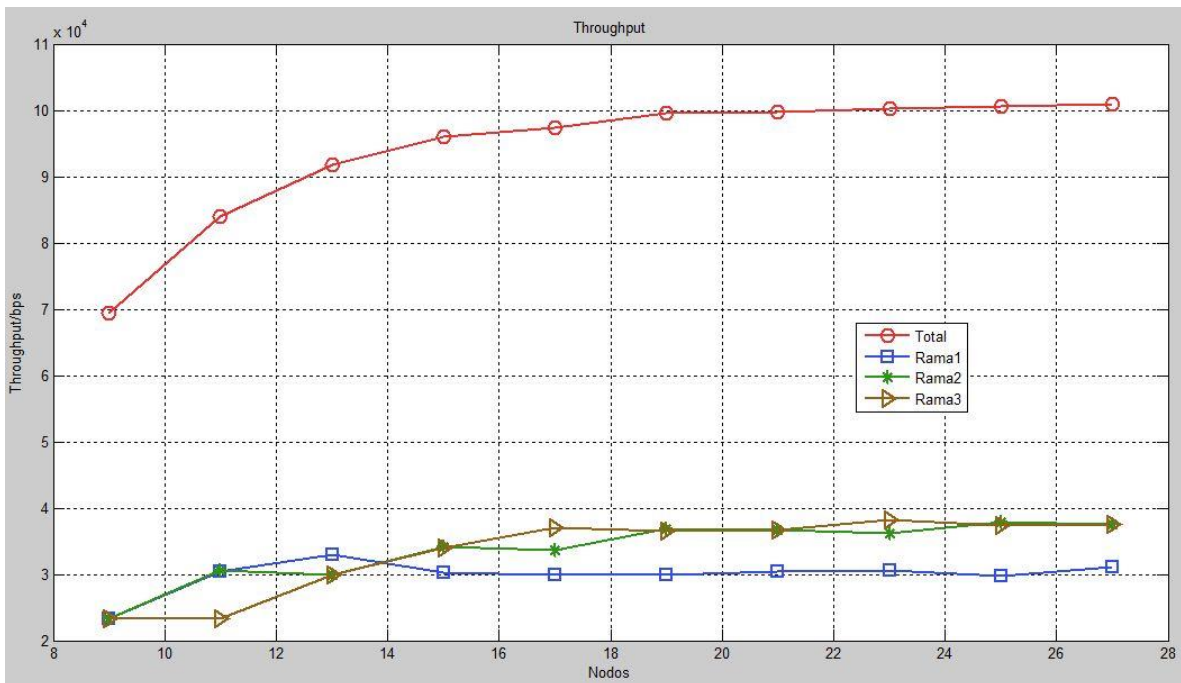


Figura 53. Throughput de la red y por ramas ZigBee topología árbol.

Por otra parte, el throughput de la segunda y tercer rama se estabilizan después de los 17 nodos alrededor de los 35.280 Kbps. La rama uno tiene un máximo a los 13 nodos con 32.75 Kbps para luego disminuir y permanecer próximo a los 32.93 Kbps.

Las figuras 54 y 55 muestran la tasa de bits erróneos para el nodo concentrador y las ramas del sistema respectivamente. Como se analizó para el caso de la topología en estrella, el BER se degrada debido a las colisiones de los paquetes de datos. Como se evidencia en las figuras 54 y 55, el valor del BER permanece constante, independiente del aumento del número de nodos para la red de concentrador y para las ramas dos y tres, a diferencia de la rama uno, que al tener un nodo oculto, la degradación del BER es mayor en comparación con los otros casos.

En la figura 54, el BER del concentrador tiene un valor máximo a los nueve nodos con un valor de 6.8×10^{-3} para luego disminuir y permanecer constante con el aumento de nodos alrededor de 0.586×10^{-3} .

Respecto a la gráfica de la figura 55, el BER de las segunda y tercer rama presentan comportamientos similares con el aumento de los nodos, estando en un valor promedio de 1.21×10^{-3} . En cuando la rama uno, el BER presenta una tendencia ascendente en el rango de 4.09×10^{-7} a 30.21×10^{-3} .

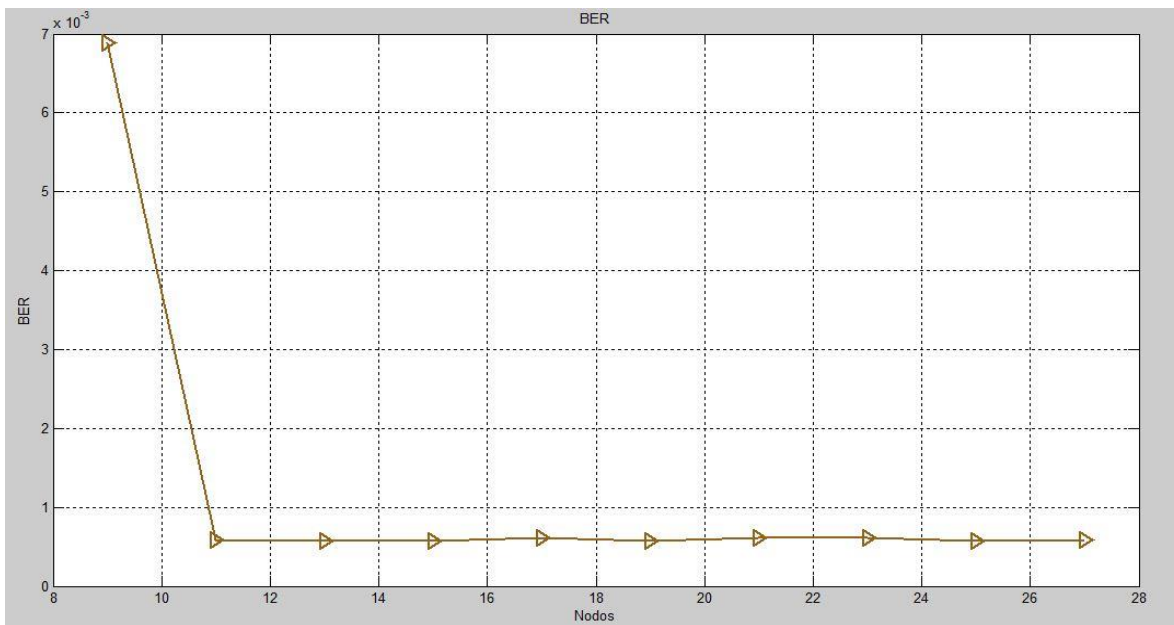


Figura 54. BER respecto a la variación de los nodos para los routers ZigBee topología árbol.

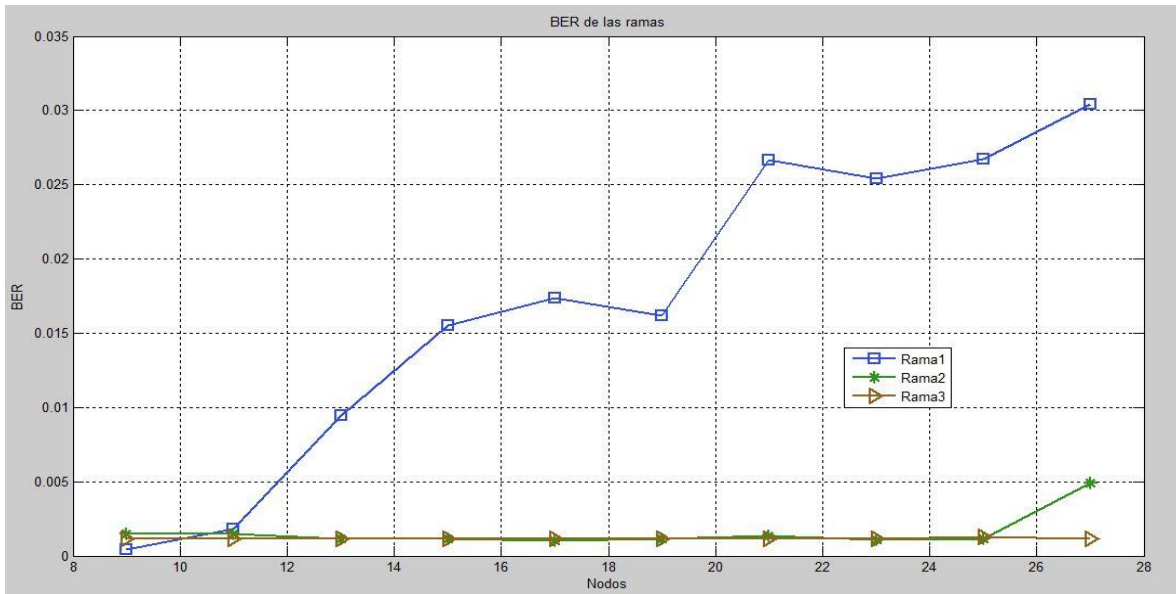


Figura 55. BER respecto a la variación de los nodos de las ramas ZigBee topología árbol.

La grafica de la figura 55, muestra el número de fallos del sistema junto con los fallos que aportan cada rama. Cada una de las curvas muestra un aumento progresivo en el número de fallos con la variación de los nodos. Este comportamiento, al igual que en la topología en estrella se debe al aumento en la congestión de la red, y al número de colisiones que dificultan el acceso al medio y a la correcta entrega del paquete.

Se observa en la figura 56, que los fallos de la rama 1 en donde se encuentra en nodo oculto, son mayores respecto a la segunda y tercer rama, teniendo un máximo de 217 fallos a 27 nodos, en cuanto a la segunda y tercer los fallos máximos son 170 y 186 fallos respectivamente con la misma cantidad de nodos. El máximo número de fallos son 568 con 27 nodos.

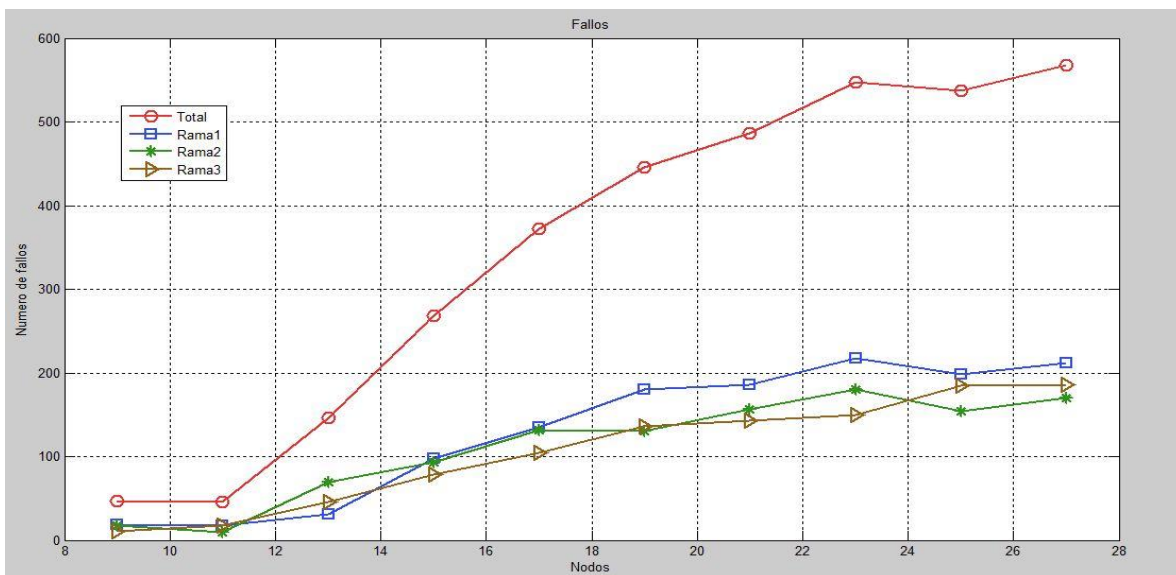


Figura 56 Número de fallos totales y por ramas ZigBee topología árbol.

