

IMPACTO DE LA TOPOLOGÍA DE RED EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DE ÁREA CORPORAL



**Daniel Alberto Jaramillo Morillo
Daniel Ernesto Jaramillo López**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Junio de 2013**

IMPACTO DE LA TOPOLOGÍA DE RED EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DE ÁREA CORPORAL



Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

Daniel Alberto Jaramillo Morillo

Daniel Ernesto Jaramillo López

Director

Ing. Oscar J. Calderón C.

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y

Arquitecturas de Telecomunicaciones

Popayán, Junio de 2013

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. RED DE ÁREA CORPORAL (BAN, <i>BODY AREA NETWORK</i>)	3
1.1. COMPONENTES DE UNA BAN	3
1.1.1. Nodo Sensor.....	4
1.1.2. Nodo Coordinador	5
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS SEGÚN SU FUNCIONALIDAD	5
1.3. ALCANCE DE UNA BAN	5
1.3.1. Comunicaciones dentro de la BAN	6
1.3.2. Comunicaciones entre BAN.....	6
1.3.3. Comunicaciones fuera de la BAN	6
1.4. ESTANDARIZACIÓN.....	7
1.4.1. Estándar IEEE 802.15.4	7
1.4.2. Estándar IEEE 802.15.6	7
1.5. APLICACIONES BAN	9
1.5.1. Aplicaciones Médicas	9
1.5.2. Aplicaciones Militares.	10
1.5.3. Aplicaciones Deportivas.	10
1.5.4. Aplicaciones de Entretenimiento.....	10
1.6. LIMITACIONES Y DESAFÍOS EN UNA BAN.....	11
1.6.1. Consumo de energía de los dispositivos.....	11
1.6.2. Procesamiento.....	12
1.6.3. Limitaciones en los materiales.....	12
1.6.4. Robustez y tolerancia a fallos	12
1.6.5. Escalabilidad	12
1.6.6. Seguridad e Interferencia.....	13
2. TOPOLOGIAS Y PARÁMETROS DE DESEMPEÑO EN UNA BAN	14
2.1. TOPOLOGÍA LÓGICA	14
2.2. TOPOLOGÍA FÍSICA	14
2.2.1. Características de la Topología Física de Red.....	14

2.2.2.	Topologías Físicas de Red usadas en BAN.....	17
2.2.2.1.	Topología en Línea.....	17
2.2.2.2.	Topología en Estrella.....	17
2.2.2.3.	Topología en Árbol	18
2.2.3.	Topologías de Red Física no usadas en BAN.....	19
2.2.3.1.	Topología en Malla	19
2.2.3.2.	Topología en Anillo.....	20
2.3.	DESEMPEÑO DE UNA RED	21
2.3.1.	Latencia.....	21
2.3.2.	Tramas Pérdidas	22
2.3.3.	<i>Throughput</i>	23
2.3.4.	Tráfico Generado.....	23
2.3.5.	Tasa de Error de trama (FER, Frame Error Rate).....	23
2.3.6.	Tráfico Recibido.....	23
3.	SIMULACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS.	25
3.1.	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	25
3.1.1.	Selección de la herramienta de simulación.....	25
3.1.1.1.	NS-2 (Network Simulator - 2) [53] [54] [55]	26
3.1.1.2.	WSNet (Wireless Sensor Network) [56]	26
3.1.1.3.	Castalia [55] [57].....	27
3.1.2.	Definición de los escenarios y casos de simulación.....	29
3.1.2.1.	Escenario de simulación No.1	30
3.1.2.1.1.	<i>Primer caso (caso 1). Topologías con distancias de enlaces diferentes.</i>	31
3.1.2.1.2.	<i>Segundo caso (caso 2). Topologías con distancias de enlaces iguales.</i>	33
3.1.2.2.	Escenario de simulación No.2	35
3.1.3.	Definición de las características técnicas de los escenarios de simulación.	35
3.1.4.	Ejecución de la simulación.....	36
3.1.5.	Análisis de resultados.....	36
3.1.5.1.	Escenario No.1. Estándar IEEE 802.15.4	36
3.1.5.1.1.	<i>Caso 1a. Distancias diferentes en cada topología, igual tasa de transmisión.</i>	36

3.1.5.1.2. Caso 1b. Distancias diferentes en cada topología, diferente tasa de transmisión.....	42
3.1.5.1.3. Caso 2a. Distancias iguales en cada topología, igual tasa de transmisión.....	45
3.1.5.1.4. Caso 2b. Distancias Iguales en cada topología, diferente tasa de transmisión.....	51
3.1.5.2. Escenario No.2. Estándar IEEE 802.15.6	55
3.1.5.2.1. Caso 1a. Distancias diferentes en cada topología, igual tasa de transmisión.....	55
3.1.5.2.2. Caso 1b. Distancias diferentes en cada topología, diferente tasa de transmisión.....	61
3.1.5.2.3. Caso 2a. Distancias Iguales en cada topología, igual tasa de transmisión.....	64
3.1.5.2.4. Caso 2b. Distancias Iguales en cada topología, diferente tasa de transmisión.....	69
4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	77
4.1. CONCLUSIONES.....	77
4.1.1. Respecto a la topología física de red.....	77
4.1.2. Respecto al Desarrollo de la Simulación.....	78
4.1.3. Respecto a los Resultados de la Simulación	78
4.2. RECOMENDACIONES.....	79
4.3. TRABAJOS FUTUROS.....	79
REFERENCIAS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Red de Área Corporal.....	4
Figura 1.2. Niveles de comunicación de las BAN.....	6
Figura 1.3. Capas del estándar IEEE 802.15.6.....	8
Figura 2.1. Cobertura de una Red de Área Corporal.....	15
Figura 2.2. Topología en Línea.....	17
Figura 2.3. Topología en Estrella.....	18
Figura 2.4. Topología en Árbol.....	19
Figura 2.5. a) Topología en Malla con conexión parcial, b) topología en malla con conexión total.....	20
Figura 2.6. Topología en anillo.....	20
Figura 3.1. Definición de los casos de simulación.....	30
Figura 3.2. Descripción de la topología lineal para la simulación del caso 1..	31
Figura 3.3. Descripción de la topología en estrella para la simulación del caso 1..	31
Figura 3.4. Descripción de la topología en árbol para la simulación del caso 1.....	32
Figura 3.5. Descripción de la topología en estrella para la simulación - caso 2.....	33
Figura 3.6. Descripción de la topología en árbol para la simulación del caso 2.....	34
Figura 3.7. Tráfico recibido en el coordinador de red para las tres topologías del escenario No.1 - caso 1a.....	37
Figura 3.8. Tramas recibidas exitosamente en el coordinador de red, para las tres topologías del Escenario No.1 - caso 1a.....	38
Figura 3.9. Tramas pérdidas de la red para las tres topologías, escenario No.1 - caso 1a.	38
Figura 3.10. <i>Throughput</i> medido en la red para las tres topologías, escenario No.1 - caso 1a.....	39
Figura 3.11. Tasa de error de trama de la red para las tres topologías, escenario No.1 - caso 1a.....	40
Figura 3.12. Latencia de tramas recibidas en el coordinador de red para las topologías del escenario No.1- caso 1a.....	41
Figura 3.13. Tráfico Generado en la red para cada topología, escenario No.1 - caso 1a y 1b.....	43
Figura 3.14. <i>Throughput</i> del Nodo 1 de la red con topología lineal, escenario No.1 - caso 1a y 1b.....	43
Figura 3.15. <i>Throughput</i> del Nodo 1 de la red con topología en estrella, escenario No.1 - caso 1a y 1b.....	44
Figura 3.16. <i>Throughput</i> del nodo 1 de la red con topología en árbol, escenario No.1- caso 1a y 1b.....	44
Figura 3.17. Tasa de error de trama del Nodo 1 en la red para las tres topologías, escenario No.1 - caso 1a y 1b.....	45

Figura 3.18. Tráfico recibido en el coordinador de red para las tres topologías, escenario No.1- caso 2a.	46
Figura 3.19. Tramas recibidas exitosamente en el coordinador de red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.	46
Figura 3.20. Tramas pérdidas en la red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.	47
Figura 3.21. <i>Throughput</i> de la red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.	48
Figura 3.22. Tasa de error de trama de la red para las topologías del escenario No.1 - caso 2a.	49
Figura 3.23. Latencia de tramas recibidas en el coordinador de red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.	50
Figura 3.24. <i>Throughput</i> de la red para topología lineal, escenario No.1 - caso 2b.	52
Figura 3.25. <i>Throughput</i> de la red con topología en estrella, escenario No.1- caso 2b. ..	52
Figura 3.26. <i>Throughput</i> de la red para topología en árbol, escenario No.1- caso 2b.	53
Figura 3.27. Tasa de error de trama del nodo 1 en la red para topología lineal, escenario No.1 - caso 2b.	53
Figura 3.28. Tasa de error de trama de la red para topología en estrella, escenario No.1 - caso 2b.	54
Figura 3.29. Tasa de error de trama de la red para topología en árbol, escenario No.1 - caso 2b.	55
Figura 3.30. Tráfico Recibido en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso1a.	56
Figura 3.31. Tramas recibidas Exitosamente en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso1a.	56
Figura 3.32. Tramas pérdidas de la red con las topologías, escenario No.2 - caso1a.	57
Figura 3.33. <i>Throughput</i> de la red con topologías del escenario No.2 - caso1a.	58
Figura 3.34. Tasa de error de Trama de la red para las topologías del escenario No.2 - caso1a.	58
Figura 3.35. Latencia de tramas recibidas en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso 1a.	60
Figura 3.36. Tráfico generado en la red para cada topología, escenario No.2 - caso 1a y 1b.	62
Figura 3.37. <i>Throughput</i> del nodo 1 de la red con topología lineal, escenario No.2 - caso 1a y 1b.	62
Figura 3.38. <i>Throughput</i> de la topología en estrella del escenario No.2 para el Caso 1a y caso 1b.	63
Figura 3.39. Tasa de error de trama del Nodo 1 en la red para las dos topologías, escenario No.2 - caso 1a y 1b.	63
Figura 3.40. Tráfico recibido en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.	64
Figura 3.41. Tramas recibidas exitosamente en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.	65
Figura 3.42. Tramas pérdidas en la red para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.	66

Figura 3.43. <i>Throughput</i> medido en la red para las topologías del escenario No.2 para el caso 2a.....	66
Figura 3.44. Tasa de error de trama de la red para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.....	67
Figura 3.45. Latencia de tramas recibidas en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.....	68
Figura 3.46. <i>Throughput</i> de la red con topología lineal del escenario No.2 - caso 2b.....	69
Figura 3.47. <i>Throughput</i> de la red con topología en estrella del escenario No.2 - caso 2b.....	70
Figura 3.48. Tasa de error de trama de la red para topología lineal, escenario No. 2 - caso 2b.....	70
Figura 3.49. Tasa de error de trama de la red para topología en árbol del escenario No.2 - caso 2b.....	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Frecuencias de operación en una red BAN.....	8
Tabla 1.2. Tipos de sensores utilizados en redes BAN	11
Tabla 2.1. Características de las topologías en redes BAN.....	21
Tabla 3.1. Características de las herramientas de simulación.....	28
Tabla 3.2. Distancia del enlace desde el sensor al coordinador - caso 1..	32
Tabla 3.3. Tasa de transmisión caso 1a y 1b.....	33
Tabla 3.4. Distancia del enlace desde el sensor al coordinador - caso 2..	34
Tabla 3.5. Tasa de transmisión caso 2a y 2b.....	35
Tabla 3.6. Parámetros técnicos establecidos para la simulación.....	35
Tabla 3.7. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, para topologías del escenario No.1 - caso 1a.	37
Tabla 3.8. Porcentaje de tramas recibidas en el coordinador de red con latencias hasta 120ms.....	42
Tabla 3.9. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, para topologías del escenario No.1- caso 1b.	42
Tabla 3.10. Tasas de transmisión y distancia de los enlaces desde el sensor al coordinador de red, para topologías del escenario No.1 - caso 2a.....	45
Tabla 3.11. Valores de <i>Throughput</i> de la red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.	48
Tabla 3.12. Porcentaje de tramas recibidas en el coordinador de red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.	51
Tabla 3.13. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, para topologías del escenario No.1- caso 2b.	51
Tabla 3.14. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, para topologías del escenario No.2 - caso1a.	55
Tabla 3.15. Porcentaje de tramas recibidas en el coordinador de red.....	61
Tabla 3.16. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, para topologías del escenario No.2 – caso 1b.	61
Tabla 3.17. Tasa de transmisión y distancia del enlace al coordinador para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.	64
Tabla 3.18. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, escenario No.2 para el caso 2b.	69
Tabla 3.19. Valores finales de los parámetros de desempeño para los casos 1a y 2a en los dos escenarios.	72
Tabla 3.20. Valores de parámetros de desempeño del nodo 1 para el Caso 1a y 1b de los dos escenarios.....	74
Tabla 3.21. Valores de los parámetros de desempeño del nodo 1 para el caso 2b en los dos escenarios.....	75

LISTA DE ACRÓNIMOS

BAN	<i>Body Area Network</i> , Red de Área Corporal
CPU	<i>Central Processing Unit</i> , Unidad Central de Procesamiento
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones
ECG	<i>Electrocardiogram</i> , Electrocardiograma
EEG	<i>Electroencephalogram</i> , Electroencefalograma
FER	<i>Frame Error Rate</i> , Tasa de Error de Trama
FFD	<i>Full Function Device</i> , Dispositivo de Función Completa
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> , Servicio General de Paquetes Vía Radio
HBC	<i>Human Body Communication</i> , Banda de Comunicación en el Cuerpo Humano
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> , Banda Industrial Científica y Médica
MAC	<i>Media Access Control</i> , Control de Acceso al Medio
MANET	<i>Mobile Ad-Hoc Network</i>
MICS	<i>Medical Implant Communication Service</i> , Servicio de Comunicación para Implantes Médicos
MIPv6	<i>Mobile Internet Protocol version 6</i> , Protocolo de Internet móvil versión 6
NB	<i>Narrow Band</i> , Banda Estrecha
NICTA	<i>National Information and Communications Technology Australia</i> , Tecnologías de Información y Comunicación Nacional de Australia
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i> , Asistente Digital Personal
PHY	<i>Physical Layer</i> , Capa Física

QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura
RFD	<i>Reduce Function Device</i> , Dispositivo de Función Reducida
RIP	<i>Routing Information Protocol</i> , Protocolo de Información de Enrutamiento
RSSI	<i>Receive Signal Strength Indication</i> , Indicador de Intensidad de Señal Recibida
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> , Relación Señal a Interferencia más Ruido
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> , Protocolo de Control de Transmisión
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> , Protocolo de Datagramas de Usuario
UWB	<i>Ultra Wide Band</i> , Banda Ultra Ancha
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , Red de Área Local Inalámbrica
WMTS	<i>Wireless Medical Telemetry System</i> , Sistema de Telemetría Médico Inalámbrico
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> , Red de Área Personal Inalámbrica
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i> , Red de Sensores Inalámbricos

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de comunicación inalámbrica han experimentado un crecimiento significativo desde finales del siglo pasado, y cada vez más, se generan grandes avances alrededor de estas, entre ellos la miniaturización de componentes electrónicos, que ha logrado proporcionar dispositivos de comunicaciones cómodos, portables y altamente funcionales para beneficio de los seres humanos. Dichos avances tanto en las tecnologías inalámbricas como también en la electrónica, han logrado el desarrollo de redes que ofrecen ventajas en cuanto a movilidad, flexibilidad, escalabilidad y bajo costo, entre ellas las Redes de Área Corporal (BAN, *Body Area Network*).

Las BAN son redes inalámbricas de pequeña escala y están compuestas por pequeños dispositivos de comunicación de baja potencia [1] [2]. Entre muchas aplicaciones que han sido ideadas para las BAN, están las militares, las de entretenimiento y las médicas [3]. Estas redes aún presentan muchos inconvenientes y desafíos, como por ejemplo; los enlaces de radio tienen un comportamiento variable e inestable y son propensos a errores; las transmisiones dentro de la BAN pueden ser afectadas por interferencias de sistemas externos, entre otros. Por otra parte, el uso de estas redes se ve limitado por las bajas especificaciones que tienen sus dispositivos, tales como: CPU, batería, memoria y un reducido ancho de banda en comparación con otras redes inalámbricas [4].

Uno de los mayores inconvenientes, es la ubicación de los nodos, los cuales pueden estar dentro o sobre el cuerpo humano, ya que el constante movimiento de este hace que el canal varíe en el tiempo, sea inestable y propenso a errores, deteriorando el desempeño de la red [4]. Este y otros efectos causados por la propagación inalámbrica se pueden contrarrestar mediante el manejo de la topología física, pues a través de esta se controla la conexión y la ubicación de los nodos [5], y por ello es de gran importancia en el diseño y la operación de una BAN.

Con el fin de analizar el impacto¹ que causa la topología en el desempeño de una red BAN, se realizó un estudio de estas, sus características y parámetros, con ello se ejecutaron simulaciones que permitieron determinar cuál topología afecta más el desempeño de la BAN.

Este documento se divide en cuatro capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Define los conceptos referentes a una BAN, así como las características y estándares que operan en dichas redes.

¹ Impacto: Se refiere al efecto causado en el desempeño de la red, por el cambio de la topología física de la misma.

Capítulo 2. Presenta las características de la topología de red y los parámetros de desempeño que se relacionan a una red BAN.

Capítulo 3. Desarrolla y Evalúa mediante simulación, el impacto de la topología en el desempeño de una red BAN, realizando adicionalmente el análisis de resultados respectivo.

Capítulo 4. Se exponen las conclusiones del proyecto y se presentan una serie de recomendaciones para el desarrollo de trabajos e investigaciones futuras.

1. RED DE ÁREA CORPORAL (BAN, *BODY AREA NETWORK*)

El grupo de trabajo 802.15.TG6 del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) define a una Red de Área Corporal o por sus siglas en inglés BAN, como "*un estándar de comunicación optimizado para dispositivos de baja potencia y que operan sobre, en o alrededor del cuerpo humano (pero no limitado a los humanos), para servir a una variedad de aplicaciones, incluyendo aplicaciones médicas, entretenimiento personal y otros*" [6]. La mayoría de los Autores presentan a una red BAN como un sistema de comunicación de pequeña escala, compuesta por pequeños dispositivos ubicados dentro o cerca del cuerpo humano que son capaces de establecer una comunicación inalámbrica, los cuales vigilan o monitorean constantemente los movimientos y parámetros vitales del cuerpo [1] [2] [3] [4] [6] [7] [8] [9] [10]. En pocas palabras, una Red de Área Corporal es un sistema de dispositivos inalámbricos que cooperan en beneficio del usuario.

Algunas características importantes de las BAN que han permitido ofrecer una gran variedad de aplicaciones médicas, militares y de entretenimiento son: la libertad de movimiento, bajo consumo de potencia de los dispositivos y el pequeño tamaño de los mismos, etc. [6]. Como las BAN basan su funcionamiento en los sensores sobre el cuerpo humano, las aplicaciones más destacadas se han logrado en el campo médico, donde dichos sensores se utilizan para medir la temperatura, la presión arterial, la frecuencia cardíaca, electrocardiogramas, etc., con el fin de mantener un monitoreo remoto y continuo de los pacientes, lo que en conjunto con la libertad de movimiento mejora la calidad de vida y reduce costos hospitalarios [11] [12].

1.1. COMPONENTES DE UNA BAN

Una red BAN permite la comunicación inalámbrica entre varios dispositivos pequeños e inteligentes. Los dispositivos que conforman la red son de dos tipos, Nodos Sensores y Nodo Coordinador, como se muestra en la figura 1.1.

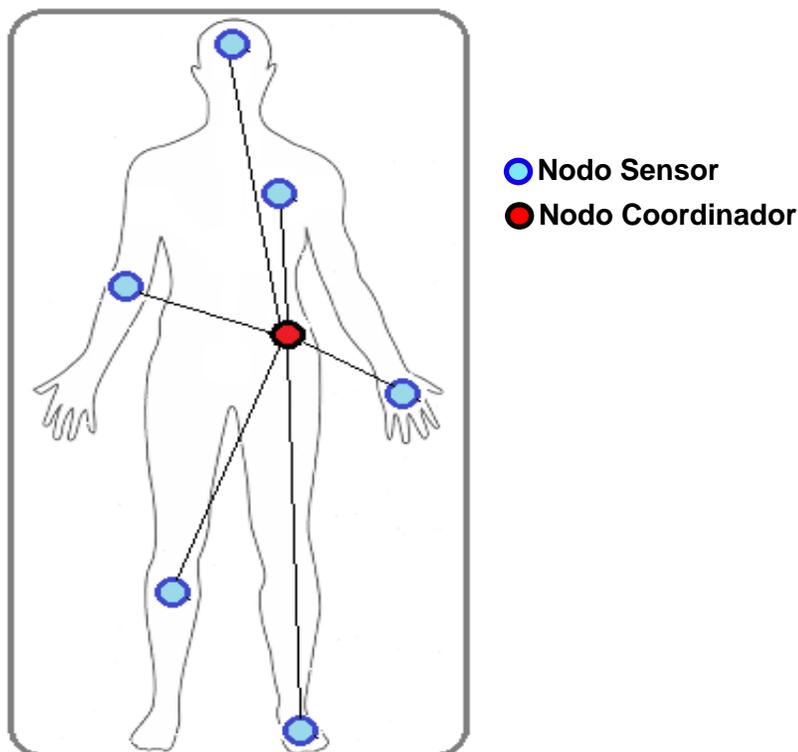


Figura 1.1. Red de Área Corporal.

1.1.1. Nodo Sensor.

El Nodo sensor es un dispositivo que se compone de una memoria, una fuente de energía, antena, micro-controlador, sensor y en algunos casos un actuador. La funcionalidad de un sensor es tomar medidas analógicas de la fisiología humana [10] [8] y convertirlas en señales eléctricas. Los datos captados se procesan y transmiten a un dispositivo coordinador. Por lo anterior, cada Nodo Sensor en la red debe tener una conexión inalámbrica dedicada con el nodo Coordinador.

Existen dos tipos de sensores, los biosensores y los sensores de movimiento:

Biosensores: Son aquellos que miden constantes vitales, como frecuencia cardiaca, nivel de oxígeno en la sangre, presión arterial, frecuencia de respiración y temperatura corporal [8] [10], y su uso está en el campo de las aplicaciones médicas.

Sensores de Movimiento: Sirven para recoger información sobre el estado actual (actividad) del cuerpo del paciente, por ejemplo: caminar, correr, pararse, sentarse, caerse, etc. [8] [10].

1.1.2. Nodo Coordinador

También llamado Gateway o puerta de enlace, es el nodo que coordina o gestiona el funcionamiento completo de la red, se encarga de funciones como: gestionar el encendido y apagado de los nodos sensores, coordinar la conexión entre ellos, recoger sus datos, almacenarlos en la memoria local, y en ocasiones procesarlos para ser visualizados por el usuario [8] [9]. A diferencia de los nodos sensores, el nodo coordinador tiene un tamaño mayor y por ello tiene una mayor capacidad de memoria y procesamiento, además presenta menos restricciones en cuanto a alimentación de energía pues puede poseer una batería más grande, recargable o incluso ir conectado a la red eléctrica [10] [11] [12]. El nodo coordinador dispone de un sistema de comunicación inalámbrica bilateral, por un lado debe ser capaz de comunicarse con los nodos sensores y por el otro tener una comunicación con redes externas. De esta forma la comunicación con el exterior se realiza a través del nodo coordinador, y puede manejar diferentes tecnologías (por ejemplo, WLAN, GPRS, etc.) con el fin de extender la cobertura de la BAN [10] [11] [12].

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS SEGÚN SU FUNCIONALIDAD

En el ítem anterior se expuso los componentes de una red BAN según el rol que desempeñan, aquí se dará una clasificación según las capacidades o habilidades que poseen los nodos, acorde a ello según sus funcionalidades se tienen dos tipos de dispositivos en la BAN. El primero de ellos, denominado Dispositivo de Función Completa (FFD, *Full Function Device*) y el segundo, Dispositivo de Función Reducida (RFD, *Reduce Function Device*) [13].

Dispositivo con funcionalidades completas: El FFD es un terminal que puede ser utilizado tanto como nodo sensor y/o nodo controlador, por soportar en su hardware y software los elementos necesarios para llevar a cabo las dos funciones. Un FFD puede realizar funciones de gestión tanto de control como de transferencia [2] [12] [13].

Dispositivo con funcionalidades reducidas: Este terminal presenta limitaciones comparado con el FFD, por esa razón el único rol que desempeña es el de nodo sensor [2] [12] [13].

1.3. ALCANCE DE UNA BAN

Varios Autores [12] [13] [14] [15] [16] [17] definen el alcance de una red de área corporal en tres niveles según la cobertura de red en la que se encuentre, es así como se tienen: comunicaciones dentro de la BAN, Comunicaciones entre BAN, y comunicaciones fuera de la BAN.

1.3.1. Comunicaciones dentro de la BAN

Este primer nivel de comunicaciones, está conformado por las comunicaciones que se realizan alrededor de dos metros del Nodo Coordinador. Estas se sub categorizan como las comunicaciones entre el cuerpo y el nodo sensor y las comunicaciones entre el nodo sensor y el coordinador de red [13] [14] [15].

Actualmente en el mercado existen a la venta sistemas como el *Fitbit* [18] y *Bodybugg* [19] dispositivos que permiten reunir datos sobre la salud de la persona, como patrones de sueño, número de pasos realizados, calorías quemadas, etc.

1.3.2. Comunicaciones entre BAN

El segundo nivel define las comunicaciones que realiza una BAN con otras BAN u otros dispositivos de fácil acceso tales como computadores o PDA [13] [14] [15].

1.3.3. Comunicaciones fuera de la BAN

Finalmente las comunicaciones fuera de la BAN están comprendidas por las comunicaciones que se ejecutan cuando la BAN se conecta a redes de mayor cobertura, como Internet o redes inalámbricas celulares; con esto se logra una mayor funcionalidad aumentando el número de servicios a los que puede estar asociada una BAN, como es el caso particular del ámbito médico, donde actualmente se desarrollan aplicaciones de monitoreo remoto [13] [14] [15].

Para este tipo de comunicaciones existen sistemas como *CodeBlue* [20] y *Ubimon* [21], estos utilizan redes como GPRS/UMTS para obtener acceso a la BAN remotamente con el objetivo de monitorear pacientes que se encuentran fuera de los centros médicos, la figura 1.2 muestra los 3 niveles mencionados.

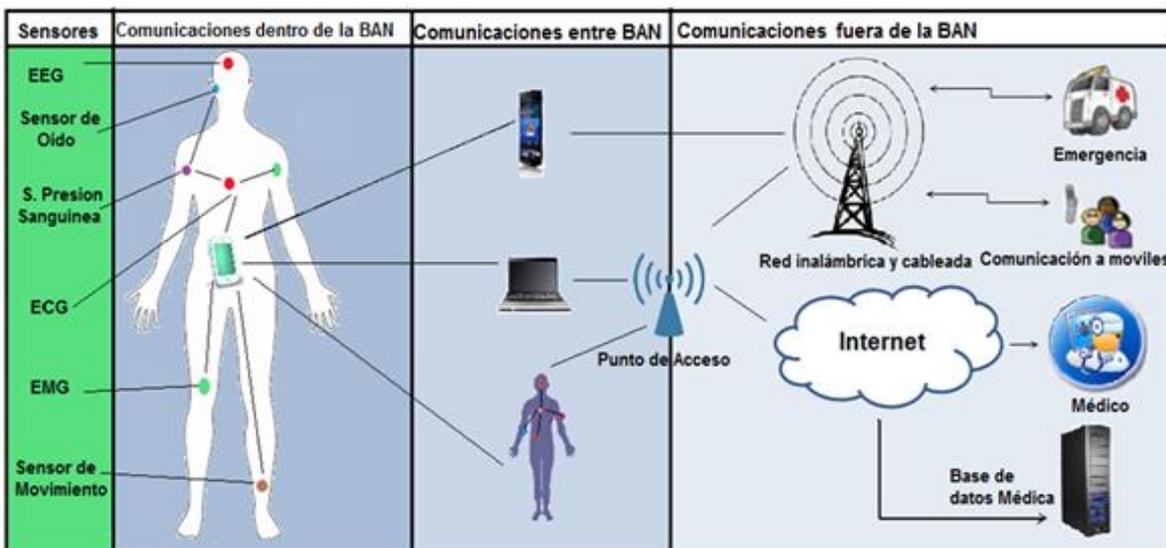


Figura 1.2. Niveles de comunicación de las BAN. Basada en [13] [14] [15] [31].

1.4. ESTANDARIZACIÓN

El IEEE 802.15 es el grupo de trabajo que se especializa en las redes inalámbricas de área personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*), este se centra en el desarrollo de normas para redes inalámbricas de corta distancia, que disponen de dispositivos de comunicaciones portátiles y móviles, como computadoras, asistentes digitales personales (PDA, *Personal Digital Assistant*), dispositivos periféricos, teléfonos celulares, buscapersonas y electrónica de consumo, lo que permite a estos dispositivos comunicarse con otros. El objetivo es la publicación de las normas o guías que puedan aplicarse para la coexistencia e interoperabilidad con otras redes cableadas e inalámbricas.

El Grupo de Trabajo IEEE 802.15 está dividido en otros siete grupos entre los cuales se encuentran dos grupos que se especializan en dispositivos de bajo costo con reducido consumo de energía. El IEEE 802.15.TG4 y el IEEE 802.15.TG6 y sus respectivos Estándares [6] [22] [23].

1.4.1. Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 definido por el IEEE, se desarrolló para redes sencillas y de bajo costo, que permitiera una comunicación de dispositivos inalámbricos con fuente de energía limitada y de bajo rendimiento; estas características hacen de este estándar el más ajustado a los requerimientos de las BAN, y hasta el año 2012 el único con el que se contaba para el diseño de las mismas [24].

Los objetivos principales de una BAN son la transferencia de datos confiable, operación de corto alcance y una duración de batería razonable [1]. Como todos los estándares IEEE 802, el estándar IEEE 802.15.4 abarca solamente la capa Física (PHY, *Physical Layer*) y el subnivel de control de acceso al medio (MAC, *Media Access Control*).

Para la operación se definen tres bandas de frecuencias libres, la primera incluye dieciséis canales en 2,4 GHz, la segunda diez canales de 902 a 928 MHz y la última un canal de 868 a 870 MHz. Las velocidades de datos máximas para cada banda son de 250 kbps, 40 kbps y 20kbps, respectivamente. La banda de 2,4 GHz opera a nivel mundial, mientras que la sub-banda 1 GHz opera en Norteamérica, Europa, y Australia / Nueva Zelanda [17] [25].

1.4.2. Estándar IEEE 802.15.6

Para desarrollar un estándar de comunicaciones optimizado para dispositivos de baja potencia y adecuado para aplicaciones BAN, el IEEE lanzó el estándar IEEE 802.15.6. Este estándar presenta varias ventajas en comparación con las normas vigentes y se centra en las redes inalámbricas de corto alcance, bajo costo, baja complejidad y bajo

consumo de energía. La norma IEEE 802.15.6 al igual que la IEEE 802.15.4 define la capa PHY, el subnivel MAC y de seguridad [26].

La figura 1.3 describe el panorama de la arquitectura IEEE 802.15.6. El protocolo MAC se define para controlar el acceso al canal. La norma también define tres niveles de seguridad: nivel 0, la comunicación no segura, nivel 1, sólo la autenticación y el nivel 2, para la autenticación y el cifrado. La capa física puede operar en tres bandas de frecuencia, para hacer frente a la velocidad de datos que requieren las exigencias impuestas por las aplicaciones médicas; estas son de Banda Estrecha (NB, *Narrow Band*), Banda Ultra Ancha (UWB, *Ultra Wide Band*), y la Banda de la Comunicación en el Cuerpo Humano (HBC, *Human Body Communication*) esta última se compone de otras 3 bandas, estas se especifican en la tabla 1.1 en ella se describe las frecuencias que propone el estándar 802.15.6 [6] [17] [26] [27].



Figura 1.3. Capas del estándar IEEE 802.15.6. Tomado de [26] [27].

Los nombres y rangos de frecuencias de las bandas mencionadas se indican en la tabla 1.1.

