



Análisis de rendimiento en red de sensores inalámbrica con distintas topologías y cantidades de nodos

Wireless sensor network performance analysis with different topologies and number of nodes

Autores

✉ ^{1*} Manuel Eduardo Vines Mendieta



✉ ² Darwin Patricio Loo Zamora



✉ ² Marely del Rosario Cruz Felipe



¹Instituto de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

²Facultad de Ciencias Informáticas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

* Autor para correspondencia

Comó citar el artículo: Vines Mendieta, M.E., Loo Zamora, D.P. & Cruz Felipe, M. del R. (2022). Análisis de rendimiento en red de sensores inalámbrica con distintas topologías y cantidades de nodos. *Informática y Sistemas: Revista de Tecnologías de la Informática y las Comunicaciones*. 6 (1),52-59. DOI: <https://doi.org/10.33936/isrtic.v6i1.4469>

Enviado: 04/03/2022

Aceptado: 08/05/2022

Publicado: 17/05/2022

Resumen

Las redes de sensores inalámbricas se basan en dispositivos que están interconectados entre sí, capaces de obtener información de su entorno; estas se construyen con varias tecnologías, entre ellas encontramos a Zigbee como protocolo de comunicación a corta distancia utilizado en aplicaciones de redes inalámbricas, maneja diferentes configuraciones sobre topologías de red en estrella, árbol y malla, soportando un gran número de sensores; el objetivo de esta investigación es analizar el rendimiento de la red de sensores inalámbrica comparando topologías con distintas cantidades de nodos; la metodología empleada se realizó sobre un ambiente de simulación utilizando la herramienta OPNET; creando escenarios para medir la latencia en la capa de aplicación sobre las topologías con diferentes números de nodos. Como resultado se determinó que mientras más nodos se aumente dentro de la red de sensores inalámbrica mejor rendimiento presenta la topología malla.

Palabras clave: Latencia; OPNET; WSN; ZigBee.

Abstract

Wireless sensor networks are based on devices that are interconnected with each other, capable of obtaining information from their environment; these are built with several technologies, among them, we find Zigbee as a short distance communication protocol used in wireless network applications, it handles different configurations on star, tree and mesh network topologies, supporting a large number of sensors; The objective of this research is to analyze the performance of the wireless sensor network comparing topologies with different numbers of nodes; the methodology used was performed on a simulation environment using the OPNET tool; creating scenarios to measure the latency in the application layer on topologies with different numbers of nodes. As a result, it was determined that the more nodes are increased within the wireless sensor network, the better the performance of the mesh topology.

Keywords: Latency; OPNET; WSN; ZigBee.



1. Introducción

Las redes de sensores inalámbrica (WSN) se basan en una serie de pequeños dispositivos electrónicos que tienen acceso al mundo exterior por medio de sensores, permiten monitorizar cualquier entorno por inaccesible y recóndito que parezca tal y como lo haría una red de insectos, los nodos sensoriales se distribuyen en el terreno y trabajan de forma coordinada para monitorizar los parámetros elegidos (Gascón, 2010).

Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones sobre redes (UIT-T) recomienda que, una WSN es una red de nodos de sensores interconectados para el intercambio inalámbrico de datos detectados; el cual consta de varios nodos sensores que van desde unas pocas decenas hasta miles de nodos, que trabajan juntos para monitorear un área en busca de datos ambientales, además, los autores identificaron dos tipos de redes de sensores: estructuradas y no estructuradas (Rueda & Portocarrero, 2017).

Sobre la localización en WSN, se efectuó un estudio sobre algoritmos, técnicas de medición, aplicaciones y desafíos en donde dividieron los algoritmos enfocado a dos categorías: las centralizadas cuyo algoritmo permite medir todas las distancias de los sensores a una ubicación central permitiendo conocer todas las posiciones de los sensores y las distribuidas cuyo algoritmo permite a cada sensor individual localizar su propia posición mediante la medición de distancia de otros nodos ancla, estos algoritmos a su vez se sub dividen en algoritmos dentro y fuera de rango (Paul & Sato, 2017).