Nodos	Paquetes				Throughput	Fallos				Colisiones
	Total	Rama1	Rama2	Rama3		Total	Rama1	Rama2	Rama3	
9	8270	2754	2754	2762	69468	47	19	17	11	146
11	9995	3600	3636	2759	83958	46	18	10	18	191
13	10920	3899	3497	3524	91728	146	31	69	46	270
15	11435	3501	3962	3972	96054	268	98	93	78	347
17	11595	3418	3880	4297	97398	372	135	132	105	366
19	11858	3387	4256	4215	99607,2	446	180	130	136	378
21	11869	3444	4207	4218	99699,6	486	186	157	143	399
23	11943	3427	4125	4391	100321,2	547	217	180	150	416
25	11985	3351	4364	4270	100674	537	198	154	185	443
27	12022	3486	4262	4274	100984,8	568	212	170	186	512

Delay/ms			Bits Enviados	Diferencia de bits	Bits Erróneos	BER
Máximo	Mínimo	Promedio				
70,08	9,59	14,82	7370880	101550	50775	0,00688859
53,76	8,64	14,99	8795840	10235	5118	0,00058187
60,48	8,64	15,71	9609600	10920	5460	0,00056818
65,92	8,64	16,17	10062800	11435	5718	0,00056823
67,52	8,32	16,16	10204480	12475	6238	0,0006113
59,2	10,56	16,31	10435040	11858	5929	0,00056818
66,88	8,32	16,26	10445600	12749	6375	0,0006103
62,72	8,64	16,3	10510720	12823	6412	0,00061004
57,28	8,64	16,47	10546800	11985	5993	0,00056823
66,56	8,32	16,43	10579680	12342	6171	0,00058329

Tabla 22. Resultados ZigBee topología árbol

5.2 Estándar 802.11 (WiFi)

A continuación se enseñan los resultados obtenidos para los modelos del estándar IEEE 802.11, en cada una de las topologías implementadas.

5.2.1 Topología en estrella

5.2.1.1 Tasa de transmisión a 6Mbps

En la figura 57 se muestran los resultados que se obtuvieron del delay para el caso de la topología en estrella, implementando el estándar IEEE 802.11. De aquí se pueden observar tres gráficas, el delay máximo, el delay mínimo y el delay promedio. Se puede distinguir que conforme aumenta el número de nodos, el delay máximo siempre permanece constante en el valor de los 280 μ s; el delay mínimo tiene una tendencia de ubicarse alrededor de los 240 μ s, aunque para el caso de la red conformada por siete nodos se obtiene un valor ligeramente más pequeño, de alrededor de 239 μ s. Por su parte, el delay promedio de la red para todos los casos está más próximo del valor del delay máximo que del mínimo,

variando dentro de un rango de los 270 μ s y los 280 μ s. Este valor es de esperarse ya que en la topología en estrella, el único tiempo que aporta al delay es el tiempo de propagación del paquete, de modo que es independiente respecto a la cantidad de nodos de la red.

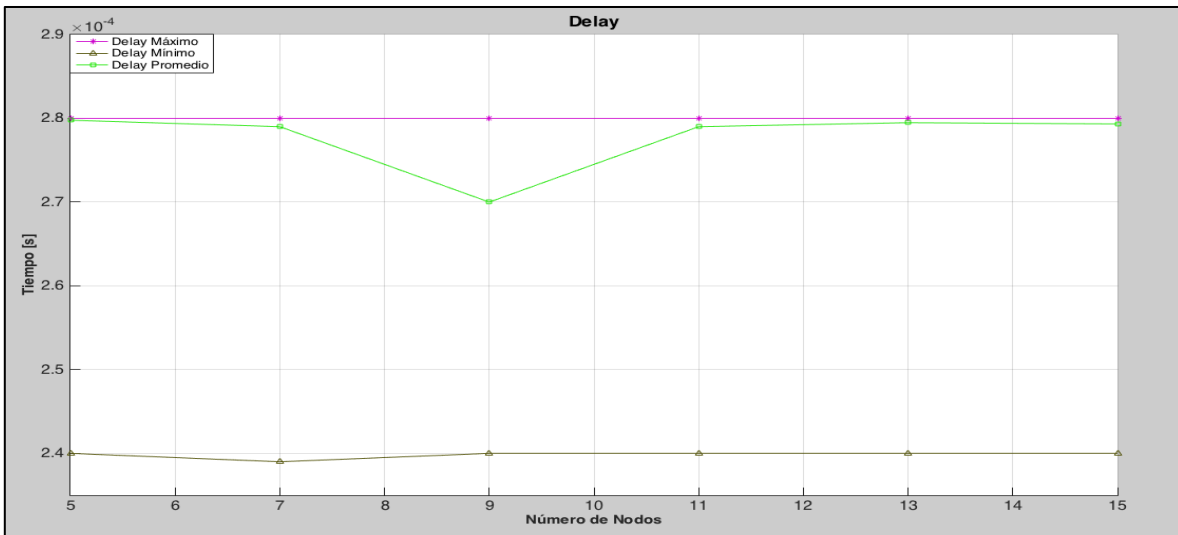


Figura 57. Delay respecto al número de nodos para WiFi a 6Mbps.

En la figura 58 se ilustra la cantidad de paquetes recibidos por el coordinador conforme aumenta la cantidad de nodos de la red. Como se puede observar en la figura, el aumento de los nodos, hace que el número de paquetes incremente de forma lineal. Para cada uno de los modelos simulados, todos los paquetes lograron enviarse. Este comportamiento se presenta porque como el tamaño del paquete es tan pequeño (sección 4.5.2.2) para la capacidad del estándar, la ventana de tiempo para enviar es suficientemente grande para que todos puedan enviar su paquete correspondiente.

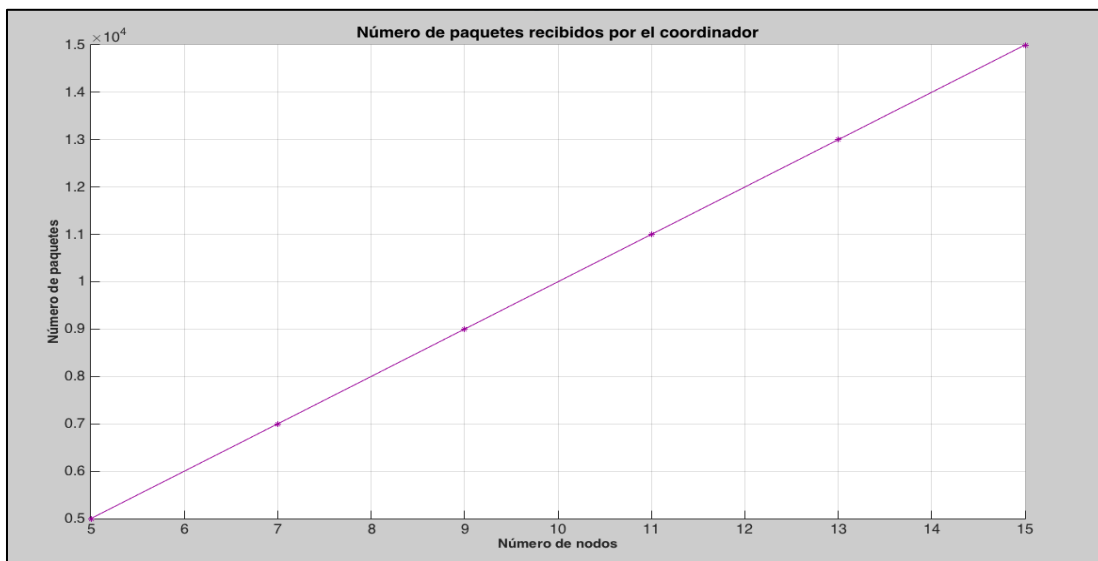


Figura 58. Número de paquetes enviados respecto al número d nodos en WiFi a 6Mbps.

En la figura 59 se muestra el comportamiento del throughput cuando el número de nodos aumenta. Como el throughput es proporcional al número de bits de información recibidos por el coordinador (ecuación 9), y por lo tanto, proporcional al número de paquetes enviados, es de esperar que la gráfica 59 tenga la misma forma que la figura 58.

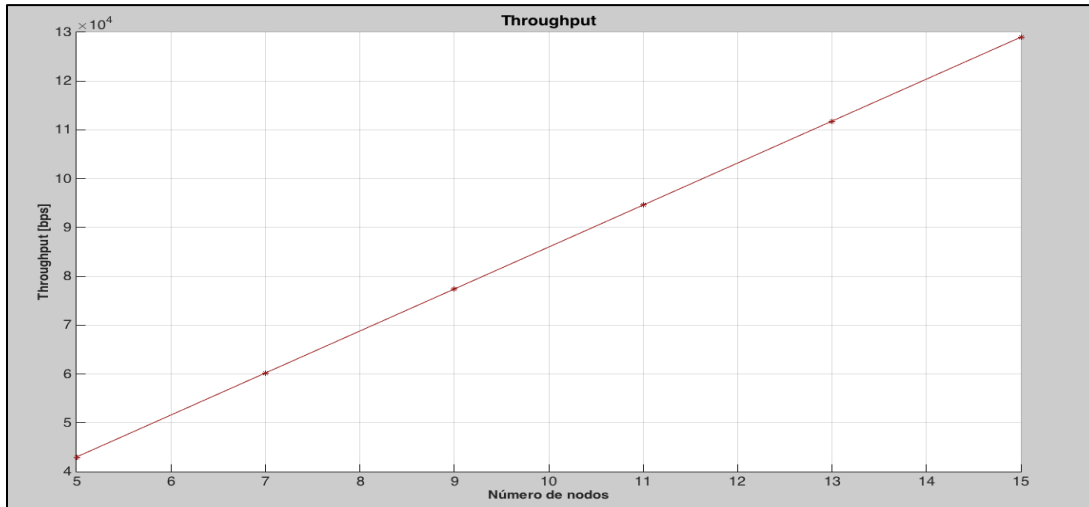


Figura 59. Throughput de la red respecto al número de nodos en WiFi a 6 Mbps.

En la figura 60 se grafica la respuesta del BER respecto al aumento de la cantidad de nodos. En esta figura se observa que a medida que aumenta el número de nodos de la red, la tasa de error de bit también aumenta, ya que entre más nodos estén tratando de acceder al medio, mayor va a ser la probabilidad de ocurrencia de colisiones y por lo tanto el coordinador recibirá mayor cantidad de bits erróneos. El valor que se obtiene de BER para el caso en el que la red está conformada por cinco nodos, es de 8×10^{-3} , llegando a un valor máximo para el escenario en el que se configuran 15 nodos, en donde se obtiene un valor de alrededor de 1.9×10^{-3} .

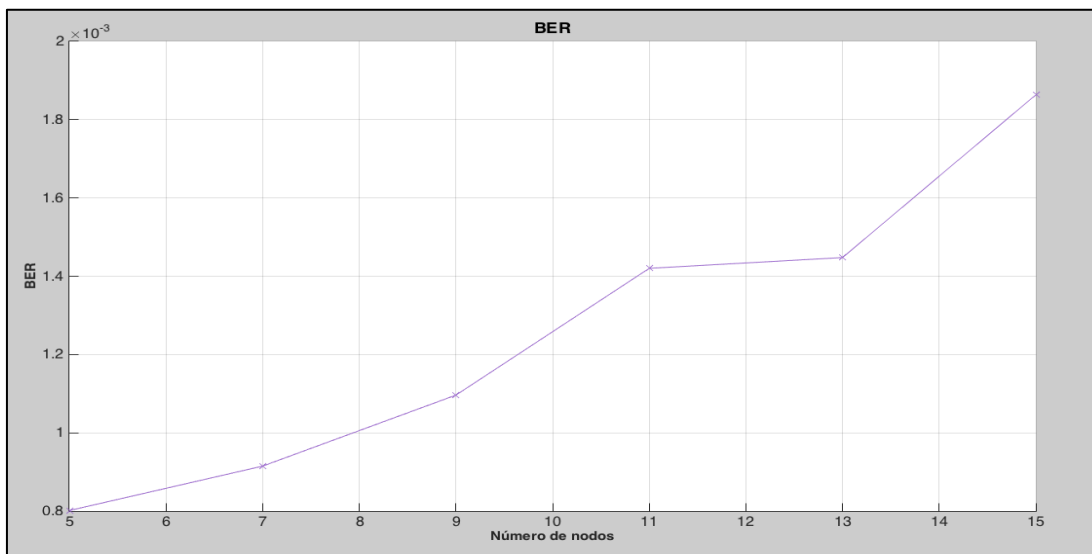


Figura 60. BER respecto al número de nodos para WiFi a 6 Mbps.

