

Ensayo de Investigación

La confiabilidad en las redes de sensores inalámbricos Reliability in wireless sensor networks

Teth Azrael Cortés Aguilar^{1,2*}, Adriana Tovar Arriaga²

¹CIATEQ Unidad Jalisco

²Tecnológico Nacional de México: ITJMMPYH.

Departamento de Sistemas Computacionales

Autor de correspondencia:

*teth.cortes@zapopan.tecmm.edu.mx

Recibido: 13-02-2023 Aceptado: 21-07-2023 (Artículo Arbitrado)

Resumen

Las redes de sensores inalámbricos WSN se construyen con nodos sensores que envían paquetes de datos hacia un nodo coordinador y son una de las tecnologías claves que transformarán la fábrica tradicional en la fábrica inteligente y conectada en la industria 4.0. Sin embargo, la confiabilidad de una WSN, que puede medirse como el número de paquetes de datos que llegan con éxito al receptor, depende de un suministro de energía constante al transmisor. El rendimiento de las comunicaciones inalámbricas se puede mejorar aumentando la potencia del transmisor, pero esto conduce a un consumo innecesario de energía, lo que reduce la vida útil de las baterías. Por otro lado, el tiempo de retardo en la recepción de paquetes de datos aumenta debido a errores de comunicación en transmisiones de baja energía, afectando la confiabilidad de la red. Este artículo reporta resultados experimentales de que la tasa de recepción de paquetes y la latencia dependen de la carga de la batería, que suministra energía a los nodos de la red.

Palabras clave: Redes de sensores inalámbricos, energía, confiabilidad.

Abstract

Wireless sensor networks WSN are built with sensor nodes that send data packets to a coordinator node and are a key technology that will transform the traditional factory into the smart and connected factory in Industry 4.0. However, the reliability of a WSN, which can be measured as the number of data packets that successfully reach the receiver, depends on a constant power supply to the transmitter. Wireless communications performance can be improved by increasing transmitter power, but this leads to unnecessary power consumption, which reduces batteries lifetime. Additionally, the delay time in reception of data packets increases due to error communications in low energy transmission, affecting the network reliability. This paper reports experimental results that the packet reception rate and latency depend on the battery charge that supplies energy to the network nodes.

Keywords: Wireless sensor networks, energy, reliability.

Introducción

En la fábrica tradicional, las máquinas están dedicadas para realizar una operación de trabajo, dentro de una ubicación determinada en el taller. Sin embargo, en los nuevos sistemas de manufactura, el trabajo se realiza en red y las máquinas pueden estar distribuidas globalmente y estar localizadas a grandes distancias entre sí (Varela et al., 2019). Previsiblemente, la cuarta revolución industrial creará grandes fábricas modernas e inteligentes. No obstante, también existe una oportunidad para las pequeñas y medianas

empresas, altamente especializadas, que trabajando colaborativamente podrán crear amplias redes de producción. La comunicación en tiempo real con sus clientes y proveedores a través de internet les permitirá fabricar rápidamente productos personalizados y de bajo costo. La empresa, ya no será importante por el tamaño de sus instalaciones, sino por su nivel de integración tecnológica, su capital humano altamente calificado y su acceso al Internet de las Cosas Industrial IIoT (*Industrial Internet of Things*) (Saniuk

et al., 2019). En particular, este nuevo paradigma de producción debe ser entendido y adoptado rápidamente por las industrias de países en vías de desarrollo para no perder competitividad en una economía globalizada (Rivera, 2020). En este sentido, las redes de sensores inalámbricos WSN (*Wireless Sensor Network*) juegan un rol fundamental para la digitalización de la empresa y facilitar la integración de nuevas tecnologías, como sistemas de decisiones basados en algoritmos de inteligencia artificial. Más aun, las WSN también son una de las tecnologías claves en las comunicaciones móviles de quinta generación 5G que se caracteriza por redes heterogéneas e integradas por una miríada de dispositivos, capaz de soportar comunicaciones masivas, por ejemplo, para la conducción de vehículos autónomos, sensores en ciudades inteligentes, telemedicina, interfaces de realidad mixta, comercio electrónico y la cuarta revolución industrial o industria 4.0 (Li et al., 2018).