Con el tiempo a las WSN se las reconoce como estructuras de red distribuidas y autoconfiguradas que constan de un gran número de nodos sensores, creando distintos escenarios en topologías estrella, árbol y malla; mediante simulación donde se lleva a cabo con una cantidad de 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 nodos, para observar el rendimiento de la red sobre las métricas como el retardo de extremo a extremo (ETD), el rendimiento y el número de saltos (Mounika, 2018).

Zigbee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de comunicación de alto nivel basado en el estándar IEEE 802.15.4. El cual se utiliza para crear redes inalámbricas de área personal de bajo consumo energético, en comparación con otras tecnologías similares como Bluetooth y Wifi. Tiene amplia utilización en la automatización de casas sobre domótica, obtención de datos de equipo médico, así como cualquier otro dispositivo de bajo consumo de energía y ancho de banda que requiera conexión inalámbrica (Alonso, 2020).

Para la evaluación del rendimiento del protocolo de enrutamiento Zigbee bajo varias condiciones, en un trabajo investigativo se modelaron y simularon dos escenarios diferentes, en el primero, se probó las características topológicas y el IEEE 802.15.4 en términos de rendimiento, retardo de nodo a nodo y la cifra de

routers sobre tres diseños de red (estrella, árbol y malla); y el segundo escenario investigó la función de auto-reparación en una topología de malla desde el diseño anterior hasta el soporte de un gran número de puntos finales con enrutamiento dinámico (Abdulrahman & Ali Yaseen, 2015).

En el trabajo publicado “Simulación de redes de sensores inalámbricos: Un modelo energético a nivel nodo-sensor bajo las especificaciones IEEE 802.15.4 y Zigbee”, se diseñó e implementó utilizando el simulador para redes de eventos discretos OPNET, basado en tres modelos de nodo, cada uno consta de un modelo de flujo de datos y un modelo energético (Amarillo Rojas & Trujillo Arboleda, 2015).

La comunicación se ha convertido en una parte muy importante sobre un sistema de WSN en cuanto a estar libre de interferencias, atenuación, diafonía y desvanecimiento; cualquiera de estos factores es un problema grave en sistemas de comunicación; para resolver estos problemas, se consideraron redes de nodos móviles y fijos para el funcionamiento eficiente empleando la tecnología Zigbee y su diseño fue realizado con la herramienta de simulación OPNET; se basaron en topologías de árbol, estrella y de malla entre los dos sistemas (Adaramola & Olasina, 2018).

La validación de los nodos sensores es una tarea desafiante por la naturaleza del entorno, el reemplazo o la recarga de la batería de este pequeño dispositivo en un lugar inaccesible, y la distribución de un gran número de nodos sensores; en esta investigación, propusieron el diseño e implementación de un modelo de validación para WSNs y poder descubrir nodos malos en cualquier distribución WSN, dando como resultado obtenido de la simulación que, al aumentar el número de nodos, el número de nodos malos aumentará en un objetivo (Almajidi & Pawar, 2019).

Es por ello que la presente investigación con base en los antecedentes de trabajos mencionados anteriormente se va a comparar redes inalámbricas utilizando varios dispositivos sensores, con el objetivo de analizar el rendimiento de una WSN sobre distintas topologías que estén soportadas con diferentes cantidades de nodos; el diseño para cada escenario será realizado mediante simulación, utilizando la tecnología Zigbee para evaluar el rendimiento de la red basándose en el parámetro de latencia.

2. Materiales y Métodos

Se realizó una investigación de tipo cuasi-experimental para analizar el rendimiento de una WSN utilizando distintas topologías de red con diferentes cantidades de nodos, diseñado sobre un área de 140x160 m2 en donde los escenarios serán creados en un ambiente de simulación para eventos discretos soportado por el protocolo de comunicaciones inalámbricas

Zigbee.

2.1 Topologías de redes Zigbee

La tecnología Zigbee utiliza tres tipos de topologías, estas son la de estrella, malla y árbol tal como se muestra en la figura 1 en donde se puede observar cómo estarían desplazados los dispositivos coordinadores, router y dispositivos finales, basado en el estándar de comunicaciones para redes inalámbricas IEEE 802.15.4, es importante resaltar que la administración de los caminos dentro de la red de sensores es tarea del coordinador.