En la figura 61 se muestra la respuesta de la red expresada en fallos reportados conforme varía el número de nodos. De esta gráfica se puede deducir que mientras más cantidad de nodos hallan en la red, más alta es la tasa de fallos reportados por los nodos, ya que al momento de realizar la contienda, cada nodo está compitiendo con una mayor cantidad de nodos para acceder al canal, lo que se traduce en un aumento proporcional del reporte de fallos respecto al aumento de nodos conectados en la red. Cuando se configura una red con cinco nodos, que es el mejor de los casos, los nodos reportan 59 fallos, mientras que cuando se configura la red con 15 nodos, se reportan 524 fallos, por lo que se puede inferir que la tasa de fallos reportados aumenta considerablemente conforme la cantidad de nodos se hace mayor. Es decir, la curva tiene un crecimiento exponencial.

Cabe resaltar que dentro de los fallos tenidos en cuenta para esta gráfica, se encuentran tanto los fallos debidos a colisiones entre nodos, como aquellos causados por la mala recepción de los datos.

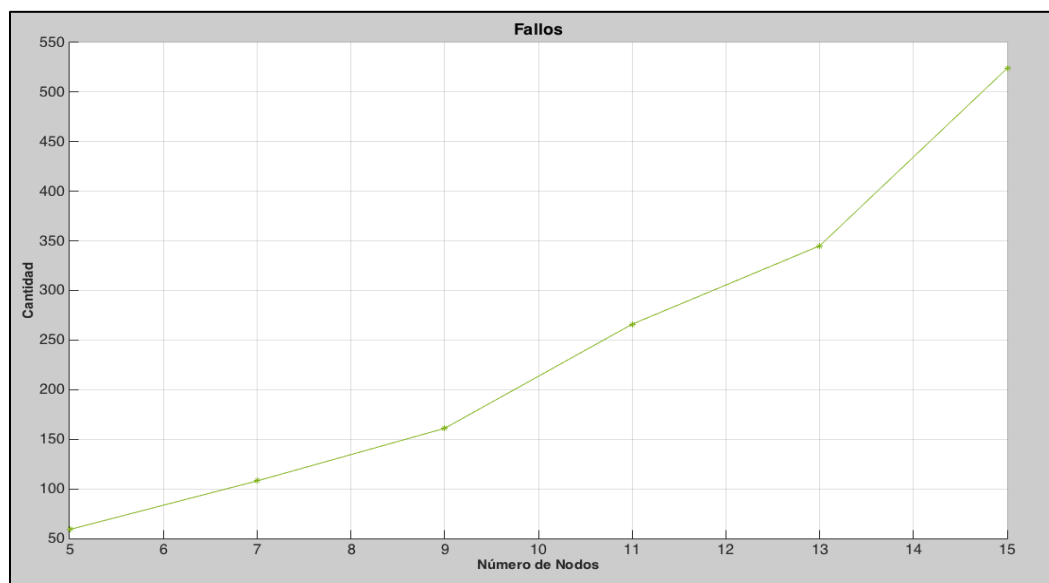


Figura 61. Cantidad de fallos reportados respecto al número de nodos para WiFi a 6 Mbps.

5.2.1.2 Tasa de transmisión a 54 Mbps

En la figura 62 se enseñan los resultados que se obtuvieron del delay para el caso de la topología en estrella, implementando el estándar IEEE 802.11 a una tasa de transmisión de 54 Mbps. Como se puede observar en la figura, el delay promedio tiene pequeños cambios alrededor de los 80 μ s, a excepción de la configuración de 5 nodos, cuyo valor es de 74 μ s, a lo largo de la variación de la cantidad de nodos de la red. Esto permite inferir que como era de esperarse, en la topología en estrella, también para el caso de 54 Mbps, el delay es independiente a dicha variable de entrada, ya que el único parámetro que determina el valor de la latencia en la topología en estrella es el tiempo de propagación del paquete.

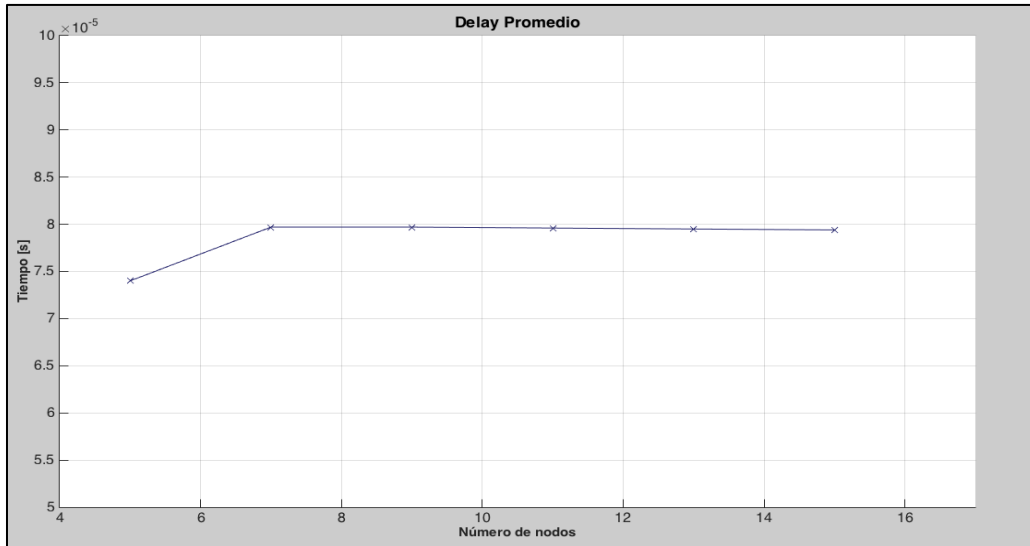


Figura 62. Delay respecto al número de nodos para WiFi en estrella a 54Mbps.

En la figura 63 se ilustra la cantidad de paquetes recibidos por el coordinador conforme aumenta la cantidad de nodos de la red. Como se puede observar en la figura, al igual que en el caso de la topología en estrella para una tasa de transmisión a 6 Mbps, se lograron enviar todos los paquetes por cada nodo, lo que hace que la respuesta sea lineal y ascendente. Por ejemplo, para el caso de la red conformada por cinco nodos, el coordinador recibió 5000 paquetes, y para el caso de la red más grande, conformada por 15 nodos, se recibieron 15000 paquetes.

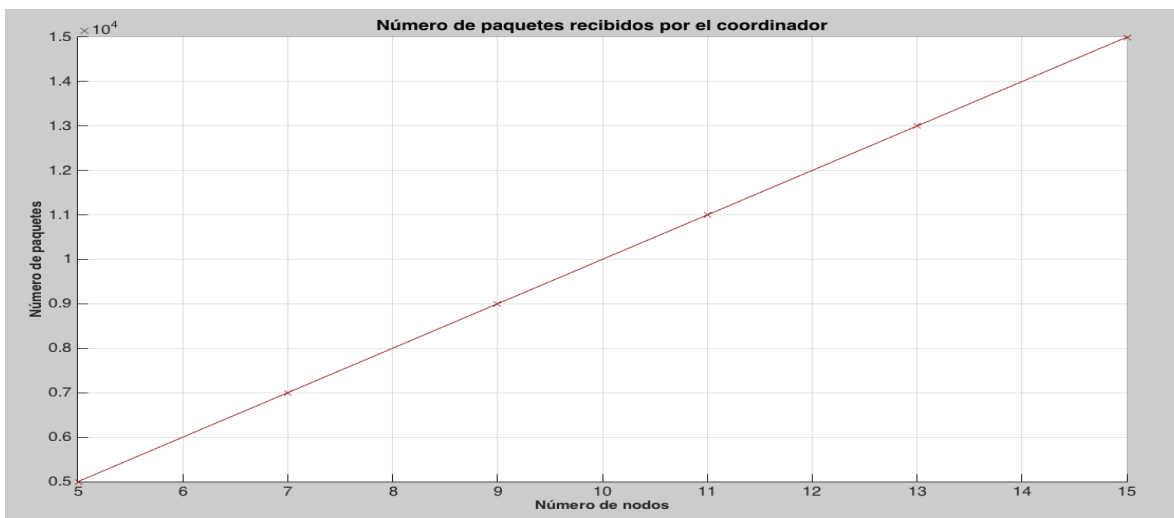


Figura 63. Número de paquetes enviados respecto al número de nodos para WiFi en topología en estrella a 54Mbps.

En la figura 64 se enseña el comportamiento del throughput cuando el número de nodos aumenta. Como el throughput es proporcional al número de bits de información recibidos por el coordinador (ecuación throughput), y por lo tanto, proporcional al número de paquetes enviados, es de esperar que la gráfica 30 tenga la misma forma que la figura

número de la anterior. El throughput más alto reportado es el de la red conformada por 15 nodos, que dio un valor de 129000 bps, mientras que el caso más bajo dio de 43000 bps.

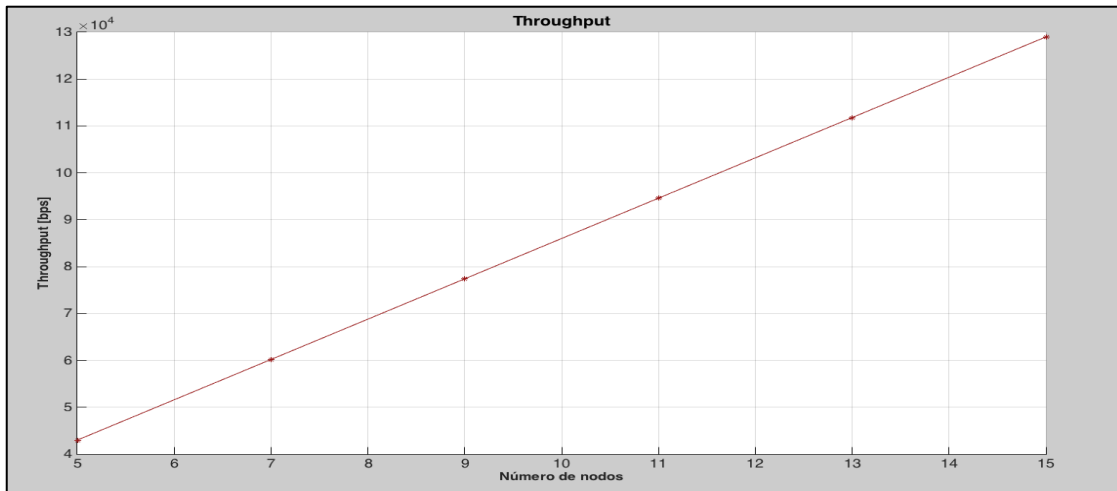


Figura 64. Throughput de la red respecto al número de nodos en WiFi a 54 Mbps.

En la figura 65 se grafica la respuesta del *bit error rate* respecto al aumento de la cantidad de nodos. En esta figura se observa que a medida que aumenta el número de nodos de la red, la tasa de error de bit también aumenta, ello por las mismas razones que se mencionaron en el caso de 6 Mbps. El valor que se obtiene de BER para el caso en el que la red está conformada por cinco nodos, que es el más pequeño de todos, es de 14.8×10^{-3} , llegando a un valor máximo para el escenario en el que se configuran 15 nodos, en donde se obtiene un valor de alrededor de 20.42×10^{-3} .

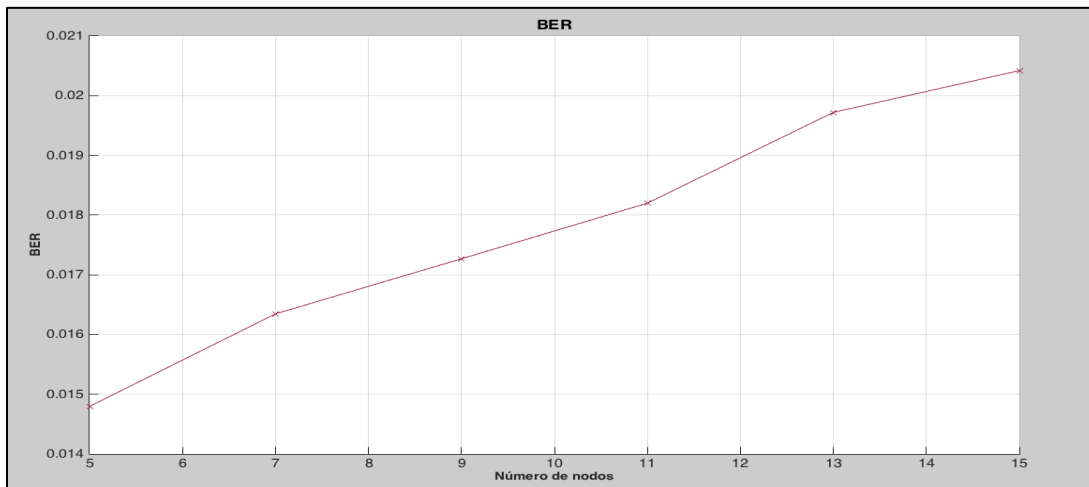


Figura 65. BER respecto al número de nodos para WiFi a 54 Mbps.