La comunicación en una WSN ocurre entre un nodo coordinador que administra la comunicación con los nodos inferiores, y los nodos inferiores que se encargan de transmitir las señales de los sensores hacia el coordinador, ver Figura 1. Sin embargo, los nodos sensores presentan limitaciones debido a su

entorno, como el rango de transmisión inalámbrica, la presencia de ruido electromagnético, la tasa de actualización de datos, el ancho de banda, el tiempo de latencia y el consumo de energía que determina el tiempo de vida de la carga de la batería de alimentación del nodo sensor (Radmand et al., 2010).

Lo común en las WSN es que el suministro de energía a los nodos sensores sea mediante baterías recargables de ácido-Pb, Ni-Cd, Ni-MH o Li-ion, sin embargo estos dispositivos presentan varias desventajas, por ejemplo, para algunas aplicaciones, no es viable su instalación debido al tamaño y peso de la batería; por otro lado, el incremento de la temperatura eleva la rapidez de descarga de la batería reduciendo el tiempo de vida y elevando el costo de mantenimiento. Otros problemas vinculados al uso de baterías son la emisión de residuos tóxicos al medio ambiente por la falta de reciclaje en su disposición final, poca disponibilidad de materias primas y posible riesgo de incendio. Por las razones expuestas, en años recientes los esfuerzos para mejorar el rendimiento de las WSN se han centrado en tecnologías para recolectar energía el entorno y en hacer más eficiente el consumo sin afectar la calidad de los enlaces de radiofrecuencia.