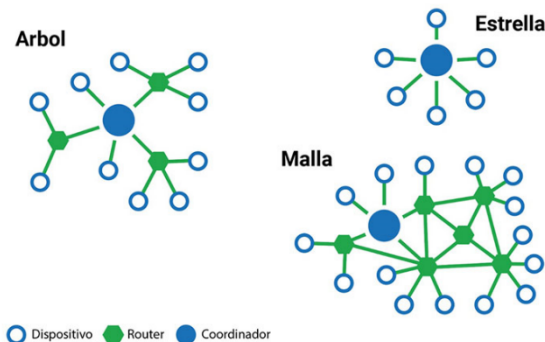


Figura 1. PTopologías estrella, malla y árbol.

La topología inalámbrica en estrella es la más sencilla del resto de topologías por ser su tecnología definida de un solo salto; esta topología contiene un grupo de dispositivos, o más nodo finales llamados dispositivos miembros. El dispositivo nodo coordinador es el responsable de establecer y crear la red, se utiliza para gestionar toda la red, comprobar el estado de cada nodo sensor, y almacenar toda la información de la red, como la detección, la ubicación de los nodos sensores, batería, etc.

La topología inalámbrica árbol, se compone de tres dispositivos: el nodo coordinador, el nodo router y los dispositivos del nodo final (Cuomo et al., 2013). El nodo coordinador actúa como la raíz del árbol, y el nodo router representa la raíz de los sub-árbol, mientras que el nodo final representa las hojas del árbol. La topología de malla, es la topología de red inalámbrica más complicada en su creación, se compone de tres dispositivos diferentes, estos son nodo coordinador, nodo router, y el nodo final. Tanto el nodo coordinador como el nodo router se consideran conexiones múltiples entre uno y otro, los dispositivos de los nodos finales son hijos de los nodos coordinadores y router (Guo et al., 2011).

2.2 Nodos de red IEEE 802.15.4/Zigbee

Cada uno de los nodos de red representa un sensor inalámbrico, el cual basa su configuración y demás en el estándar descrito en la norma Zigbee del 2007, la cual contempla tres tipos de nodos de red: dispositivo final, coordinador PAN y enrutador (Alliance, 2015).

Es preciso mencionar que tanto la capa física como la capa

MAC se han construido de tal manera que cumplan con las especificaciones impuestas por el estándar IEEE 802.15.4-2003 (IEEE SA - IEEE 802, 2003).

- Dispositivo final. Es un dispositivo de la norma 802.15.4-2003 con funciones reducidas (RFD) o completas (FFD), y que no es un coordinador Zigbee ni tampoco un enrutador Zigbee. Este tipo de nodo tiene las siguientes características (Cunha et al., 2007):

- Componente de red opcional.
- No permite asociación.
- No participa en el enrutamiento.
- Puede ser un RFD que implementa un subconjunto reducido de la pila de protocolos.

- Coordinador Zigbee. Es un coordinador PAN según la norma 802.15.4-2003, el cual trabaja en la capa de red del protocolo Zigbee. Sus características principales son (Cunha et al., 2007):

- Uno para cada red Zigbee.
- Inicia y configura la formación de la red.
- Es un coordinador de red de área personal de la norma IEEE 802.15.4.
- Es el enrutador cuando la red está formada.
- Es un FFD, el cual implementa toda la pila de protocolos.

- Enrutador. Es un FFD, según la norma 802.15.4-2003, el cual, aunque no es un coordinador Zigbee, puede actuar como un coordinador PAN de la norma 802.15.4-2003 dentro de su espacio de operación. Además, este dispositivo es capaz de enrutar mensajes entre dispositivos y asociar dispositivos tanto en su capa MAC como en su capa de red. Sus principales características son (Cunha et al., 2007):

- Componente opcional de red.
- Se asocia con el coordinador Zigbee (ZC) o con un router Zigbee previamente asociado (ZR).
- Puede ser un coordinador PAN según la norma IEEE 802.15.4.
- Participa en el enrutamiento multi-salto de los mensajes.
- Es un FFD, el cual implementa toda la pila de protocolos.