Nombre de las Banda de frecuencia	Frecuencias	
NB	401-402 MHz y 405-406 MHz para banda estrecha menos de 100 KHz	
HBC	<i>Servicio de Comunicación para Implantes Médicos (MICS, Medical Implant Communication Service)</i>	402-405 MHz
	<i>Industrial Científica y Médica (ISM, Industrial, Scientific and Medical)</i>	902-928MHz, 2.4GHz hasta 2.4835 GHz, 5.725 hasta 5.875 GHz
	<i>Sistema de Telemetría Inalámbrico Médico (WMTS, Wireless Medical Telemetry System)</i>	608–614 MHz, 1395–1400 MHz, 1427–1429.5 MHz
UWB	3.1GHz hasta 4.9 GHz o 6GHz hasta 10.6 GHz.	

Tabla 1.1. Frecuencias de operación en una red BAN. Tomado de [23].

Las principales características que el estándar IEEE 802.15.6 presenta son [23] [26]:

- Cobertura limitada a dos ó tres metros.
- Enlace inalámbrico robusto para soportar latencia limitada y minimizar la pérdida de datos.
- Solo es posible interactuar con 10 redes en un área de 36 metros cuadrados.
- Velocidades de transmisión de datos que varían entre 10 kbps y 10 Mbps cuando se emplean en aplicaciones médicas.
- Dispositivos con limitada disipación de temperatura, por el hecho de que algunos interactúan con el cuerpo humano.
- Materiales especiales y compatibles, este aspecto es muy importante para sensores embebidos al cuerpo humano.

1.5. APLICACIONES BAN

Entre las muchas aplicaciones posibles que han sido ideadas para las redes BAN se encuentran: monitoreo de personas en hospitales, en aviones o naves espaciales, en el hogar (cuidado post operatorio), en seguimiento de bebés, interconexión de dispositivos en los productos de entretenimiento y el monitoreo o análisis de deportistas. A continuación se muestran algunas de las aplicaciones que más auge han tenido con el crecimiento de las redes BAN [1] [9] [10].

1.5.1. Aplicaciones Médicas

Este tipo de aplicaciones presenta un gran número de investigaciones y desarrollos en sistemas de vigilancia y cuidado de pacientes. Una de las razones de dicho aumento, es el incremento global de personas con edades entre 65 y 84 años que demandan cuidados médicos. Actualmente se han desarrollado interfaces para el diagnóstico y para la monitorización remota de datos fisiológicos a pacientes en sus hogares. En el futuro será posible controlar a los pacientes de forma continua y dar la medicación necesaria si están en casa, en un hospital o en otro lugar [1] [10] [9] [28].

Entre algunos datos fisiológicos medidos por los sensores están Electroencefalografía (EEG, *Electroencephalography*), Electrocardiograma (ECG, *Electrocardiogram*), presión arterial, temperatura corporal, posicionamiento físico, rutinas de sueño, determinación de sustancias químicas en el cuerpo como el oxígeno, glucosa y hasta sustancias cancerígenas en las células; para realizar esta labor cada sensor utiliza una tasa de transmisión menor o igual a 10Kbit/s. En sistemas compuestos en los cuales se utiliza más de un sensor, la tasa de transmisión de datos puede ser superior [14] [29].

1.5.2. Aplicaciones Militares.

En el campo militar se utiliza la información obtenida por sensores con el objetivo de ayudar al soldado. Entre algunos datos recolectados están: vigilancia de la salud, conocimiento de ubicación, temperatura, oxígeno y los niveles de estrés del militar [2] [12] [30].

1.5.3. Aplicaciones Deportivas.

En el ámbito deportivo se pueden recolectar diferentes datos de un atleta sin tenerlo en un laboratorio. El mayor avance con estas redes es la capacidad de medir diversos parámetros del deportista durante una competición. En una carrera atlética por ejemplo el obtener información sobre los movimientos del deportista daría a los entrenadores una idea más precisa de las fortalezas y debilidades de estos. Otro uso que se le da a las redes BAN en el deporte es que se logra monitorear el estado de cualquier deportista, como su presión arterial, identificar entre diferentes movimientos, cual presenta un mejor rendimiento, incluso saber si el movimiento de la persona es el adecuado o no. Las redes BAN en el deporte ayudan no solo a conocer el estado de salud del deportista sino también a mejorar la actividad física practicada [1] [6] [12] [31].

1.5.4. Aplicaciones de Entretenimiento

Las redes BAN también se relacionan con varios dispositivos como computadores, celulares, dispositivos de juegos, impresoras, cámaras de vídeo, automóviles, y dispositivos de audio. Esta gran cantidad de dispositivos a los cuales se puede tener acceso permite abarcar un gran número de aplicaciones. A diferencia de las aplicaciones médicas que usan bajas tasas de transmisión, en estas se incrementan, caso particular es el de un transmisor auricular inalámbrico, el cual necesita alrededor de 128kbit/s y 384 kbit/s con compresión y 1,5 Mbit/s sin compresión. En el caso de servicios de vídeo la tasa puede variar desde 384 kbit/s o mayor, según el estándar de vídeo utilizado [1] [29].

La tabla 1.2 resume algunos sensores utilizados en diferentes aplicaciones.

Sensor	Funcionalidad
Acelerómetro.	Este sensor se utiliza para el control y determinación de la posición de partes del cuerpo como: sentado, de rodilla, de pie, acostado, caminando y corriendo. Esta habilidad del acelerómetro es muy importante y se aplica en el campo médico, deportes, entretenimiento.
Giroscopio.	El giroscopio se usa para mantener la orientación y se basa en el principio de conservación del momento angular. Se usa en conjunto con el acelerómetro para el control de la posición.
Medidor de Glucosa.	Como su nombre lo indica, realiza la labor de determinar numéricamente la cantidad de glucosa en la sangre.
Presión arterial.	Este sensor es muy utilizado en el campo médico, utiliza la técnica de oscilometría para medir la presión sistólica y diastólica, y obtiene los resultados de una manera no invasiva.
Sensor de CO₂.	Determina las concentraciones de CO ₂ y de oxígeno en la respiración humana.
Sensor ECG.	El sensor de electrocardiograma mide los pulsos eléctricos del corazón, se usa para monitorear y diagnosticar enfermedades de este importante órgano.
Sensores de humedad y temperatura.	Se usan para medir la temperatura o humedad del cuerpo humano o del ambiente cercano alrededor de una persona.

Tabla 1.2. Tipos de sensores utilizados en redes BAN basado en [9] [11] [12] [28] [31].

1.6. LIMITACIONES Y DESAFÍOS EN UNA BAN

En esta sección, se describen las principales limitaciones y retos para la comunicación inalámbrica en redes de área corporal; también se describen diferentes soluciones para algunos de los retos actuales.

1.6.1. Consumo de energía de los dispositivos

Una de las mayores restricciones que tienen los dispositivos BAN, es la capacidad de almacenamiento de energía, debido a que los sensores tienen tamaños pequeños y en consecuencia también sus baterías.

En algunos casos los sensores pueden estar implantados al interior del cuerpo, este hecho hace que el cambio de la batería sea un proceso incómodo para el paciente; por esa razón es un reto que estos sensores contengan baterías con un mayor tiempo de vida y que a su vez se gestione de manera óptima este recurso.

Algunas alternativas presentes para obtención de energía son la utilización de vibraciones y energía solar, pero estas opciones no generan la potencia necesaria para el funcionamiento adecuado del dispositivo sensor [3] [6] [11] [17].

1.6.2. Procesamiento

La cantidad de energía que se suministra para realizar el procesamiento de datos es limitada, debido a que la mayor parte de esta se utiliza en los procesos de transmisión; una posible solución a este inconveniente es la aplicación de mecanismos de compresión de datos, con el fin de transmitir la totalidad de la información pero en una menor cantidad de bits [8] [9] [11].

1.6.3. Limitaciones en los materiales

Las propiedades físicas de los sensores, como tamaño y material con que se construyen son variables a tener en cuenta en el momento de su diseño. Por un lado el tamaño afecta la comodidad del paciente, bien sea que este ubicado interno o externo al cuerpo. Con respecto al material de fabricación, su selección se hace más relevante para dispositivos implantados; estos, deben estar fabricados de un material compatible con los tejidos para evitar el rechazo y además, los materiales deben actuar como una barrera entre los fluidos y los componentes del sensor, sin embargo no debe inhibir el funcionamiento del mismo [8] [9] [11].

1.6.4. Robustez y tolerancia a fallos

La robustez y la tolerancia a fallos en una red de área corporal es un factor de mayor relevancia, comparado con otro tipo de redes alámbricas o inalámbricas. En el contexto BAN cuando se tienen sensores implantados en el cuerpo humano, realizar un mantenimiento no es práctico como en otras redes, por eso se hace necesario que los elementos sensores tenga un tiempo de vida extenso y que fallen poco.

El fallo de un nodo no debe afectar el funcionamiento conjunto de la red, la mejor forma de evitar esto es implementar una red distribuida, con el objetivo de que cada nodo pueda funcionar de forma autónoma, y aun así cooperar cuando sea necesario. Si un sensor deja de funcionar, entonces los sensores en el área circundante deben seguir funcionando de forma normal [3] [6] [10] [11].

1.6.5. Escalabilidad

La escalabilidad es la capacidad que tiene una red para expandirse, admitir nuevos nodos sin afectar el rendimiento [32]. En el ámbito BAN los sensores son relativamente pequeños y debido a esto poseen una funcionalidad limitada, el número de sensores que

pueden operar en una sola red es reducido, esto sin que puedan afectarse mutuamente, por esa razón el reto en la escalabilidad es lograr la operación de varios sensores de forma óptima y que operen en zonas próximas [3] [11] [17].

1.6.6. Seguridad e Interferencia

Una red de área corporal transmite datos de alta importancia pues la mayoría de veces envían información de signos vitales cuando se monitorean pacientes en estado crítico de salud. Para lograr una mayor seguridad en la transmisión se realizan procesos de encriptación durante la transmisión y procesos de autenticación en la recepción, el reto es generar protocolos de seguridad que permitan realizar dichos procesos en aplicaciones con una baja tasa de transmisión como lo son la mayoría de aplicaciones médicas [11] [12] [17].

Las Redes de Área corporal son un nuevo campo de estudio y debido a sus aplicaciones generan un gran impacto en la sociedad, sobre todo en el campo de la medicina, sin embargo, los dispositivos que las componen traen consigo muchos inconvenientes en especial el consumo de energía y su difícil renovación. Actualmente se investiga con el fin de dar soluciones a las limitaciones y desafíos que se presentan y afectan el rendimiento de estas redes. El siguiente capítulo describe uno de los aspectos que puede afectar el rendimiento de una BAN el cual es la topología física de red.

2. TOPOLOGIAS Y PARÁMETROS DE DESEMPEÑO EN UNA BAN

El buen desempeño de una red en general puede ser afectado por muchos factores, uno de ellos es la topología física de la red, esta describe la estructura de interconexión que tienen los nodos o dicho de otra forma, la organización geométrica que describen los nodos que se encuentran interconectados. Adicionalmente, en casi todos los contextos de red, se tiene la topología lógica, la cual describe la forma en que los nodos transmitirán datos entre ellos [33] [34] .

La topología física de una red influye en los procesos de comunicación; particularmente en una red BAN se tendrán fenómenos como la interferencia, colisiones y latencia, que impactan parámetros como el *Throughput*, pérdida de tramas, tráfico recibido, tráfico enviado, y el consumo de energía por parte de la red [30]. A continuación se describen los dos tipos de topología: la física y la lógica.

2.1. TOPOLOGÍA LÓGICA

La topología lógica, se describe como las reglas de direccionamiento que se ejecutan cuando se comunican los dispositivos, más concretamente la manera en cómo se envían los datos a través de la red, independientemente de la topología física [32]. Los protocolos de la capa de enlace de datos son los encargados de definir las rutas de las señales lógicas [32] [33]. A nivel general existen dos tipos:

- **Broadcast:** cada Nodo transmite los datos a todos los demás nodos.
- **Tokens:** la forma de transmisión se realiza por medio de turnos.

2.2. TOPOLOGÍA FÍSICA

La topología física de una red inalámbrica es la forma geométrica como sus componentes de red se disponen, en pocas palabras, representa la forma física de la red tanto de los dispositivos como de los enlaces existentes entre nodos [32]. La topología física no especifica los métodos de conectividad, sino la ubicación en una determinada zona, número de dispositivos, número de enlaces, etc. [33] [34].

2.2.1. Características de la Topología Física de Red

La topología Física siempre está presente en el diseño e implementación de una red sin importar su tipo o aplicación, pero cada tipo de red tiene ciertas características importantes y en especial para una red de área corporal se deben tener en cuenta:

- **Cobertura de red**

La cobertura define el alcance que tiene o hasta donde se puede extender una red, para el caso de las redes BAN, esta característica se ve reducida al área que pueda cubrir el cuerpo humano, como se muestra en la figura 2.1. Para una aplicación estándar se define de 1 a 2 metros, sin embargo para un uso especial se puede considerar hasta 5 metros [1] [29] [35] .

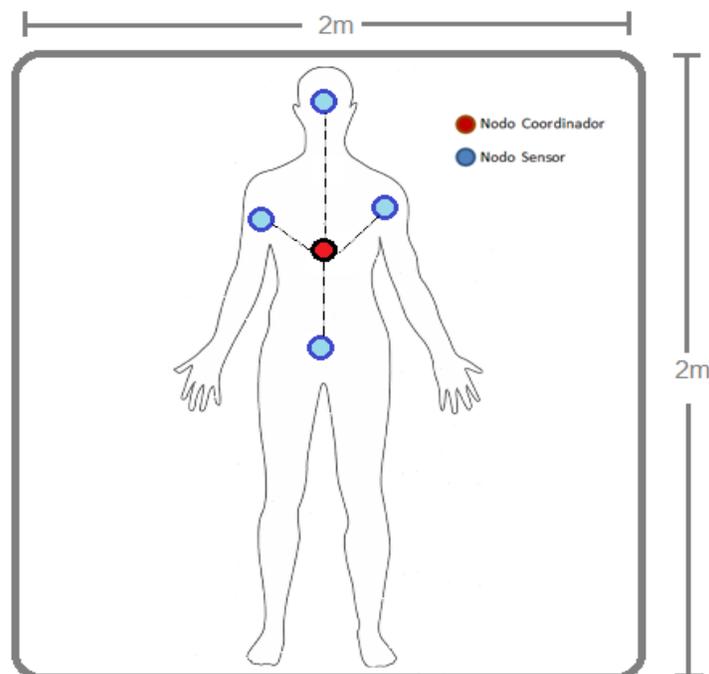


Figura 2.1. Cobertura de una Red de Área Corporal [35].

Esta característica hace que la red sea pequeña y que el número de nodos o sensores que se pueda utilizar sea bajo; además, al existir entre los nodos una distancia corta, hace que se incrementen las interferencias, lo que causa, que ciertas topologías no sean indicadas para redes BAN.

- **Número de nodos**

Al trabajar con redes inalámbricas, el número de nodos se ve limitado no solo por los problemas de interferencias que son generados por parte de otros nodos, sino también, al control que pueda tener el coordinador de la red. Para redes BAN se define que la red debe ser escalable hasta 256 nodos, sin embargo, este parámetro está en función de la aplicación; para una implementación médica se recomienda el uso de 6 nodos incluido el Coordinador [35] [36] [37].

- **Redundancia de enlaces**

Esta característica se refiere al número de caminos posibles de los cuales dispone un Nodo Sensor para enviar los datos al Nodo Coordinador y depende del tipo de topología que se haya escogido para la red. El hecho de que un nodo tenga varios

camino por donde pueda enviar los datos, implica que se tenga una conexión con otros nodos aparte de la conexión con el coordinador, como es el caso de una topología en árbol o en estrella.

- **Energía consumida**

El consumo de energía se puede dividir en tres dominios: adquisición de datos, comunicación inalámbrica y procesamiento de datos [36]. La comunicación inalámbrica produce el mayor gasto de energía y ésta es una de las razones por las cuales la potencia de transmisión es restringida, además, los nodos sensores deben operar durante meses o incluso años sin intervención, especialmente para dispositivos implantados, el tiempo de vida es crucial ya que no es muy fácil ni cómodo para el usuario reemplazar o recargar los dispositivos [6] [9]. Por ejemplo, un marcapasos o un monitor de glucosa requerirían un tiempo de vida de más de 5 años [37].

Uno de los factores que están presentes en el consumo de energía es la distancia de los enlaces, pues “la potencia que se emplea para transmitir está en función de la distancia y el número de bits transmitidos” [11]. Es por eso que el uso de una topología diferente puede impactar sobre esta característica.

- **Escalabilidad**

Una BAN debe ser escalable esencialmente para las aplicaciones médicas que monitorizan pacientes. Para la monitorización del paciente en muchas ocasiones es necesario cambiar el número de nodos para recoger distintos datos. Una BAN escalable permitirá a los médicos o encargados reconfigurar fácilmente la red del usuario, ya sea añadiendo o eliminando nodos sin afectar el funcionamiento de la misma, dependiendo de lo que se requiera o no medir en el paciente [3] [6] [11].

El número de nodos que una red puede controlar dependen en gran medida de la topología a utilizar; se tiene en cuenta tanto el método de acceso que se maneja como las interferencias que pueda causar el adicionar más nodos a la red. Dependiendo de la topología seleccionada se tiene un método de acceso diferente, además la topología controla tanto la posición como el número de nodos, de tal manera que la escalabilidad va directamente relacionada con la topología física de red.

- **Enrutamiento.**

Es la habilidad que tiene un nodo para dirigir datos, de manera estática o dinámica, hacia otros nodos. El enrutamiento estático define una ruta por defecto a diferencia del enrutamiento dinámico en el cual la ruta es elegida en tiempo de ejecución, dependiendo de la disponibilidad. El enrutamiento, es una característica que puede estar presente en una BAN y dependerá del tipo de topología que se esté utilizando [38].

2.2.2. Topologías Físicas de Red usadas en BAN

A continuación se describen las topologías Físicas más comunes encontradas en la literatura, respecto a las redes BAN. El número y tipo de topologías que se puedan implementar está condicionado al estándar que se utiliza. Este trabajo se centró en el uso de dos estándares: IEEE 802.15.4 y el IEEE 82.15.6.

2.2.2.1. Topología en Línea

En esta topología los dispositivos van conectados uno a continuación del otro formando una línea recta [33], el nodo coordinador puede estar ubicado en cualquier parte de la red. Como se muestra en la figura 2.2, para una topología en línea la ubicación del nodo coordinador (en rojo) es un factor que determina el desempeño principalmente del nodo sensor posicionado a mayor distancia, pues este tendrá mayor consumo de energía e incluso interferencias de nodos intermedios.

La cobertura de este tipo de topologías se ve limitada a una recta y el alcance que esta puede tener lo definen los Nodos de sus extremos. Es poco escalable, ya que aumentar el número de Nodos hace que se incrementen las interferencias en la red y se degrade su desempeño.

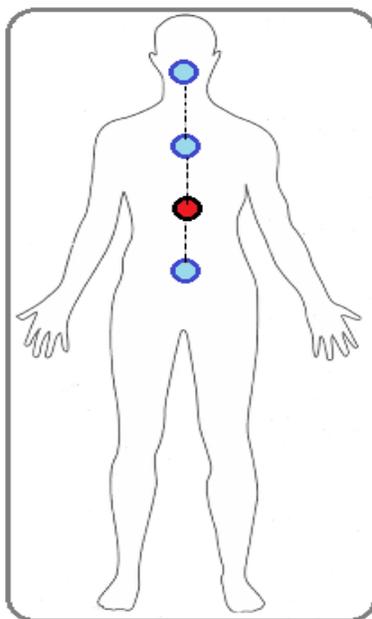


Figura 2.2. Topología en Línea.

2.2.2.2. Topología en Estrella.

La topología en estrella está compuesta por su controlador de red, dispositivo al que se conectan directamente los nodos inalámbricos, su disposición física se muestra en la

figura 2.3. El círculo rojo representa el controlador de red y los círculos azules los nodos sensores.

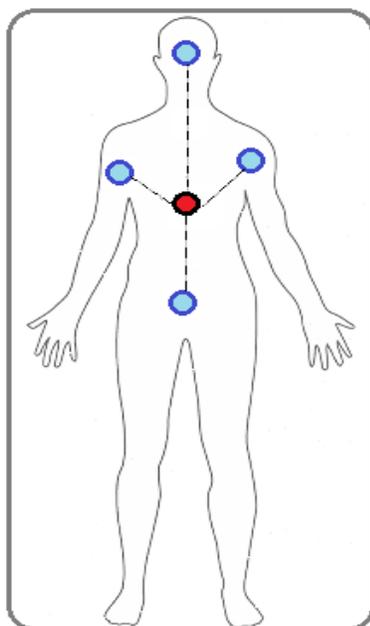


Figura 2.3. Topología en Estrella.

En el momento de iniciar una red en estrella el controlador establece un identificador de red, con el objetivo de que los dispositivos conectados en su zona de cobertura funcionen de manera independiente y no se vean afectados por otras redes BAN cercanas [40]. Tanto en esta como en las demás topologías, el controlador debe ser muy robusto y funcionar todo el tiempo, su falla implicaría el colapso de la red, sin embargo esta topología es muy utilizada en BAN por su fácil despliegue y su bajo consumo de potencia, se implementa en las redes domésticas y en aplicaciones de juegos [6] [39] [40] [41].

2.2.2.3. Topología en Árbol

La topología en árbol parte de un controlador principal, del cual se desprenden otros FFD, estos dispositivos de segundo orden ofrecen servicios de enrutamiento a los nodos sensores, la figura 2.4 muestra la topología en árbol, el círculo rojo representa el controlador principal, círculos amarillos dispositivos de segundo orden y círculos azules nodos sensores [2] [39] [40].

El coordinador principal con la misión de dirigir los procesos de comunicación, fija un identificador de cabecera y un identificador de grupo. El identificador de grupo permite diferenciar los coordinadores secundarios del principal y el identificador de cabecera está orientado al nodo coordinador, con esos parámetros se logra instaurar ordenadamente la comunicación entre todos los dispositivos [6].

Una de las ventajas de este tipo de topología es un área de cobertura más grande, sin embargo, implica tener una mayor latencia y consumo de energía pues, además de tener más nodos, estos deben ser capaces de realizar un enrutamiento estático [33] [42].

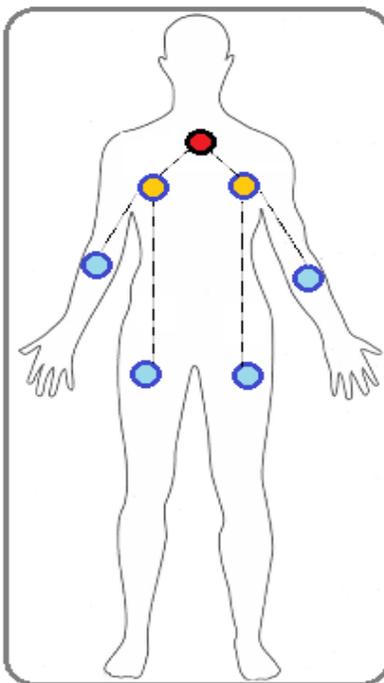


Figura 2.4. Topología en Árbol.

2.2.3. Topologías de Red Física no usadas en BAN

Estas son topologías que no se ajustan a las condiciones exigidas por una BAN, ya sea por características propias de la red o que los dispositivos no cumplen con los requerimientos de una BAN.

2.2.3.1. *Topología en Malla*

En la topología en malla todos los dispositivos tienen la habilidad de comunicarse entre sí, esta capacidad permite disminuir la pérdida de la conexión pero para lograr esto, es necesario aumentar el consumo de energía debido a que los nodos sensores deben procesar más datos y tener un protocolo de enrutamiento [33] [39] [40] [42].

En esta topología los nodos, son dispositivos FFD, pero de todos ellos solo uno asume el rol de controlador de red. Existen dos tipos de topología en Malla, la Malla con conexión parcial y la Malla con conexión total. La figura 2.5 muestra estas dos topologías.

Esta topología es muy utilizada en redes inalámbricas de sensores (WSN, *Wireless Sensor Networks*) pero en redes BAN no se justifica su uso, porque posee características que van en contra del estándar IEEE 802.15.6, cómo son el consumo de energía y

tamaño en los nodos [14] [16]. Por esa razón solo se expone pero no se utilizará en los procesos de simulación.

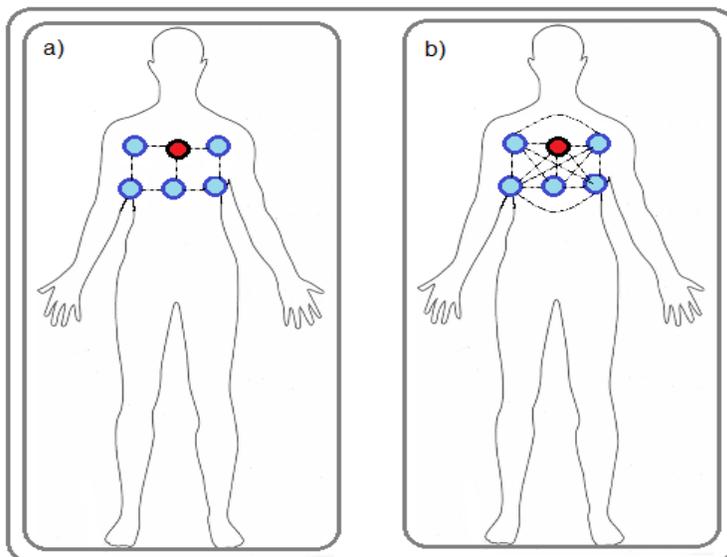


Figura 2.5. a) Topología en Malla con conexión parcial, b) topología en malla con conexión total, por los Autores.

2.2.3.2. Topología en Anillo

En la topología física en anillo los elementos se conectan uno a continuación del otro, formando un lazo cerrado, figura 2.6. El funcionamiento de la topología lógica en anillo es el siguiente, cada terminal recibe una trama por turno y cada trama es direccionada secuencialmente hasta llegar al nodo destino, la topología lógica en anillo puede funcionar sobre cualquier topología física de red. Inalámblicamente esta topología rara vez se utiliza, pues no es muy eficiente [33] [39].

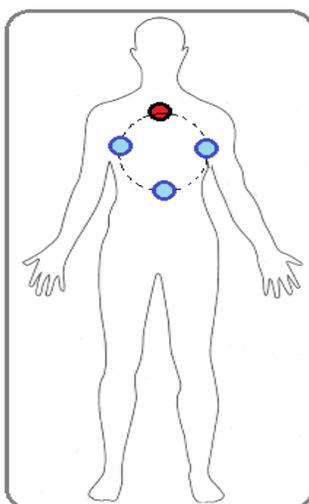


Figura 2.6. Topología en anillo.

Producto del análisis realizado en el presente proyecto se puede evidenciar que hay un conjunto de parámetros que afectan el desempeño de una red BAN, según la topología que se utilice. En la tabla 2.1 se muestran las características más relevantes de las topologías BAN.

Características	Topologías Usadas en BAN			Topologías no usadas BAN	
	Línea	Estrella	Árbol	Malla	Anillo
Consumo de Energía	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto
Redundancia en Caminos	No	No	No	Si	No
Enrutamiento	No	No	Si	Si	No
Escalabilidad	No	No	Si	Si	Si
Cobertura	Baja	Media	Alta	Alta	Media
Dificultad en Implementación	Baja	Baja	Media	Alta	Media

Tabla 2.1. Características de las topologías en redes BAN. Por los Autores.

La topología organiza y permite coordinar la conectividad que hay entre cada uno de los nodos de la red, de ella dependen muchos de los parámetros de desempeño como: el tráfico enviado, tráfico recibido, tramas pérdidas, etc. A continuación se presenta la definición de desempeño y algunos parámetros que sirven para su evaluación.

2.3. DESEMPEÑO DE UNA RED

El desempeño se define como efectividad u óptimo funcionamiento de una red y este puede ser medido principalmente por el *Throughput* y la latencia, además de otros factores como: capacidad, protocolo de acceso, velocidades, conectividad, tramas pérdidas, tráfico enviado y recibido, etc. [37].

2.3.1. Latencia

Latencia es el tiempo requerido para que una trama sea enviada y recibida entre el origen y destino; dicho retardo en transmisión puede ser generado por la pérdida de tramas, interferencias que generan retransmisiones, procesamiento en los nodos, etc. Existen dos tipos de latencia: la latencia de puesta en marcha o arranque de la red y latencia de transmisión [43] [45].

- **Latencia de arranque de la red**

Esta latencia se refiere al tiempo desde que el nodo sensor se enciende, hasta que se sincroniza con el nodo coordinador y está listo para él envío de tramas. Si los sensores están activos, normalmente permanecen sincronizados y no se presentaría dicha latencia, la fase de arranque solo es necesaria cuando el sensor

se pone en marcha debido a la configuración inicial, la reconfiguración se genera si el nodo requiere cambio de batería, o si el sensor perdió la sincronización con la red.

- **Latencia de transmisión**

La latencia de transmisión se define como el tiempo que se demora un nodo sensor en transmitir una trama hasta el nodo coordinador, esto incluye el tiempo de procesamiento en el nodo sensor, tiempo de propagación por el medio y tiempo de procesamiento en el nodo coordinador. En el tiempo de propagación se debe tener en cuenta si hay algún nodo retransmisor en la ruta, que pueda hacer que se produzca un retardo adicional [44].

Algunas de las aplicaciones de redes BAN pueden ser muy tolerantes al retardo y permitir una latencia considerablemente grande, sin embargo, la mayoría de las aplicaciones médicas son críticas ya que requieren la transmisión de datos en tiempo real y que se haga en el menor tiempo posible, además, un valor de latencia óptimo ayuda a mejorar el desempeño de la red, tanto en consumo de energía como en la fiabilidad y calidad del servicio [13].

2.3.2. Tramas Pérdidas

Las tramas pérdidas, se definen como las tramas que no son capaces de llegar desde el nodo sensor al nodo coordinador y se pierden en el camino debido a factores tales como: la degradación de la señal, enlaces sobresaturados, tramas erradas, hardware o controladores de red defectuosos, interferencia presente en la red, desvanecimiento, pérdidas de trayecto, congestión en el canal, colisiones, etc.

Es importante considerar que el canal de comunicación en una red BAN, se ve afectado por el cuerpo humano y su movimiento, el cuerpo humano se compone principalmente de agua, esto hace que se presenten pérdidas debidas a la absorción de potencia y la señal se atenúa considerablemente antes de llegar al receptor, además, el movimiento hace que el canal sea variante en el tiempo, ocasionando un excesivo desvanecimiento, ayudando a que las pérdidas sean mayores.

No siempre la pérdida de tramas significa un problema, esto va a depender de la aplicación y de qué tan importante o significativa puede ser la información a transmitir. El escoger correctamente la topología ayuda a reducir en gran medida la pérdida excesiva de tramas, ya sea con un enlace de gran cobertura, pero de mayor latencia o un enlace con distancia corta pero que puede transmitir grandes cantidades de información, según el tipo de datos a enviar [17] [46].

2.3.3. *Throughput*

El *Throughput* es una medida de la cantidad de datos transmitidos desde el origen hasta el destino en un período de unidad de tiempo (segundos), la ecuación 2.1 describe este aspecto. Este se mide contando el número total de tramas de datos recibidos con éxito en el nodo coordinador y calculando el número de bits recibidos, se divide por el tiempo de ejecución o tiempo total de simulación [40]. Así es como el *Throughput* depende directamente de las tramas recibidas, parámetro que cambia con la selección de la topología de red [47].

$$Tp = \frac{Br}{Ts} \quad (2.1)$$

Donde, *Tp*: *Throughput*,
Ts: *Tiempo de simulación*
 y *Br*: *Bits recibidos*.

Un buen *Throughput* significa que se puede transmitir un mayor número de datos de forma confiable en un menor tiempo, esto implica que se pueden tener aplicaciones más complejas y eficientes.

2.3.4. Tráfico Generado

La congestión de la red depende de la cantidad de tráfico generado por los nodos, afectando el desempeño de la misma. El tráfico se ve afectado principalmente por la cantidad de nodos operando en la red, topología física y el tipo de nodos; dependiendo del tipo de nodo, la cantidad de datos generados puede ser mayor o menor, un nodo FFD tienen la capacidad de generar más datos que un nodo RFD [6].