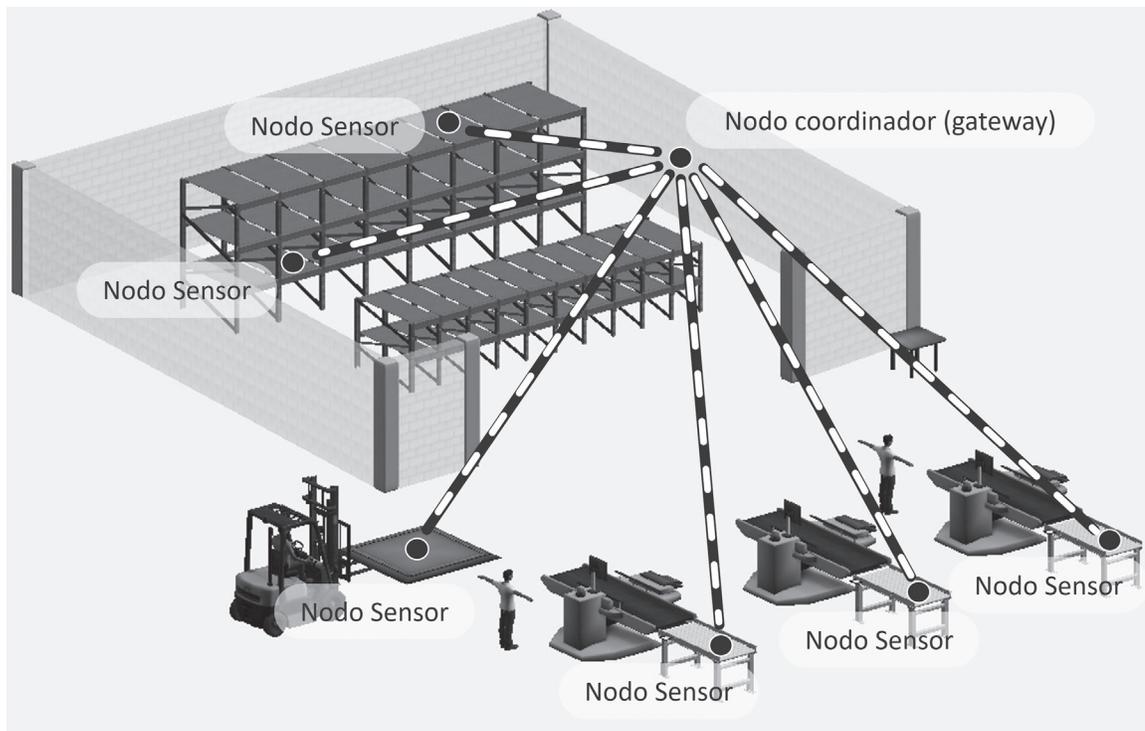


Figura 1. Representación esquemática de una WSN con la conexión de nodos sensores hacia un nodo coordinador. Donde el nodo coordinador también puede hacer la función de puerta de enlace (*gateway*) hacia el internet de la empresa.

Fuente: Elaboración propia.

Fuentes alternativas de suministro de energía para WSN

Es importante considerar un suministro de energía a través de fuentes alternativas, vinculadas al entorno de trabajo de las WSN, debido a las ventajas que puede aportar para reducir los costos de mantenimiento, por ejemplo, al reducir la dependencia de las baterías. Por otra parte, la naturaleza dinámica de las fuentes alternativas de energía y la posición de los nodos sensores en un entorno industrial no permiten que el suministro de energía esté siempre disponible. De ahí, que algunas propuestas combinan las ventajas de usar sistemas híbridos y modos de bajo consumo, que activan ocasionalmente algunos nodos para ampliar la cobertura de la red durante intervalos de baja recolección de energía (Mukherjee et al., 2019). En general, se han propuesto varios métodos de recolección de energía mediante dispositivos piroeléctricos, termoelectricos, piezoeléctricos, electrostáticos, fotovoltaicos, turbinas eólicas e hidráulicas, celdas de combustible microbiana y antenas rectificadoras (Bhatti et al., 2016), ver Figura 2.

La recolección de energía (*Energy Harvesting*) es un tema de interés en las WSN, porque puede prolongar su tiempo de vida, sin embargo, estos métodos solo funcionan si las fuentes generan una densidad de energía constante. Para solucionar este problema se han propuesto métodos de transferencia de energía mediante luz, ondas de radiofrecuencia, resonancia inductiva y ondas mecánicas, que equilibran el suministro entre los nodos de la red. Por ejemplo, Wang et al. (2012) proponen un método que utiliza radiación láser para entregar energía hacia una red mediante celdas fotovoltaicas. En el mismo sentido, Tran et al. (2019) proponen un protocolo de comunicación que transfiere la energía mediante radiofrecuencia, en ranuras de tiempo adjuntas a las ranuras asignadas para la envío de los paquetes de datos. Por otro lado, Cárdenas et al., (2022), mencionan el uso de celdas de combustible microbiana como una fuente de energía limpia que se puede implementar en los sistemas de tratamiento de aguas residuales que se usan comúnmente en la industria.