En la figura 66 se enseña la respuesta de la red expresada en fallos reportados conforme varía el número de nodos. Como sucedió en el caso de 6 Mbps, mientras más nodos conformen la red, mayor cantidad de fallos se van a reportar, tanto los debidos a las colisiones como los debidos a los paquetes degradados en el medio. Para este caso, la red que estaba conformada por cinco nodos, reportó una cantidad de 54 fallos, que fue el

mínimo de todos, mientras que para la red conformada por 15 nodos reportó un total de 435 fallos.

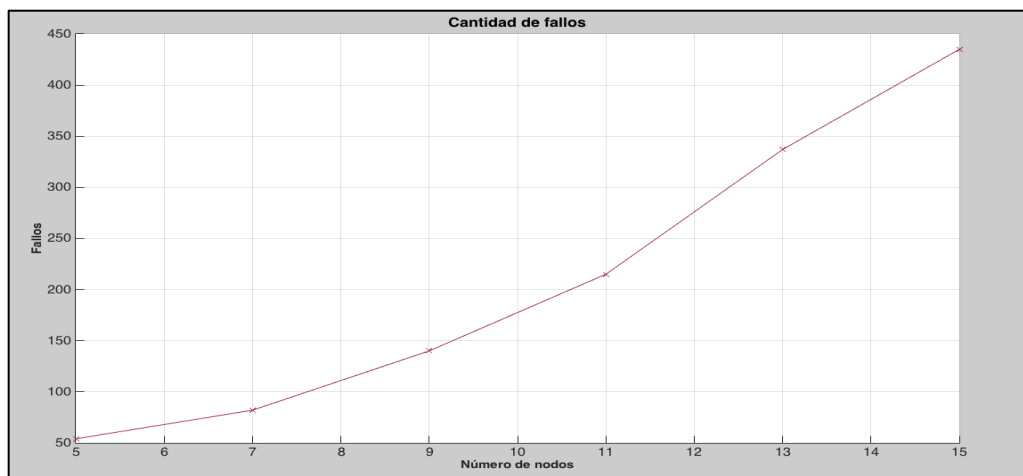


Figura 66. Cantidad de fallos reportados respecto al número de nodos para WiFi a 54 Mbps.

5.2.2 Topología en Árbol

En esta sección se enseñan los resultados obtenidos para el caso de la topología en árbol operando bajo ambas tasas de transmisión.

5.2.2.1 Tasa de transmisión a 6 Mbps

En la figura 67 se ilustra el comportamiento del delay obtenido cuando se variaba la cantidad de nodos de la red. En la gráfica se puede observar que hay una variación máxima de poco más de 1 ms a lo largo de toda la curva, reportándose el punto más bajo en la configuración de 15 nodos, cuyo caso particular tiene un delay de 19 ms, hasta llegar a los 20.4 ms, valor que se obtuvo para el caso en que la red se configuró con 19 nodos. Se puede distinguir que para los primeros casos, aquellos en los que se tenía menor cantidad de nodos en la red, específicamente desde la configuración de los 9 nodos hasta los 15, el delay promedio empieza a decrecer lentamente, partiendo de 1.96 ms hasta reportar su punto más bajo en 19 ms. Luego, el delay empieza a crecer con una pendiente considerable hasta volver a caer en los 21 nodos, llegando a los 1.98 ms.

Aunque la figura es algo irregular, se puede inferir que la tendencia de la gráfica es ascendente conforme incrementa la cantidad de nodos de la red, comportamiento que es de esperar, ya que en la topología en árbol, entre más nodos hayan por cada rama, la congestión de datos en los routers va a ser más grande, por lo que el acceso al medio será más complicado y por lo tanto, el tiempo de espera de cada trama incrementará considerablemente.

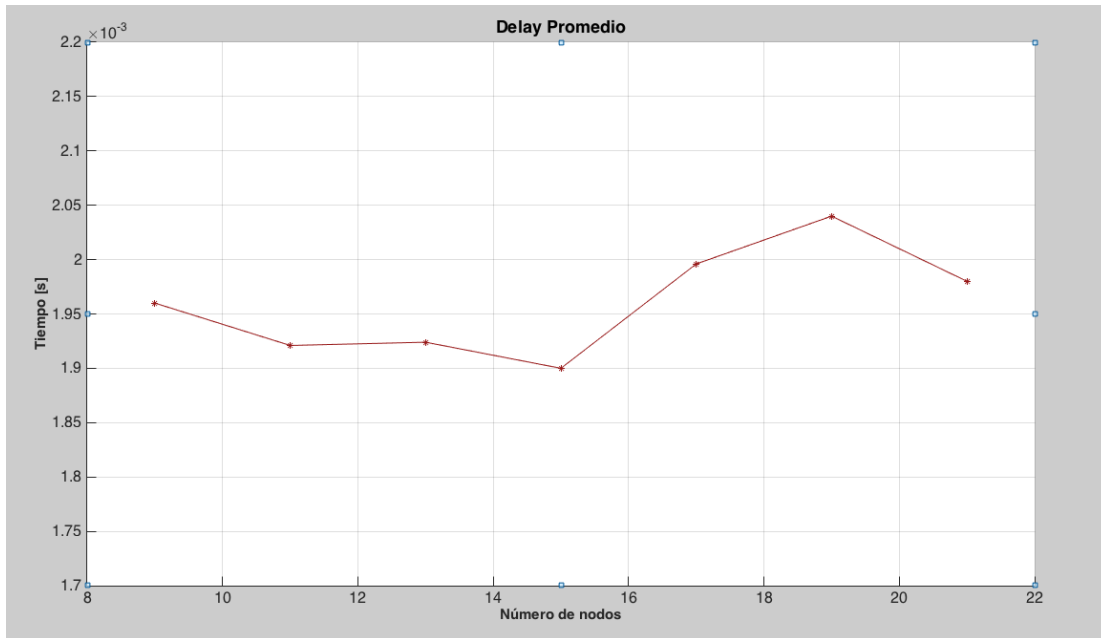


Figura 67. Delay promedio respecto a la cantidad de nodos en la topología en árbol a 6 Mbps.

Por otro lado, en la figura 68 se enseña el comportamiento del delay máximo respecto a la cantidad de nodos. Aquí es claro el comportamiento ascendente del delay máximo de la red conforme aumentan los nodos. Se reporta un delay máximo de 14 ms para una cantidad de 19 nodos. La forma de la curva es debida a la misma razón explicada anteriormente.

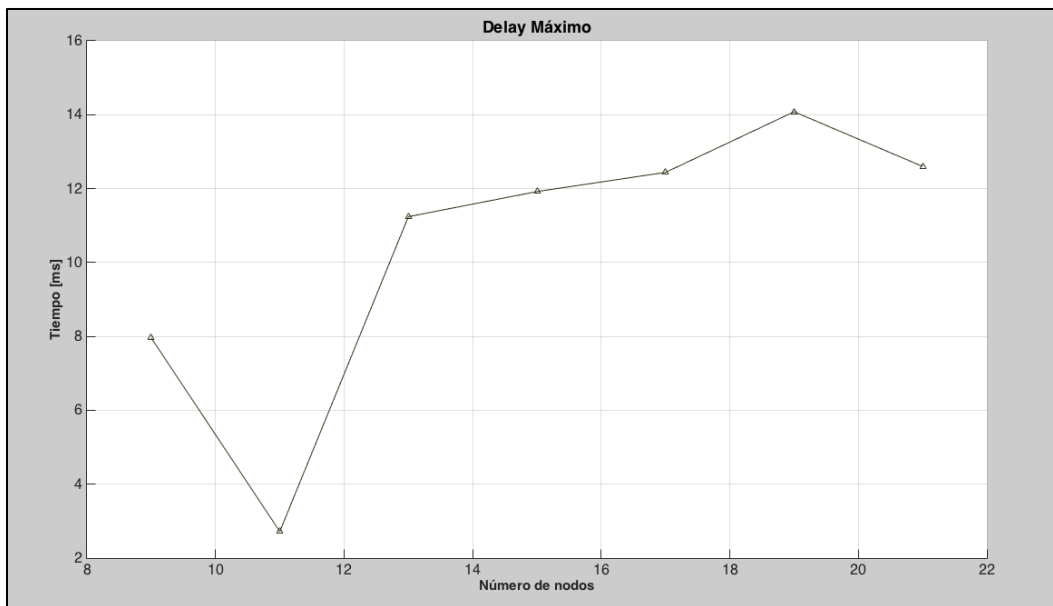


Figura 68. Delay máximo respecto a la cantidad de nodos en la topología en árbol a 6 Mbps.

En la figura 69 se ilustra la respuesta de la cantidad de paquetes según aumenta el número de nodos. Como se observa en la gráfica, esta tiene un comportamiento lineal que cuenta con una pendiente de 1000. Se puede distinguir que para todos los casos, el coordinador

recibió la cantidad de paquetes esperada. Por ejemplo, para el caso de 9 nodos, que es el punto más bajo de la curva, se reportaron 9000 paquetes, mientras que para el caso de 21 nodos, al coordinador llegaron 21000 paquetes. Este comportamiento se da porque aun estando la red configurada en árbol, como se explicó en la topología en estrella, la tasa de transmisión de datos es bastante alta para satisfacer el tiempo requerido para el envío del paquete que acá se está usando, por lo que todas los nodos alcanzan a enviar el paquete que les corresponde dentro de la ventana de los 100 ms.

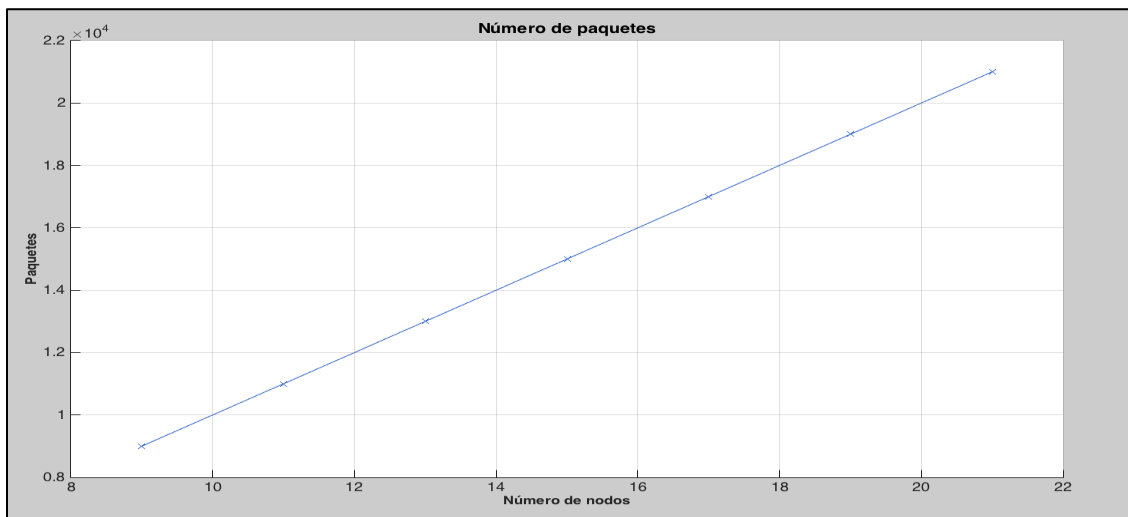


Figura 69. Cantidad de paquetes enviados respecto al número de nodos a 6 Mbps.

En la figura 70 se ilustra el comportamiento del throughput respecto a la cantidad de nodos de la red. Como es de esperarse, se observa un comportamiento proporcional a la gráfica 69, ya que de acuerdo a la ecuación de throughput, este es proporcional a la cantidad de bits de información enviados por paquete. El throughput más alto que se obtuvo fue para el caso de la configuración de 21 nodos, para el cual fue de 180600 bps, mientras que el mínimo fue de 77400 bps, para el caso de 9 nodos.