2.3.5. Tasa de Error de trama (FER, Frame Error Rate)

La FER es un parámetro que se utiliza para medir el rendimiento de un receptor inalámbrico [48]. Cuando un nodo sensor se encuentra en movimiento durante la transmisión de datos, ese hecho genera desvanecimiento de la señal lo que degrada el rendimiento afectando el proceso de comunicación y aumentando el número de tramas erradas en recepción [49]. La ecuación 2.2 muestra la forma de calcular la FER, basada en [50].

$$FER = \frac{\text{Total de Tramas Erradas}}{(\text{Total de Tramas Erradas} + \text{Total de Tramas Recibidas})} \times 100\% \quad (2.2)$$

2.3.6. Tráfico Recibido

El tráfico recibido se refiere a la cantidad de tramas recibidas exitosamente por el Nodo coordinador en un tiempo determinado. Existen dos formas de medir dicho tráfico, una de ellas es medir el tráfico de cada uno de los nodos sensores en la red y la otra midiendo el

total de tramas recibidas por el nodo coordinador [6]. Este es uno de los parámetros importantes en la medición de desempeño de una BAN.

Para tener un gran tráfico recibido se debe minimizar la pérdida de tramas, minimizar el retardo y maximizar el *Throughput*, el realizar esto implica poder tener nuevas aplicaciones, especialmente de entretenimiento lo cual ayudaría a que se comercialice y se conozca mucho más este tipo de redes.

Para poder notar el impacto que la topología Física causa en el desempeño de una Red de Área Corporal, se evalúan mediante simulación los parámetros anteriormente descritos con diferentes topologías. En el siguiente capítulo se presenta el procedimiento de la simulación y sus resultados.

3. SIMULACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS.

Este capítulo presenta un análisis del desempeño en una BAN al variar su topología física de red; para ello se selecciona una metodología, con el fin de obtener resultados confiables. Inicialmente se realiza una selección de herramienta de simulación que se ajuste a lo deseado, posterior a eso se describen los escenarios y las características técnicas al momento de simular, finalmente se exponen los resultados y su análisis.

3.1. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

La metodología de simulación basada en [51] [52] permite llevar a cabo el desarrollo del proyecto de forma estructurada y ordenada. A continuación se describen los pasos que la componen.

- a. **Elección de la herramienta de simulación:** Se analizan diferentes herramientas de simulación, con el fin de seleccionar la que mejor se adapta a lo requerido en la simulación.
- b. **Definición de los escenarios y casos de simulación:** Se definen las topologías y los escenarios de red a analizar, acorde a los estándares y las capacidades del simulador seleccionado.
- c. **Definición de las características técnicas de los escenarios de simulación:** se definen los parámetros técnicos que conforman los escenarios de simulación.
- d. **Ejecución de las simulaciones:** se ejecuta las simulaciones para las topologías de red seleccionadas y diferentes escenarios.
- e. **Análisis de resultados:** finalmente se realiza el análisis de los resultados obtenidos en la simulación, evaluando el impacto que produce una topología particular en el desempeño de la BAN.

3.1.1. Selección de la herramienta de simulación

La herramienta seleccionada principalmente debe permitir la experimentación para redes de área corporal para los estándares IEEE 802.15.4 o IEEE 802.15.6, que son los más usados en las BAN. El principal requerimiento buscado es que se permita variar la topología de red para obtener resultados de parámetros de desempeño como *Throughput*, *tramas pérdidas*, *latencia*, etc.

Se analizaron tres herramientas que permiten el despliegue de redes BAN, las cuales son: NS-2, WSNNet y Castalia. A continuación se describen algunas características de cada una para determinar la más adecuada.

3.1.1.1. NS-2 (Network Simulator - 2) [53] [54] [55]

NS-2 es un simulador de eventos discretos, proviene de la evolución de *REAL Network Simulator*, simulador creado en 1989, NS-2 es implementado en lenguaje C++ y utiliza otro lenguaje para su interfaz OTcl que es una versión de Tcl orientada a objetos. El simulador permite obtener resultados para procesos en redes móviles inalámbricas ad-hoc, protocolos TCP, UDP, OSPF, RIP, AODV, MIPv6, HMIPv6, PMIPv6, enrutamiento unicast y multicast para redes; así mismo es utilizado para redes alámbricas. Entre estas y otras aplicaciones están:

- Simular estructuras y protocolos de redes satelitales, redes de área local inalámbricas (WLAN, *Wireless Local Area Network*), cableadas, redes móviles inalámbricas (MANET, *Mobile Ad-Hoc Networks*).
- Desarrollar nuevos protocolos y algoritmos y comprobar su funcionamiento.
- Comparar distintos protocolos en cuanto a prestaciones [35].

Puesto que es un simulador de código libre puede ser instalado en diferentes sistemas operativos, NS-2 fue desarrollado para ser ejecutado en modo Batch donde el usuario especifica una topología de red, pila de protocolos y demás aspectos a medir mediante un script, NS-2 no proporciona los resultados de manera directa si no en un archivo de traza el cual se utiliza para obtener las gráficas, estos archivos se filtran a través de lenguajes como Perl o Awk, para ser interpretados y poder visualizarlos, otra opción es usar lenguajes como: NAM, *Network Animator*.

Referente a redes BAN, NS-2 permite simular el estándar IEEE 802.15.4 utilizado para ciertas aplicaciones BAN, más no tiene implementado el IEEE 802.15.6 propio para redes BAN ni un canal adecuado para dicha simulación.

3.1.1.2. WSNNet (Wireless Sensor Network) [56]

Es un simulador de redes de sensores de uso libre, con funcionalidades similares a otros como NS-2, JIST, OMNET++. En WSNNet los nodos simulados en secciones que representan los bloques hardware y software, permiten simular patrones como:

- Movilidad en los nodos.
- Fuente de energía.
- Aplicaciones.
- Protocolos de enrutamiento.
- Protocolos de capa MAC.

- Aplicaciones.
- Interferencias Radio.

En una simulación, WSNNet permite controlar el momento en que los sensores se encienden, además permite tomar medidas cuando alguno o varios nodos entran en modo reposo por factores externos o por falta de energía.

WSNet admite la simulación y operación en entornos con fenómenos físicos, (temperatura, humedad, etc.), así los Nodos además de tomar medidas, también pueden sufrir daños si el medio no es el apropiado para su funcionamiento. Lo que hace a esta herramienta, un simulador más aproximado a la realidad refiriéndose a la parte de hardware.

WSNet se diseñó para permitir en su funcionamiento una variedad de modelos de radio para su experimentación, pues dispone de una capa física sin interferencias y sin pérdidas de trayecto, esto le da la capacidad de modelar diferentes escenarios ajustados por el experimentador. Así mismo la adición de nuevos modelos no hace necesario modificar el núcleo WSNNet.

Sobre los estándares a modelar incluye IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4, para el caso BAN este simulador no incluye un modelo de propagación propio para estas redes.

3.1.1.3. **Castalia [55] [57]**

Castalia es una plataforma embebida en Omnet ++, especializada para experimentación en entornos inalámbricos WSN, BAN y en general en redes de baja potencia. Castalia fue desarrollado en el año 2006 por el ministerio de Tecnologías de Información y Comunicación Nacional de Australia (NICTA, *National Information and Communications Technology Australia*), ellos querían probar algunos patrones para WSN antes de realizar los sistemas reales. Hasta ese momento los modelos para simular escenarios inalámbricos que utilizaran bajas potencias en transmisión y corto alcance eran muy simples, debido a eso NICTA implementó un modelo más realista y de código abierto ampliable y fiable. A continuación se listan sus principales características.

- Modelo de canal avanzado, el cual fue obtenido empíricamente y posee las siguientes características:
 - Modelo que define un mapa de pérdidas de trayecto.
 - Modelo complejo para la variación temporal del canal.
 - Soporte para la movilidad de los nodos.
 - La interferencia se maneja como intensidad de la señal recibida y no como función independiente.

- Modelo de radio avanzado: basado en radio receptores reales usados en comunicaciones de baja potencia.
 - Permite variar de manera múltiple los niveles de potencia de transmisión de los nodos.
 - La probabilidad de recepción se basa en la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*), en el tamaño de las tramas y en el tipo de modulación.
 - Los nodos pueden operar en diferentes estados como: encendido, apagado afectando esto el consumo de potencia.
 - Utiliza un modelo real de Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI, *Receive Signal Strength Indication*)
- Diseñado para la adaptación y expansión.
- Protocolos MAC disponibles
- Mecanismos de sincronización para los nodos.

Castalia dispone de módulos para realizar la simulación, bajo los estándares IEEE 802.15:

- **IEEE 802.15.4 MAC:** implementa la funcionalidad principal del estándar IEEE 802.15.4, aunque algunas funcionalidades no están incluidas, el módulo está diseñado principalmente para redes BAN, PAN y WSN.
- **IEEE 802.15.6 *Draft Proposal for BAN.***: implementa el estándar IEEE 802.15.6, el módulo está diseñado únicamente para redes BAN y WSN.

La tabla 3.1 ilustra características de los simuladores analizados.

Características	NS-2	WSNet	Castalia
Soporta canal variante en el tiempo, propio de una red BAN	No	No	Si
Soporta el Estándar IEEE 802.15.4	Si	Si	Si
Soporta el Estándar IEEE 802.15.6	No	No	Si
Dificultad para implementar un canal variante en el tiempo	Desconocido	Desconocido	-
Permite el estudio de diferentes topologías físicas de red	Si	Si	Si
Extensible mediante módulos	Si	Si	Si
Creación de escenario Gráficamente	Si	No	No
Obtención de resultados de forma directa	No	Si	Si
Licencia	Código Libre	Código Libre	Código libre

Tabla 3.1. Características de las herramientas de simulación. Por los Autores.

A pesar de que las 3 herramientas son extensibles en su estructura, no es interés propio el realizar cambios en software. Los tres simuladores presentan resultados para escenarios específicos, pero Castalia presentó mayor ventaja a nivel BAN sobre las otras, por las razones que se muestran a continuación:

- Es el único simulador que tiene implementado el estándar IEEE 802.15.6 por consiguiente no es necesario la creación de nuevos módulos.
- Es el mejor simulador a nivel BAN pues el canal de transmisión está diseñado a partir de datos empíricos, es así como se obtienen resultados más próximos a la realidad.
- Permite configurar diferentes topologías físicas de red.
- El simulador permite obtener los resultados de forma gráfica y directa, no es necesario recurrir a otros programas como en el caso de NS-2.
- Permite comparar resultados de topologías y condiciones similares para los estándares IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6.
- A pesar de que las configuraciones de red no se realizan de manera gráfica, el establecimiento de esos parámetros no es una labor compleja.

3.1.2. Definición de los escenarios y casos de simulación

Para analizar el impacto de la topología física de red en el desempeño de una red de área corporal, se proponen 2 escenarios de simulación, el primer escenario opera con el estándar IEEE 802.15.4 y el segundo con el estándar IEEE 802.15.6, además, los dos escenarios se componen de dos casos:

- Primer caso (caso 1), la distancia de los sensores con respecto al coordinador es diferente para cada topología.
 - Caso 1a: Todos los nodos tiene una misma tasa de transmisión.
 - Caso 1b: Se mantiene la tasa de transmisión de uno de los nodos variando la de los demás.
 -
- Segundo caso (caso 2), la distancia de los sensores con respecto al coordinador es la misma para cada topología.
 - Caso 2a: Todos los nodos tiene una misma tasa de transmisión.
 - Caso 2b: Se varía la tasa de transmisión de los nodos de modo que el nodo cercano al coordinador transmita con mayor tasa, el nodo lejano con menor tasa y viceversa.

La figura 3.1 ilustra la organización de los escenarios de simulación y sus casos.

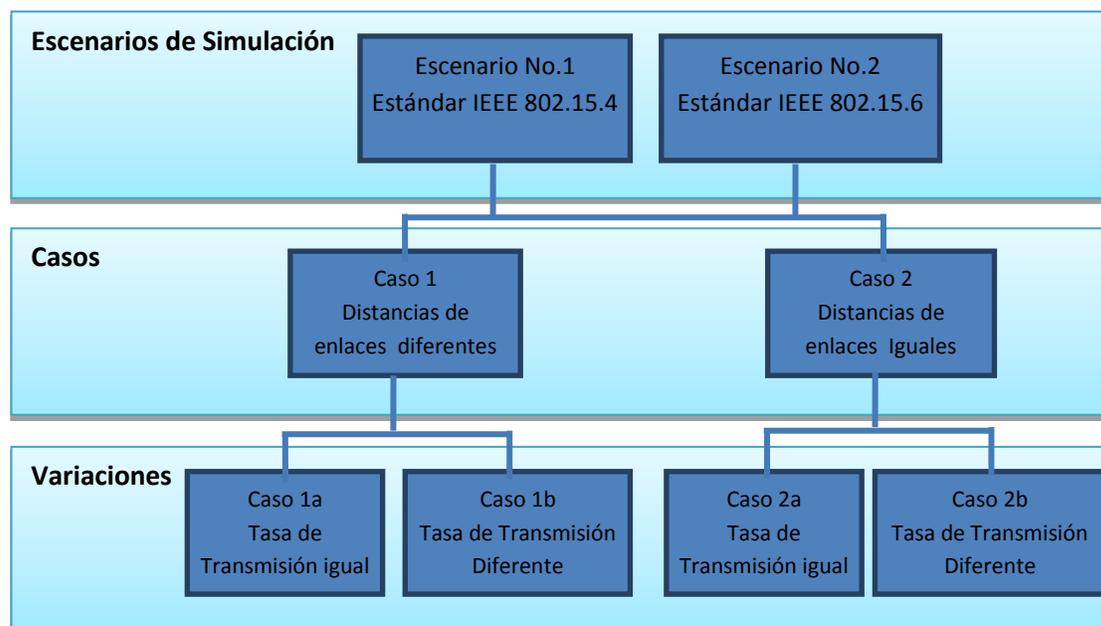


Figura 3.1. Definición de los casos de simulación. Por los Autores.

3.1.2.1. *Escenario de simulación No.1*

El primer escenario simulado es el correspondiente al estándar IEEE 802.15.4 con las topologías: lineal, estrella y árbol, esto se ajusta a lo permitido por la herramienta de simulación seleccionada. Los casos y las variaciones se aplican para todas las topologías del escenario.

Las topologías se disponen en un área cuadrada de 2 x 2 metros la cual se define por las características propias de una BAN y se componen de un Nodo Coordinador y cuatro Nodos Sensores, cuya ubicación en la red se especifica mediante coordenadas cartesianas. A diferencia de las topologías lineal y en estrella, la topología en árbol contiene dos nodos repetidores adicionales.

A continuación se describen las topologías para los dos casos.

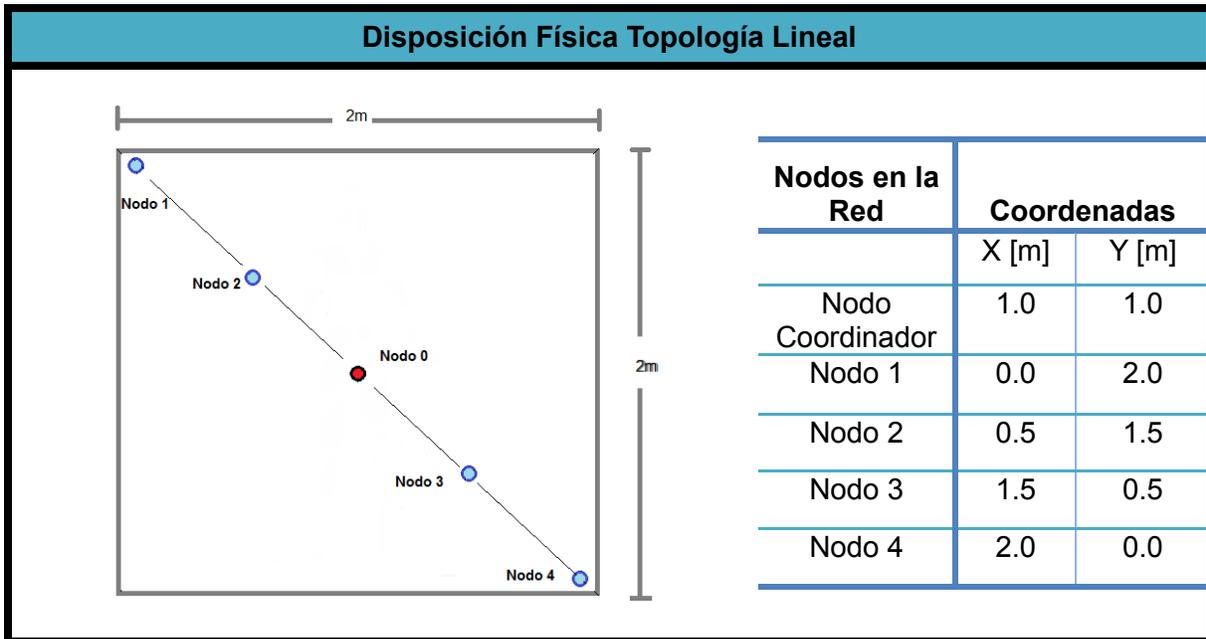
3.1.2.1.1. *Primer caso (caso 1). Topologías con distancias de enlaces diferentes.*➤ **Topología Lineal**

Figura 3.2. Descripción de la topología lineal para la simulación del caso 1. Por los Autores.

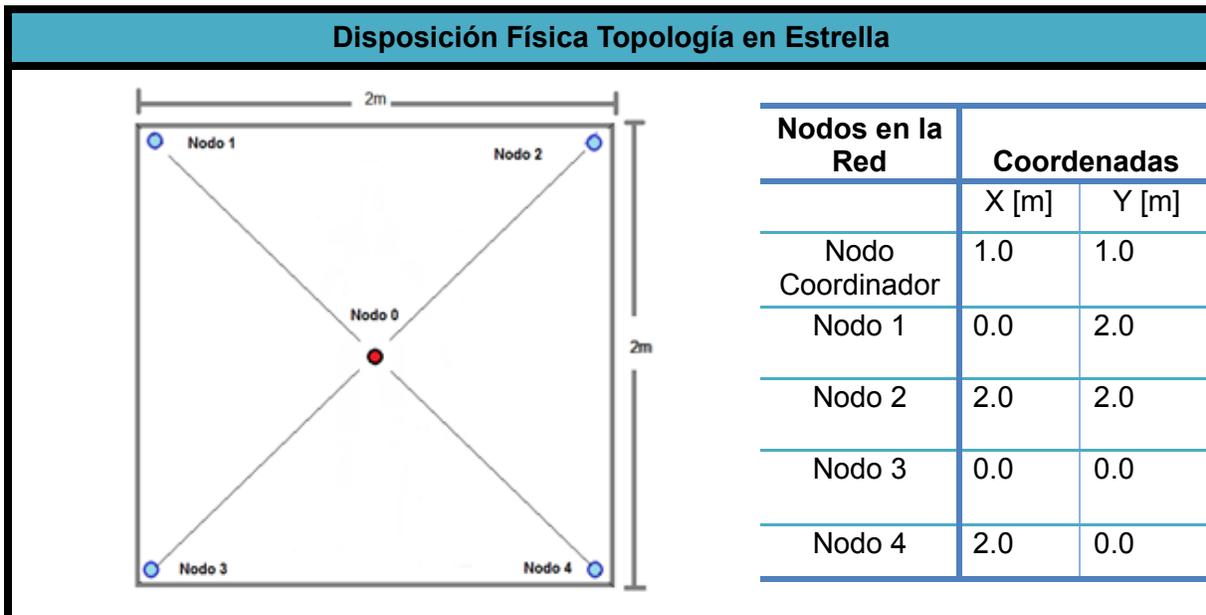
➤ **Topología en Estrella**

Figura 3.3. Descripción de la topología en estrella para la simulación del caso 1. Por los Autores.

➤ Topología en Árbol

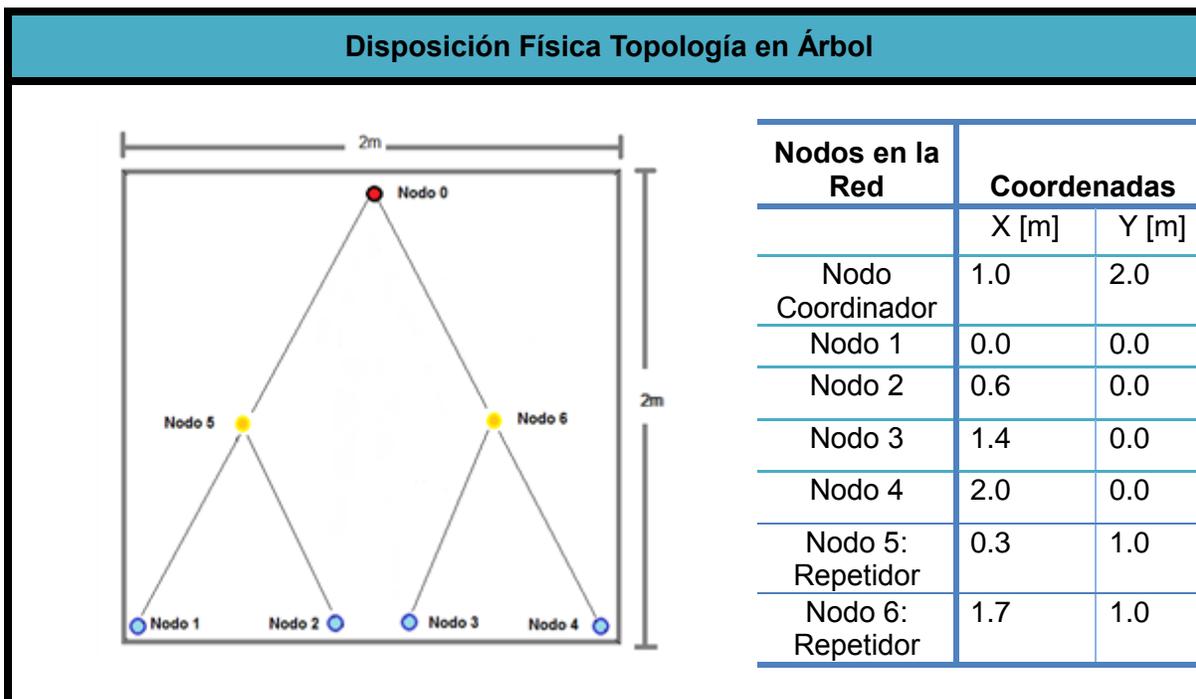


Figura 3.4. Descripción de la topología en árbol para la simulación del caso 1. Por los Autores.

La tabla 3.2 muestra la distancia entre los nodos y el coordinador para cada una de las topologías.

	Topología Lineal	Topología en Estrella	Topología en Árbol
Nodo 1: Nodo Sensor	1.414 metros	1.414 metros	2.236 metros
Nodo 2: Nodo Sensor	0.707 metros	1.414 metros	2.039 metros
Nodo 3: Nodo Sensor	0.707 metros	1.414 metros	2.039 metros
Nodo 4: Nodo Sensor	1.414 metros	1.414 metros	2.236 metros

Tabla 3.2. Distancia del enlace desde el sensor al coordinador - caso 1. Por los Autores.

Para cada caso se tiene dos variaciones de la tasa de transmisión, la primera maneja una tasa de transmisión de tramas igual para todos los nodos de las diferentes topologías, la segunda cambia la tasa de transmisión de tres nodos en la red, dejando uno con las mismas condiciones que en el primer caso, esto para notar la influencia de la topología de red en la tasa de transmisión.

Nodos Presentes en la Red	Tasa de transmisión	
	Caso 1a	Caso 1b
Nodo 0: Nodo Coordinador	0 tramas/seg	0 tramas/seg
Nodo 1: Nodo Sensor	10 tramas/seg	10 tramas/seg
Nodo 2: Nodo Sensor	10 tramas/seg	45 tramas/seg
Nodo 3: Nodo Sensor	10 tramas/seg	45 tramas/seg
Nodo 4: Nodo Sensor	10 tramas/seg	45 tramas/seg

Tabla 3.3. Tasa de transmisión caso 1a y 1b. Por los Autores.

Se selecciona la tasa de transmisión de 10 tramas/segundo, ya que la mayoría de las aplicaciones médicas se encuentran por debajo de este valor, por ejemplo: monitor de tensión muscular, monitor de glucosa, monitor de presión sanguínea, etc., la tasa de transmisión de 45 tramas/seg corresponde a un sensor de movimiento [17].

3.1.2.1.2. Segundo caso (caso 2). Topologías con distancias de enlaces iguales.

Para este caso se varía la ubicación de los nodos sensores en las topologías en estrella y árbol, con el fin de conseguir que tengan las mismas distancias que la topología lineal.

➤ Topología en Estrella

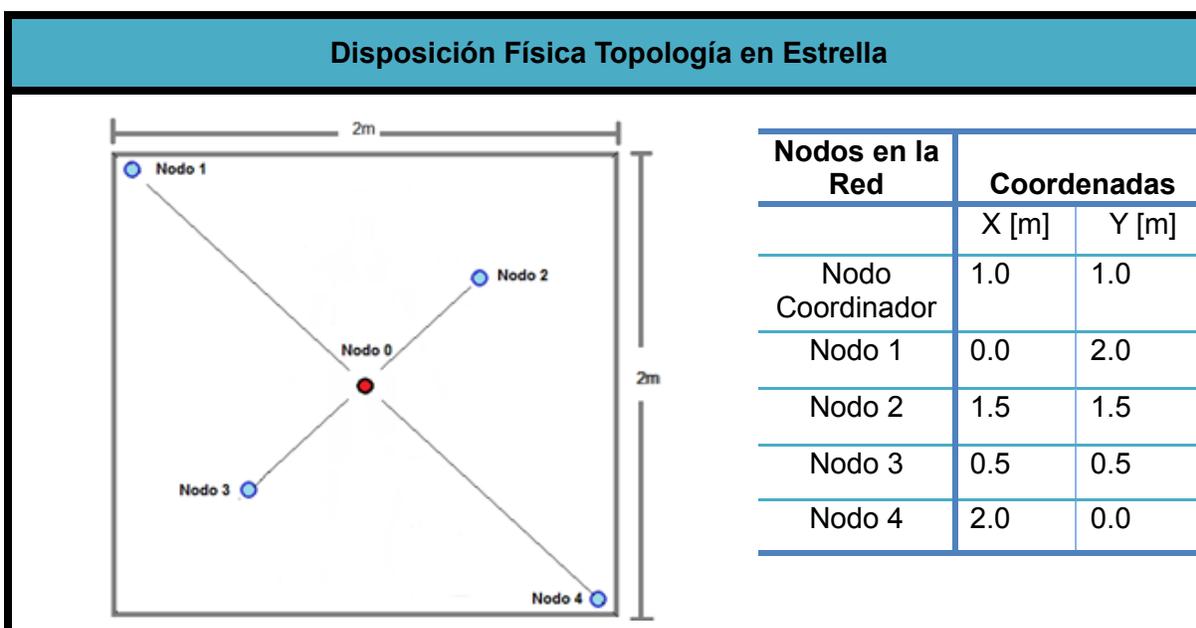


Figura 3.5. Descripción de la topología en estrella para la simulación - caso 2. Por los Autores.

➤ Topología en Árbol

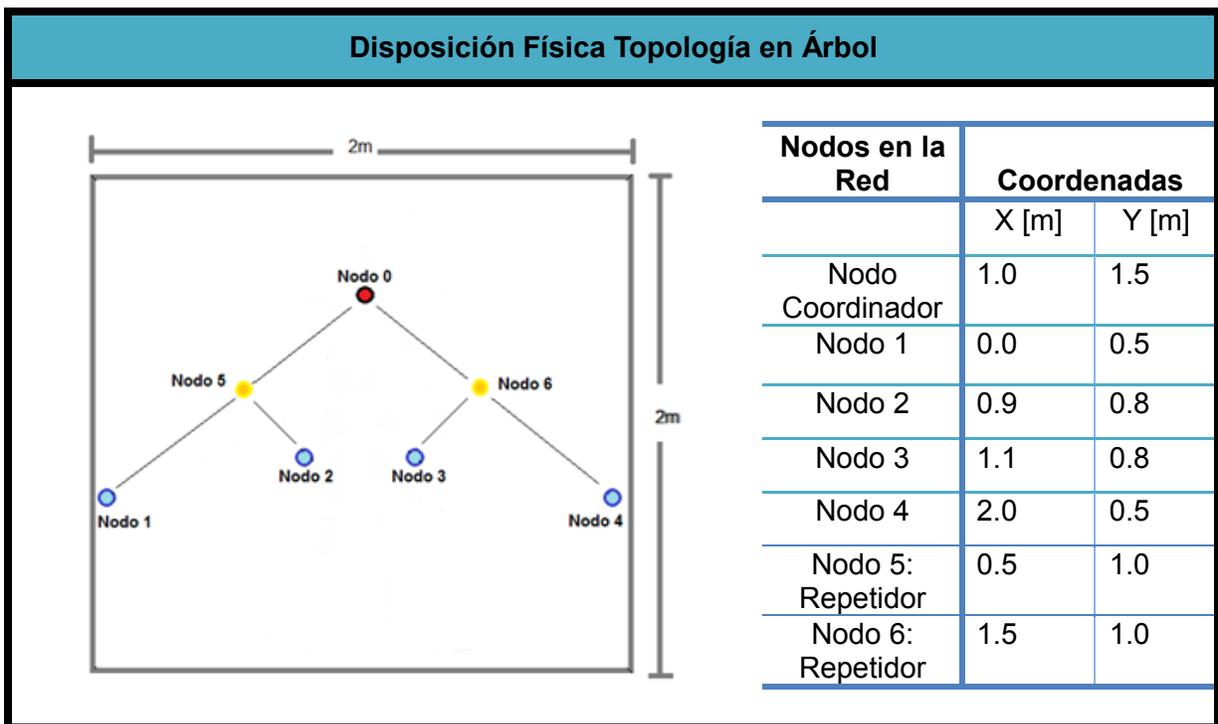


Figura 3.6. Descripción de la topología en árbol para la simulación del caso 2. Por los Autores.

La tabla 3.4 muestra las distancias entre los sensores y el nodo coordinador, cada nodo en la red tiene la misma distancia de enlace para las tres topologías.

	Topología Lineal	Topología en Estrella	Topología en Árbol
Nodo 1: Nodo Sensor	1.414 metros	1.414 metros	1.414 metros
Nodo 2: Nodo Sensor	0.707 metros	0.707 metros	0.707 metros
Nodo 3: Nodo Sensor	0.707 metros	0.707 metros	0.707 metros
Nodo 4: Nodo Sensor	1.414 metros	1.414 metros	1.414 metros

Tabla 3.4. Distancia del enlace desde el sensor al coordinador - caso 2. Por los Autores.

La tabla 3.5 muestra la tasa de transmisión para las dos variaciones del caso 2.

Nodos Presentes en la Red	Tasa de transmisión	
	Caso 2a	Caso 2b
Nodo 0: Nodo Coordinador	0 tramas/seg	0 tramas/seg
Nodo 1: Nodo Sensor	10 tramas/seg	10 tramas/seg
Nodo 2: Nodo Sensor	10 tramas/seg	45 tramas/seg
Nodo 3: Nodo Sensor	10 tramas/seg	10 tramas/seg
Nodo 4: Nodo Sensor	10 tramas/seg	45 tramas/seg

Tabla 3.5. Tasa de transmisión caso 2a y 2b. Por los autores.

3.1.2.2. Escenario de simulación No.2

El segundo escenario simulado es el correspondiente al estándar IEEE 802.15.6 con las topologías: lineal y estrella, las cuales se ajustan al estándar y a lo permitido por la herramienta de simulación seleccionada. Al igual que en el primer escenario se trabaja con dos casos con sus respectivas variaciones y los mismos parámetros, descritos para el caso 1 y 2.

3.1.3. Definición de las características técnicas de los escenarios de simulación

Para el análisis del desempeño se tuvieron en cuenta los estándares IEEE 802.15.4 y el IEEE 802.15.6, de estos la mayoría de los parámetros técnicos son definidos por defecto en la herramienta de simulación, sin embargo quedan algunos parámetros que define el usuario, como la potencia de transmisión, tasa de transmisión, tiempo de simulación, etc.