2.3 Red de Sensores Inalámbrica (WSN)

La WSN está constituida por sensores de bajo costo con una interfaz inalámbrica que nos permiten, mediante elementos sensores, recolectar todo tipo de información del mundo físico. Son utilizadas para supervisar de manera cooperativa cualquier fenómeno que pueda ser medido, por ejemplo, condiciones ambientales tales como temperatura, sonido, vibración o, en este caso, agentes contaminantes en las plantas de tratamiento de agua automatizada (Sohraby et al., 2007). La WSN puede incluir nodos sensores que son, a su vez, actuadores y que permiten controlar diferentes dispositivos utilizando el mismo medio de

comunicación inalámbrico.

Actualmente, existen muchos tipos de redes que pueden ser enmarcados dentro de las WSNs. Estos son tipos de WSNs definidos para aplicaciones particulares, como, por ejemplo, las redes inalámbricas de sensores multimedia (wireless sensor multimedia networks, WSMNs), las redes de sensores submarinas (underwater sensor networks, USNs), las redes de área corporal (body area networks, BANs), las redes de área vehicular (vehicular area sensor networks, VANs), entre otros (Almajidi & Pawar, 2019).

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) son capaces de detectar eficientemente diversos parámetros con alta precisión. Básicamente, una red de sensores inalámbricos se compone de tres elementos principales; unidad de sensor (para tomar mediciones), unidad de cálculo (para procesar los datos) y la unidad de comunicación (para permitir la comunicación entre los nodos inalámbricos) (Risteska Stojkoska et al., 2014).

2.4 Simulador para la WSN

El método empleado para esta investigación fue la simulación, donde se pudo evidenciar que existen varios simuladores que permiten diseñar un modelo de red completo. Entre estas herramientas de simulación encontramos al Network Simulator 2 (NS-2), NS3, OMNET ++, OPNET, MATLAB, que soportan las funciones de desarrollo del protocolo de comunicaciones inalámbricas Zigbee; todos los simuladores nombrados proporcionan la simulación de eventos discretos para evaluar diversos parámetros dentro de la red que es muy empleado por investigadores.

La simulación con OPNET es la plataforma que se convierte en la principal herramienta proveedora de soluciones para la estimación de diseños y aplicaciones de redes inalámbricas; soporta el modelo de red inalámbrica basado en Zigbee dando varios elementos de una red inalámbrica Zigbee (Coordinador Zigbee, Router Zigbee, Dispositivo final Zigbee) estos elementos pueden ser establecidos como fijos o móviles (Zhao & Xie, 2011).

Para el análisis dentro de la simulación de la WSN se crearon nueve escenarios, las topologías fueron combinadas de acuerdo a la distancia entre nodos, a continuación, se detalla en la Tabla 1 los parámetros a utilizar para cada escenario de simulación dentro de la WSN.

3. Resultados y Discusión

Para la realización de la presente investigación se comparó el rendimiento dentro de una WSN utilizando tres topologías de red combinadas a distintas distancias manejada por la tecnología

Tabla 1. Parámetros para cada escenario de simulación.

Fuente: Los autores.

Parámetros de Topología	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Distancia entre nodos (metros)	40 metros	20 metros	10 metros
Números de Nodos	25	49	195
Coordinador	1	1	1
Router	8	8	8
Dispositivo final	16	40	186
Poder de transmisión	0.05	0.05	0.05
Banda de Transmisión	2.4 Ghz	2.4 Ghz	2.4 Ghz

Zigbee; utilizando como parámetro de medición la latencia sobre la capa de aplicación en cada uno de los escenarios que fueron diseñados mediante la herramienta de simulación OPNET y serán expuestos a continuación.

3.1 Primer Escenario

Sobre el primer escenario, la Figura 2 nos muestra cómo se elaboró la WSN dentro de un área aproximada de 140 x 160 m², donde se aplicó una topología de red en estrella, la misma que fue duplicada para una topología de red en árbol y en malla creándose de esta forma las tres topologías para este primer escenario combinado, en donde se distribuyeron dispositivos entre ellos 1 coordinador Zigbee, 8 dispositivos router y 186 dispositivos finales, manteniéndose a una distancia entre nodos de 10 metros.

3.2 Segundo Escenario

Para el segundo escenario la Figura 3, muestra la WSN con un área aproximada de 140 x 160 m², donde se diseñó una red en estrella, y se la duplicó para una red en árbol y en malla creando así las tres topologías para este segundo escenario combinado, en donde se distribuyeron dispositivos entre ellos 1 coordinador Zigbee, 8 dispositivos router y 40 dispositivos finales, manteniendo una distancia entre nodos a 20 metros.