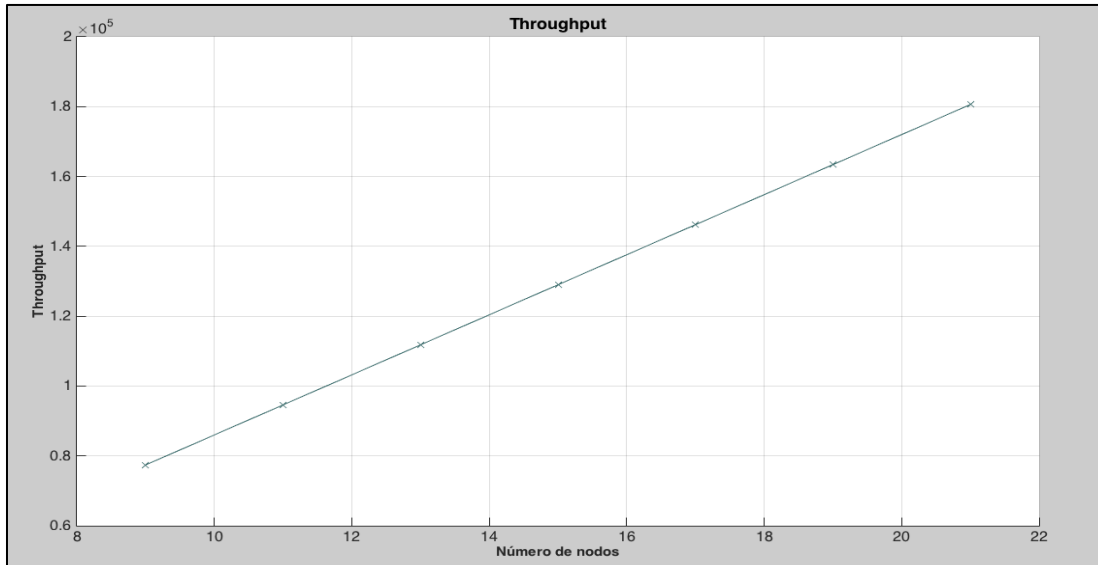


Figura 70. Throughput respecto al número de nodos para WiFi en topología árbol a 6 Mbps.

En la figura 71 se enseña el comportamiento del BER respecto a la cantidad de nodos de la red. Se puede observar que la diferencia máxima de la curva del BER desde su punto más bajo en 4.87×10^{-4} , en el caso de los 15 nodos hasta su punto más alto en 6.37×10^{-4} , en el escenario de 21 nodos. Se puede inferir que la tendencia de la curva es ascendente, lo que es de esperarse, ya que conforme aumenta el número de nodos en la red, aumentan las colisiones en los routers, y por lo tanto, el número de bits degradados en el receptor.

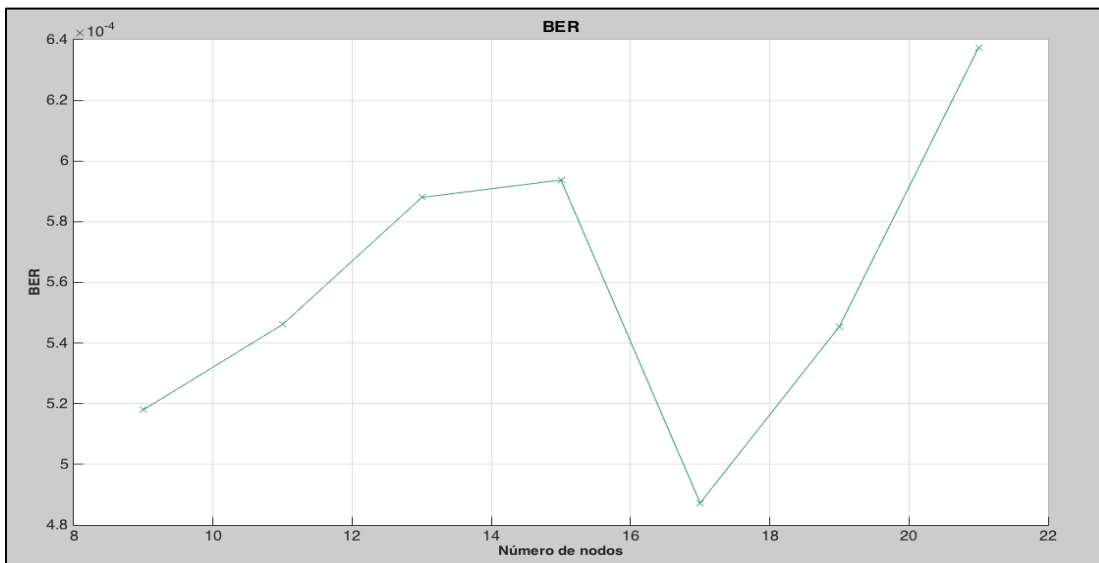


Figura 71. BER respecto al número de nodos en WiFi topología en árbol a 6 Mbps.

Por otro lado, en la figura 72 se ilustra la respuesta del número total de fallos respecto a la cantidad de nodos de la red. Aquí, para contabilizar la cantidad de fallos, se tienen en cuenta los fallos reportados por cada una de las ramas y sus respectivos routers, de acuerdo a las colisiones que hayan sucedido, más los paquetes degradados por el canal. La curva

tiene una tendencia ascendente conforme aumenta la cantidad de nodos de la red, iniciando en su punto más bajo con 218, en la configuración de 9 nodos, hasta llegar a la máxima cantidad de fallos reportados, cuyo valor es de 818, en la red con 21 nodos. La forma de la curva presentada se da porque al igual que en los casos anteriores, entre más nodos estén compitiendo en la red para acceder al medio, mayor cantidad de colisiones se van a presentar y por lo tanto, los fallos aumentan.

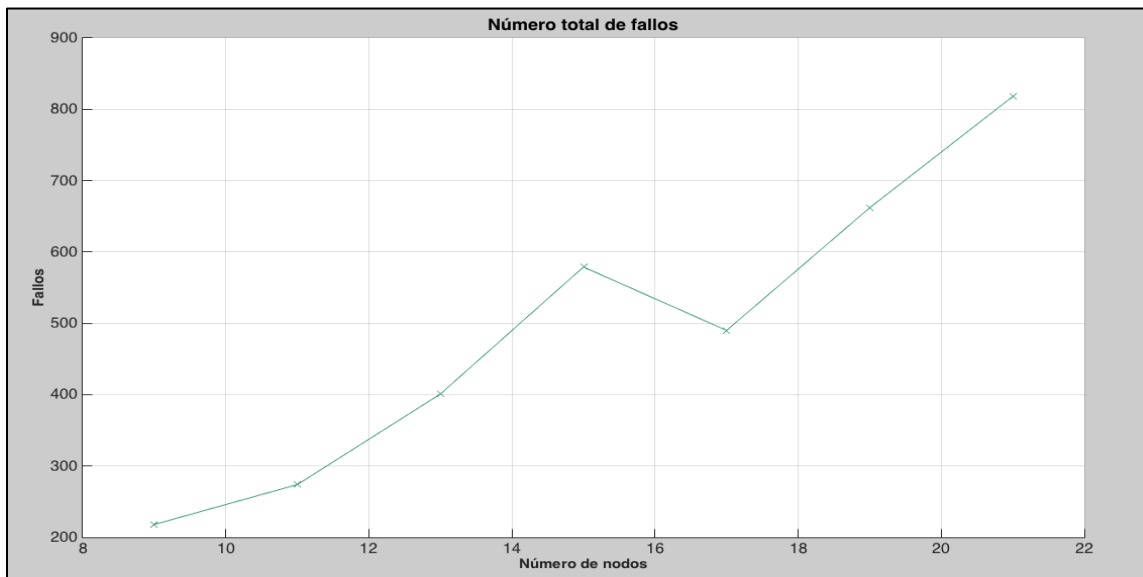


Figura 72. Cantidad de fallos con respecto a la cantidad de nodos para WiFi en topología en árbol a 6Mbps.

5.2.2.2 Tasa de transmisión a 54 Mbps

En la figura 73 se ilustra el comportamiento del delay obtenido cuando se variaba la cantidad de nodos de la red. En la gráfica se puede observar que hay una variación máxima de alrededor de 1 ms a lo largo de toda la curva, reportándose el punto más bajo en la configuración de 13 nodos, cuyo caso particular tiene un delay de 1.344 ms, hasta llegar a los 1.452 ms, valor que se obtuvo para el caso en que la red se configuró con 19 nodos. Se puede identificar que el comportamiento del delay conforme aumenta la cantidad de nodos de la red, tiene una tendencia ascendente.

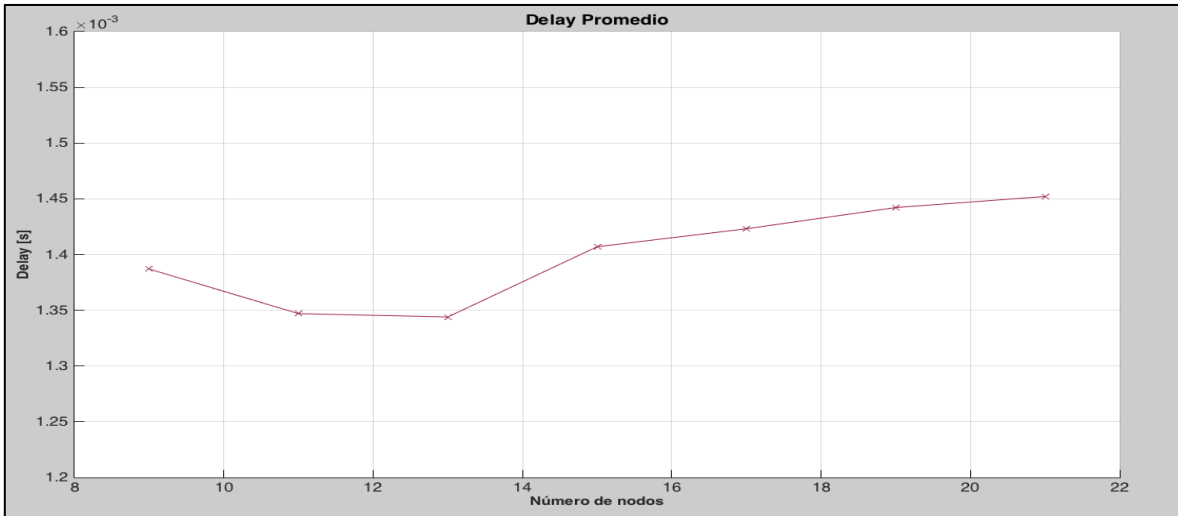


Figura 73. Delay promedio respecto a la cantidad de nodos en la topología en árbol a 6 Mbps.

Por otro lado, en la figura 74 se enseña el comportamiento del delay máximo respecto a la cantidad de nodos. Aquí es claro el comportamiento ascendente del delay máximo de la red conforme aumentan los nodos. Se reporta un delay máximo de 10 ms para una cantidad de 19 nodos.

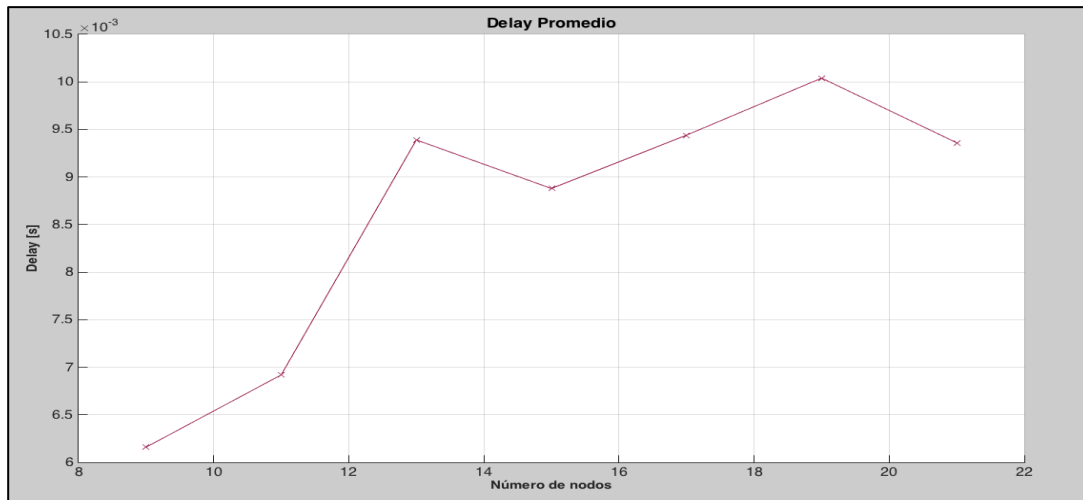


Figura 74. Delay máximo respecto a la cantidad de nodos en la topología en árbol a 6 Mbps.