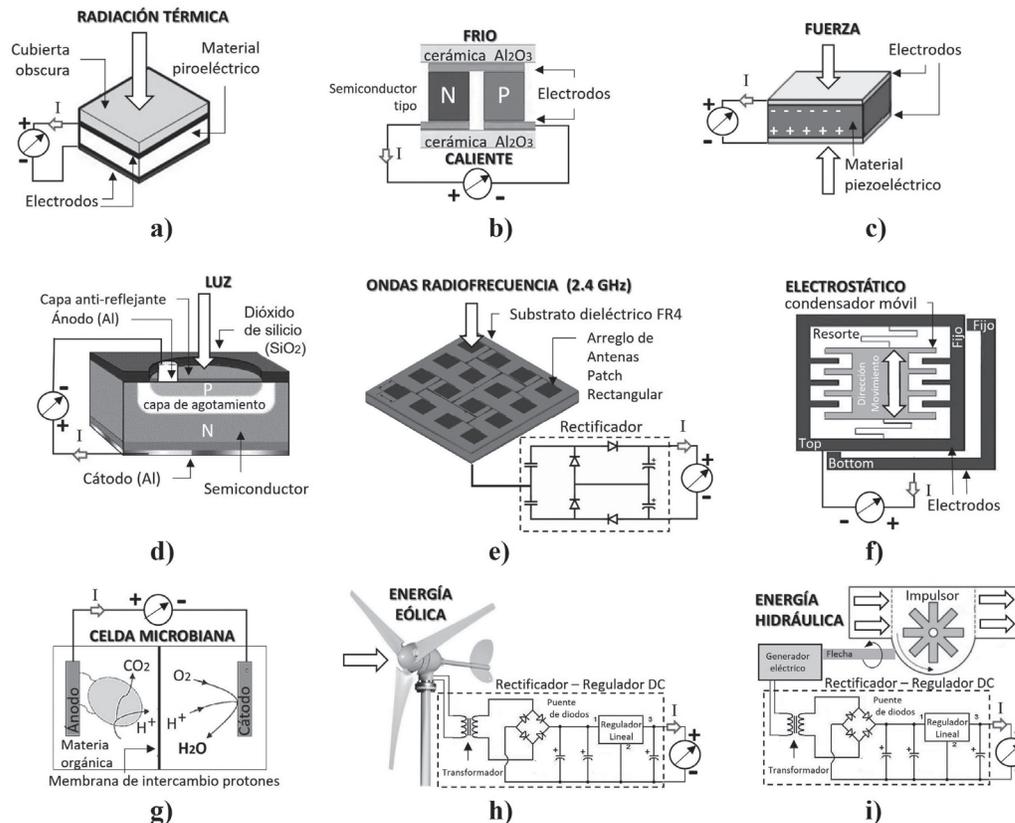


Figura 2. Métodos de recolección de energía a) Piroeléctrico, b) Termoelectrico, c) Piezoeléctrico, d) Fotovoltaico, e) Antenas rectificadora f) Electrostaticos, g) Celdas de combustible microbiana, h) Turbina eólica, i) Turbina hidráulica. .

Fuente: Elaboración propia.

Confiabilidad y eficiencia energética de la red

En condiciones limitadas de energía, la confiabilidad y la eficiencia energética de la red están en oposición. Mientras que la confiabilidad en la transmisión de paquetes de información se puede mejorar elevando la potencia del transmisor, esta situación conlleva un consumo innecesario de energía. En consecuencia es deseable especificar el nivel mínimo de potencia con el cual se alcanza cierta confiabilidad en las comunicaciones, que además de conducir a un ahorro de energía, incrementará la vida útil del sistema.

Para solucionar este problema se han propuesto métodos que regulan bajo demanda la potencia de transmisión mediante retroalimentación entre los nodos, estos ajustes también reaccionan a los cambios producidos por el entorno (Lin et al., 2016). La rapidez de agotamiento de la energía almacenada en las baterías de una WSN depende de cómo se coloquen en el entorno, que en general se pueden clasificar como aleatoria o determinística. El tiempo de operación de la WSN depende de la estrategia de colocación, por ejemplo, en una topología de malla, los nodos que se localizan cerca de la estación base o de la puerta de enlace (*Gateway*) siempre tienen un mayor tráfico de paquetes de datos y en consecuencia consumen más rápidamente su reserva de energía. Y cuando un nodo ha agotado su suministro de energía disponible surge un problema denominado hueco de energía, que tiende a incrementar el tiempo de latencia, elevar la tasa de paquetes recibidos con error y en última instancia reducir prematuramente el tiempo de operación de la red.

Para evitar este problema, una alternativa es distribuir los nodos de tal manera que el consumo de energía este balanceado (Halder et al., 2017), sin embargo esto no garantiza que la confiabilidad de la red no se vea afectada. La tolerancia a fallas es la capacidad de la red para proporcionar y mantener un nivel de servicio QoS (*Quality of Service*) aceptable frente a fallas en su operación normal.

El modelo de Markov para la confiabilidad en redes inalámbricas se basa en dos conceptos, los posibles estados del sistema y la transición entre estos estados. Así, la confiabilidad de la red se define como la probabilidad de que el sistema esté en cualquier estado excepto en el estado de falla (Bein et al., 2005).