3.3 Tercer Escenario

Para el tercer escenario la figura 4, muestra la WSN con un área aproximada de 140 x 160 m², donde se diseñó una red en estrella, y se la duplicó para una red en árbol y en malla creando así las tres topologías para este tercer escenario compartido, en donde se distribuyeron dispositivos entre ellos 1 coordinador Zigbee, 8 dispositivos router y 16 dispositivos finales, manteniendo una

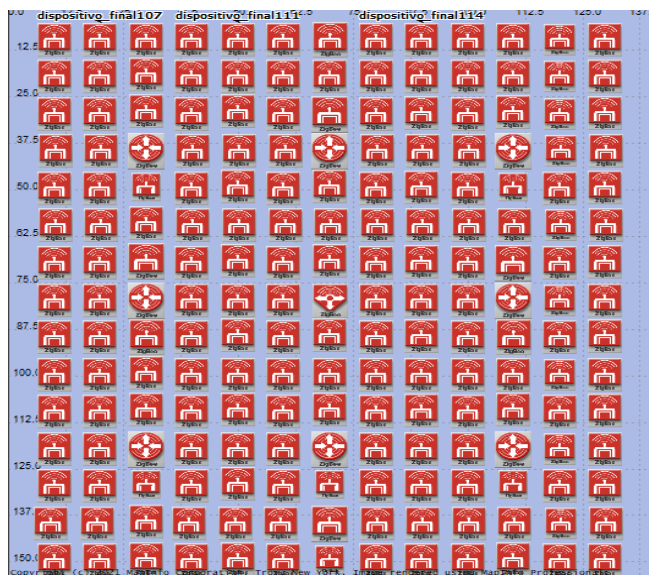


Figura 2. Escenario WSN a una distancia de 10 metros
Fuente: Los autores.



Figura 4. Escenario WSN a una distancia de 40 metros.
Fuente: Los autores.

distancia entre nodos a 40 metros.

En una red en estrella, todos los nodos finales se comunican directamente con la estación base. En una topología de árbol, el coordinador y el enrutador pueden tener hijos y actuar como padres. Utilizando una red de malla, los paquetes pasan por una serie de rutas para llegar a su destino utilizando la ruta más viable para evitar las zonas muertas. Una vez configurado el parámetro definido para cada uno de los escenarios utilizando la tecnología Zigbee, se procede a comparar el retardo de la red dentro de la WSN a distintas distancias.

3.4 Latencia en topologías a 10 metros de distancia

La simulación de retardo extremo a extremo (latencia), se lo identifica como el retardo de los paquetes recibidos por la capa MAC 802.15.4 sobre los nodos de la red que son reenviados a la capa superior; refiriéndonos sobre este escenario se ha combinado a las tres topologías a una misma distancia de 10 metros entre nodos, donde se pudo evidenciar los resultados comparativos como lo muestra la Figura 5 en función del número de nodos dentro de la WSN.



Figura 3. Escenario WSN a una distancia de 20 metros
Fuente: Los autores.

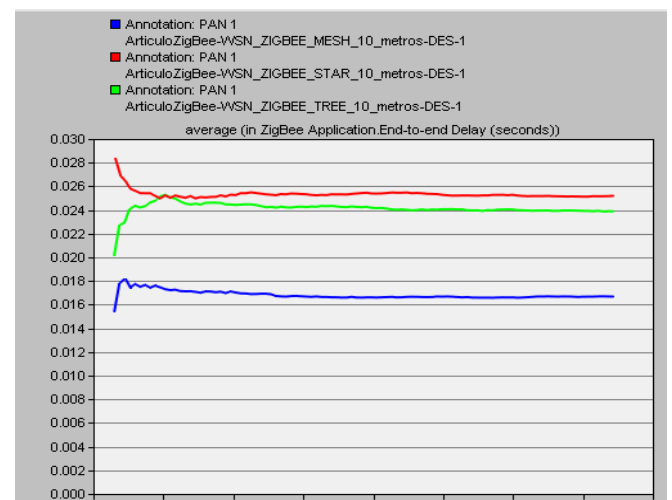


Figura 5. Combinación de 3 escenarios utilizando las topologías estrella, árbol y malla a 10 metros de distancia
Fuente: Los autores.