En la figura 30 se ilustra la respuesta de la cantidad de paquetes según aumenta el número de nodos. De la figura se observa que todos los nodos enviaron los paquetes que les correspondían, ya que hay una respuesta lineal de la cantidad de paquetes conforme varía el número de nodos de la red. Para el caso de 9 nodos, que es el caso en que se envió la menor cantidad de paquetes, se enviaron 9000 paquetes, mientras que la mayor cantidad fue otra vez la red conformada por 21 nodos, cuya cantidad de paquetes enviados fue de 21000.

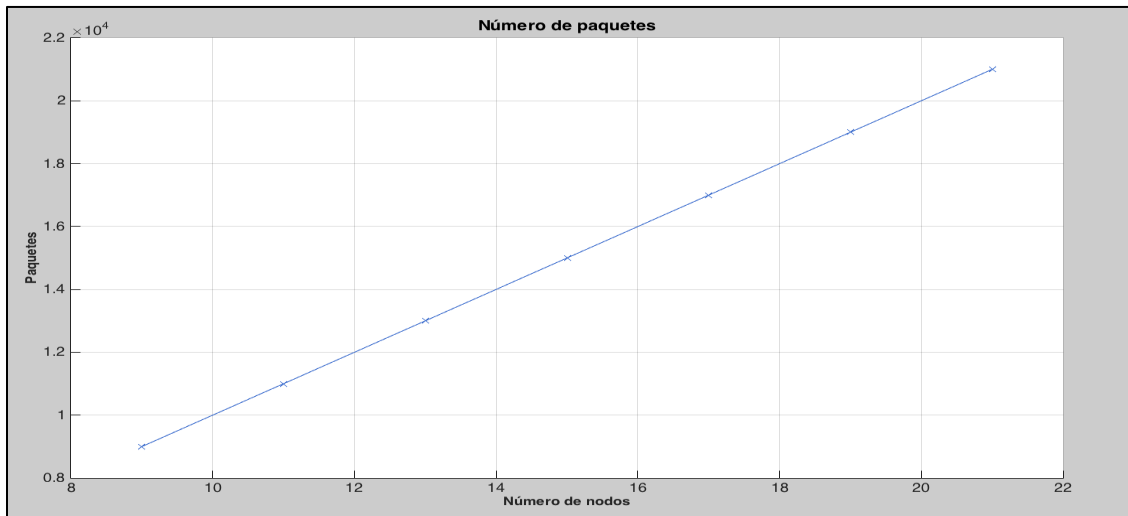


Figura 75. Cantidad de paquetes enviados respecto al número de nodos a 54 Mbps.

El comportamiento del throughput se ilustra en la figura 76, y como se puede observar, tuvo un comportamiento de la misma forma que la gráfica de la cantidad de paquetes enviados (gráfica 75). Esto se da por las mismas razones explicadas para el caso de 6 Mbps.

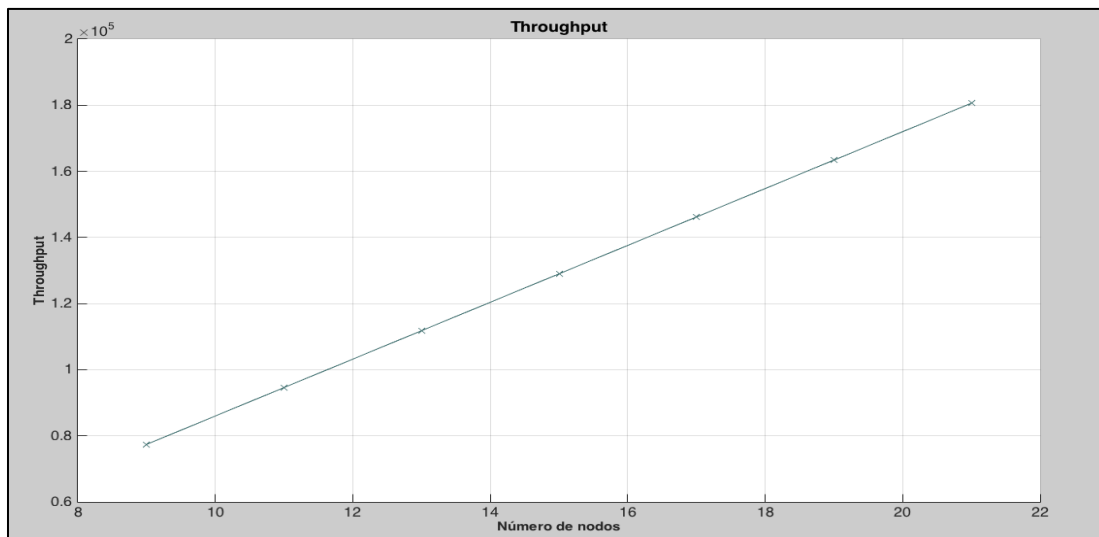


Figura 76. Throughput respecto al número de nodos para WiFi en topología árbol a 54 Mbps.

La imagen de la figura 77, hace referencia a la tasa de error de bit respecto a la variación de los nodos. En la gráfica se observa que el BER se varía dentro del rango de valores de 15.6×10^{-3} a 16.2×10^{-3} mostrando una ligera tendencia a disminuir. Aunque estos valores del BER son bastante altos, su valor es generado principalmente por el número de colisiones de paquetes dentro de la red como se relaciona en la gráfica 78.

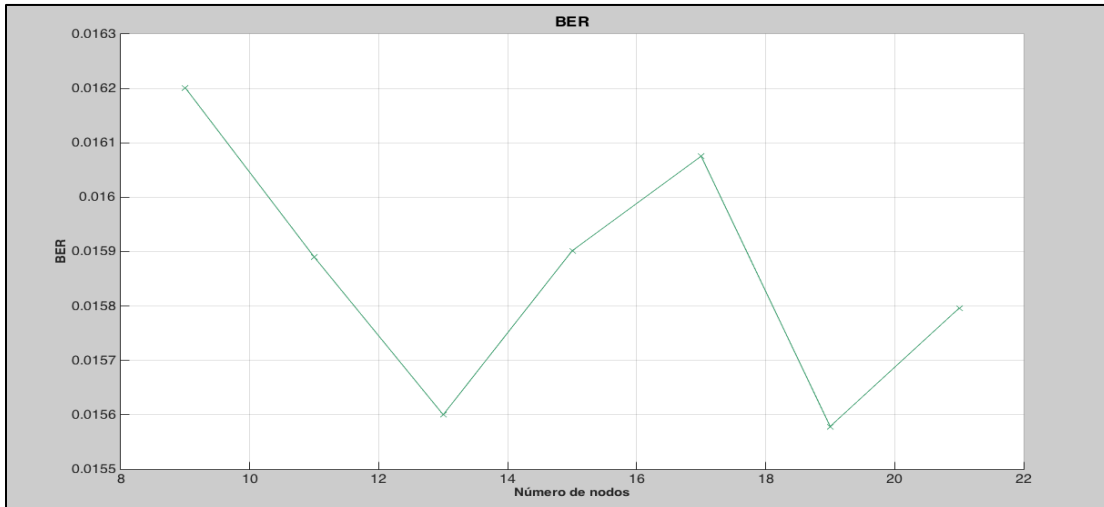


Figura 77. BER respecto al número de nodos en WiFi topología en árbol a 54 Mbps.

Por otro lado, en la figura 78 se ilustra la respuesta del número total de fallos respecto a la cantidad de nodos de la red. De la figura se puede ver que la cantidad de fallos tiene una respuesta ascendente y cada que aumenta la cantidad de nodos, la diferencia de la cantidad de fallos de una configuración respecto a otra con menor número de nodos, es cada vez mayor. Es decir, por ejemplo la diferencia de la cantidad de fallos reportados en la red con 21 nodos y la red con 19, es de 148, mientras que la diferencia de fallos de la red de 11 nodos y la de 9 nodos es de 36, por lo que se nota un crecimiento exponencial del número de fallos reportados.

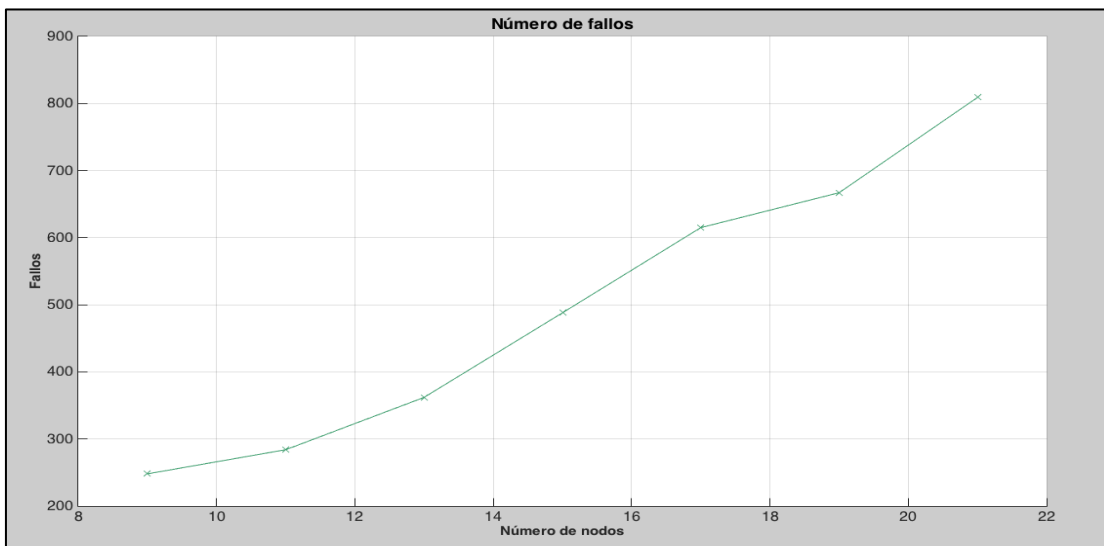


Figura 78. Cantidad de fallos con respecto a la cantidad de nodos para WiFi en topología en árbol a 54 Mbps.

5.3 Estándar IEEE 802.3 (Ethernet)

De acuerdo a los parámetros de la simulación, a continuación se muestra los parámetros de salida respecto al número de nodos.

La figura 79, muestra el retardo promedio de la red respecto al número de nodos. La grafica tiene una tendencia ascendente, con una gran variación entre 15 a los 17 nodos pasando de un retraso de 0.2751×10^{-3} s a 0.551×10^{-3} s respectivamente. El menor tiempo de retraso ocurre con cinco nodos con un delay promedio de 0.107×10^{-3} s. Este comportamiento se debe a que los paquetes deben esperar un tiempo en el switch para que este los direcciona hacia el nodo concentrador, entre más nodos se encuentren en la red, más paquetes se encontrarán esperando a que el switch los direcciona aumentando de esta forma el tiempo de retardo de los paquetes.