La tabla 3.6 muestra los parámetros técnicos establecidos para la simulación.

PARÁMETROS	
Tasa de transmisión	Definida en las tablas 3.3 y 3.5
Distancia	Definida en las tablas 3.2 y 3.4
Cantidad de Datos por Trama	100Bytes
Tiempo de simulación	120seg
Bits por símbolo	2
Potencia de Transmisión	-15dBm
Sensibilidad de los Nodos	-87dBm
Frecuencia de la Portadora	2400MHz
Ancho de Banda	20MHz
Modulación	QPSK Diferencial
Método de Acceso	CSMA/CA
Estándar	IEEE 802.15.4 y IEEE 802.15.6
Canal de transmisión	Con variación temporal

Tabla 3.6. Parámetros técnicos establecidos para la simulación. Por los Autores.

Para evaluar el desempeño de la red, se consideran los siguientes parámetros de desempeño:

- Tráfico Recibido.
- Tramas Pérdidas.
- *Throughput*.
- *FER*.
- Latencia.

3.1.4. Ejecución de la simulación

Para poder realizar la simulación en Castalia se debe generar un archivo de configuración que define el escenario de simulación con el nombre de *Omnnetpp.ini*. En él se detallan todos los parámetros técnicos antes mencionados, como el tiempo de simulación, tasa de transmisión, etc. Una vez listo esto, se procede a ejecutar la simulación mediante el comando `./bin/Castalia -c` en la consola de Ubuntu.

Para tener un nivel de confianza de los resultados, se ejecuta cada simulación con 300 iteraciones.

3.1.5. Análisis de resultados

3.1.5.1. Escenario No.1. Estándar IEEE 802.15.4

Se simuló el escenario No.1 en el cual se obtuvieron resultados de los parámetros de desempeño descritos con anterioridad.

3.1.5.1.1. Caso 1a. Distancias diferentes en cada topología, igual tasa de transmisión.

En el caso 1a se simuló el escenario No.1, donde en cada topología la distancia de los enlaces entre los nodos sensores y el coordinador, dependen de la distribución en la topología física.

Como se muestra en la tabla 3.7, la tasa de transmisión es igual para todos los nodos. Esto con el fin de analizar su comportamiento teniendo en cuenta las pérdidas por trayecto, variaciones temporales e interferencias en la red.

Nodos	Tasa de Transmisión	Topología		
		Lineal	Estrella	Árbol
Nodo 1: Nodo Sensor	10tramas/seg	1.414 metros	1.414 metros	2.236 metros
Nodo 2: Nodo Sensor	10tramas/seg	0.707 metros	1.414 metros	2.039 metros
Nodo 3: Nodo Sensor	10tramas/seg	0.707 metros	1.414 metros	2.039 metros
Nodo 4: Nodo Sensor	10tramas/seg	1.414 metros	1.414 metros	2.236 metros

Tabla 3.7. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, para topologías del escenario No.1 - caso 1a.

- **Tráfico Recibido**

La figura 3.7 muestra el tráfico recibido en el nodo coordinador para cada una de las topologías del escenario No.1, este representa el número de tramas que son recibidas por segundo.

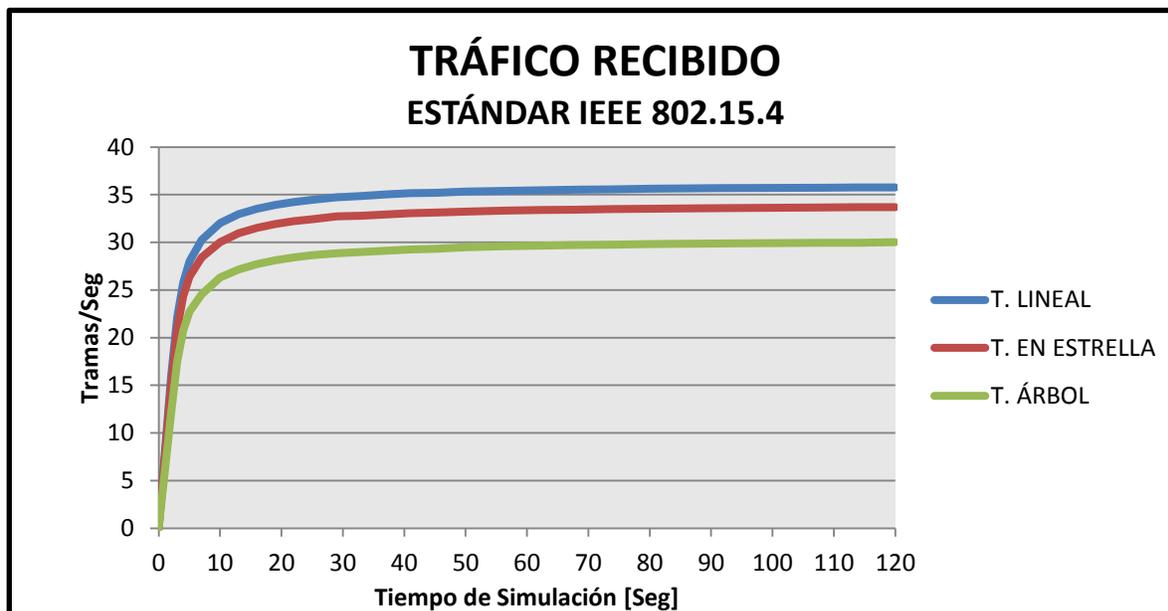


Figura 3.7. Tráfico recibido en el coordinador de red para las tres topologías del escenario No.1 - caso 1a.

En la figura 3.7 se observa como la red BAN con topología lineal presenta un tráfico de 35,7 tramas/seg, siendo la topología que más se aproxima al tráfico generado el cual es de 10 tramas/seg por cada nodo, para un total de 40tramas/seg en toda la red.

El tráfico recibido es un parámetro que se ve afectado en gran medida por las pérdidas de trayecto y este a su vez depende de la distancia de los enlaces, es por ello que la topología lineal al tener dos de sus nodos más cercanos al coordinador presenta un mejor desempeño.

La figura 3.8 muestra el número de tramas recibidas por el coordinador, que provienen de cada nodo en la red. Se observa que con la topología lineal se presenta un mayor número de tramas recibidas por parte de los nodos 2 y 3, quienes tienen un enlace más corto hacia el coordinador.

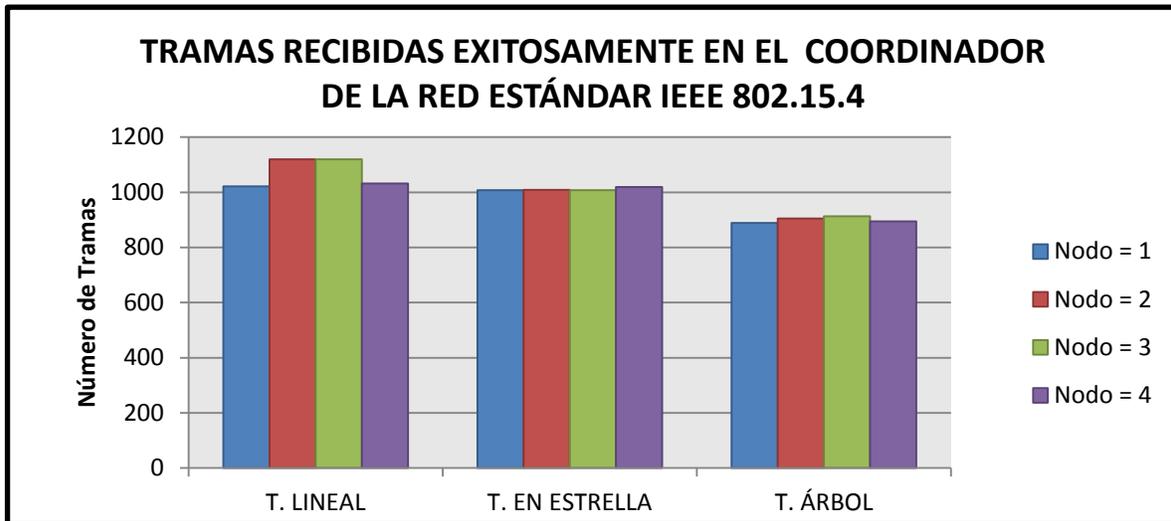


Figura 3.8. Tramas recibidas exitosamente en el coordinador de red, para las tres topologías del Escenario No.1 - caso 1a.

Por su parte el coordinador de la topología en estrella, recibe de cada nodo un número similar de tramas, esto se debe a que la distancia de los enlaces es la misma, y como es de esperarse cada nodo presenta una similar cantidad de pérdidas por trayecto.

La red BAN con topología en árbol al tener una mayor cobertura y nodos repetidores que causan más interferencia, presenta el menor número de tramas recibidas exitosamente en su coordinador.

- **Tramas Pérdidas**

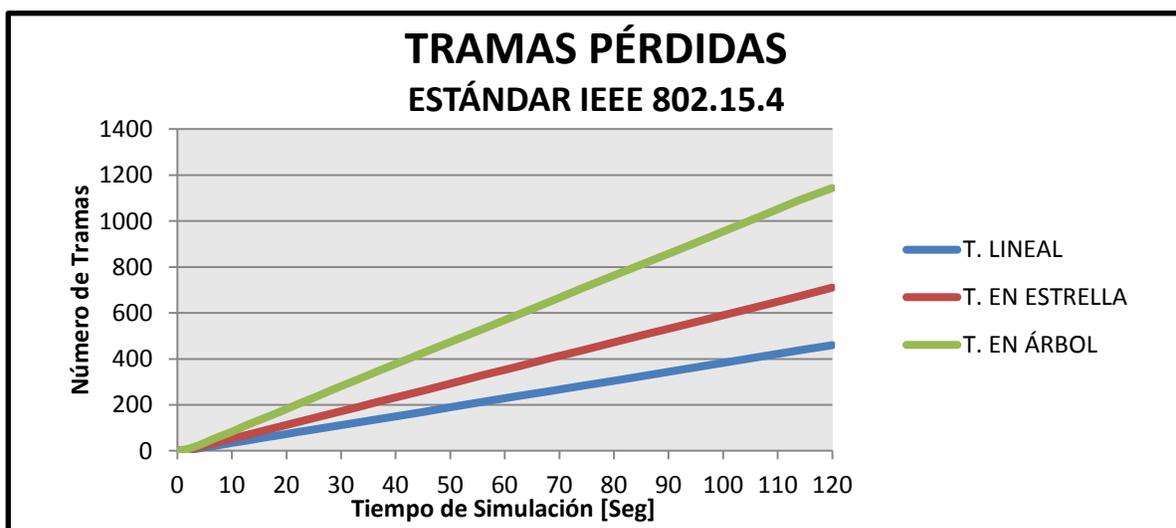


Figura 3.9. Tramas pérdidas de la red para las tres topologías, escenario No.1 - caso 1a.

En la figura 3.9 se observa como los resultados de este parámetro se ven inversamente relacionados con el número de tramas recibidas, de aquí que la topología con la menor cantidad de tramas pérdidas es la lineal, seguida de la topología en estrella y por último la topología en árbol, cuyos resultados se deben a las distancias de enlaces. Además, la red con topología en árbol presenta interferencias adicionales a causa de sus nodos repetidores.

- **Throughput**

En la figura 3.10 se muestra la medida del *Throughput* de las topologías seleccionadas para el estándar IEEE 802.15.4. El eje **X** muestra el tiempo medido en segundos y el eje **Y** el *Throughput* en Bits/seg.

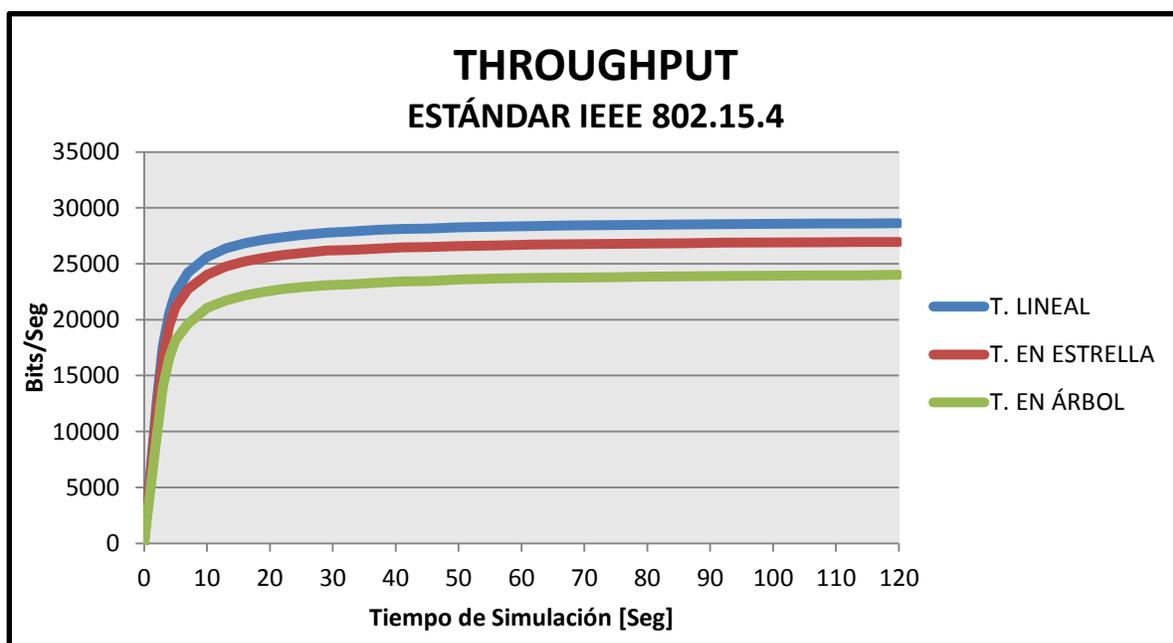


Figura 3.10. Throughput medido en la red para las tres topologías, escenario No.1 - caso 1a.

La figura 3.10 muestra el *Throughput* de la red BAN con las topologías: lineal, estrella y árbol, el valor final es de 28619.8Bits/s, 26953.9 Bits/s y 24015.8 Bits/s respectivamente. Se observa como la red con topología lineal tiene un mejor desempeño con respecto a las otras; la razón por la cual esto ocurre es porque posee dos nodos más próximos al coordinador y así tiene menores pérdidas por trayecto.

La red con topología en árbol tiene una gran ventaja, y es la cobertura que puede alcanzar gracias a los repetidores, sin embargo, sus pérdidas por trayecto son mayores, además, los nodos repetidores, causan más interferencias, lo que hace que su desempeño se vea deteriorado.

- **FER**

La figura 3.11 muestra el porcentaje de la Tasa de Error de Tramas del escenario No.1 para el caso 1a.

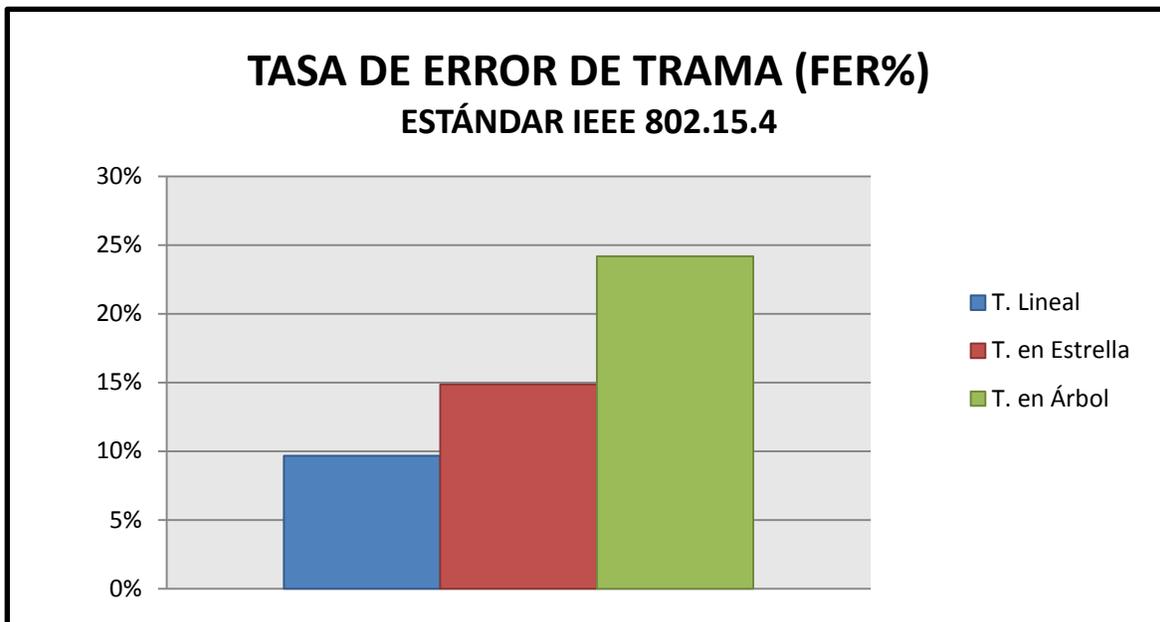


Figura 3.11. Tasa de error de trama de la red para las tres topologías, escenario No.1 - caso 1a.

Se observa que este parámetro se ve afectado por el cambio de topología, pues, la red con topología lineal tiene el menor porcentaje de FER, lo que indica una menor probabilidad de perder o tener tramas erradas. Lo contrario ocurre con la topología en árbol, cuyo porcentaje es del 24%, lo que significa que se está perdiendo o dañando casi la cuarta parte de la información generada en la red.

- **Latencia**

La figura 3.12 es un histograma que indica en el eje **Y** el porcentaje del número de tramas recibidas en el nodo coordinador y en el eje **X**, diferentes intervalos de tiempo que corresponden a la latencia en ms de dichas tramas.

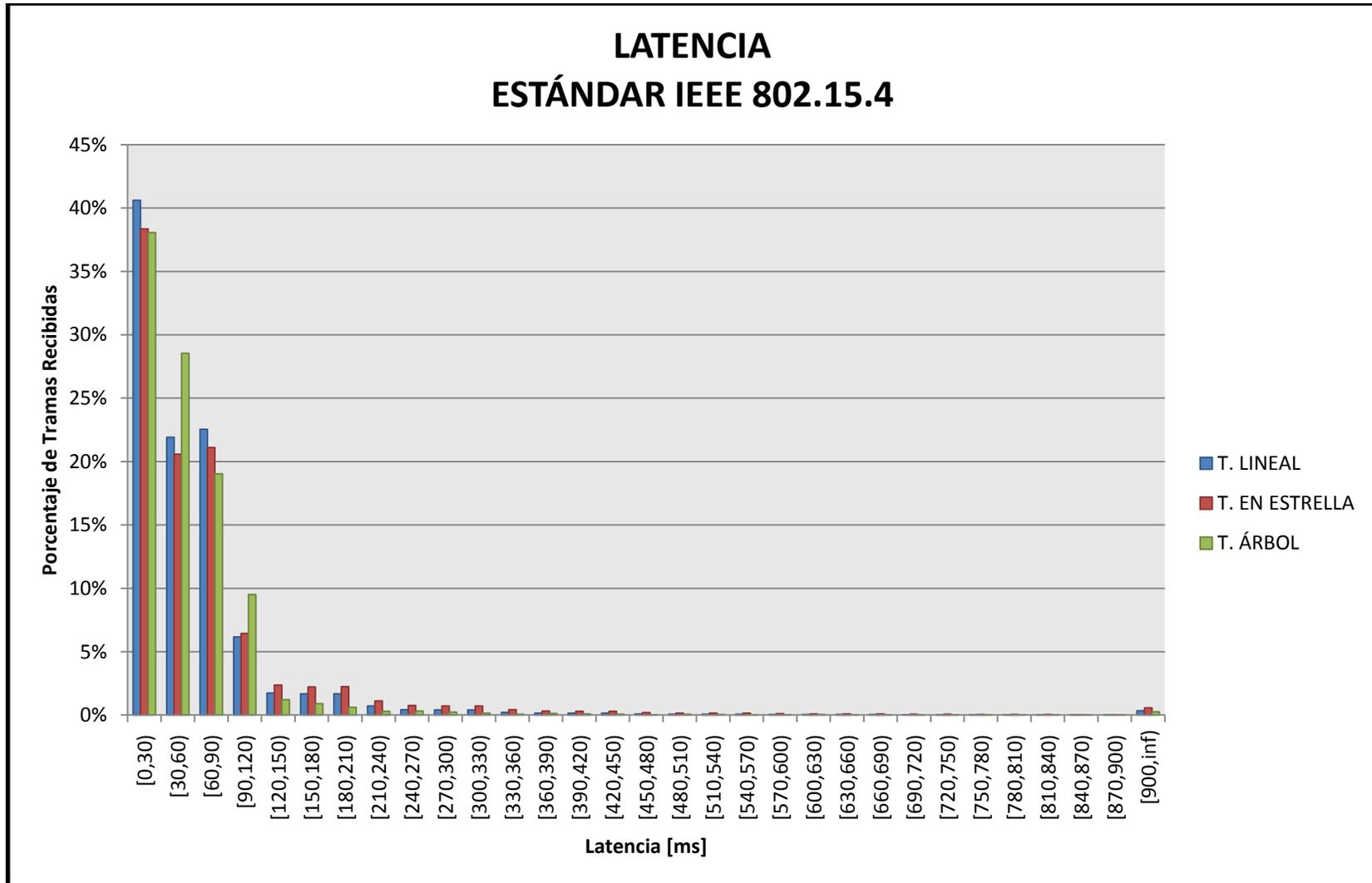


Figura 3.12. Latencia de tramas recibidas en el coordinador de red para las topologías del escenario No.1- caso 1a.

La tabla 3.8 se obtiene de la figura 3.12, donde se aprecia cual es el porcentaje de tramas que cada topología presenta con una latencia menor a 120ms.

	Porcentaje de Tramas recibidas
T. LINEAL	93%
T. EN ESTRELLA	89%
T. ÁRBOL	96%

Tabla 3.8. Porcentaje de tramas recibidas en el coordinador de red con latencias hasta 120ms.

Se observa como la red con topología en árbol presenta un mayor porcentaje de tramas recibidas con latencias considerablemente bajas, esto se debe gracias a los repetidores que ayudan a descongestionar el tráfico de la red.

La red con la topología en estrella, obtiene el menor porcentaje de la tabla, indicando que las distancias de los enlaces de mayor alcance, hacen que se generen retardos en las tramas recibidas.

3.1.5.1.2. Caso 1b. Distancias diferentes en cada topología, diferente tasa de transmisión.

Para este caso se cambia a una mayor tasa de transmisión de los Nodos 2, 3 y 4, esto con el fin de observar el comportamiento del nodo 1 frente al incremento del tráfico en la red. Con ello se realiza una comparación del nodo para el caso 1a y caso 1b, en todas las topologías del escenario No.1.

Nodos	Tasa de Transmisión	Topología		
		Lineal	Estrella	Árbol
Nodo 1: Nodo Sensor	10tramas/seg	1.414 metros	1.414 metros	2.236 metros
Nodo 2: Nodo Sensor	45tramas/seg	0.707 metros	1.414 metros	2.039 metros
Nodo 3: Nodo Sensor	45tramas/seg	0.707 metros	1.414 metros	2.039 metros
Nodo 4: Nodo Sensor	45tramas/seg	1.414 metros	1.414 metros	2.236 metros

Tabla 3.9. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, para topologías del escenario No.1- caso 1b.

- **Tráfico Generado**

La figura 3.13 muestra el tráfico que se genera en la red BAN con cada una de las topologías del escenario No.1, para el Caso 1a con un tráfico final de 39,6 Tramas/seg y para el Caso 1b con un tráfico de 143,2 Tramas /seg. El tráfico generado es el mismo en todas las topologías.

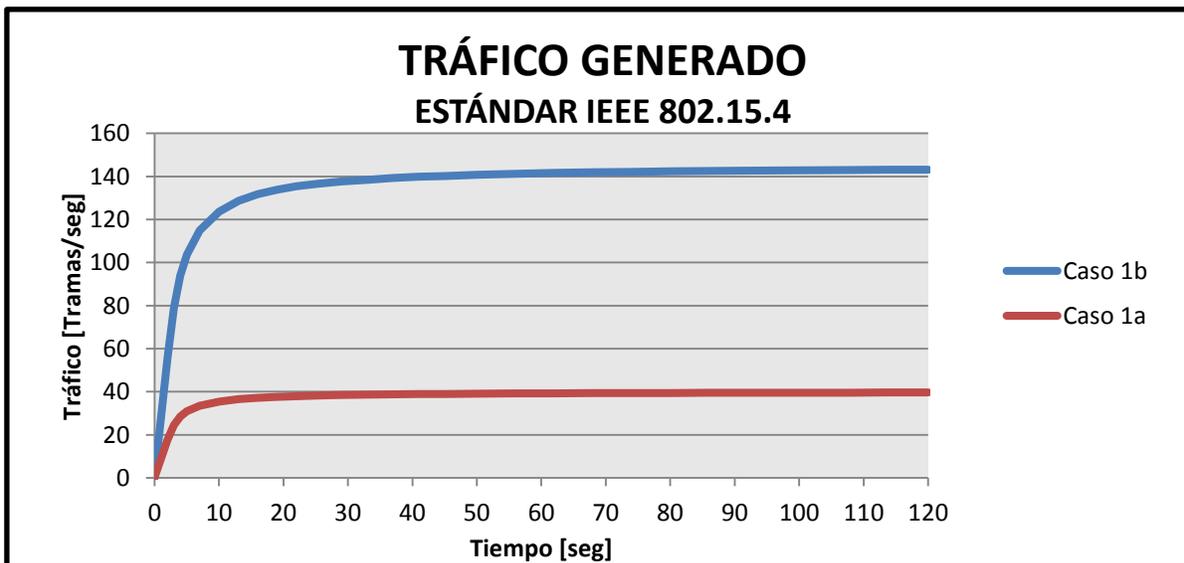


Figura 3.13. Tráfico Generado en la red para cada topología, escenario No.1 - caso 1a y 1b.

- **Throughput**

Las figuras 3.14, 3.15 y 3.16 muestran el *Throughput* del Nodo 1 con topología lineal, en estrella y árbol respectivamente, para el Caso 1a y el Caso 1b del escenario No.1.

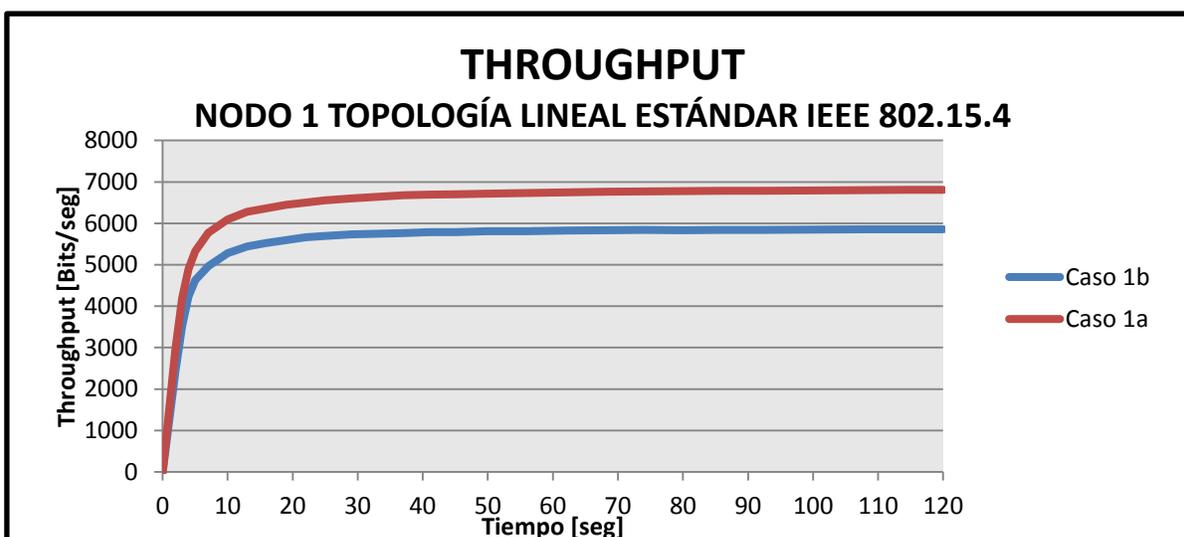


Figura 3.14. *Throughput* del Nodo 1 de la red con topología lineal, escenario No.1 - caso 1a y 1b.

En la figuras 3.14 y 3.15 se evidencia cómo el *Throughput* del Nodo 1 para el caso 1b, se reduce en comparación al caso 1a, gracias al aumento en la tasa de transmisión. Presentado un mismo comportamiento, aunque se tengan topologías físicas diferentes.

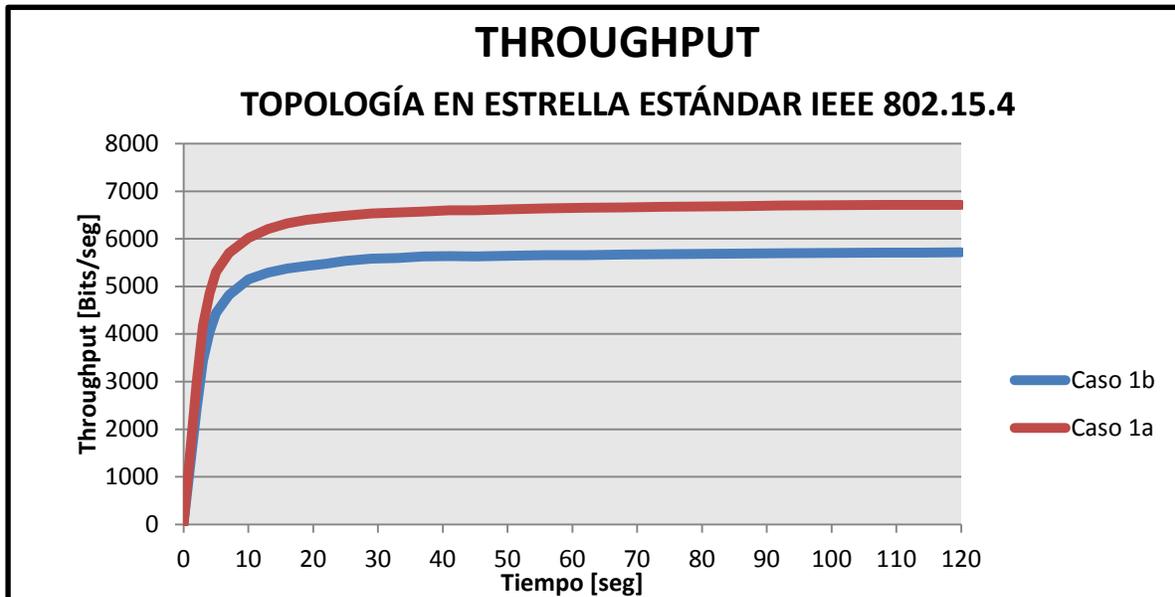


Figura 3.15. *Throughput* del Nodo 1 de la red con topología en estrella, escenario No.1 - caso 1a y 1b.

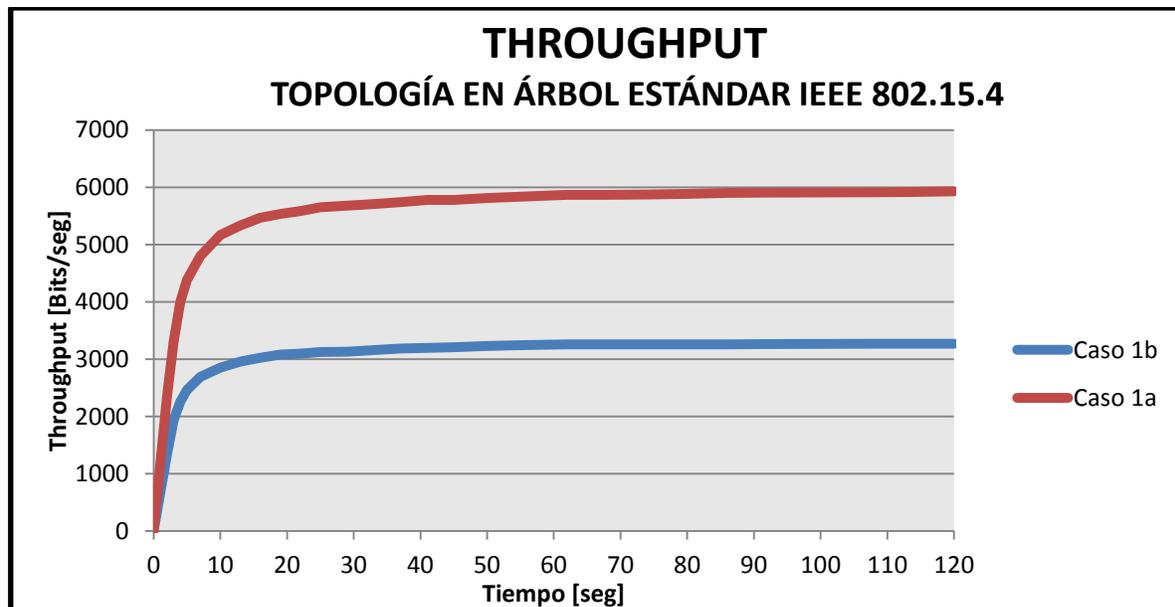


Figura 3.16. *Throughput* del nodo 1 de la red con topología en árbol, escenario No.1- caso 1a y 1b.