En la Figura 5 se observa que la topología de malla tiene un menor retardo llegando a los 0.01669 segundos, evidenciando mejor rendimiento de la red basándose en el número de nodos dentro de la WSN al estar entre cortas distancias sobre este escenario combinado a 10 metros, seguido de la topología árbol que tiene



un retardo de los 0,02389 segundos y por último la topología estrella aparece con un retardo de los 0,02520 segundos.

3.5 Latencia en topologías a 20 metros de distancia

Refiriéndonos sobre este segundo escenario se ha combinado a las tres topologías a una misma distancia de 20 metros entre nodos, donde se pudo evidenciar los resultados comparativos como lo muestra la Figura 6 en función del número de nodos dentro de la WSN.

Sobre la Figura 6 se observa que la topología de malla tiene un menor retardo llegando a los 0.02956 segundos, evidenciando mejor rendimiento de la red basándose en el número de nodos dentro de la WSN al estar entre cortas distancias sobre este escenario combinado a 20 metros, esta vez cambió el orden de retardo en donde identificamos a la topología estrella que tiene un retardo del 0,03743 segundos y la topología árbol tiene un retardo del 0.04238 segundos, dando a denotar un cambio significativo en este escenario de la topología malla con la topología árbol, en donde la cantidad de nodos ha influido en comparación del retardo con el primer escenario.

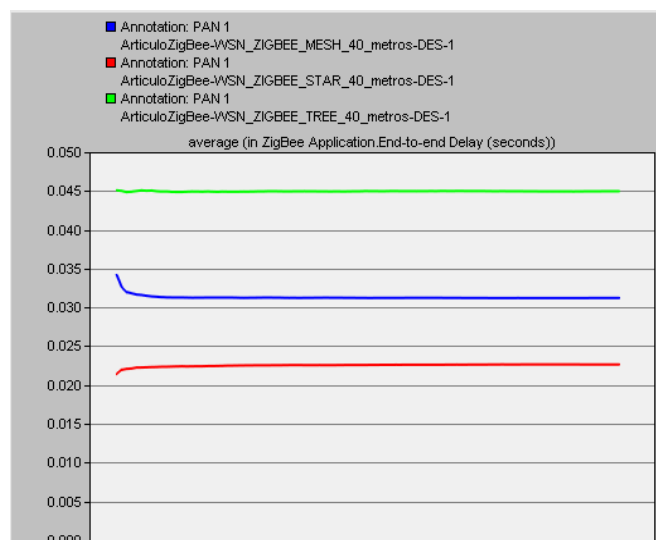


Figura 6. Combinación de 3 escenarios utilizando las topologías estrella, árbol y malla a 20 metros de distancia.

Fuente: Los autores.

3.6 Latencia en topologías a 40 metros de distancia

Sobre este escenario se ha combinado a las tres topologías a una misma distancia de 40 metros entre nodos, donde se pudo evidenciar los resultados comparativos como lo muestra la Figura 7 en función del número de nodos dentro de la WSN.

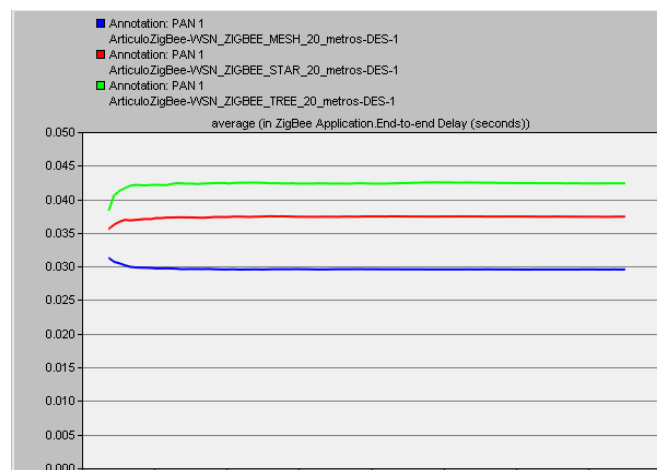


Figura 7. Combinación de 3 escenarios utilizando las topologías estrella, árbol y malla a 40 metros de distancia.

Fuente: Los autores.