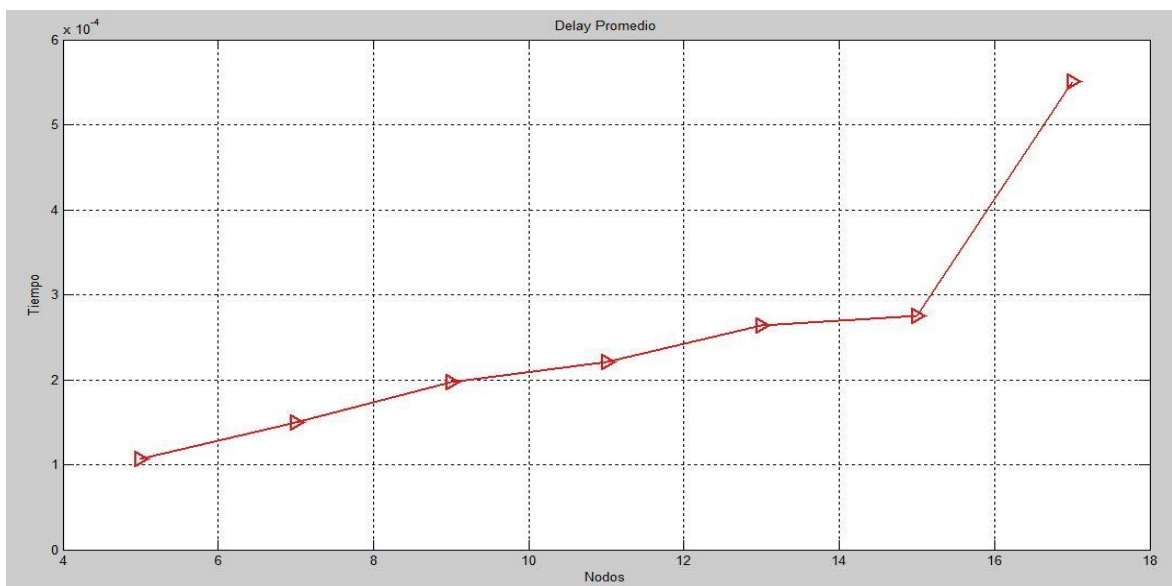


Figura 79. Delay promedio respecto al número de nodos Ethernet.

La grafica de la figura 80 corresponde al numero de paquetes enviados exitosamente por la red. Tiene una relacion linealmente proporcional con el numero de nodos y en él se puede evidenciar que las características técnicas del estándar IEEE 802.3, para el tamaño del paquete propuesto y frecuencia de envío, es capaz de manejar fácilmente estos requerimientos variando la cantidad de nodos en el sistema. Por ejemplo con cinco nodos la cantidad de paquetes enviados fueron de 4950, para 11 nodos el numero de paquetes ascendió a 10890 y para 17 nodos el numero de paquetes correspondió con 16864 paquetes mostrando una tendencia aproximadamente lineal.

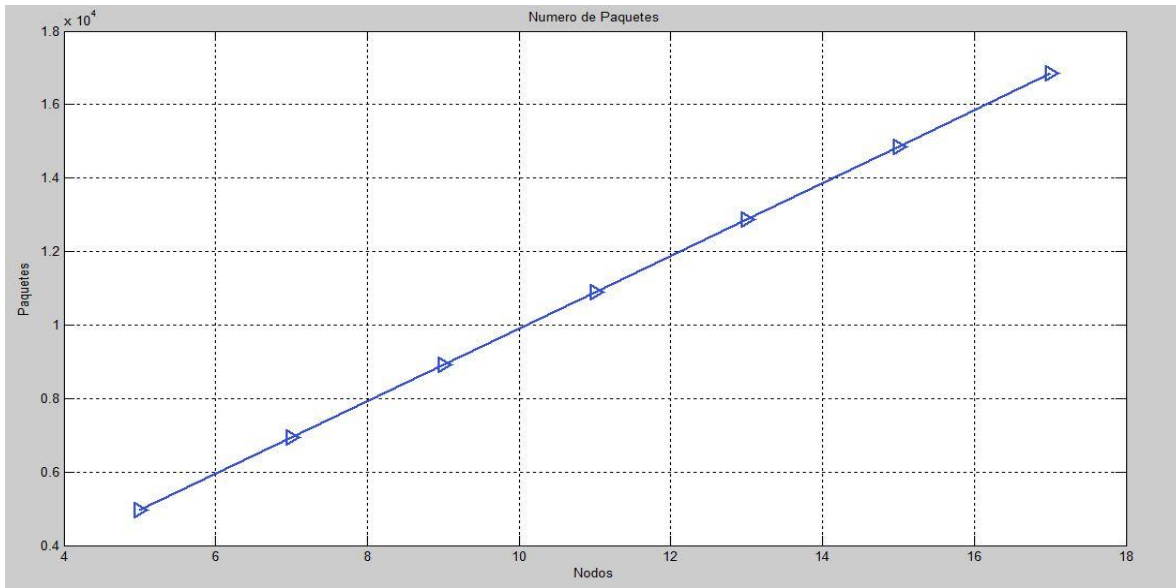


Figura 80. Número de paquetes respecto al número de nodos Ethernet.

El throughput de la red, se presenta en la figura 81. En la gráfica se observa una relación lineal del throughput respecto al número de nodos al igual que en la figura 80, dado que este parámetro es proporcional a la cantidad de paquetes enviados y al igual como se expresó con la métrica anterior, esta grafica evidencia que la capacidad técnica de esta tecnología satisface fácilmente las características de la red planteada. Los valores alcanzados para el throughput en la figura tenemos por ejemplo que para 5 nodos se obtuvo un valor de 41.580 Kbps, en el caso de 11 nodos el throughput es de 91.476 Kbps y para 17 nodos este valor correspondió a 141.657 Kbps.

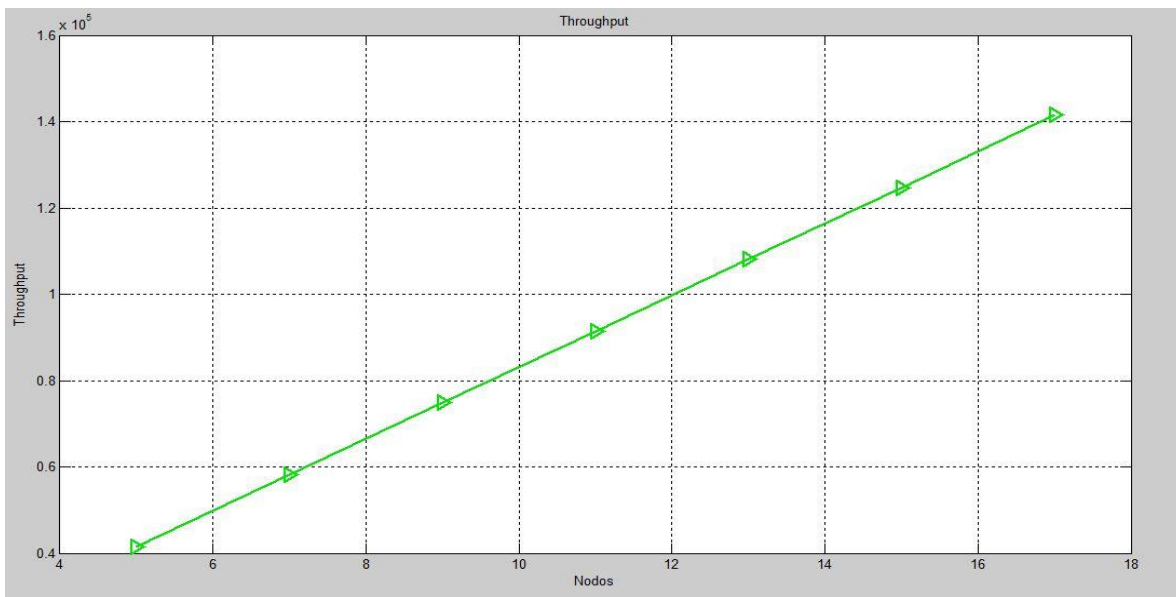


Figura 81. Throughput respecto al número de nodos Ethernet.

Nodos	Paquetes	Delay Prom/ms	Throughput/bps
5	4950	0,107	41580
7	6930	0,1501	58212
9	8910	0,1967	74844
11	10890	0,2206	91476
13	12870	0,2635	108108
15	14850	0,2754	124740
17	16864	0,5513	141657,6

Tabla 23 Resultado simulación Ethernet

Capítulo 6. Conclusiones

De acuerdo a los objetivos de una microrred y las características que esta debe satisfacer, se determinó que la robustez, la confiabilidad, la escalabilidad y la implementación de una comunicación bidireccional con retrasos adecuados de acuerdo a la aplicación, son los requerimientos que la red de telecomunicaciones debe satisfacer para lograr un correcto funcionamiento. Sin embargo, los parámetros del sistema de comunicaciones son dependientes de la estructura de la microrred y del sistema de control que esta tenga implementado, por lo que estos varían de una implementación a otra.

Se encontró que los estándares que mejor se adaptan al sistema de telecomunicaciones de una microrred rural aislada corresponden a los IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.15.4 (ZigBee) y IEEE 802.3 (Ethernet), ya que las tasas de transmisión, el área de cubrimiento y las características de los estándares en que se basan, cumplen los requerimientos de la microrred.

En cuanto a los parámetros de desempeño de la red se encontró que aunque las tecnologías inalámbricas presenten ciertas ventajas sobre las alambradas respecto a la facilidad que tienen al momento de realizar su instalación o expansión, se debe tener en cuenta la distribución espacial de los mismos al momento de configurar la red inalámbrica, de tal forma que se minimice los efectos de colisiones de paquetes que disminuyen el rendimiento del sistema en cuanto a los paquetes enviados y el BER producto de colisiones y estado del canal. La topología lógica que se implemente en el sistema de telecomunicaciones que gestiona la microrred es dependiente de la distribución espacial de los nodos que la conforman. Para el caso particular de una microrred rural aislada, se encontró que las topologías más comunes del sistema de comunicaciones son la de árbol y la de estrella.

Por otro lado, según los requerimientos del sistema de telecomunicaciones del apartado 3.2 respecto al retardo permitido para la red, se encontró que las tres tecnologías (en las dos topologías para el caso de los estándares IEEE 802.15.4 y IEEE 802.11), satisfacen los requerimientos de tiempo, siendo IEEE 802.11 e IEEE 802.3 las más rápidas. El estándar 802.11 presentó valores de 79 μ s y 279 μ s para las tasas de transmisión de 54 Mbps y 6Mbps respectivamente, en topología estrella; para la topología en árbol los tiempos fueron de 1.39 ms y 1.96 ms para las tasas de transmisión de 54 Mbps y 6 Mbps respectivamente. El estándar 802.3 presentó un retraso promedio en el rango de 107 μ s a 551 μ s. En cuanto al estándar 802.15.4 el delay promedio fue de 3.52 ms para la topología en estrella y 15.96 ms para la topología en árbol. Sin embargo, se debe tener en cuenta el número de paquetes enviados y los fallos del sistema. Para el caso de Ethernet, debido a su configuración, los fallos debidos a colisiones son nulos y el número de paquetes enviados es alto, garantizando la fiabilidad y escalabilidad del sistema.

El estándar IEEE 802.11, al igual que IEEE 802.3 tienen una alta tasa de paquetes enviados y respondió bien al aumento de nodos en la red para ambas tasas de transmisión y

topologías, pero si se tienen en cuenta los fallos debidos a pérdida de paquetes se observa que tanto en la topología en estrella como en árbol, para ambas tasas de transmisión, a medida que la cantidad de nodos aumenta, el número de fallos aumenta de forma exponencial. En tal caso se debe tener en cuenta la tolerancia de la microrred a retrasos del paquete por fallos reportados dentro de la ventana de tiempo del envío. No obstante, en caso de que el número de fallos por colisiones sea significativo, el uso de las tramas de control RTS/CTS debería ser implementado. Los fallos obtenidos para ambas configuraciones, a 54 Mbps y a 6 Mbps tanto para la topología en estrella como para la topología en árbol, se mantienen en valores similares a lo largo del aumento de la cantidad de nodos, pero se debe tener en cuenta que operando bajo 54 Mbps la microrred está sujeta a una distancia de cubrimiento considerablemente menor.

Para el estándar IEEE 802.15.4 en topología en estrella se observó que los parámetros de rendimientos de la red se ven afectados por el aumento de nodos. En la topología en estrella, se observó que el número de fallos fueron menos de 100 y el BER estuvo por debajo de $1.19e-3$ hasta que se superaron los 11 nodos. En cuanto a la topología en árbol, la cantidad de fallos para 13 nodos fue de 146 y el BER fue de $0.56e-3$. Por otro lado, en cuanto al throughput, la topología en estrella alcanzó su máximo valor a los 13 nodos con 91 Kbps, mientras que para la topología en árbol se obtuvo en 19 nodos con 100 Kbps, por lo tanto, aunque esta última presentó un retardo mayor, permitió mayor escalabilidad en los nodos presentando un throughput mayor.

6.1 Trabajos futuros

Como futuro trabajo, se plantea hacer una co-simulación con un sistema de potencia que modele una microrred, por lo que se necesita que el modelo de comunicaciones aquí propuesto pueda tener parámetros de entrada provistos por programas diferentes a Matlab® y que los datos de salida puedan ser exportados hacia otros ambientes de simulación. Simulink, en conjunto con Matlab®, provee esta funcionalidad de interconexión con otros entornos de simulación y esta es una de las grandes razones por las que aquí se ambienta la red de telecomunicaciones. Sin embargo, como también es posible modelar el sistema de potencia de la microrred en Simulink, o incluso en Matlab®, se vuelve ideal la interconexión de los dos modelos para recrear toda la microrred.