En la red con topología en árbol se ve un gran efecto negativo frente el cambio de la tasa de transmisión. A diferencia con las otras topologías, esta debe tanto procesar la información en el nodo coordinador como en los dos nodos repetidores, lo que causa que su desempeño se vea sumamente deteriorado.

- FER

La figura 3.17 muestra la tasa de error de trama de la red BAN con las tres topologías en el escenario No.1 para el Caso 1a y Caso 1b.

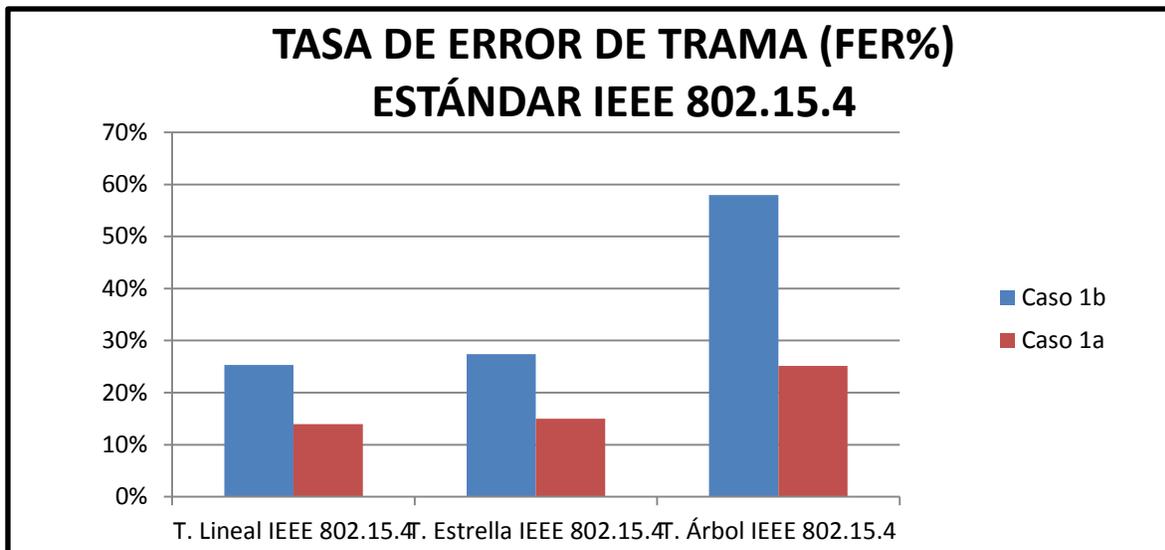


Figura 3.17. Tasa de error de trama del Nodo 1 en la red para las tres topologías, escenario No.1 - caso 1a y 1b.

Como se observa en la figura 3.17 el desempeño de la red BAN se ve afectado de una manera diferente con cada topología. Para el Caso 1b, la menor FER se obtiene con la topología lineal, seguida con un valor similar por la topología en estrella.

La red con la topología en árbol por su parte obtiene un valor alto de FER, en consecuencia con esta topología se presenta el mayor efecto negativo frente al incremento del tráfico en la red.

3.1.5.1.3. Caso 2a. Distancias iguales en cada topología, igual tasa de transmisión.

En el caso 2a se simuló el escenario No.1, las topologías de red tienen una misma distancia en sus enlaces, tal como se muestra en la tabla 3.10. Con esto se pretende ver el comportamiento de la red, frente a interferencias y al canal variante en el tiempo, sin tener en cuenta las pérdidas por trayecto.

Nodos	Tasa de Transmisión	Topología
		Lineal, Estrella, Árbol
Nodo 1:	10tramas/seg	1.414 metros
Nodo 2:	10tramas/seg	0.707 metros
Nodo 3:	10tramas/seg	0.707 metros
Nodo 4:	10tramas/seg	1.414 metros

Tabla 3.10. Tasas de transmisión y distancia de los enlaces desde el sensor al coordinador de red, para topologías del escenario No.1 - caso 2a.

- **Tráfico Recibido**

La figura 3.18 muestra el tráfico recibido en el nodo coordinador para cada una de las topologías de red.

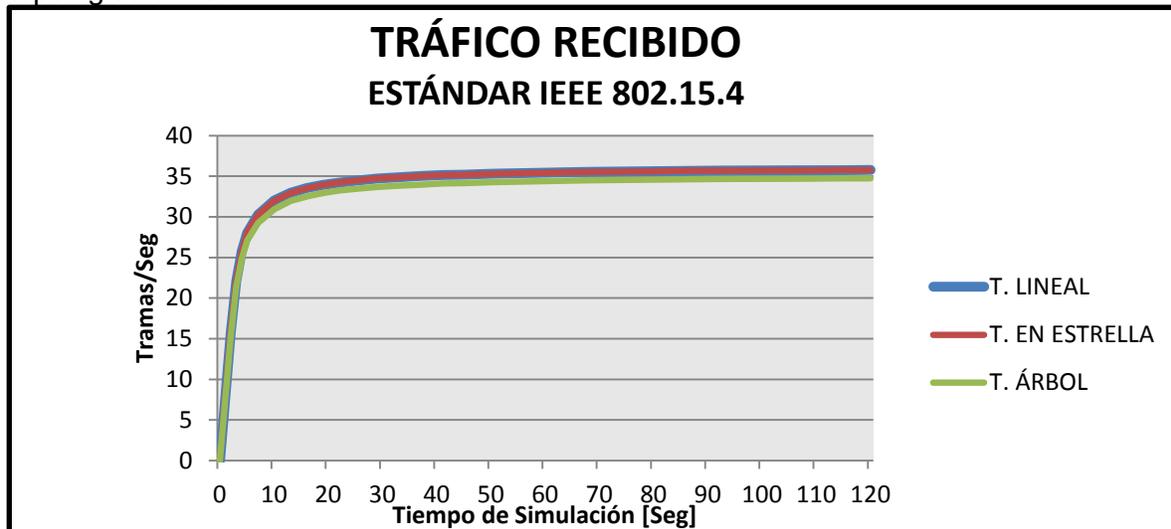


Figura 3.18. Tráfico recibido en el coordinador de red para las tres topologías, escenario No.1- caso 2a.

Como se observa en la figura 3.18, se tiene una gran similitud con las topologías lineal y en estrella, pues se simuló cada nodo de la red, a la misma distancia del coordinador en todas las topologías, esto hace que si bien la topología no sea la misma, las condiciones sean más cercanas. Sin embargo, con la topología en árbol, se tienen condiciones tanto de interferencias como de procesamiento diferentes que con el resto de topologías, de aquí que tenga un menor valor de tráfico recibido en su coordinador.

La figura 3.19 muestra el número de tramas recibidas por el coordinador de cada uno de los nodos de la red con las tres topologías.

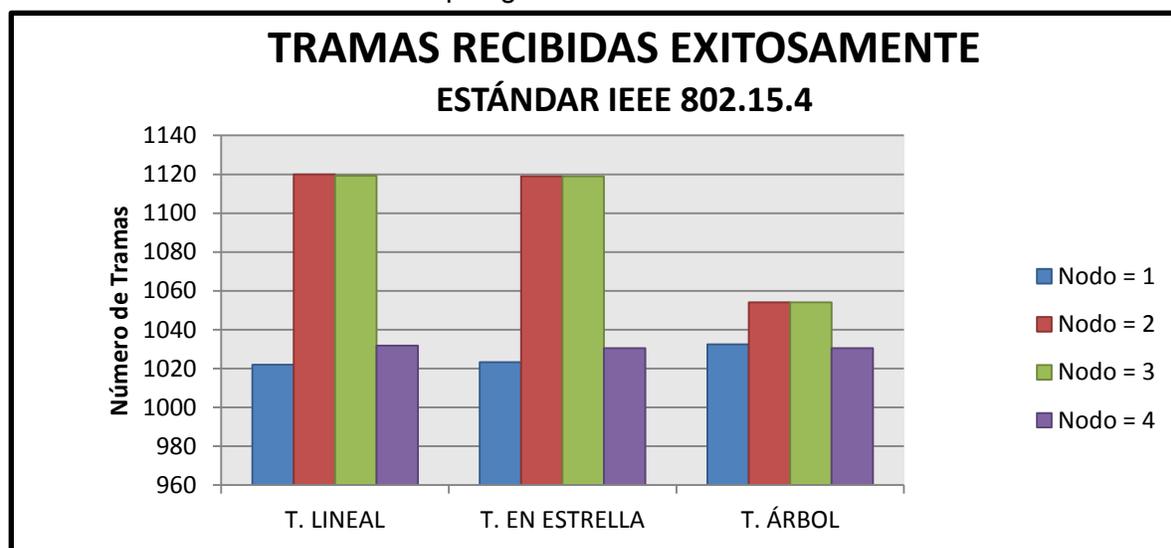


Figura 3.19. Tramas recibidas exitosamente en el coordinador de red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.

En la figura 3.19, se observa un comportamiento muy diferente con la topología en árbol en comparación con las otras topologías. Es evidente como los repetidores en la red provocan una reducción significativa en el éxito de recepción de las tramas.

- **Tramas Pérdidas**

La figura 3.20 muestra la cantidad de tramas pérdidas en la red BAN con cada una de las topologías simuladas.

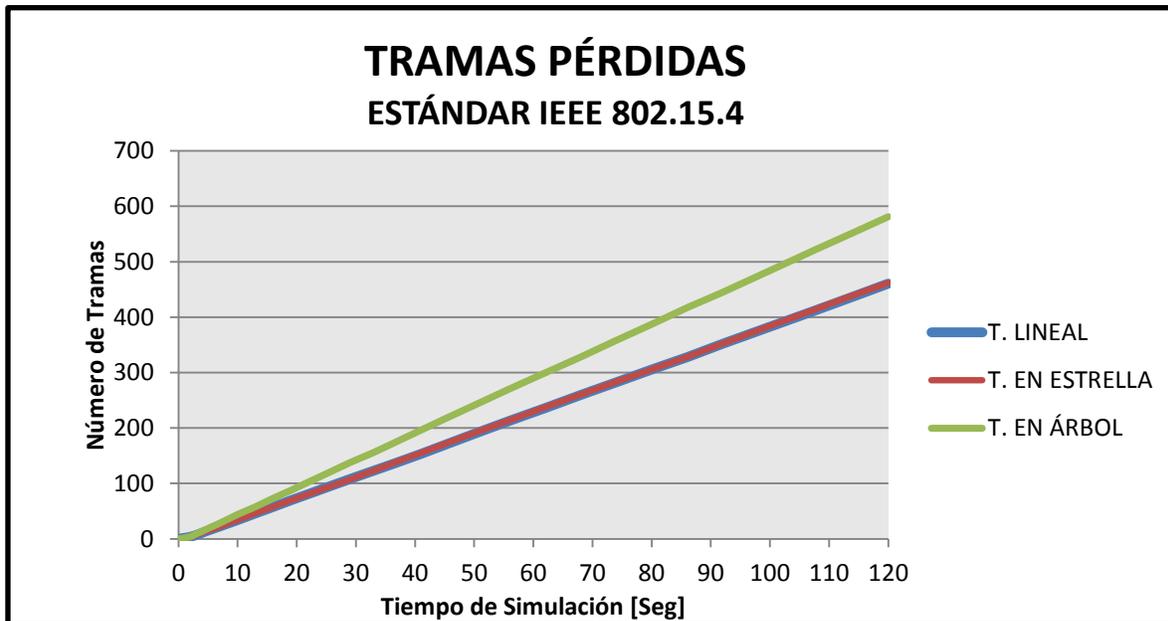


Figura 3.20. Tramas pérdidas en la red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.

En la figura 3.20 se observa una elevada pérdida de tramas de la red con la topología en árbol a diferencia de las topologías lineal y en estrella, esto se debe en gran parte a las interferencias generadas por los repetidores, además el enlace de los nodos no es directo al coordinador, pues al pasar por el repetidor describe otro camino, adicionando pérdidas de trayecto.

- **Throughput**

La figura 3.21 muestra la medida del *Throughput* de la red BAN con las topologías del escenario No.1.

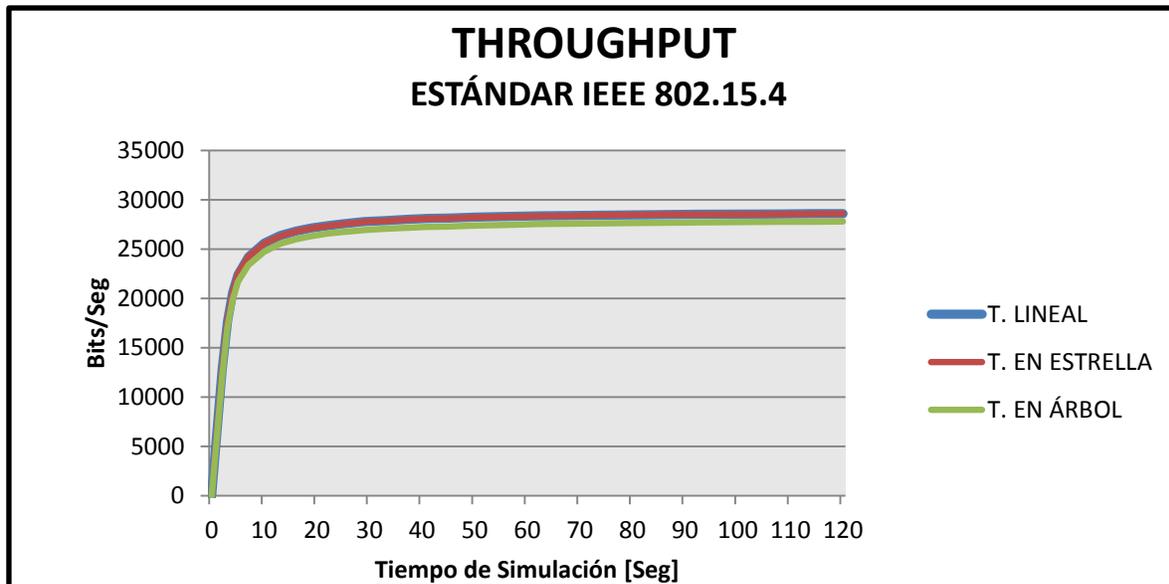


Figura 3.21. Throughput de la red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.

Se observa como el mejor resultado para el estándar IEEE 802.15.4 se obtiene cuando se usa una topología lineal, por otro lado el peor comportamiento se muestra con una topología en árbol.

La tabla 3.11 muestra el valor final del *Throughput* de la red BAN con las topologías lineal, en estrella y en árbol.

	Topologías		
	Lineal	Estrella	Árbol
Throughput	28619,8667	28611,5	27807,6

Tabla 3.11. Valores de Throughput de la red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.

Como se aprecia los valores de *Throughput* de la red con la topología lineal y estrella son similares, pero se tiene un mejor desempeño con la topología lineal, esto se debe a las interferencias y al canal variante en el tiempo de los nodos 2 y 3; que puede que tenga una misma distancia de enlace, pero las condiciones son diferentes gracias a su ubicación.

- **FER**

La figura 3.22 muestra la Tasa de Error de Trama y corrobora los resultados obtenidos de tráfico recibido, tramas perdidas y *Throughput*, mostrando como resultado, una FER igual para las redes con las topologías lineal y en estrella del 9,7% y para la red con la topología en árbol una FER del 12,2%.

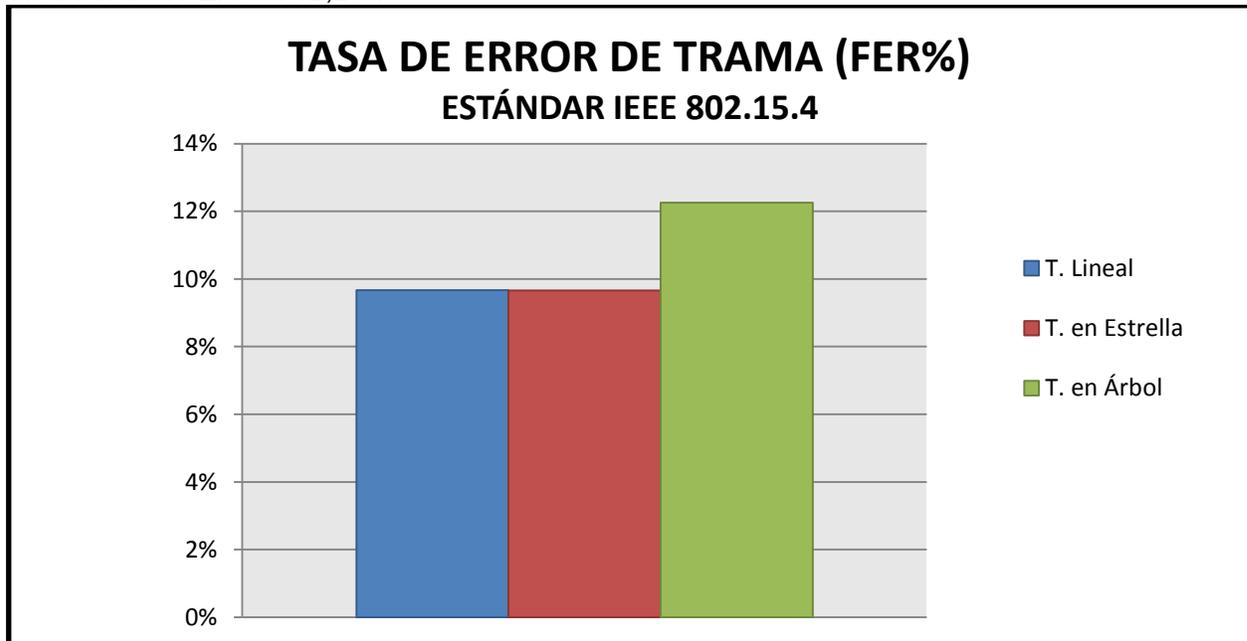


Figura 3.22. Tasa de error de trama de la red para las topologías del escenario No.1 - caso 2a.

Los resultados de la FER se presentan así, ya que la topología en estrella tiene un mismo comportamiento lógico que la lineal y por eso su resultado es idéntico. Por su parte los repetidores de la topología en árbol causan que la probabilidad de tener tramas perdidas o erradas en la red aumente.

- **Latencia**

La figura 3.23 muestra el histograma de latencias de la red para las tres topologías del escenario No.1 para el caso 2a.

Se ve como la red con la topología en árbol, tiene un mejor desempeño en cuanto a latencia, pues los nodos repetidores ayudan a descongestionar el tráfico de la red, obteniendo así tramas recibidas con menores retardos. Estos resultados son comparables a los presentados en el caso 1a.

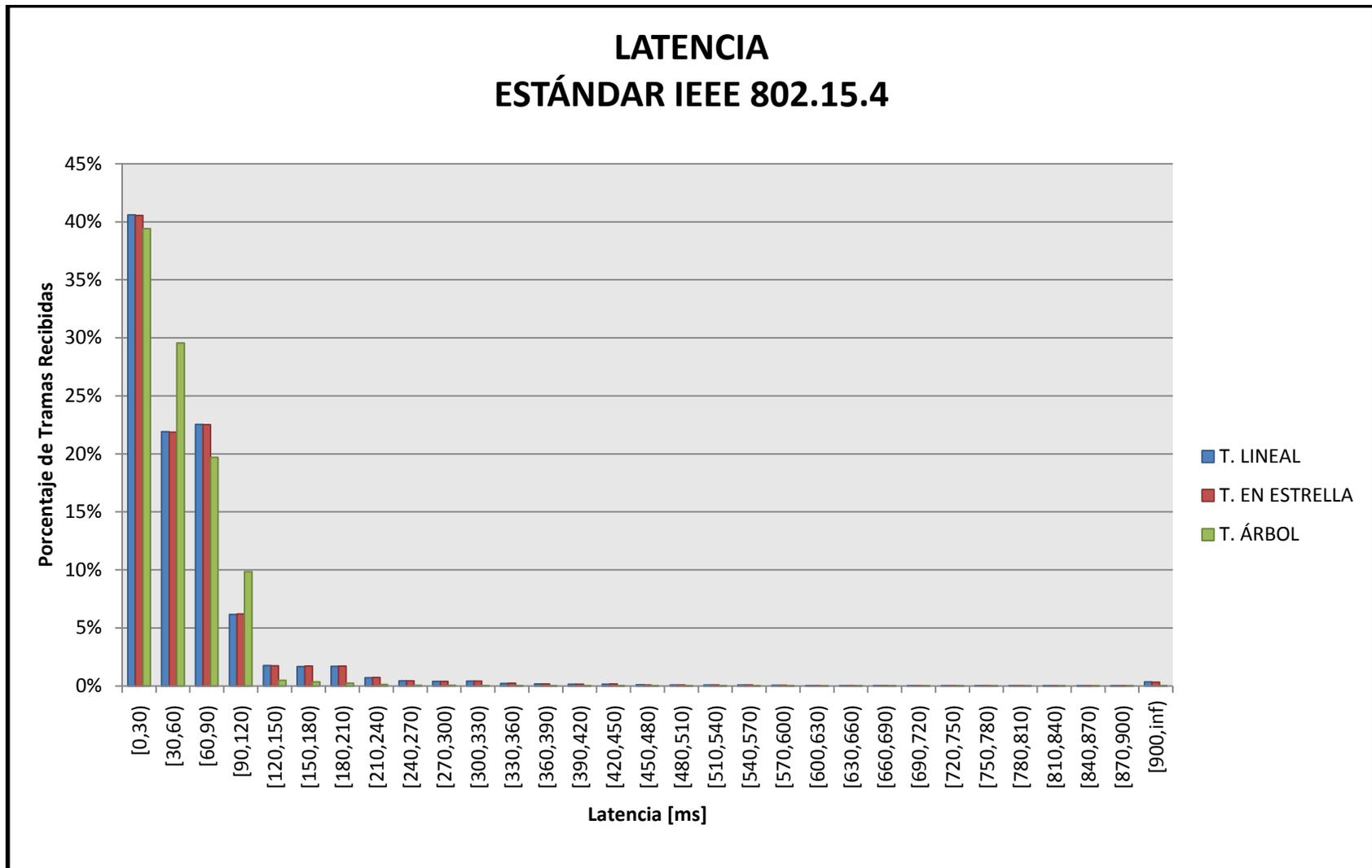


Figura 3.23. Latencia de tramas recibidas en el coordinador de red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.

Al igual que para el Caso 1a en la tabla 3.12 se tiene el porcentaje de tramas recibidas que no sobrepasan una latencia de 120ms.

	Porcentaje de Tramas recibidas
T. LINEAL	93%
T. EN ESTRELLA	93%
T. ÁRBOL	99%

Tabla 3.12. Porcentaje de tramas recibidas en el coordinador de red para las topologías del escenario No.1- caso 2a.

En la tabla 3.12, los resultados con la topología en estrella y lineal presentan el mismo resultado, pues sus distancias de enlaces de los nodos al coordinador son las mismas.

Con la topología en árbol se tuvo un mejor desempeño en comparación al caso 1a, esto se debe a que las distancias de los enlaces de los sensores al coordinador para este caso son más cortos.

3.1.5.1.4. Caso 2b. Distancias iguales en cada topología, diferente tasa de transmisión.

La tabla 3.13, muestra las tasas de transmisión y distancias del enlace desde el sensor al coordinador para el caso 2b.

Dichas características se establecen con el objetivo de ver el impacto de la distancia del enlace como de la tasa de transmisión que maneja cada nodo en el desempeño de la red.

Nodos	Tasa de Transmisión	Topología
		Lineal, Estrella, Árbol
Nodo 1: Nodo Sensor	10tramas/seg	1.414 metros
Nodo 2: Nodo Sensor	45tramas/seg	0.707 metros
Nodo 3: Nodo Sensor	10tramas/seg	0.707 metros
Nodo 4: Nodo Sensor	45tramas/seg	1.414 metros

Tabla 3.13. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, para topologías del escenario No.1- caso 2b.

- **Throughput**

La figura 3.24 muestra el *Throughput* de la red BAN con la topología lineal para cada uno de sus nodos. Como se observa, para el Nodo 2 se tiene el mejor resultado en la red, esto se debe a que este nodo tiene una distancia al coordinador corta. Por el contrario, el nodo que presenta el menor valor es el 4, puesto que se encuentra lejos del coordinador, lo que hace que presente mayores pérdidas por trayecto.

En cuanto a los nodos 2 y 4, aunque transmiten a tasas altas e iguales, se nota un mejor desempeño para el nodo cuyo enlace con el coordinador es más corto.

A diferencia de lo anterior, los nodos 1 y 3, a pesar de estar dispuestos a iguales distancias del coordinador que los nodos 2 y 4, presentan un resultado más cercano. Estos transmiten a tasas bajas, lo que significa que para el estándar IEEE 802.15.4, se tiene un impacto menor de las distancias de los enlaces para nodos cuyas tasas de transmisión son bajas.

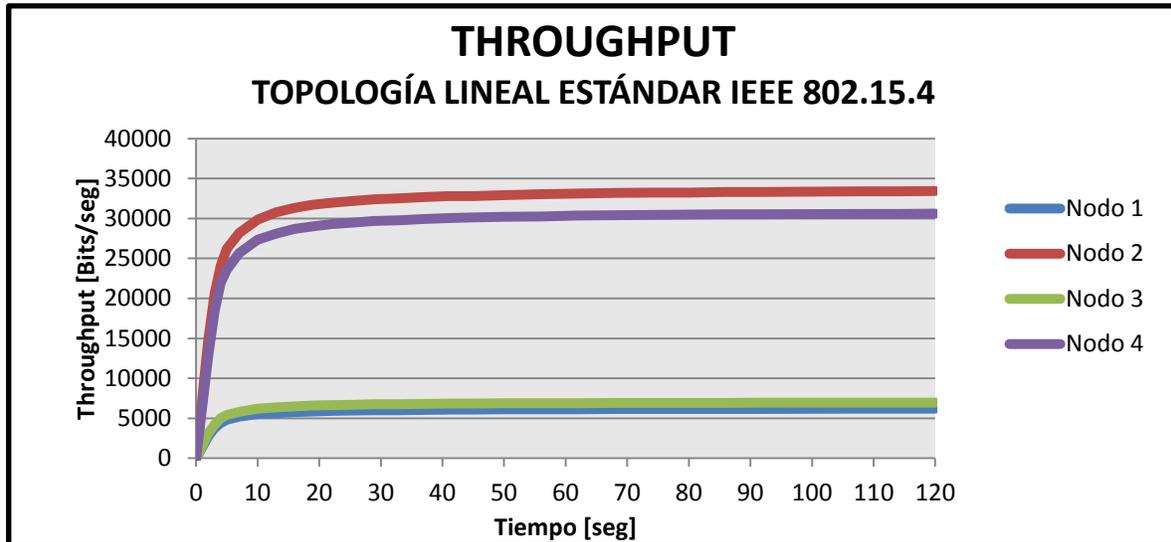


Figura 3.24. *Throughput* de la red para topología lineal, escenario No.1 - caso 2b.

La figura 3.25 muestra el *Throughput* de la red con topología en estrella, presentado el mismo resultado que con la topología lineal, esto se debe a que los nodos sensores tienen las mismas distancias al coordinador y las mismas tasas de transmisión, aunque la ubicación de sus nodos sea diferente.

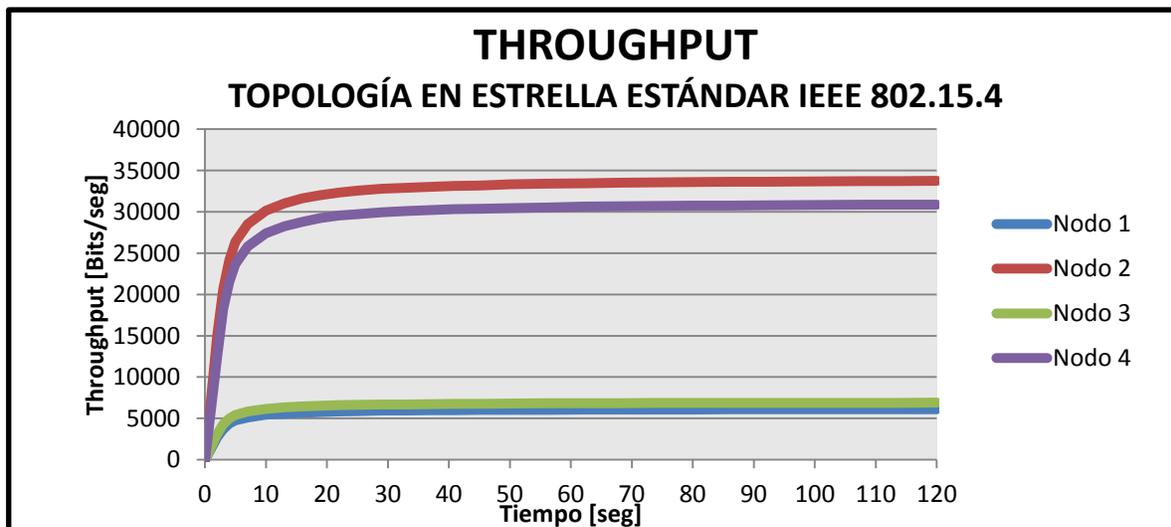


Figura 3.25. *Throughput* de la red con topología en estrella, escenario No.1- caso 2b.

La figura 3.26 muestra el *Throughput* de la red BAN con topología en árbol.

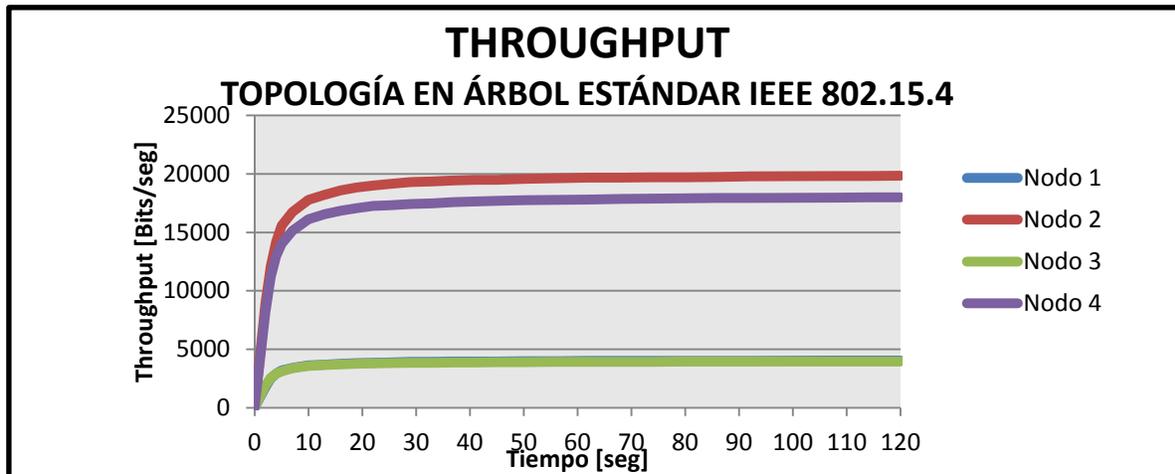


Figura 3.26. Throughput de la red para topología en árbol, escenario No.1- caso 2b

A diferencia de los resultados con las otras topologías, se aprecia un valor menor para todos los nodos de la red, además el Nodo 1 y Nodo 3 tiene el mismo desempeño, lo que indica que para una tasa de transmisión baja no afecta la distancia del enlace al coordinador.