En la Figura 7 se observa que ahora aparece la topología estrella con menor retardo sobre sus antecesores llegando a los 0.02265 segundos, esto se refleja basándose en la cantidad menor de nodos dentro de la WSN al estar a una distancia de 40 metros entre nodos, mientras que la topología malla tiene un retardo del 0,03121 segundos y la topología árbol tiene un retardo del 0.04497 segundos, dando a denotar un cambio significativo de la topología estrella sobre las otras topologías donde la cantidad de nodos ha influido en este tercer escenario.

De los resultados obtenidos podemos decir que, la de mejor rendimiento dentro de la WSN entre una distancia de 10 y 20 metros es la topología malla, mientras que en el tercer escenario a 40 metros se pudo denotar un cambio significativo en donde resalto con menor retardo la topología estrella; sin embargo, se realizó un análisis estadístico a base de los datos exportados de cada uno de los escenarios comparados, en donde se utilizó un método de validación el cual permitió definir si en realidad la topología estrella, malla o árbol es la recomendada para la WSN.

3.7 Análisis estadístico comparativo entre las topologías estrella árbol y malla.

Sobre el análisis estadístico realizado se puede observar en la Figura 8 una comparativa entre las topologías estrella, árbol y malla a 10, 20 y 40 metros de distancia entre los nodos aplicado sobre la WSN, mediante la exportación de los datos obtenidos de la simulación en OPNET.

Podemos evidenciar una comparativa de las topologías basándose en un gráfico de cajas, en donde se puede denotar que a mayor número de nodos mejor será la latencia utilizando la topología malla sobre esta WSN cuando se manejan gran número de nodos

distribuidos a 10 metros, mientras que en la topología estrella se puede denotar sobre la Figura 8 que la latencia a 10 y 40 metros no es mucha su diferencia significativa sobre la topología malla.

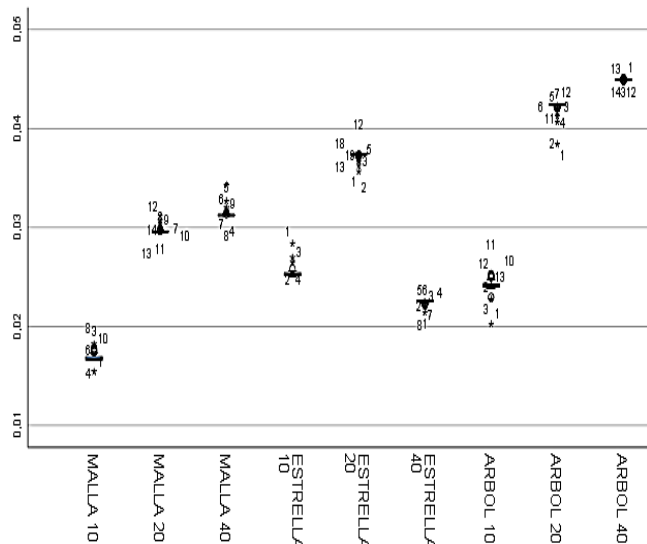


Figura 8. Combinación de 9 escenarios utilizando la topología estrella, árbol y malla a 10, 20 y 40 metros de distancia.
Fuente: Los autores.

4. Conclusiones

A partir de la conclusión de la WSN utilizando el protocolo de comunicaciones inalámbrica ZigBee se compararon las diferentes topologías soportadas por esta tecnología obteniendo que la más idónea es la topología en malla.

A partir de la comparación empleando la topología en malla, la simulación con diferentes cantidades de nodos se obtuvo que el mejor escenario fue el primero con 195 nodos a una distancia de 10 metros dentro de la WSN.

Se comprueba, a partir del análisis estadístico, una diferencia significativa entre los datos exportados de los 9 escenarios simulados entre los nodos corroborando que la topología en malla a mayor cantidad de nodos tiene un menor retardo, comprobándose que es la mejor topología dentro de la WSN.