Por otra parte en cuanto a la simulación del sistema de telecomunicaciones, se plantea variar los requerimientos de entrada como el tamaño del paquete, la frecuencia de envío y las condiciones del medio observando el desempeño de la red para cada uno de los casos.

Debido a que una microrred rural aislada está expuesta a un sinnúmero de factores externos que pueden alterar su funcionamiento normal, se hace interesante observar la resiliencia del sistema de comunicaciones cuando la microrred se ve afectada por algún fallo debido a apagones, mal funcionamiento de algún nodo, entre otros [68].

Bibliografía

- [1] A. Mahmood, N. Javaid, and S. Razzaq, "A review of wireless communications for smart grid," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 248–260, Jan. 2015.
- [2] A. Clark and C. J. Pavlovski, "Wireless Networks for the Smart Energy Grid: Application Aware Networks," *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. II, 2010.
- [3] J. Gao, Y. Xiao, J. Liu, W. Liang, and C. L. P. Chen, "A survey of communication/networking in Smart Grids," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 391–404, Feb. 2012.
- [4] S. A. Arefifar, Y. A. I. Mohamed, S. Member, and T. El-fouly, "Optimized Multiple Microgrid-Based Clustering of Active Distribution Systems Considering Communication and Control Requirements," vol. 62, no. 2, pp. 711–723, 2015.
- [5] S. Safdar, B. Hamdaoui, E. Cotilla-Sanchez, and M. Guizani, "A survey on communication infrastructure for micro-grids," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2013, pp. 545–550.
- [6] A. Giusti, M. Salani, G. a. Di Caro, A. E. Rizzoli, and L. M. Gambardella, "Restricted neighborhood communication improves decentralized demand-side load management," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 92–101, 2014.
- [7] S. Bukowski and S. J. Ranade, "Communication network requirements for the Smart Grid and a path for an ip based protocol for customer driven microgrids," *2012 IEEE Energytech, Energytech 2012*, pp. 1–6, 2012.
- [8] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "Simulation of communication infrastructure of a centralized microgrid protection system based on IEC 61850-7-420," *2012 IEEE 3rd Int. Conf. Smart Grid Commun. SmartGridComm 2012*, pp. 492–497, 2012.
- [9] M. Khederzadeh, "22 nd International Conference on Electricity Distribution Paper 0212 APPLICATION OF WIDE-AREA PROTECTION CONCEPTS IN MICROGRIDS 22 nd International Conference on Electricity Distribution Back-up," no. 212, pp. 10–13, 2013.
- [10] D. Rua, S. Member, L. F. M. Pereira, N. Gil, J. A. P. Lopes, and S. Member, "Impact of Multi-Microgrid Communication Systems in Islanded Operation," pp. 1–6.
- [11] R. Mao, Y. Xu, H. Li, C. Science, and O. Ridge, "Wireless Communication for Controlling Microgrids: Co-simulation and Performance Evaluation," no. Mccc, 2013.
- [12] R. Quintanilla and J. M. Y. Z. I. V. P. C, "Nuevas exigencias y aplicaciones de comunicaciones para la protección de microrredes," pp. 43–50, 2010.
- [13] R. H. Lasseter, "MicroGrids," *2002 IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet. Conf. Proc. (Cat. No.02CH37309)*, pp. 305–308, 2002.

- [14] J. de Alaminos, E. Alcor, M. Asensio, R. Bernadó, L. Fernández, E. Gomez, L. Iriarte, M. Labriet, L. López, A. Mejicanos, and J. J. Peiró, “Estudio sobre las microrredes y su aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales,” p. 124, 2014.
- [15] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, “Distributed generation: A definition,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 57, pp. 195–204, 2001.
- [16] K. Shenai and K. Shah, “Smart DC micro-grid for efficient utilization of distributed renewable energy,” *IEEE 2011 EnergyTech, ENERGYTECH 2011*, 2011.
- [17] J. S. Anadón, “Modelado y simulación de una microrred basada en generación fotovoltaica,” vol. 2, pp. 127–129.
- [18] H. E. Gaona, Elvis Eduardo; Rodríguez, César Leonardo; Rojas, “INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIONES EN MICRORREDES ELÉCTRICAS,” vol. 4, no. 2, pp. 37–44, 2015.
- [19] H. Jiayi, J. Chuanwen, and X. Rong, “A review on distributed energy resources and MicroGrid,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, pp. 2465–2476, 2008.
- [20] S. Shukla, S. Member, Y. Deng, S. Shukla, S. Member, and L. Mili, “Construction of a Microgrid Communication Network,” 2014.
- [21] D. E. Bakken, A. Bose, C. H. Hauser, D. E. Whitehead, and G. C. Zweigle, “Smart generation and transmission with coherent, real-time data,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 928–951, 2011.
- [22] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, “Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.
- [23] I. UPME, IDEAM, COLCIENCIAS, “Atlas potencial hidroenergético de Colombia 2015,” p. 160, 2015.
- [24] S. C. C. 21 IEEE, *IEEE Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems*, no. November. 2007.
- [25] R. Bi, M. Ding, and T. T. Xu, “Design of common communication platform of microgrid,” *2nd Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst. PEDG 2010*, pp. 735–738, 2010.
- [26] Nist, N. S. Publication, and National Institute of Standards and Technology, “NIST Special Publication 1108 NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards,” *Nist Spec. Publ.*, vol. 0, pp. 1–90, 2014.
- [27] J. Weimer, Y. Xu, C. Fischione, K. H. Johansson, P. Ljungberg, C. Donovan, A. Sutor, and L. E. Fahlen, “A Virtual Laboratory for Micro-Grid information and communication infrastructures,” *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, pp. 1–6, 2012.

- [28] F. Martin-Martínez, A. Sánchez-Miralles, and M. Rivier, “A literature review of Microgrids: A functional layer based classification,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1133–1153, 2016.
- [29] D. Martin, “Hardware-In-The-Loop for Power and Telecommunications Co-Simulation with Applications,” 2014.
- [30] M. Stevic, W. Li, M. Ferdowsi, a. Benigni, F. Ponci, and A. Monti, “A two-step simulation approach for joint analysis of power systems and communication infrastructures,” *IEEE PES ISGT Eur. 2013*, pp. 1–5, 2013.
- [31] H. Lin, S. Sambamoorthy, S. Shukla, J. Thorp, and L. Mili, “A study of communication and power system infrastructure interdependence on PMU-based wide area monitoring and protection,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–7, 2012.
- [32] D. Bhor, K. Angappan, and K. M. Sivalingam, “A co-simulation framework for Smart Grid wide-area monitoring networks,” *2014 6th Int. Conf. Commun. Syst. Networks, COMSNETS 2014*, 2014.
- [33] T. Godfrey, S. Mullen, R. C. Dugan, C. Rodine, D. W. Griffith, and N. Golmie, “Modeling Smart Grid Applications with Co-Simulation,” *Smart Grid Commun. (SmartGridComm), 2010 First IEEE Int. Conf.*, pp. 291–296, 2010.
- [34] L. K. Siow, P. L. So, H. B. Gooi, F. L. Luo, C. J. Gajanayake, and Q. N. Vo, “Wi-Fi based server in microgrid energy management system,” *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, pp. 1–5, 2009.
- [35] M. a. Ahmed and Y. C. Kim, “Communication networks of domestic small-scale renewable energy systems,” *Proc. - Int. Conf. Intell. Syst. Model. Simulation, ISMS*, pp. 513–518, 2013.
- [36] N. Saputro, K. Akkaya, and S. Uludag, “A survey of routing protocols for smart grid communications,” *Comput. Networks*, vol. 56, no. 11, pp. 2741–2771, 2012.
- [37] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, “Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN,” *Comput. Networks*, vol. 67, pp. 74–88, 2014.
- [38] W. Stallings, *Comunicaciones y Redes de Computadores*, Séptima. Pearson Prentice Hall, 2004.
- [39] R. Neri Vela, *Lineas de Transmision*. McGraw-Hill, 2004.
- [40] D. Pozar, *Microwave Engineering Fourth Edition*, Fourth. WILEY, Jhon Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [41] B. Sklar, “DIGITAL COMMUNICATIONS Fundamentals and Applications.”
- [42] M. Souryal, C. Genti, D. Griffith, D. Cypher, and N. Golmie, “A Methodology to Evaluate Wireless Technologies for the Smart Grid,” *2010 First IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 356–361, 2010.

- [43] “Enterprise QoS Solution Reference Network Design Guide Version 3.3 Quality of Service Design Overview.”
- [44] “Chapter 2 - What is Network QoS?” [Online]. Available: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb742481.aspx>.
- [45] W. Wang, Y. Xu, and M. Khanna, “A survey on the communication architectures in smart grid,” *Comput. Networks*, vol. 55, no. 15, pp. 3604–3629, Oct. 2011.
- [46] D. E. Lopez and W. D. Rodriguez, “Acondicionamiento de un algoritmo de encaminamiento al sistema de comunicaciones en una microred,” 2015.
- [47] A. S. Tanenbaum, *Redes de Computadoras*, Cuarta. Pearson Prentice Hall, 2003.
- [48] I. C. Society, *IEEE Standard for Ethernet - Section one*, vol. 2012, no. December. 2012.
- [49] L. A. N. Man, S. Committee, and I. Computer, *Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications IEEE Computer Society*, vol. 2012, no. March. 2012.
- [50] C. E. Spurgeon and J. Zimmerman, *Ethernet: The Definitive Guide*, Second. O’Reilly Media, Inc., 2014.
- [51] R. Kanna, “Design of Zigbee Transceiver for Design of Zigbee Transceiver for,” pp. 1–87, 2011.
- [52] ZigBee Alliance, “The Alliance | The ZigBee Alliance.” [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/zigbeealliance/>.
- [53] M. A. Setiawan, F. Shahnia, S. Rajakaruna, and A. Ghosh, “ZigBee-Based Communication System for Data Transfer Within Future Microgrids,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2343–2355, 2015.
- [54] Z. Alliance, “Zigbee Specification,” *Zigbee Alliance website*, pp. 1–604, 2008.
- [55] S. Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. 2008.
- [56] IEEE, “IEEE-SA -IEEE Get 802 Program - 802.15: Wireless PANs.” [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>.
- [57] IEEE Computer Society, *802.15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, vol. 2011, no. September. 2011.
- [58] H. Labiod, H. Afifi, and C. De Santis, *WiFi, Bluetooth, ZigBee and WiMax*, Primera. Dordrecht, Netherlands.: Springer, 2007.
- [59] LAN/MAN Standards Comitee, *IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks- Specific requirements--Part 15.4: Wireless MAC and PHY Specifications for Low-Rate WPANs*, vol. 2006, no. September. 2006.
- [60] Cisco, “Cisco IOS Software Configuration Guide for Cisco Aironet Access Points,” vol. 2, no. June, 2003.

- [61] H. Labiod, Hossam Afifi, and C. de Santis, *WiFiTM, BluetoothTM, ZigbeeTM and WiMaxTM*. Netherlands: Springer, 2007.
- [62] P. Roshan and J. Leary, *802.11 Wireless LAN Fundamentals*. 2003.
- [63] S. Navarro García, “Algoritmos Cross-Layer Para La Optimización De Las Prestaciones Del Tcp En Redes Wireless Ad-Hoc,” 2005.
- [64] M. Gast, *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, no. April. 2005.
- [65] “MATLAB - MathWorks.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [66] J. Frolik, S. S. Member, a L. Lentine, a Seier, and C. Palombini, “for μ Grid Agents,” *2012 3rd IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Eur. (ISGT Eur.*, pp. 1–5, 2012.
- [67] H. S. K. Elgohary, M. A. E. A. H. Abdelrahman, K. El Bahrawy, and M. I. Sabry, “D1 substation automation based on IEC61850 and Zigbee,” *Int. Conf. Eng. Technol. ICET 2012 - Conf. Bookl.*, 2012.
- [68] A. B. Ahmed, L. Weber, and A. Nasiri, “Microgrid Communications : State of the Art and Future Trends,” pp. 780–785, 2014.