Para los nodos 2 y 4 con tasas de transmisión altas e iguales, se aprecia un menor desempeño para el nodo 4, el cual se encuentra más lejos del coordinador que el Nodo 2. Estos dos nodos tienen un comportamiento similar en comparación con las otras topologías, esto se debe a las pérdidas por trayecto, las cuales tienen un mayor impacto en nodos con tasas de transmisión altas.

- **FER**

La figura 3.27 muestra la Tasa de Error de Trama de la red BAN con topología lineal.

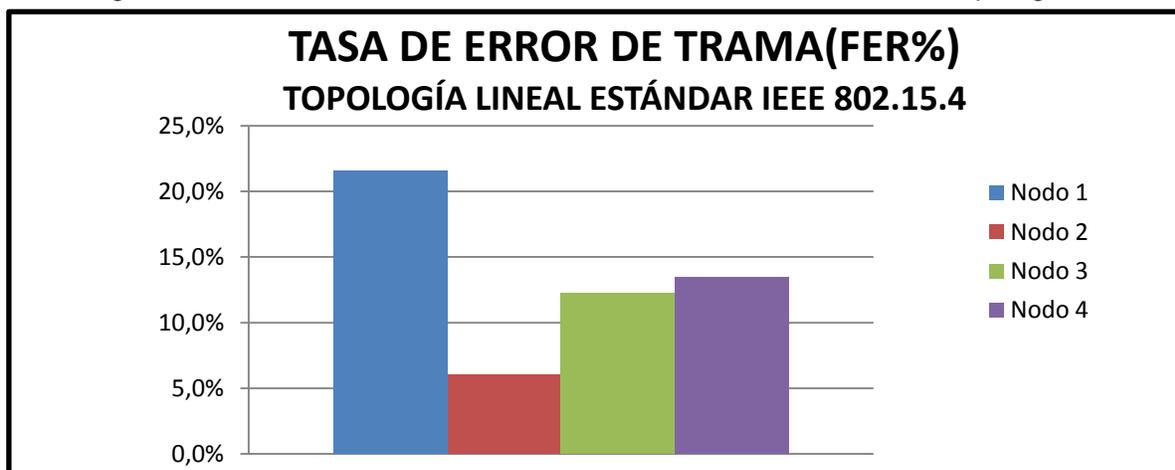


Figura 3.27. Tasa de error de trama del nodo 1 en la red para topología lineal, escenario No.1 - caso 2b.

En la figura 3.27 para la red con topología lineal se ve como el transmitir con una alta tasa y estar cerca del coordinador, como el caso del nodo 2, provoca un mejor desempeño, de aquí que su valor de la FER sea el más bajo en la red. Por el contrario para el nodo 1, al tener una tasa de transmisión baja y estar a una mayor distancia del coordinador, su desempeño es notablemente menor, cuyo valor de la FER es el mayor de todos los nodos en la red.

La figura 3.28 muestra la Tasa de Error de Trama de la red con topología en estrella para el estándar IEEE 802.15.4.

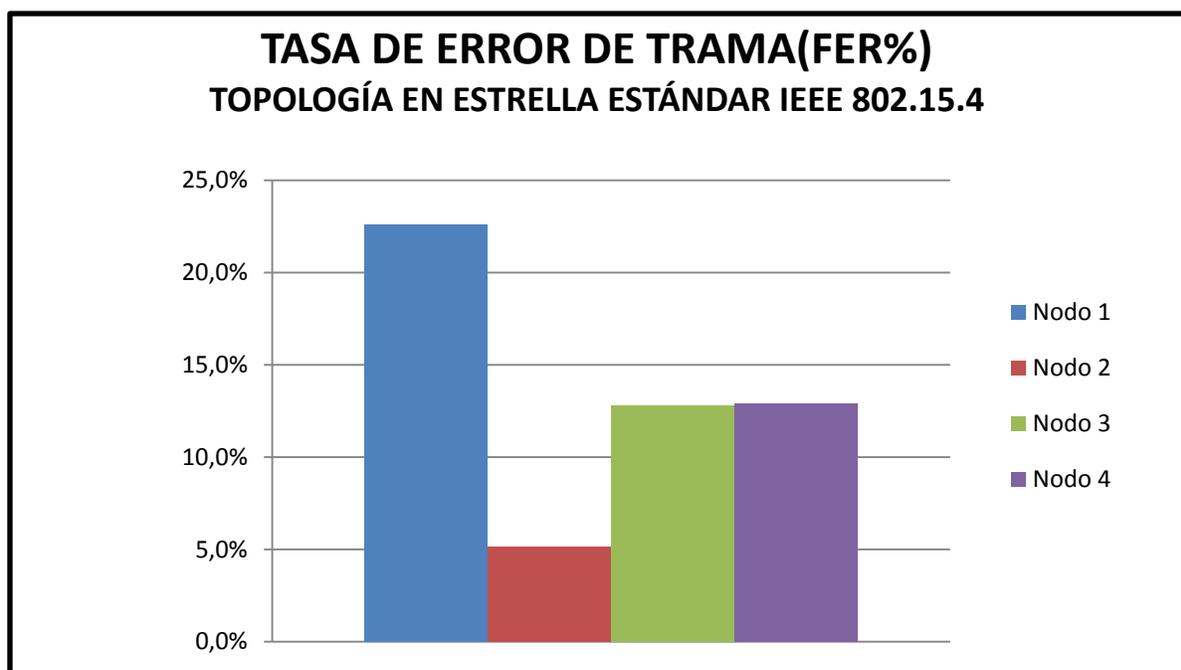


Figura 3.28. Tasa de error de trama de la red para topología en estrella, escenario No.1 - caso 2b.

Los resultados de la FER en la figura 3.28, muestra un comportamiento similar en comparación con la topología lineal, debido a que se manejan las mismas distancias de enlaces y tasas de transmisión.

La figura 3.29 muestra la Tasa de Error de Trama de la red con topología en árbol para el estándar IEEE 802.15.4.

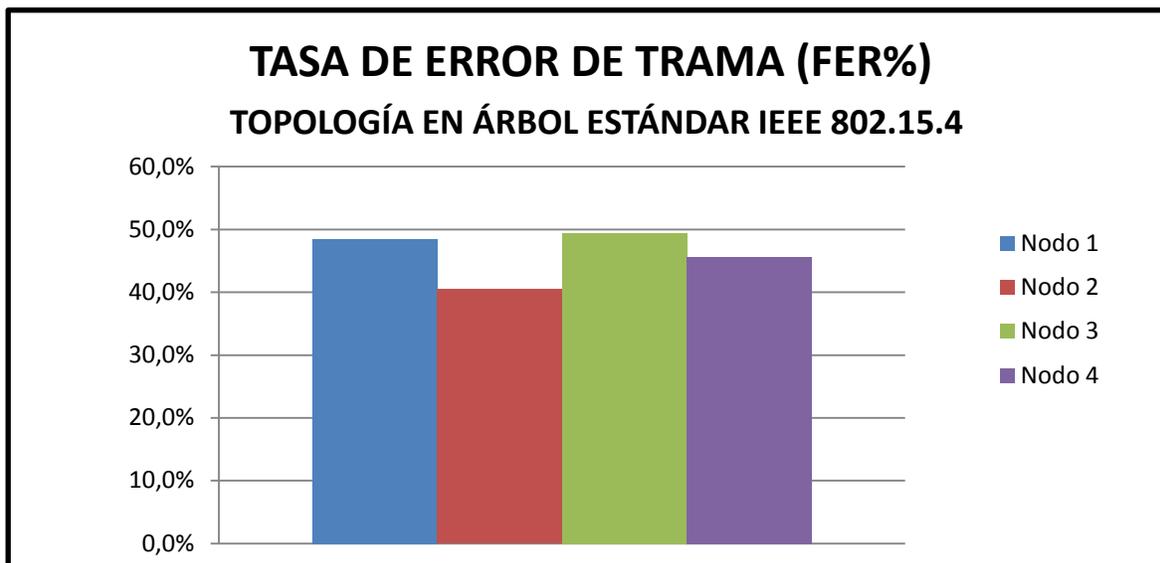


Figura 3.29. Tasa de error de trama de la red para topología en árbol, escenario No.1 - caso 2b.

La figura 3.29 muestra para la red BAN con topología en árbol, resultados extremadamente grandes de FER en comparación a la red con topología lineal y en estrella. Pues ninguno de sus nodos presenta un valor inferior al 22%, siendo este valor el máximo alcanzado por los nodos de las topologías de las figuras 3.27 y 3.28.

3.1.5.2. Escenario No.2. Estándar IEEE 802.15.6

3.1.5.2.1. Caso 1a. Distancias diferentes en cada topología, igual tasa de transmisión.

Al igual que para el escenario No.1 este caso se realiza ahora para el escenario No.2, pero solo se simulan la topología lineal y en estrella.

Las características de tasa de transmisión y distancias al nodo coordinador se muestran en la tabla 3.14.

Nodos	Tasa de Transmisión	Topología	
		Lineal	Estrella
Nodo 1: Nodo Sensor	10tramas/seg	1.414 metros	1.414 metros
Nodo 2: Nodo Sensor	10tramas/seg	0.707 metros	1.414 metros
Nodo 3: Nodo Sensor	10tramas/seg	0.707 metros	1.414 metros
Nodo 4: Nodo Sensor	10tramas/seg	1.414 metros	1.414 metros

Tabla 3.14. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, para topologías del escenario No.2 - caso1a.

• **Tráfico recibido**

La figura 3.30 muestra una reducción considerable del tráfico recibido para el estándar IEEE 802.15.6 con respecto al estándar IEEE 802.15.4 de la figura 3.7.

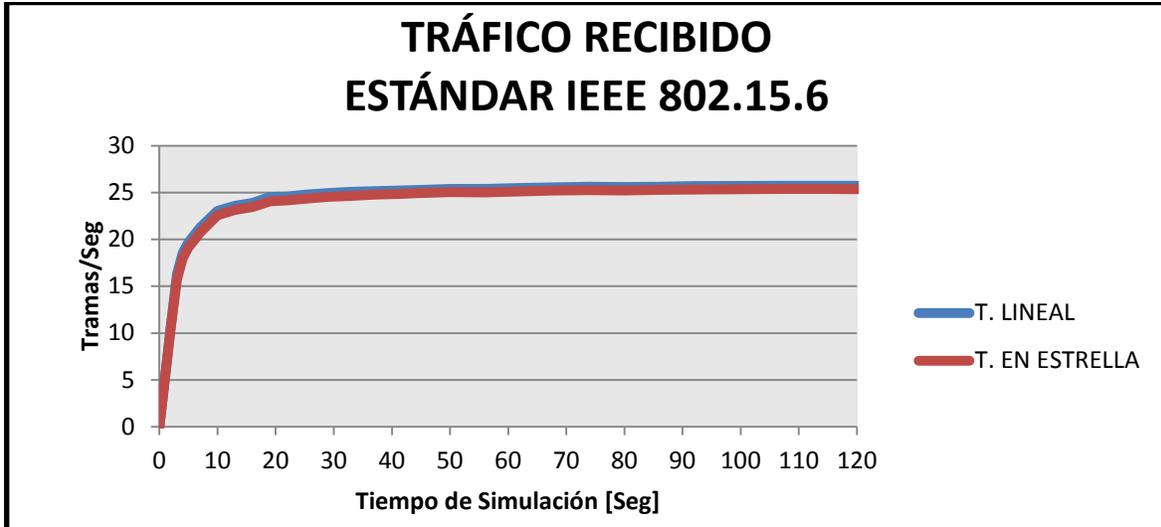


Figura 3.30. Tráfico Recibido en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso1a.

Los resultados responden a las características y distancias propias de la topología de red, pues cada una tiene tanto pérdidas de trayecto como interferencias diferentes, sin embargo la diferencia entre los resultados con las dos topologías no es tan marcada como con el estándar IEEE 802.15.4.

La figura 3.31 muestra el número de tramas recibidas exitosamente en el coordinador de la red, provenientes de cada uno de los nodos con la topología lineal y en estrella del escenario No.2 para el caso 1a.

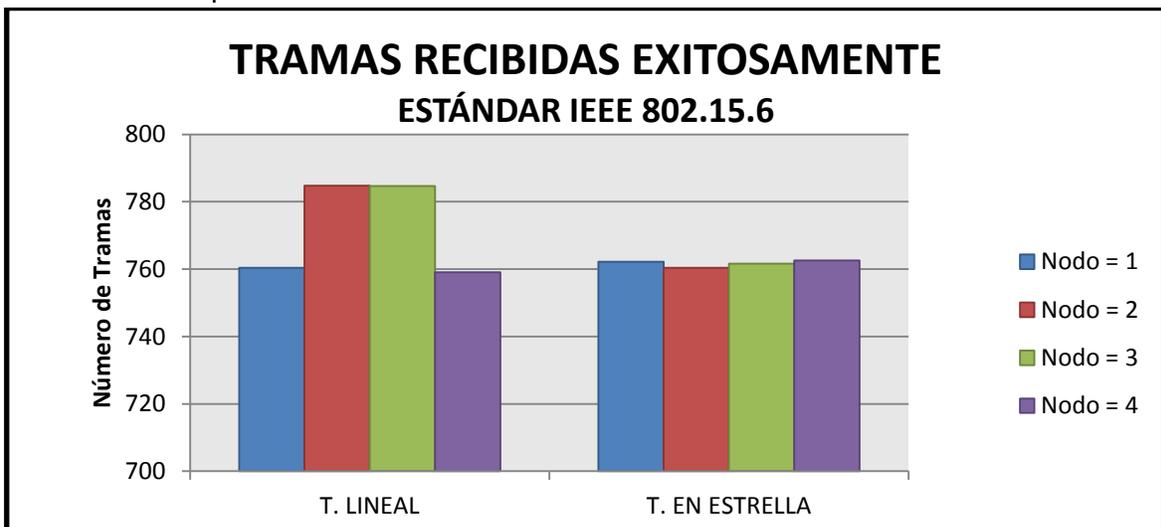


Figura 3.31. Tramas recibidas Exitosamente en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso1a.

Se observa como el número de tramas recibidas por cada uno de los nodos en la red es diferente con cada topología y responde directamente a su ubicación. Para la red con topología lineal, los nodos 2 y 3 los cuales se encuentran más cerca al coordinador, obtienen un mayor número de tramas exitosas y los nodos 1 y 4 ubicados a una mayor distancia del coordinador tienen un menor número de tramas recibidas. La red con topología en estrella, presenta un similar número de tramas recibidas por cada nodo, debido a que los nodos se encuentran a una misma distancia del coordinador.

- **Tramas Pérdidas**

En la figura 3.32, se observa como la red BAN con topología en estrella presenta un mayor número de tramas pérdidas, mostrando un menor desempeño de la misma.

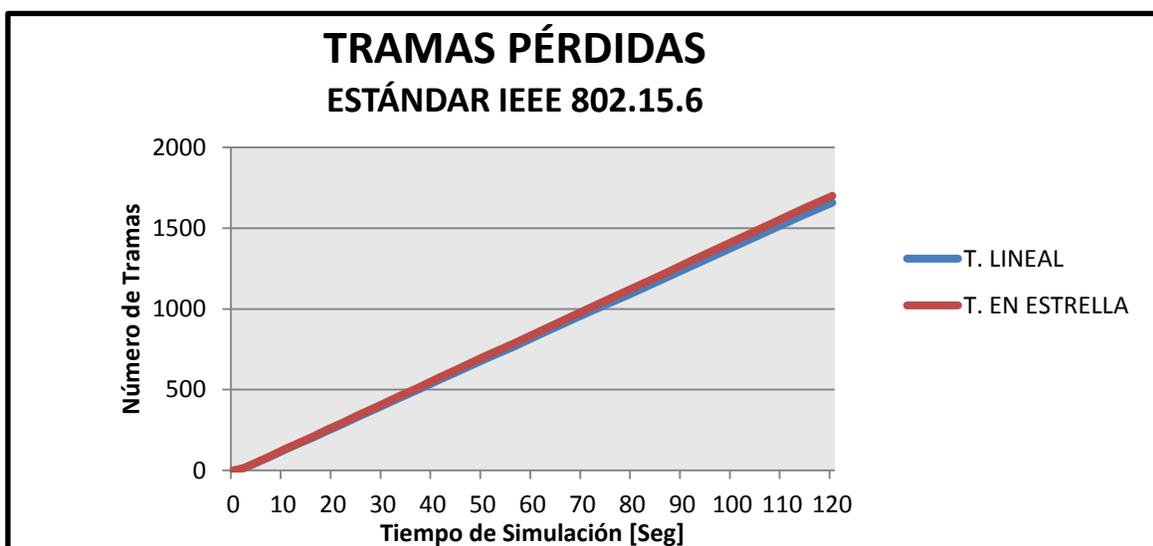


Figura 3.32. Tramas pérdidas de la red con las topologías, escenario No.2 - caso1a.

Si se compara este resultado con el caso 1a del escenario No.1 en la figura 3.9, se ve como el número de tramas pérdidas se incrementó significativamente con las dos topologías, indicando que con el estándar IEEE 802.15.6 se obtiene un desempeño de red menor en comparación al resultado obtenido con el estándar IEEE 802.15.4.

- **Throughput**

La figura 3.33 muestra el *Throughput* de la red BAN con las topologías seleccionadas para el estándar IEEE 802.15.6.

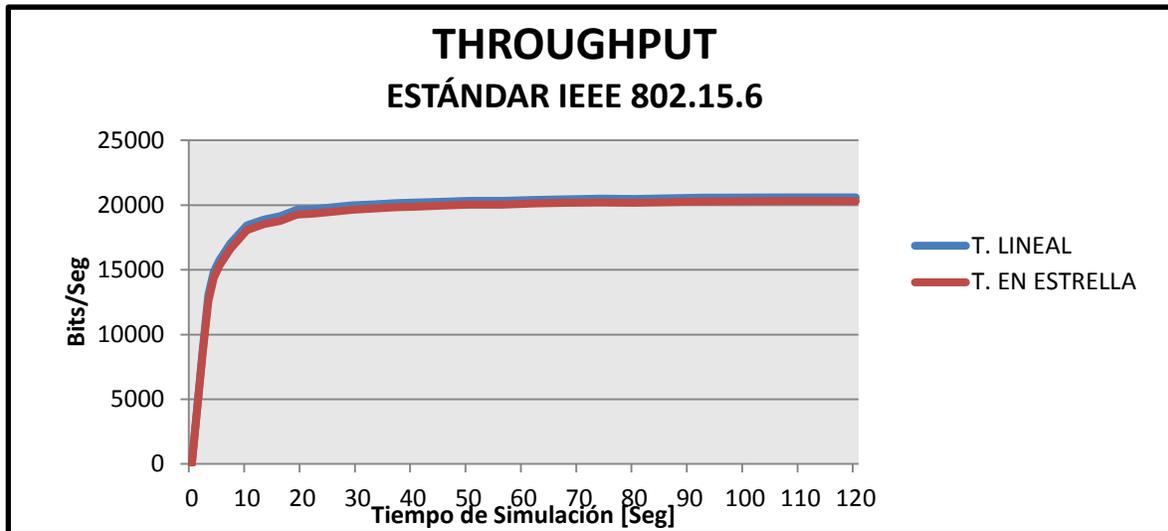


Figura 3.33. *Throughput* de la red con topologías del escenario No.2 - caso1a.

Al igual que en el escenario No.1 en la figura 3.10, la red con topología lineal presenta un mejor desempeño, sin embargo la diferencia con respecto a la red con topología en estrella no es tan marcada para el estándar IEEE 802.15.6, a pesar de tener las mismas condiciones en cuanto a distancia y tasa de transmisión.

Con el estándar IEEE 802.15.6, los resultados de *Throughput* son considerablemente más bajos, el valor con la topología lineal es de 20592.4 Bits/s y para la topología en estrella 20311.2 Bits/s, una reducción de más de 6000Bits/s, en comparación a los resultados del estándar IEEE 802.15.4 de la figura 3.10.

- FER

La figura 3.34 ilustra la Tasa de Error de Trama obtenida con el estándar IEEE 802.15.6.

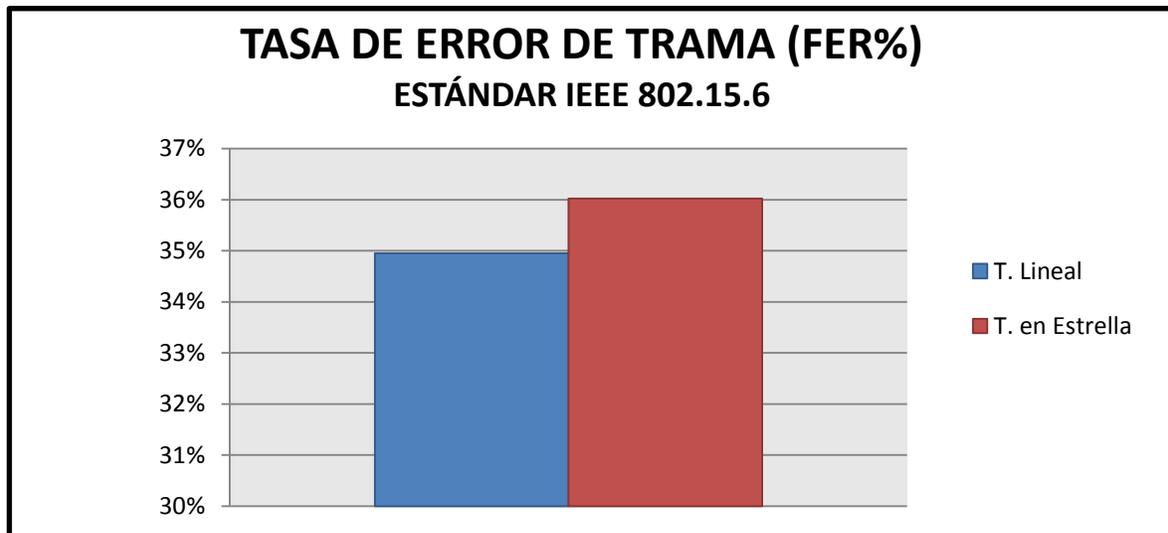


Figura 3.34. Tasa de error de Trama de la red para las topologías del escenario No.2 - caso1a.

El resultado mostrado en la figura 3.34 presenta un mayor valor de FER para la red con topología lineal, lo cual indica un mejor desempeño de la misma, ya que la disposición de sus nodos permite que se presenten menos pérdidas por trayecto. Aunque se encuentren uno tras de otro generando más interferencias, se siguen presentando mejores resultados con la topología lineal.

- **Latencia**

La figura 3.35 presenta el histograma de latencia de la red BAN con las dos topologías para el estándar IEEE 802.15.6.

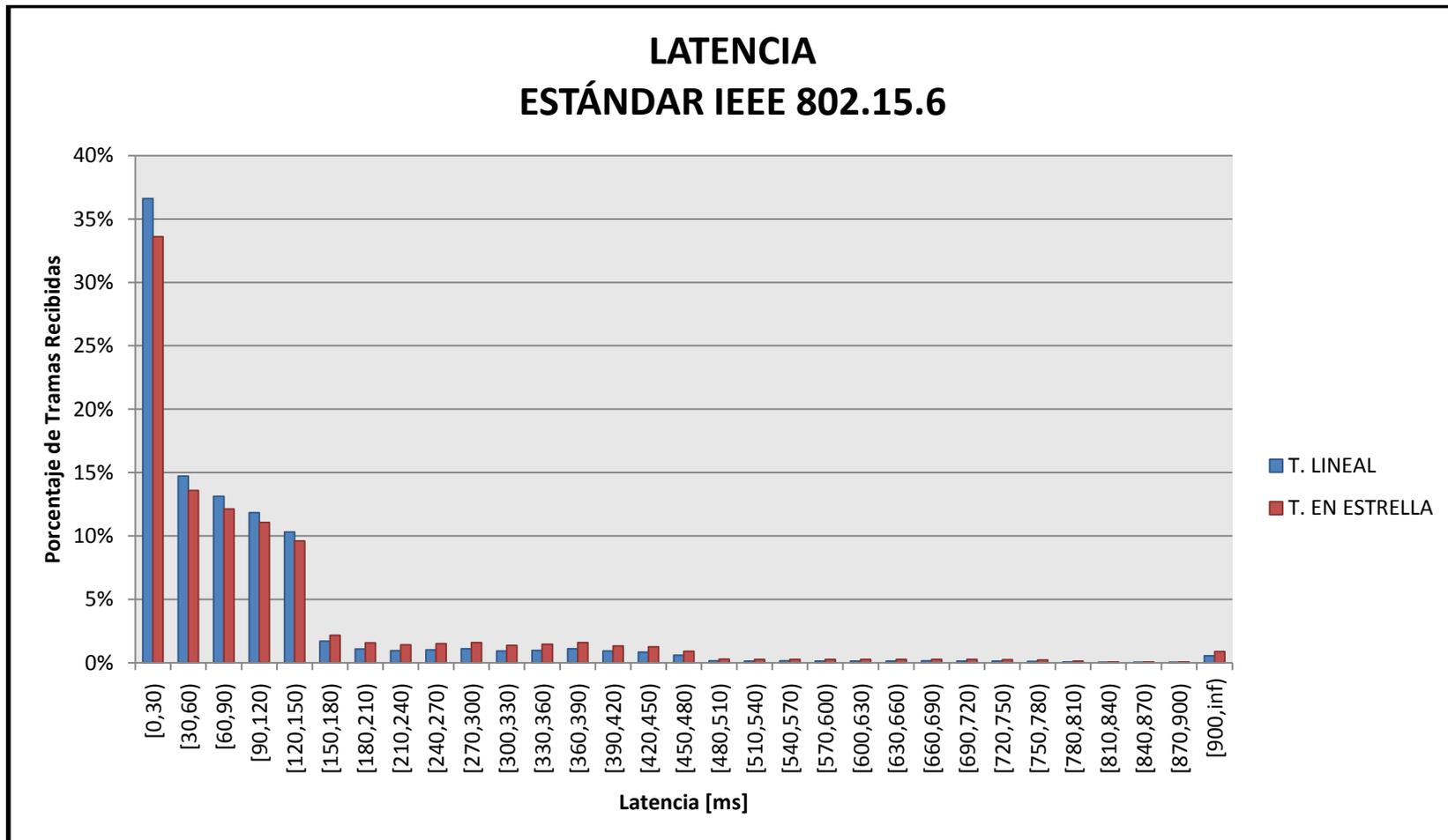


Figura 3.35. Latencia de tramas recibidas en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso 1a.

La tabla 3.15 obtenida a partir de la figura 3.35, muestra el porcentaje de tramas recibidas que no sobrepasan la latencia de 120ms; se observa como la red con topología lineal presenta un porcentaje del 87% de las tramas recibidas exitosamente con un retardo bajo y para la red con topología en estrella un porcentaje del 80%, indicando un mejor resultado para la topología lineal.

	Porcentaje de Tramas recibidas con latencia hasta 120ms
T. LINEAL	87%
T. EN ESTRELLA	80%

Tabla 3.15. Porcentaje de tramas recibidas en el coordinador de red.

3.1.5.2.2. *Caso 1b. Distancias diferentes en cada topología, diferente tasa de transmisión.*

La tabla 3.16 muestra las tasas de transmisión y distancia del enlace al coordinador de cada nodo en la red. Este es el mismo caso del escenario No.1 ahora aplicado en el escenario No.2.

Nodos	Tasa de Transmisión	Topología	
		Lineal	Estrella
Nodo 1: Nodo Sensor	10tramas/seg	1.414 metros	1.414 metros
Nodo 2: Nodo Sensor	45tramas/seg	0.707 metros	1.414 metros
Nodo 3: Nodo Sensor	45tramas/seg	0.707 metros	1.414 metros
Nodo 4: Nodo Sensor	45tramas/seg	1.414 metros	1.414 metros

Tabla 3.16. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, para topologías del escenario No.2 – caso 1b.

- **Tráfico Generado**

La figura 3.36 muestra el tráfico generado en la red BAN con las topologías del escenario No.2. Para el caso 1a con un tráfico final de 39,5 tramas/seg y para el caso 1b con un tráfico de 142,9 tramas /seg.

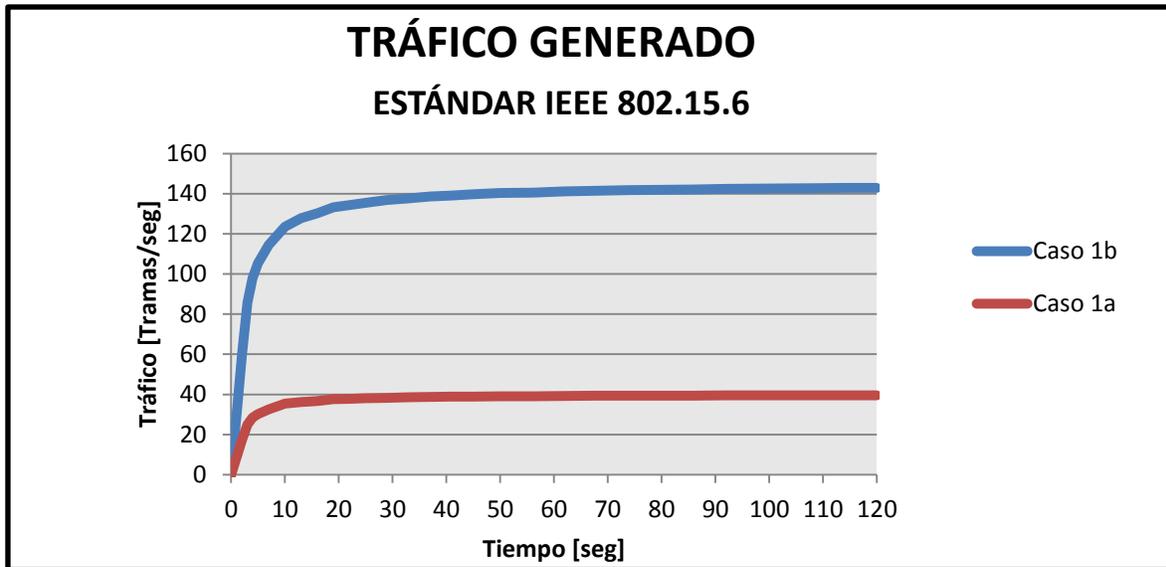


Figura 3.36. Tráfico generado en la red para cada topología, escenario No.2 - caso 1a y 1b.

- **Throughput**

Las figuras 3.37 y 3.38 muestran el *Throughput* del nodo 1 en la red con topología lineal y topología en estrella respectivamente, para el caso 1a y 1b.

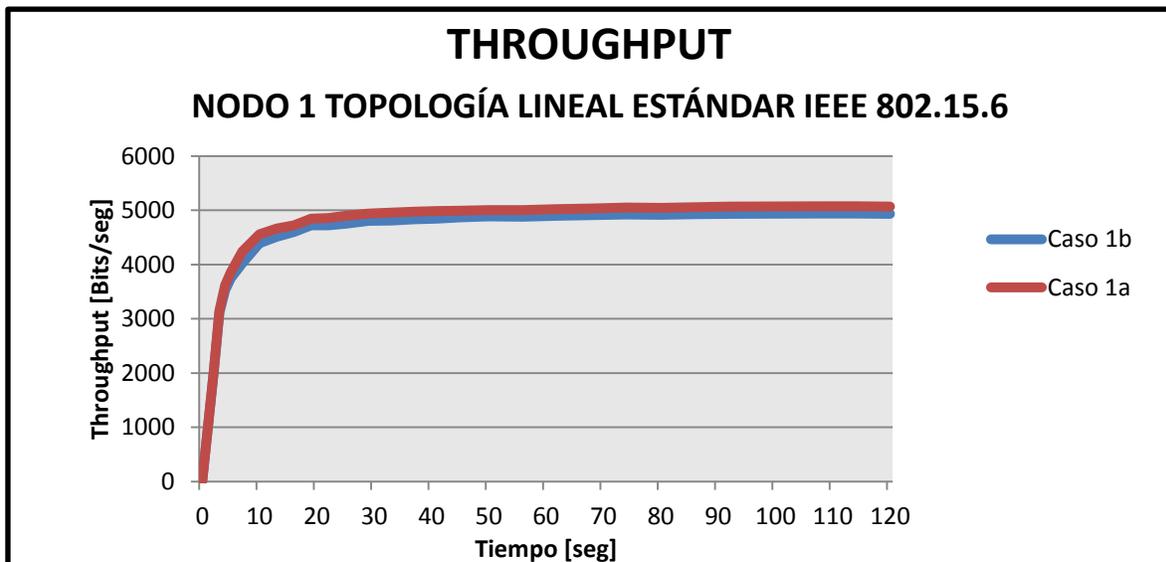


Figura 3.37. *Throughput* del nodo 1 de la red con topología lineal, escenario No.2 - caso 1a y 1b.