Métodos para determinar la potencia del transmisor

Reducir el consumo de energía en las WSN logra elevar su tiempo de operación. En la práctica, es frecuente que cuando no se están transmitiendo datos, los nodos se configuran en modo de bajo consumo de energía desactivando el transceptor. Por otro lado, enlaces de baja calidad afectados por interferencia y ruido electromagnético, conduce al desperdicio de energía por la retransmisión de paquetes de datos (Distefano, 2013). El control de la potencia de transmisión se puede clasificar en dos enfoques: un enfoque basado en la red y un enfoque basado en nodos. En el enfoque basado en red, se busca determinar una potencia mínima para los enlaces adyacentes, mientras que un enfoque basado en nodos, se usan potencias de transmisión diferentes para cada enlace. En el enfoque basado en red no es posible alcanzar un consumo mínimo de energía. Por esta razón, se han propuesto varios métodos que utilizan el enfoque basado en nodos.

Lin et al. (2016) proponen un método que consiste en enviar un grupo de señales de prueba a diferentes niveles de potencia para construir una función lineal de acuerdo a la lectura de la intensidad de la señal recibida RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), sin embargo, este método requiere una gran cantidad de memoria en el proceso de construcción de la función lineal que muchas veces no está disponible en los nodos inferiores.

Por otro lado, Correia et al. (2007) proponen dos métodos para el control de la potencia de transmisión, en el primero se determina la potencia mínima requerida de acuerdo al número de mensajes recibidos correctamente durante la transmisión, sin embargo, este método es complicado de implementar en una aplicación real. En el segundo método proponen un modelo predictivo para establecer la potencia mínima requerida en el receptor para un determinado ruido de fondo. Sin embargo, como el modelo se basa en datos empíricos su precisión se puede ver afectada en condiciones diferentes a las experimentales. De forma similar Zhao et al. (2007) también proponen calcular la potencia mínima deseada en la transmisión mediante una ecuación que está en función de una potencia umbral en el receptor, y que depende de las condiciones del entorno, pero no

mencionan como calcular o medir la potencia umbral necesario en el receptor.

En contraste, Sheu et al. (2009) proponen un método de dos etapas para determinar la potencia mínima de transmisión, en la primera etapa cada nodo envía 100 paquetes de prueba para un determinado nivel de potencia. Cada nodo determina la potencia inicial según la cantidad de paquetes reconocidos. En la siguiente etapa, la potencia se controla mediante un indicador de la potencia de la señal y un indicador de la calidad del enlace. La potencia de transmisión se ajusta comparando los límites inferior y superior de las señales de la segunda etapa mediante experimentación. De la misma manera, Xiao et al. (2009) proponen para una topología de red en estrella conectada a una puerta de enlace, el control de la potencia de transmisión, duplicando la potencia de transmisión si el promedio del indicador de la potencia de la señal es menor a un límite inferior y reduciendo proporcionalmente la potencia si el promedio del indicador de la potencia de la señal es mayor a un límite superior; donde los límites superior e inferior se determinan experimentalmente.

La mayoría de los métodos propuestos para el control de la potencia basados en nodos requieren la transmisión de paquetes de prueba para encontrar la potencia mínima adecuada o de encontrar experimentalmente los límites. Sin embargo, el envío de paquetes de prueba demanda un alto consumo de energía, que además se puede incrementar debido a condiciones adversas del entorno, por otro lado, la mayoría de estos métodos suelen omitir la confiabi-

lidad de las comunicaciones de extremo a extremo. En consecuencia, también se han propuesto otros métodos que buscan encontrar la ruta de transmisión óptima que minimice la tasa de paquetes recibidos con error (Ferrari et al., 2005).

Otros métodos proponen calcular la tasa de recepción de paquetes de cada salto entre nodos de la red, para mantener la tasa de entrega de paquetes de extremo a extremo en función de la confiabilidad deseada en las comunicaciones (Kim et al., 2015). La potencia de transmisión se ajusta según la tasa de transmisión de paquetes para reducir el consumo de energía, y la tasa de entrega de paquetes se calcula como el número de paquetes recibidos exitosamente entre el número de paquetes enviados. El nivel de potencia de transmisión requerido del nodo emisor se determina a partir de la relación señal a ruido SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) deseada entre el emisor y el receptor. Este método tiene un mayor consumo de energía pero logra reducir los requerimientos de memoria y el número de retransmisiones, elevando la confiabilidad de la red.