Contribución de los autores

Manuel Eduardo Vincés Mendieta: Conceptualización, metodología y análisis formal del artículo; Diseño y configuración del software de simulación; Redacción del borrador original del artículo. **Darwin Patricio Loor Zamora:** Redacción del borrador original del artículo, Conceptualización y metodología, Participación en la implementación de la simulación. **Marely del Rosario Cruz Felipe:** Conceptualización y la investigación, Visualización y análisis de los resultados, Supervisión del proyecto y revisión y edición del artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Referencias bibliográficas

- Abdulrahman, N., & Ali Yaseen, F. (2015). Performance Evaluation of Zigbee Routing Protocol under Various Conditions using OPNET Modeler. *International Journal of Computer Applications*, 117(18), 25-31. <https://doi.org/10.5120/20656-3284>
- Adaramola, O. J., & Olasina, J. R. (2018). Network Investigation and Performance Analysis of ZigBee Technology using OPNET. *Journal of Advances in Computer Engineering and Technology*, 4(4), 209-218.
- Alliance, Z. (2015). ZigBee Specification. *Standard*, Oct.
- Almajidi, A. M., & Pawar, V. P. (2019). A New System Model for Sensor Node Validation by Using OPNET. *Wireless Personal Communications*, 108(4), 2389-2401. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06527-3>
- Alonso, C. C. (2020). *Proyecto de Investigación*.
- Amarillo Rojas, M. O., & Trujillo Arboleda, L. C. (2015). Simulación de Redes de Sensores Inalámbricos: un Modelo Energético a Nivel de Nodo-Sensor Bajo las Especificaciones Ieee 802.15.4tm y Zigbee. *Publicaciones e Investigación*, 9(0), 13. <https://doi.org/10.22490/25394088.1430>
- Cunha, A., Alves, M., & Koubâa, A. (2007). *Implementation details of the time-division beacon scheduling approach for ZigBee cluster-tree networks*. <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/3940>
- Cuomo, F., Abbagnale, A., & Cipollone, E. (2013). Cross-layer network formation for energy-efficient IEEE 802.15.4/ZigBee Wireless Sensor Networks. *Ad Hoc Networks*, 11(2), 672-686. <https://doi.org/10.1016/J.ADHOC.2011.11.006>
- Gascón, D. (2010). *Redes de Sensores Inalámbricos, la tecnología invisible*. 180-182. Gascón, D. (2010). *Redes de Sensores Inalámbricos, la tecnología invisible*. Tecnología y Sociedad. Artículo de la revista BIT del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT),[consulta: 21 febrero 2019]. Available: <http://www.libelium.com/libelium-downloads/libelium-bit-coit.pdf>.
- Guo, L., Peng, Y., Wang, X., Jiang, D., & Yu, Y. (2011). Performance evaluation for on-demand routing protocols based on OPNET modules in wireless mesh networks. *Computers & Electrical Engineering*, 37(1), 106-114. <https://doi.org/10.1016/J.COMPELECENG.2010.10.002>
- Hammoodi, I. S., Stewart, B. G., Kocian, A., & McMeekin, S. G. (2009). A Comprehensive Performance Study of



- OPNET Modeler For ZigBee Wireless Sensor Networks. NGMAST 2009 - *3rd International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, 357-362. <https://doi.org/10.1109/NGMAST.2009.12>
- IEEE SA - IEEE 802. (2003). <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4/3388/>
- Mounika, P. (2018). Performance analysis of wireless sensor network topologies for Zigbee using riverbed modeler. *Proceedings of the 2nd International Conference on Inventive Systems and Control, ICISC 2018, Icisc*, 1456-1459. <https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399050>
- Paul, A. K., & Sato, T. (2017). Localization in wireless sensor networks: A survey on algorithms, measurement techniques, applications and challenges. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/JSAN6040024>
- Risteska Stojkoska, B., Popovska Avramova, A., & Chatzimisios, P. (2014). Application of wireless sensor networks for indoor temperature regulation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/502419>
- Rueda, J. S., & Portocarrero, J. M. T. (2017). Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora. *Revista Colombiana de Computación*, 18(2), 58-74. <https://doi.org/10.29375/25392115.3218>
- Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. (2007). Basic Wireless Sensor Technology. En *Wireless Sensor Networks* (pp. 75-92). <https://doi.org/10.1002/9780470112762.ch3>
- Zhao, W., & Xie, J. (2011). OPNET-based modeling and simulation study on handoffs in Internet-based infrastructure wireless mesh networks. *Computer Networks*, 55(12), 2675-2688. <https://doi.org/10.1016/J.COMNET.2011.04.013>