El caso 1b muestra un desempeño menor como consecuencia de incrementar el tráfico en la red, sin embargo la diferencia con el caso 1a, no es muy notable, lo cual indica que el estándar IEEE 802.15.6 es más robusto frente al flujo de grandes cantidades de datos en comparación al estándar IEEE 802.15.4, el cual mostraba una mayor diferencia cuando se incrementó el tráfico en la red en la figura 3.14.

La figura 3.38 muestra el *Throughput* del nodo 1 para la red BAN con topología en estrella.

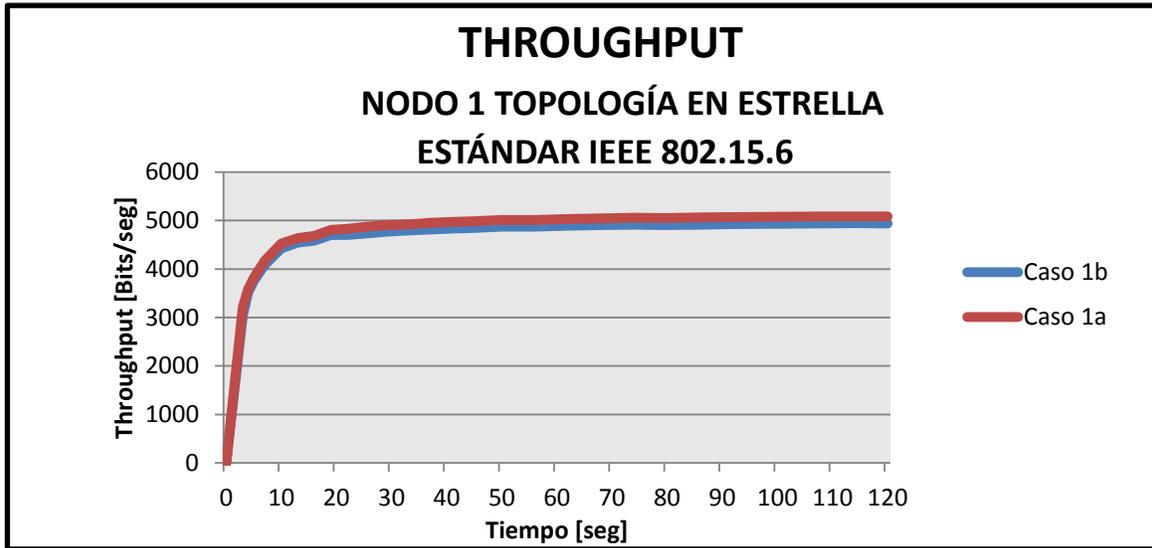


Figura 3.38. *Throughput* de la topología en estrella del escenario No.2 para el Caso 1a y caso 1b.

Al igual que en la figura 3.37, se observa un comportamiento similar, sin embargo se nota que el resultado para el caso 1b, presenta un menor *Throughput* en comparación con el caso 1a, concluyendo que la red con una topología en estrella, es más vulnerable a un gran tráfico, que con una topología lineal.

- FER

La figura 3.39 presenta los resultados de la FER para el nodo 1 en el caso 1a y 1b con las dos topologías del escenario No.2.

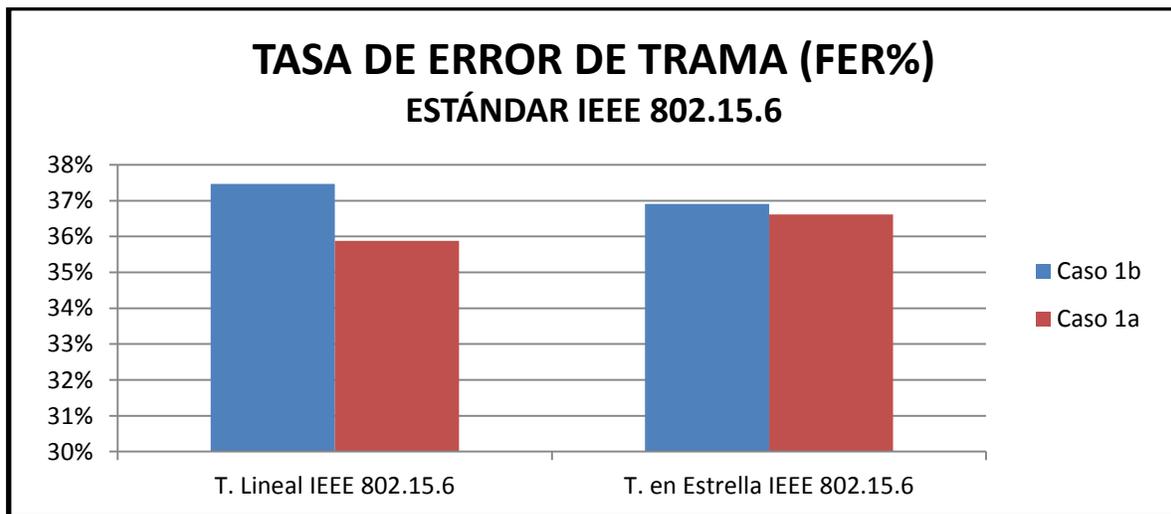


Figura 3.39. Tasa de error de trama del Nodo 1 en la red para las dos topologías, escenario No.2 - caso 1a y 1b.

En el caso 1a se observa como la red con topología lineal tiene un mejor desempeño que la red con topología en estrella, sin embargo, para el caso 1b al incrementar el tráfico en la red, dicha topología presenta un mayor deterioro en términos de tasa de error de trama. Estos resultados indican que una red BAN con topología lineal trabaja mejor con un tráfico bajo, por el contrario una red con topología en estrella responde mejor a grandes cantidades de datos.

3.1.5.2.3. Caso 2a. Distancias Iguales en cada topología, igual tasa de transmisión.

La tabla 3.17 muestra las tasas de transmisión y distancia del enlace al coordinador de cada nodo en la red; las distancias de los enlaces es la misma para las dos topologías del escenario No.2.

Nodos	Tasa de Transmisión	Topología	
		Lineal	Estrella
Nodo 1: Nodo Sensor	10tramas/seg	1.414 metros	1.414 metros
Nodo 2: Nodo Sensor	10tramas/seg	0.707 metros	0.707 metros
Nodo 3: Nodo Sensor	10tramas/seg	0.707 metros	0.707 metros
Nodo 4: Nodo Sensor	10tramas/seg	1.414 metros	1.414 metros

Tabla 3.17. Tasa de transmisión y distancia del enlace al coordinador para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.

- Tráfico Recibido

La figura 3.40 muestra para la red con topología lineal un tráfico de 25,74 tramas/seg y con topología en estrella un tráfico de 25,81 tramas/seg.

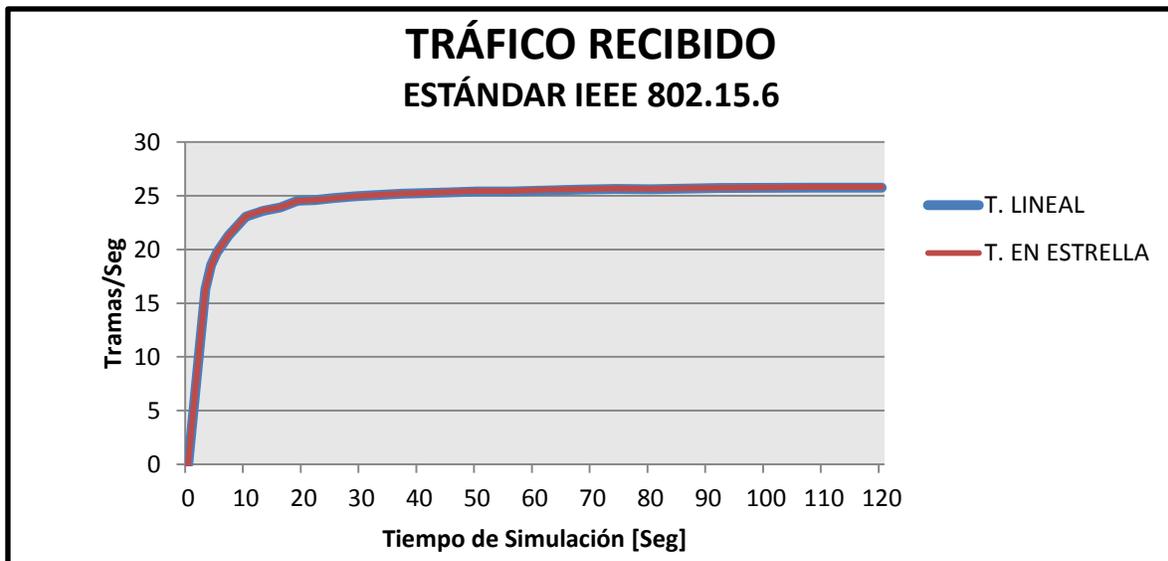


Figura 3.40. Tráfico recibido en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.

A diferencia del escenario No.1, se tienen un leve pero mayor tráfico recibido de la red con la topología en estrella. Ya que las distancias de los enlaces son iguales, estos resultados se deben a que el estándar IEEE 802.15.6 es más vulnerable a interferencias en comparación con el estándar IEEE 802.15.4, el cual para el mismo caso, figura 3.18, mostró un mejor desempeño con la topología lineal.

La figura 3.41 ilustra claramente como cada uno de los nodos de la topología en estrella, tienen un mejor desempeño que los nodos en la topología lineal, a pesar de tener la misma distancia de enlace al coordinador y la misma tasa de transmisión, esto indica que una red con una topología lineal tienen mayores interferencias, debido a que los nodos se encuentran uno detrás del otro, esto para el estándar IEEE 802.15.6.

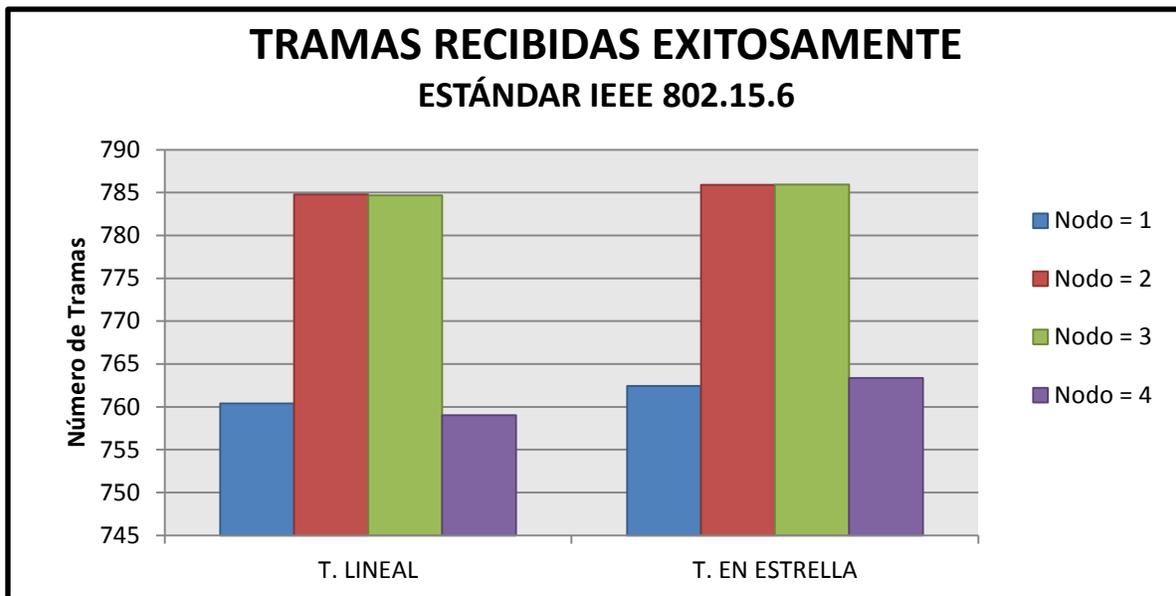


Figura 3.41. Tramas recibidas exitosamente en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.

- **Tramas Pérdidas**

La figura 3.42 muestra el número de tramas pérdidas de la red con las topologías del escenario No.2; el valor final con la topología en estrella es 1648,7 tramas pérdidas y con la topología lineal un valor de 1658, 2 tramas pérdidas.

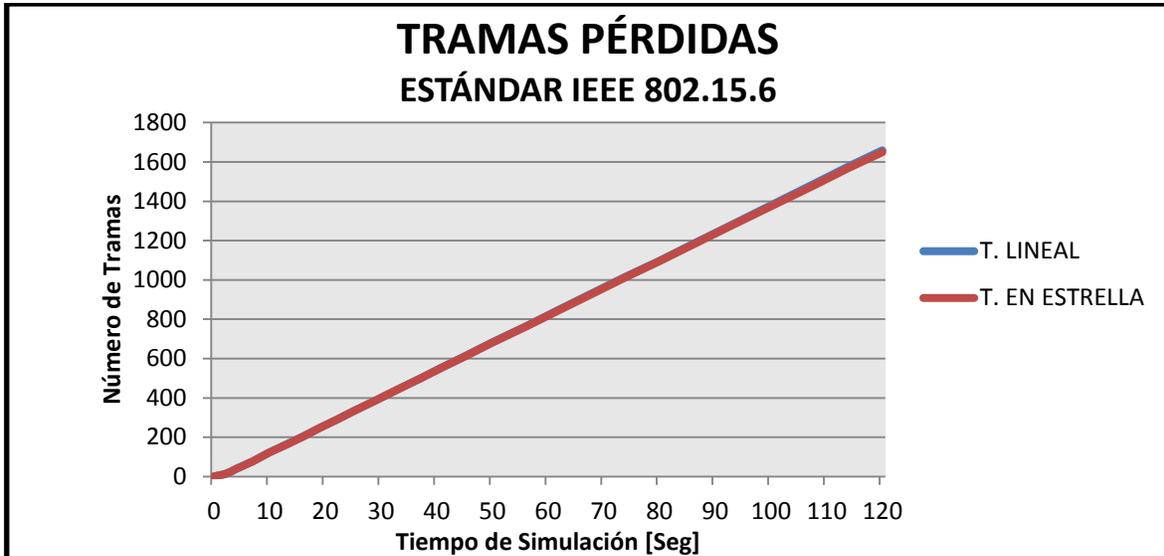


Figura 3.42. Tramas pérdidas en la red para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.

Al igual que los anteriores resultados, la red con topología en estrella presenta un mejor comportamiento, sin embargo, en comparación con el escenario No.1 para el mismo caso, se nota una gran reducción del desempeño, esto se debe a que con el estándar IEEE 802.15.6 la red se vuelve más vulnerable a interferencias que a pérdidas de trayecto.

- **Throughput**

La figura 3.43 muestra el *Throughput* de la red BAN con las dos topologías del escenario No.2 para el caso 2a.

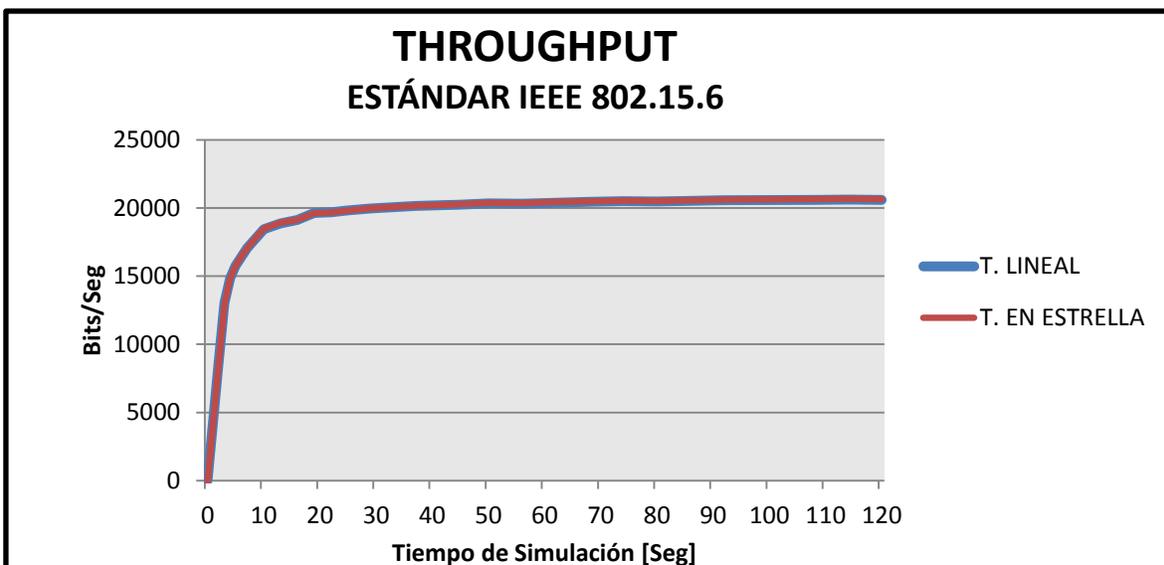


Figura 3.43. *Throughput* medido en la red para las topologías del escenario No.2 para el caso 2a.

Al igual que para los parámetros de desempeño como tráfico recibido y tramas pérdidas, de los resultados de *Throughput* se obtienen las mismas conclusiones, puesto que indica un comportamiento similar para las dos topologías, mostrando un leve pero mejor desempeño por parte de la red con una topología en estrella.

- **FER**

La figura 3.44 ilustra las Tasa de error de trama para la red BAN con las topologías del escenario No.2.

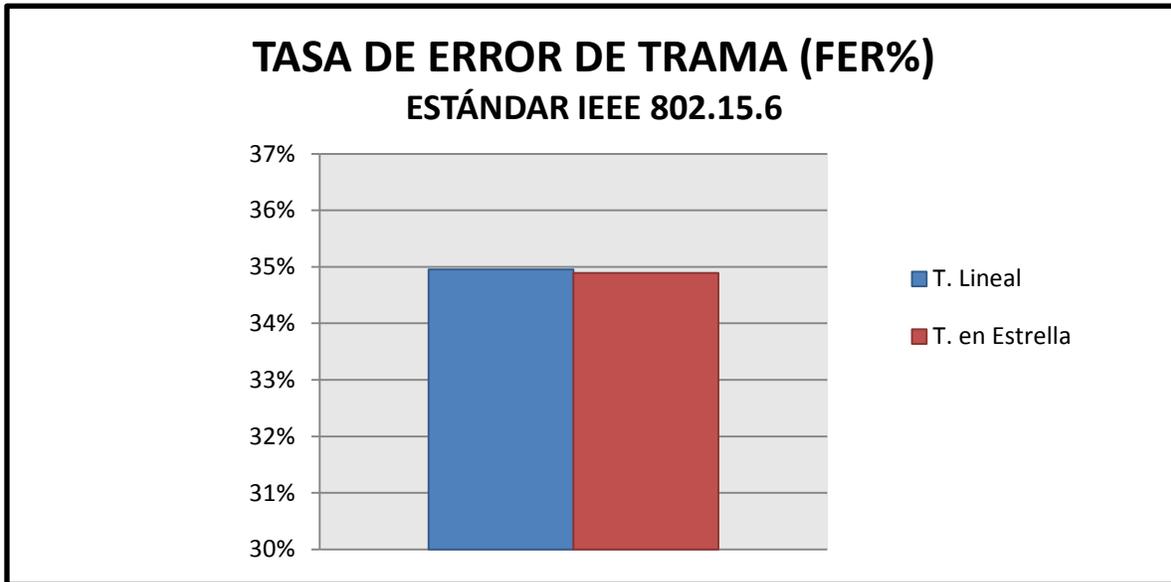


Figura 3.44. Tasa de error de trama de la red para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.

Al tener las mismas distancias de enlaces para las dos topologías, no se tienen en cuenta las pérdidas de trayecto, lo que indica que los resultados de la FER se deben a las interferencias causadas por los nodos adyacentes. La red con una topología lineal causa más interferencias en comparación a una red con topología en estrella.

- **Latencia**

La figura 3.48 muestra un histograma de latencia de la red con las dos topologías del escenario No.2 para el caso 2a.

Se observa como los resultados de latencia para la red con ambas topologías muy similar, lo que muestra que la latencia no se ve afectada por interferencias sino por la distancias de los enlaces desde los sensores al coordinador y el procesamiento de los datos en nodos repetidores.

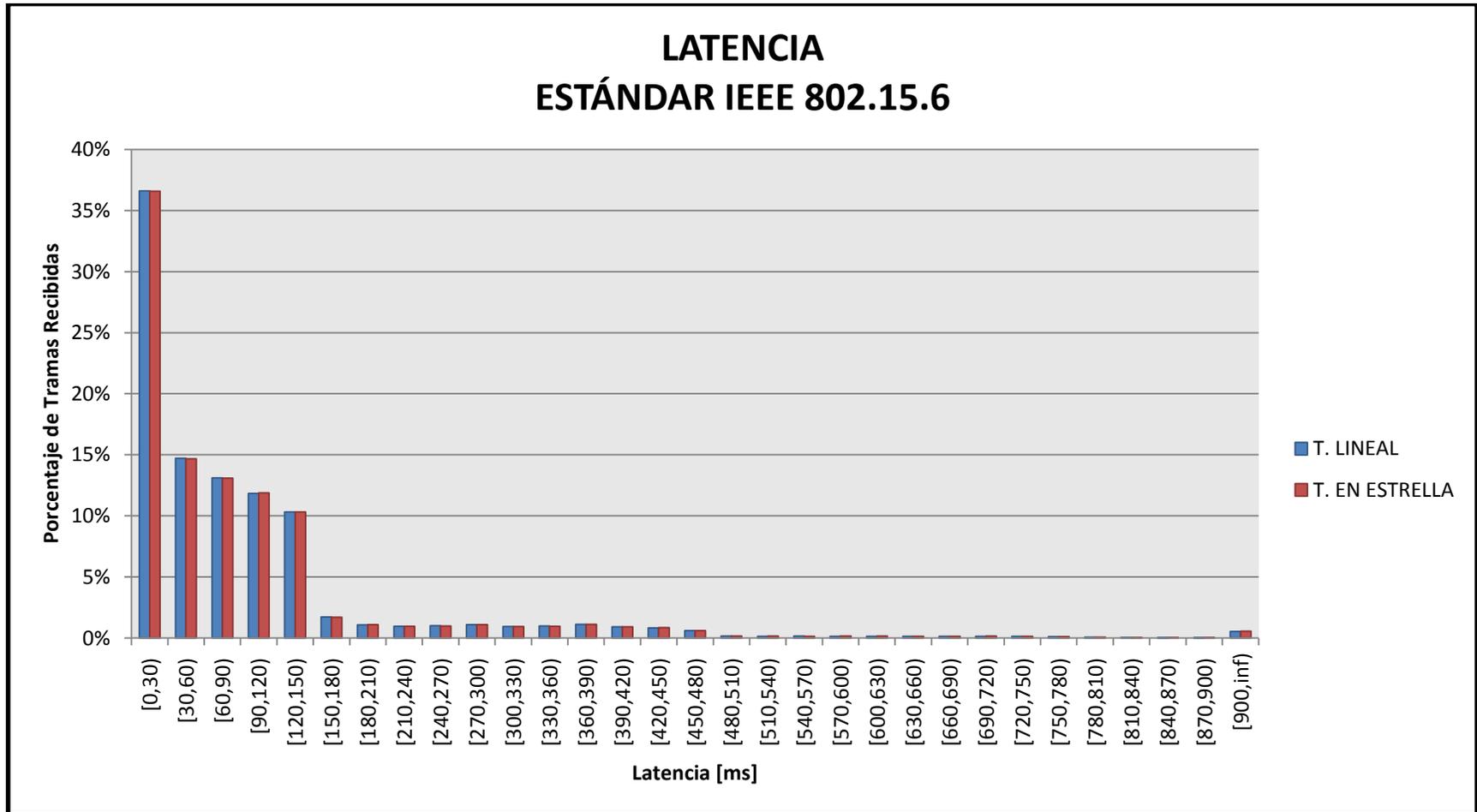


Figura 3.45. Latencia de tramas recibidas en el coordinador de red para las topologías del escenario No.2 - caso 2a.

3.1.5.2.4. *Caso 2b. Distancias iguales en cada topología, diferente tasa de transmisión.*

La tabla 3.18 muestra las distancias de los enlaces al Coordinador y las tasas de transmisión de cada nodo para el escenario No.2.

Nodos	Tasa de Transmisión	Topología
		Lineal, Estrella
Nodo 1: Nodo Sensor	10tramas/seg	1.414 metros
Nodo 2: Nodo Sensor	45tramas/seg	0.707 metros
Nodo 3: Nodo Sensor	10tramas/seg	0.707 metros
Nodo 4: Nodo Sensor	45tramas/seg	1.414 metros

Tabla 3.18. Tasas de transmisión y distancia del enlace desde el sensor al coordinador, escenario No.2 para el caso 2b.

- **Throughput**

La figura 3.46 muestra el *Throughput* de la red con topología lineal para cada uno de sus nodos. Los resultados indican que el comportamiento de la red para el estándar IEEE 802.15.6 es similar al estándar IEEE 802.15.4, sin embargo los valores de *Throughput* son significativamente más bajos sobre todo en los nodos con tasas de transmisión altas.

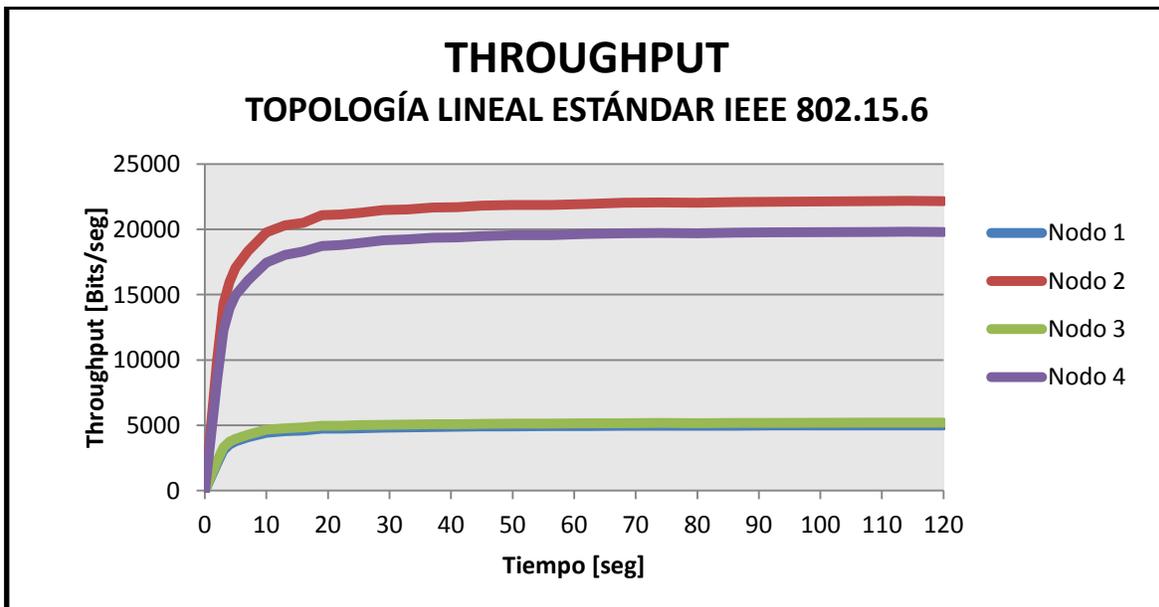


Figura 3.46. Throughput de la red con topología lineal del escenario No.2 - caso 2b.

La figura 3.47 muestra el *Throughput* de la red con topología en estrella. Se observa el mismo resultado que con la topología lineal; los nodos 1 y 3 tienen valores de *Throughput*

aproximados cuando se transmite a tasas bajas, aunque el uno se encuentre lejos y el otro cerca del coordinador, indicando que el estándar IEEE 802.15.6, no percibe la influencia de la distancia a la que se encuentre en el nodo sensor, es decir, las pérdidas por trayecto son menores.

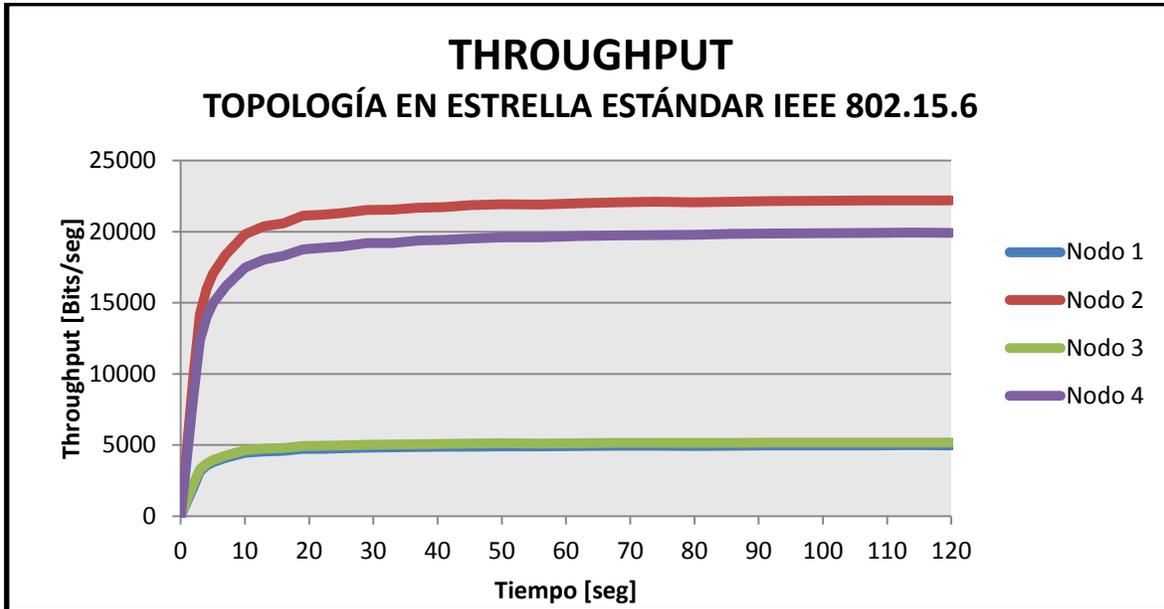


Figura 3.47. *Throughput* de la red con topología en estrella del escenario No.2 - caso 2b.

- FER

La figura 3.48 muestra la tasa de error de trama para la red BAN con topología lineal.

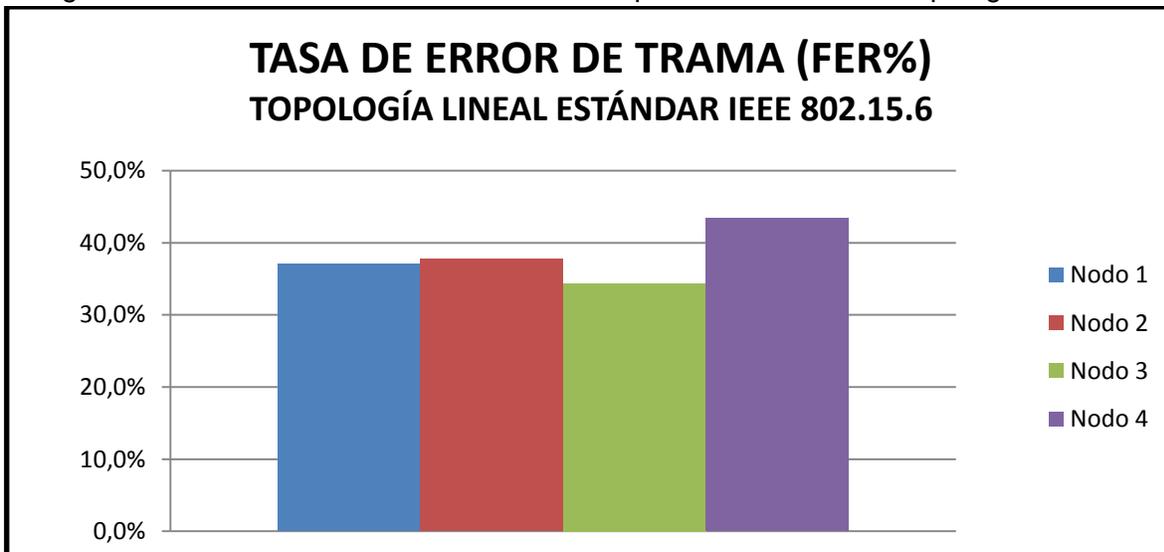


Figura 3.48. Tasa de error de trama de la red para topología lineal, escenario No. 2 - caso 2b.

A diferencia del escenario No.1 donde la menor FER la presenta el Nodo 2, en este escenario el menor valor se observa para el nodo 3, es así como el estándar IEEE 802.15.6 tienen un mejor comportamiento con nodos cercanos al coordinador, transmitiendo a tasas bajas. Por el contrario el nodo 4 obtiene el menor desempeño, siendo así que transmitir a tasas altas en enlaces de mayor distancia, presenta el peor de los casos.

La figura 3.49 muestra el resultado de la tasa de error de trama en la red BAN con topología en estrella del escenario No.2 para el caso 2b.

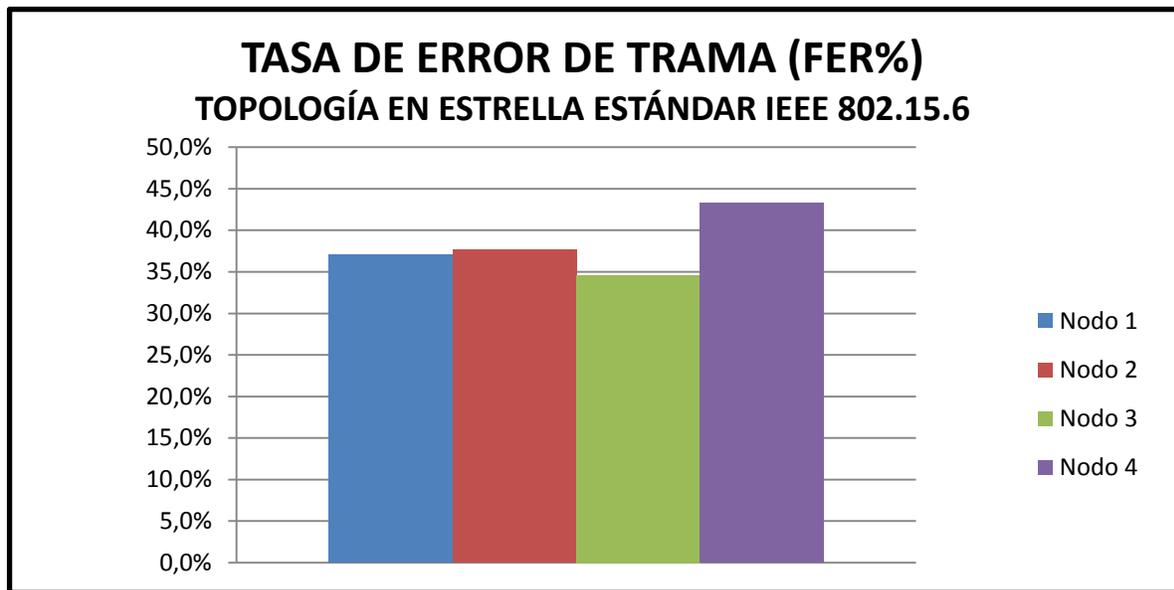


Figura 3.49. Tasa de error de trama de la red para topología en árbol del escenario No.2 - caso 2b.

De manera similar los nodos en la red con topología en estrella, presentan el mismo comportamiento de la red con topología lineal, mostrando una pequeña mejora del desempeño para los nodos 3 y 4.

Después de realizar los respectivos análisis para cada caso descrito, las tablas 3.19, 3.20 y 3.21 presentan los resultados de los parámetros de desempeño de red que son afectados por la Topología física. En cada tabla se muestran los casos de los escenarios en los cuales se puede hacer una comparación.

La tabla 3.19 muestra los valores finales de los parámetros de desempeño para los casos 1a y 2a en los dos escenarios de simulación.

	Topología	Tráfico Recibido [Tramas/seg]	Tramas Pérdidas	Throughput [Bits/seg]	FER%
Escenario No.1 Estándar IEEE 802.15.4					
Caso 1a	Lineal	35,77	460,31	28619,87	9,67%
	Estrella	33,69	709,81	26953,90	14,86%
	Árbol	30,02	1143,40	24015,83	24,19%
Caso 2a	Lineal	35,77	460,31	28619,87	9,67%
	Estrella	35,76	461,81	28611,50	9,66%
	Árbol	34,76	581,40	27807,60	12,26%
Escenario No.2 Estándar IEEE 802.15.6					
Caso 1a	Lineal	25,74	1658,22	20592,40	34,95%
	Estrella	25,39	1699,59	20311,27	36,02%
Caso 2a	Lineal	25,74	1658,22	20592,40	34,95%
	Estrella	25,81	1648,77	20651,23	34,89%

Tabla 3.19. Valores finales de los parámetros de desempeño para los casos 1a y 2a en los dos escenarios.

De la tabla 3.19 y el análisis de la ejecución de los casos de simulación caso 1a y caso 2a se tienen para cada parámetro de desempeño las siguientes conclusiones:

Tráfico Recibido

- Los resultados del tráfico recibido en el coordinador de la red con el estándar IEEE 802.15.4, son mejores en comparación a los resultados obtenidos con el estándar IEEE 802.15.6.
- El mejor desempeño con respecto a tráfico recibido se obtuvo con la red con topología lineal, esto para ambos escenarios.
- El mejor valor de tráfico recibido en el escenario No.1 y escenario No.2, se presenta para la red con topología lineal, gracias a los nodos cercanos al coordinador, indicando que la distancia del enlace es importante para garantizar un buen desempeño de red.
- En el Escenario No.2 para el caso 1a, se presenta para la red con topología en estrella un resultado similar que con la topología lineal, a pesar de tener todos sus nodos ubicados lejos del coordinador, indicando que para el estándar IEEE 802.15.6 no se tienen pérdidas de trayecto significativas como con el estándar

IEEE 802.15.4, en donde sí se observa una gran diferencia de los resultados para las dos topologías.

Tramas Pérdidas

- Para el estándar IEEE 802.15.4 la topología en árbol, muestra el mayor número de tramas pérdidas con un valor de 1143, por otro lado la topología lineal con un valor de 460.31 obtuvo el menor valor.
- Para el caso 1a del escenario No.1 la cantidad de tramas pérdidas con las diferentes topologías difieren significativamente, mostrando que con una topología cuyos enlaces sean de mayor alcance, se obtiene un efecto negativo en el desempeño de la red BAN, pues las pérdidas de trayecto dependen directamente de las distancias de sus enlaces.
- Para el caso 2a del escenario No.1, se muestra el menor número de tramas pérdidas para la red con topología lineal, a pesar de que para todas las topologías se tengan las mismas distancias de enlaces de los nodos sensores al coordinador.

Throughput

- Los resultados más bajos de *Throughput* se obtienen en el Escenario No.2, esto muestra que una red operando con el estándar IEEE 802.15.6 presenta un menor desempeño en comparación a una red con el estándar IEEE 802.15.4.
- En los dos escenarios la distancia de los enlaces, refleja un impacto en el desempeño de red. Pues en ambos escenarios, los resultados de *Throughput* mejoran cuando se disminuye la distancia de los sensores al coordinador.
- En el caso 2a del escenario No.2, para la topología en estrella se evidencia un mejor desempeño que en la topología lineal, fundamentalmente por se presenta una menor interferencia entre los nodos.
- El *Throughput* es uno de los parámetros de red más sensible al cambio de topología, pues se evidencia una diferencia marcada de los resultados para este parámetro.

FER

- En el escenario No.1 para el caso 1a, la red con topología en árbol tiene el mayor porcentaje de tasa de error de trama y esto se debe en gran medida a la cobertura de la que se dispone el trabajar con esta topología.
- El caso 2a muestra que el valor de la FER de la red con topología en árbol se disminuye a la mitad, en comparación con el caso 1a, esto en razón a las cortas distancias de los enlaces que se ven menos afectados por pérdidas de trayecto.

- La topología en árbol del escenario No.1 para el caso 2a, a pesar de tener una misma distancia de sus enlaces que el resto de las topologías, hace que la red presente un valor de FER elevado, esto se explica por la presencia de nodos repetidores, los cuales incrementan tanto las interferencias como el procesamiento.
- Al igual que el *Throughput*, la FER es uno de los parámetros que más se impacta por el cambio de la topología de red.

La tabla 3.20 muestra una comparación de los resultados del caso 1a y el caso 1b para los parámetros de desempeño del Nodo 1 de la red con todas las topologías.

	Topología	Tráfico Generado	Tráfico Recibido [Tramas/seg]	Tramas Pérdidas	Throughput [Bits/seg]	FER%
Escenario No.1 Estándar IEEE 802.15.4						
Caso 1a Nodo 1	Lineal	39,61	8,52	166,15	6813,00	13,98%
	Estrella	39,61	8,39	180,99	6715,23	15,00%
	Árbol	39,60	7,41	296,71	5928,19	25,14%
Caso 1b Nodo 1	Lineal	143,20	7,33	308,36	5860,57	25,33%
	Estrella	143,18	7,15	329,93	5717,87	27,37%
	Árbol	142,21	4,09	692,88	3270,98	57,94%
Escenario No.2 Estándar IEEE 802.15.6						
Caso 1a Nodo 1	Lineal	39,56	6,34	426,29	5069,20	35,88%
	Estrella	39,55	6,35	424,47	5081,27	36,61%
Caso 1b Nodo 1	Lineal	142,92	6,17	445,82	4934,30	37,46%
	Estrella	142,87	6,18	445,24	4940,27	36,91%

Tabla 3.20. Valores de parámetros de desempeño del nodo 1 para el Caso 1a y 1b de los dos escenarios.

De la tabla 3.20 se tienen las siguientes conclusiones:

- La cantidad de tráfico generado es similar para todas las topologías y esto se aplica para los dos casos de cada escenario, sin embargo la pequeña variación se debe a que el simulador pretende ser lo más real posible, si este fuera ideal el tráfico generado para el caso 1a sería 40 tramas/seg, pues cada nodo transmite con una tasa de 10 tramas /seg y para el caso 1b de 145 tramas/seg, ya que uno de los nodos trasmite a 10 tramas/seg y el resto a 45 tramas/seg.
- Los resultados en los valores de los parámetros de desempeño para el caso 1b, son menores en comparación con los obtenidos para el caso 1a, esto se debe al mayor volumen de datos que se envían en el caso 1b

- En los casos 1a y 1b en el escenario No.1, se observa como la red con topología en árbol, presenta un menor desempeño para todos los parámetros de la tabla 3.20. Dado que los nodos repetidores causan más interferencias y pérdidas por procesamiento, en especial para el caso 1b, donde se genera un mayor tráfico en la red.
- La tabla 3.20 para el estándar IEEE 802.15.6, presenta resultados similares de los casos 1a y 1b en comparación al estándar IEEE 802.15.4, cuyos resultados evidencian un gran deterioro del desempeño frente al incremento del tráfico. Esto indica un mejor manejo de tráfico y procesamiento de datos, cuando se trabaja con el estándar IEEE 802.12.6.

La tabla 3.21 ilustra los resultados de los parámetros de desempeño del caso 2b, para los dos escenarios.

	Nodos Sensores	Tasa de Transmisión [tramas/seg]	Distancia al Coordinador [metros]	Throughput [Bits/seg]	FER%
Escenario No.1, Caso 2b					
Estándar IEEE 802.15.4					
Lineal	Nodo 1	10	1,414	6201,53	21,6%
	Nodo 2	45	0,707	33431,90	6,1%
	Nodo 3	10	0,707	6961,16	12,2%
	Nodo 4	45	1,414	30605,53	13,5%
Estrella	Nodo 1	10	1,414	6112,40	22,6%
	Nodo 2	45	0,707	33742,26	5,2%
	Nodo 3	10	0,707	6900,53	12,8%
	Nodo 4	45	1,414	30883,30	12,9%
Árbol	Nodo 1	10	1,414	4033,19	48,4%
	Nodo 2	45	0,707	19845,90	40,4%
	Nodo 3	10	0,707	3954,14	49,5%
	Nodo 4	45	1,414	17986,73	45,6%
Escenario No.2, Caso 2b					
Estándar IEEE 802.15.6					
Lineal	Nodo 1	10	1,414	4989,13	37,1%
	Nodo 2	45	0,707	22157,86	37,7%
	Nodo 3	10	0,707	5193,76	34,4%
	Nodo 4	45	1,414	19802,83	43,4%
Estrella	Nodo 1	10	1,414	4983,36	37,1%
	Nodo 2	45	0,707	22183,13	37,7%
	Nodo 3	10	0,707	5178,90	34,6%
	Nodo 4	45	1,414	19917,56	43,3%

Tabla 3.21. Valores de los parámetros de desempeño del nodo 1 para el caso 2b en los dos escenarios.

De la tabla 3.1 se obtiene las siguientes conclusiones.

Escenario No.1, Estándar IEEE 802.15.4

- El nodo 1 del escenario No. 1, de las topologías lineal y en estrella presenta los mayores valores de FER, lo cual es resultado de transmitir a bajas tasas sobre distancias grandes con el estándar IEEE 802.15.4, situación que no sería recomendable.
- El Nodo 1 de red con topología en estrella tiene un valor de FER más alto que con topología lineal, demostrando que la ubicación de los nodos de esta topología, incrementa el efecto de las interferencias en la red.
- El Nodo 2 en el escenario No.1, tiene mejores resultados de desempeño, esto demuestra que el operar a tasas de transmisión altas y una distancia de enlace corta, mejora considerablemente el desempeño de la red.
- La topología en árbol muestra para el Nodo 3 un valor elevado de la FER, el cual tiene una distancia corta y una tasa de transmisión baja, lo que indica un gran deterioro del desempeño de la red al con dichas características.

Escenario No.2, Estándar IEEE 802.15.6

- El nodo 3 en las dos topologías del escenario No.2, presenta el mejor desempeño en cuanto a *Throughput* y FER, gracias a que opera con bajas tasas de transmisión a cortas distancias. De aquí que se recomienda trabajar con estas características para el estándar IEEE 802.15.6.
- El peor de los resultados lo obtiene el Nodo 4, el cual se encuentra a una distancia del coordinador mayor que el resto de nodos y operando con una tasa de transmisión alta. Por tanto no es recomendable tener nodos con estas características, cuando se trabaje con el estándar IEEE 802.15.6.

Este capítulo presentó los resultados arrojados por la simulación en los 2 escenarios para dos casos, como se describieron en el plan de pruebas. Se realizó el análisis de los principales parámetros de desempeño de red y se concluyó que los dos que presentan un mayor impacto al variar la topología física son el *Throughput* y la FER.

El siguiente capítulo presenta conclusiones generales del desarrollo del proyecto, trabajos futuros y recomendación relacionadas a la implementación de redes BAN.

4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros. Las conclusiones se basan en los objetivos propuestos y en el resultado de su desarrollo. Las recomendaciones se dan acerca de la metodología de trabajo y los trabajos futuros con respecto a las herramientas de simulación, la topología física de red, la simulación y sus resultados.

4.1. CONCLUSIONES

4.1.1. Respecto a la topología física de red

- Los estándares IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6 se impactan de manera diferente en su desempeño, dependiendo de las topologías usadas, siendo más evidente su efecto en el estándar IEEE 802.15.6.
- La red con topología lineal obtuvo el mejor desempeño, en términos de tráfico recibido, tramas perdidas, *Throughput* y FER, ya que tiene nodos más cercanos al coordinador, presentando menos pérdidas por trayecto.
- El desempeño de la red con topología en árbol va ligado al área de cobertura que se ofrezca, es así como para una pequeña área presenta mejores resultados tanto de *Throughput* como de FER.
- La red BAN con topología en árbol tuvo los mejores resultados en cuanto a latencia; sus nodos repetidores ayudan a descongestionar el tráfico de la red, pudiendo ser utilizada para aplicaciones que demanden una alta capacidad de procesamiento con baja latencia.
- Las redes BAN con topologías lineal y en estrella tuvieron un mejor comportamiento frente a un alto tráfico. por el contrario, el desempeño de la red con topología en árbol se vio drásticamente afectado.
- Para el estándar IEEE 802.15.4, los mejores resultados de los parámetros de desempeño se obtuvieron con enlaces cortos y con tasas de transmisión altas, a diferencia del estándar IEEE 802.15.6 que obtuvo mejores resultados con enlaces cortos pero a tasas de transmisión bajas.

4.1.2. Respeto al Desarrollo de la Simulación

- Una adecuada exploración de las herramientas de simulación, evita que se presenten problemas y limitaciones al momento de abordar el plan de pruebas con el cual será posible obtener resultados.
- La simulación con la herramienta Castalia debe realizarse mediante comandos por línea de código, ya que no se cuenta con una interface gráfica que ayude a este proceso. Esto implica que los errores que se puedan tener al momento de digitar el código, solo se pueden apreciar cuando ya se allá ejecutado la simulación.
- La simulación de los escenarios con castalia, requiere crear archivos que describan los parámetros técnicos, tales como la Topología, la técnica de acceso, el comportamiento del canal, protocolos a utilizar, medidas que se desean hacer, etc.
- Una vez realizada la simulación, si se quiere realizar cambios en alguno de los parámetros técnicos, se debe configurar y ejecutar el escenario por completo, lo cual no es difícil de hacer, pero sí muy dispendioso.
- Castalia presenta los resultados de las simulaciones mediante archivos de texto, estos se observan mediante herramientas de Ubuntu o se exportan para trabajar en programas de cálculo como Excel.
- Castalia facilita la combinación de módulos de simulación, realizar pruebas simultaneas y ejecutar un gran número de repeticiones, pero se debe disponer de un equipo con gran capacidad de procesamiento.

4.1.3. Respeto a los Resultados de la Simulación

- En los resultados de las redes con topología lineal y en estrella, se aprecia como la selección del estándar impacta de manera considerable en el desempeño de la red. Se puede ver como el estándar IEEE 802.15.4 trabaja mejor con tasas de transmisión altas y el estándar IEEE 802.15.6 con tasas bajas.
- En los estándares IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6 los mejores resultados de desempeño se obtienen con una topología lineal.
- De los resultados obtenidos de la redes con nodos operando a tasas de transmisión altas, se observa que es necesario disponer de enlaces cortos, ya que la mayoría de tramas se pierden en el trayecto del enlace.
- En el estándar IEEE 802.15.4 el peor de los resultados se obtuvo para la topología en árbol, en especial para los nodos cuya tasa de transmisión es baja y se

encuentran a una distancia cercana del coordinador, pues es infructuoso tener un repetidor para enlaces cortos.

- El peor de los resultados para los casos de simulación con el estándar IEEE 802.15.6 se presenta cuando se tiene nodos con tasas de transmisión altas en un enlace de gran alcance, pues se tienen mayores pérdidas de trayecto.
- En una red BAN la ubicación de los nodos es un aspecto clave para optimizar el desempeño de red, debido a que su disposición influye en las pérdidas de trayecto, la variación temporal en el canal y en las interferencias con el resto de nodos.

4.2. RECOMENDACIONES

- Es importante definir una metodología de trabajo y simulación, pues está permite desarrollar el proyecto de una manera clara, estratégica y concisa.
- Se debe realizar un estudio detallado de las características de la herramienta de simulación, en donde se pueda determinar si se cumple con los requisitos necesarios para la solución del problema planteado, evitando inconvenientes en el momento de realizar las pruebas.
- Para seleccionar la herramienta adecuada, se debe tener en cuenta que se pueda manipular fácilmente, cuente con interfaz gráfica, permita la fácil configuración de los escenarios y de ser posible se puedan hacer cambios en tiempo real.
- Es necesario conocer las versiones de la herramienta de simulación, pues para este trabajo se utilizó un módulo que solo se encontraba en la versión más reciente de Castalia.
- Cuando se trabaje en herramientas de código, es recomendable realizar comentarios con el fin de mantenerlos organizados describiendo el significado de las líneas. De esta forma se evitan errores y se puede realizar cambios y pruebas mucho más rápido.
- De ser posible contar con un equipo de buenas capacidades y que cumpla con los requerimientos del software seleccionado, pues esto puede ayudar a que se tengan resultados óptimos y lo suficientemente rápido.

4.3. TRABAJOS FUTUROS

- Una de las principales características de un BAN es la facilidad de movimiento que permite al usuario. Se propone realizar un estudio del impacto de la topología en el desempeño de la red con condiciones de movilidad.

- Castalia no posee un módulo de enrutamiento dinámico, lo cual influyó en el número de topologías seleccionadas pues debido a eso la topología en malla no se implementó, se plantea que para trabajos posteriores se cree un módulo, que me permita analizar el desempeño de la red frente a una topología en malla.
- La ejecución de las simulaciones en Castalia se realizan mediante comandos, se propone desarrollar una interfaz gráfica, que permita la configuración de los escenarios de una forma agradable, en donde se pueda visualizar los resultados para una mejor comprensión.

REFERENCIAS

- [1] L. Betancur, "Redes de área corporal. Una perspectiva al futuro desde la investigación," *Sistemas y Telemática*, vol. 9, no. 16, pp. 11-30, 2011.
- [2] E. Karulf. (2008, abril) CSE574S: Wireless and Mobile Networking (Spring 2008). [Online]. <http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/ban/index.html>
- [3] J. Y. Khan and M. R. Yuce, "Wireless Body Area Network (WBAN) for medical application," in *Intech*, Domenico Campolo, Ed. Newcastel, Australia: ISBN 978-953-7619-57-2, 2010, ch. 31, p. 38.
- [4] R. D'Errico and L. Ouvry, "Time-variant BAN channel characterization," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on*, Grenoble, 2009, p. 5.
- [5] R. D'Errico, R. Rosini, and M. Maman, "A Performance Evaluation of Cooperative Schemes for On-Body Area Networks based on Measured Time-variant Channels," in *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, Grenoble, 2011, p. 5.
- [6] A. Devineni, "Performance evaluation of body area network using zigbee protocol," Universidad estatal de San Diego, San Diego, Tesis 2011.
- [7] N. Murtazar, "Body Area Networks: Analytical Characterization and Investigations in Optimal Antenna Design," Jacobos University, Thesis Doctoral 2009.
- [8] A. Saeed et al., "A Scalable Wireless Body Area Network for Bio-Telemetry," *Journal of Information Processing Systems*, vol. 5, no. 2, p. 10, Junio 2009.
- [9] P. Khan, M. Hussain, and K. S. Kwak, "Medical Applications of Wireless Body Area Networks," *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, vol. 3, no. 3, p. 9, septiembre 2009.
- [10] R Kaur, "Wireless Body Area Network & its application," *Research Cell: An International Journal of Engineering Sciences*, vol. 1, pp. 199-216, Julio 2011.
- [11] L. Schwiebert, S. K. Gupta, and J. Weinmann, "Research Challenges in Wireless Networks of Biomedical Sensors," in *7th annual international conference on Mobile computing and networking*, New York, 2001, pp. 151-165.
- [12] M. Chen, S. Gonzalez, A. Vasilakos, H. Cao, and V. Leung, "Body Area Networks: A

- Survey," *Mobile Networks and Applications*, vol. 16, no. 2, pp. 171-195, Agosto 2010.
- [13] M. Ameen, J. Liu, S. Ullah, and K. Kwak, "A Power Efficient MAC Protocol for Implant Device Communication in Wireless Body Area Networks," in *The 8th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference - Smart Spaces and Personal Area Networks*, Incheon, 211, pp. 1155-1160.
- [14] N. Kumar, A. Aggrawal, and N. Gupta, "Wearable Sensors for Remote Healthcare Monitoring System," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 37-42, 2012.
- [15] Y. Hovakeemiana, K. Naikb, and A. Nayak, "A Survey on Dependability in Body Area Networks," University of Waterloo, University of Ottawa, Waterloo, Ottawa, Artículo 2011.
- [16] G. Crosby, T. Ghosh, R. Murimi, and C. Chin, "Wireless Body Area Networks for Healthcare: A Survey," *International Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing (IJASUC)*, vol. 3, no. 3, p. 26, Junio 2012.
- [17] B. Latré, B. Braem, I. Moerman, and C. Blondia, "A survey on wireless body area networks," *The ACM guide to computing literature*, vol. 17, no. 1, pp. 1-18, Enero 2011.
- [18] Fitbit Inc. (2013, Marzo) Fitbit. [Online]. <http://www.fitbit.com/es>
- [19] (2013, Marzo) Bodybugg Personal Calorie Management system. [Online]. <http://www.bodybugg.com/>
- [20] President and Fellows of Harvard College. (2012, Diciembre) Harvard Sensor Networks Lab. [Online]. <http://fiji.eecs.harvard.edu/CodeBlue>
- [21] Imperial college London. (2012, June) Ubiquitous Monitoring Enviroment for Weareable and Implantable Sensor. [Online]. <http://www.doc.ic.ac.uk/vip/ubimon/home/index.html>
- [22] k. Kwak, S. Ullah, and N. Ullah, "An Overview of IEEE 802.15.6 Standard," in *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), 2010 3rd International Symposium on*, Incheon, Nov 2010, pp. 1-6.
- [23] A. Reichman, "Standardization of Body Area Networks," *Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems, 2009. COMCAS 2009. IEEE International Conference on*, vol. 0, pp. 1-4, Noviembre 2009.
- [24] H. ElSawy, E. Hossain, and S. Camorlinga, "A Distributed Spectrum Sharing Method for Improving Coexistence of IEEE 802.15.4 Networks," in *Global*

- Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, 2011 IEEE, vol. 0, Canada, Diciembre 2011, pp. 1-5.
- [25] E. A. Equihua, "Red inalámbrica de reveladores de estado sólido," Instituto politécnico Nacional, México, Tesina 2009.
- [26] IEEE Standards Association, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.6: Wireless Body Area Networks," Estándar IEEE 802.15.6, 2012.
- [27] Informatica Médica. (2013, Enero) Cibermedico. [Online]. <http://cibermedico.wordpress.com/category/informatica-medica/>
- [28] S. Ullah et al., "A Review of Wireless Body Area Networks for Medical Applications," *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 2, no. 8, pp. 797-803, Agosto 2010.
- [29] Stefan. Druden, "Requirements and Application Scenarios for Body Area Networks," in *Mobile and Wireless Communications Summit, 2007. 16th IST*, 2007, pp. 1-5.
- [30] P. S. Pandian et al., "Wireless Sensor Network for Wearable Physiological Monitoring," *Journal of Networks*, vol. 3, no. 5, pp. pp 21-29, Mayo 2008.
- [31] N. A. Khan et al., "Ubiquitous HealthCare in Wireless Body Area Networks," in *Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*, 2012 IEEE 11th International Conference on, Islamabad, 25 to 27 June 2012, pp. 1960-1967.
- [32] Cisco. (2007, dec) Cisco Networking Academy. CCNA Exploration 4.0, Aspectos Basicos de Networking.
- [33] A. Rosado, "Sistemas industriales distribuidos: una filosofia de automatización," in *Sistemas Industriales Distribuidos*, Universidad de Valencia, Ed. Valencia, España, dic 2012, ch. 1, pp. 18-38. [Online]. http://www.uv.es/rosado/courses/sid/Capitulo2_rev0.pdf
- [34] J. Peña, J. Garcia, J. Reig, and O. Moreno, "Redes inalámbricas para los nuevos servicios personales de e-salud basados en tecnologías de inteligencia ambiental," *Revista I+S*, no. 97, pp. 31-36, Marzo 2013.
- [35] IEEE, "IEEE P802.15 Wireless personal area network," Estándar IEEE P802. 15-08-0644-097-0006, 2008.
- [36] Intech, "Power Management in Sensing Subsystem of Wireless Multimedia Sensor Networks," in *Wireless Communications and Networks - Recent Advances*, A. Eksim, Ed. Barcelona, España: Intech, Marzo 2012, ch. 21, pp. 549-570.

- [37] S. Sorbet et al., *Guía del paciente portador de marcapasos*, primera ed., L. M. Moya, Ed. Madrid, España: Agencia Española de Medicamentos, 2007.
- [38] A. M. Ortiz, "Técnicas de enrutamiento inteligente para redes de sensores inalámbricas," Universidad de Castilla la Mancha, Albacete, Tesis doctoral 2011.
- [39] C. Watson, "Effective topologies for the constraints set forth for biomedical," Norfolk, Norfolk State University, Norfolk, Reporte Técnico Technical Report #NSUCS-2004-006, 2006.
- [40] Rosemount wireless instrumentation, "Self-Organizing Networks: Wireless Topologies for In-Plant Applications," Nota Técnica 00840-0200-4180, Rev AA, 2007.
- [41] L. Fernández, J. M. Blasco, J. Hernández, and E. Montón. (2012, Diciembre) Wireless Sensor Networks in Ambient Intelligence. <http://www.tsb.upv.es/eventos/workshophealthcare/documentos/D1-1.pdf>.
- [42] I. Barneda, "Zigbee aplicado a la transmisión de datos de sensores biomedicos," Universidad autonoma de barcelona, Bellaterra, Memoria del proyecto de ingeniería Técnica en telecomunicaciones 2008.
- [43] M. Soini, Jussi Nummela , P. Ukkonen, and L. Sydänheimo, "WIRELESS BODY AREA NETWORK FOR HIP REHABILITATIONSYSTEM," *Ubiquitous Computing and Communication Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 42-48, 2008.
- [44] E. S. Tse-Au and P. A. Morreale, "End-to-end QoS measurement: analytic methodology of application response time vs. tunable latency in IP networks," in *Network Operations and Management Symposium, 2000. NOMS 2000. 2000 IEEE/IFIP*, NJ, 2000, pp. 129-142.
- [45] P. Brandaño, "Abstracting information on body area networks," Universidad of Cambridge, Cambridge, Reporte Técnico ISSN 1476-2986, 2012.
- [46] C. Guo, "Packet Forwarding with Minimum Energy Consumption in Body Area Sensor Networks," in *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2010 7th IEEE*, Delft, 2010, pp. 1-6.
- [47] M. Sukor, S. Ariffin, N. Fisa, and S. Y. Adel , "Performance Study of Wireless Body Area Network in Medical Environment," in *Modeling & Simulation, 2008. AICMS 08. Second Asia International Conference on*, Skudai, 2008, pp. 202-206.
- [48] Agilent. (2012, diciembre) <http://wireless.agilent.com/>. [Online]. http://wireless.agilent.com/rfcomms/refdocs/cdma2k/cdma2000_meas_fer_desc.html

- [49] K. Wagh and S. Rajankar, "Wireless Body Area Network: Real-Time Health," in *MPGI National Multi Conference 2012 (MPGINMC-2012)*, Nanded, 2012, pp. 7-11.
- [50] J. Olsén, "On Packet Loss Rates used for TCP Network Modeling," Uppsala University, Uppsala, Artículo 2010.
- [51] J. Black, B. Johnsonbaugh , R. Klungle , and O. Ulgen, "Simulation methodology -- a practitioner's perspective," University of Michigan-Dearborn, 2006.
- [52] V. Wojcik, "Steps in Simulation and Model Building," in *in Simulation Methodology – Discrete Event Simulation*, Ontario, 2003.
- [53] J. Hernández. (2012, Diciembre) Simulación de redes locales Ethernet utilizando NS-2.
<http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16309/Art%C3%ADculo%20docente%20simulaci%C3%B3n%20Ethernet.pdf?sequence=1>.
- [54] UC Berkeley, LBL, USC/ISI, y Xerox PARC., "The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation)," Manual 2011.
- [55] M. Stehlík, "Comparison of Simulators for Wireless Sensor Networks," universidad de Masaryk , Brno, Tesis de Maestría 2011.
- [56] WSNetwork. (2013, Enero) WSNet / Worldsens simulator. [Online].
<http://wsnet.gforge.inria.fr/license.html>
- [57] A. Boulis. (2011, Marzo) Castalia A simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks. Manual de usuario.