Confiabilidad de la red en función de los protocolos

Para alcanzar cierta confiabilidad en la red, ver Tabla 1, también se deben considerar otros factores diferentes a los mencionados anteriormente como son el tamaño del paquete de datos, la densidad de los nodos en la red, así como los protocolos de control de acceso y los protocolos de enrutamiento (Wategaonkar et al., 2016). El protocolo de enrutamiento

Tabla 1. Relación de conceptos importantes sobre el rendimiento de una WSN asociados al protocolo de comunicación (Sumathi et al. 2012)

Concepto	Definición	Relación con el protocolo
Calidad de Servicio QoS	Se refiere a la capacidad de la red para garantizar que los requerimientos de servicio se cumplen para una determinada aplicación.	Establecer las rutas entre los diferentes nodos que tienen la capacidad de mantener los requisitos de QoS dentro de las restricciones de energía.
Confiabilidad	Se mide como la proporción del número de paquetes de datos recibidos en la puerta de enlace dentro de un lapso de tiempo, respecto al número de paquetes generados desde los nodos	Los protocolos de enrutamiento son los responsables de transferir los paquetes de datos desde un nodo de origen a un nodo de destino a través de la red.
Congestión	Se refiere a la pérdida de paquetes de información, que puede ocurrir debido a una saturación en memoria, colisión entre paquetes de datos, fallas en la sincronización, baja tasa de transmisión y restricciones en el canal.	Un protocolo adecuado puede reducir el tráfico de datos y el retraso en las comunicaciones, también puede mejorar su rendimiento y aumentar la vida útil de la red.
Latencia	Se refiere al lapso de tiempo transcurrido desde el envío del paquete de información hasta que se recibe en la puerta de enlace o nodo coordinador.	Entre menor sea este tiempo mejor es el desempeño del protocolo.
Encabezados de control de paquetes	Se refiere a las señales de control que acompañan a cada paquete de información generados por el protocolo.	Entre menor sea su número se mejora el desempeño del protocolo debido a un menor consumo de energía.
Ancho de banda	Se refiere al número de bits que pueden enviarse por segundo.	Se puede mejorar el desempeño del protocolo mediante algoritmos de compresión de datos y optimización de tiempos de espera.

en las WSN es importante debido a que el consumo de energía en las transmisiones inalámbricas es proporcional al cuadrado de la distancia entre dos nodos (Anisi et al., 2011).

En el protocolo de enrutamiento de difusión dirigida DD (*Direct Diffusion*), se envían y reciben datos de los nodos independientemente del entorno, su objetivo es encontrar la ruta más eficiente entre el emisor y el receptor; utilizan algoritmos de aprendizaje automático para agregar criterios sobre el número de saltos entre nodos y la ruta con el menor consumo de energía (Samara et al., 2016). El protocolo de Jerarquía de agrupamiento adaptativo de baja energía LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), usa un enfoque aleatorio para distribuir el consumo de energía entre los nodos, consta de dos fases; en la primera fase se selecciona el nodo con la mayor reserva de energía como la estación base; en la segunda fase cada nodo envía sus datos a la estación base mediante un solo salto en la transmisión. Después de un determinado tiempo la red regresa a la primera fase (Tandel, 2016). El protocolo híbrido de distribución eficiente de energía HEED (*Hybrid Energy Efficient Distributed*), es una propuesta mejorada al protocolo LEACH para redes donde cada nodo tiene una energía inicial diferente. En la selección del nodo como estación base, se considera la energía remanente de cada nodo y la proximidad de nodos vecinos (Kaur et al., 2016). El protocolo de agregación en red INA (*In Network Aggregation*), es apropiado para redes fijas. Consta de tres fases, en la primera fase se calcula el número de saltos de cada nodo a

la puerta de enlace y se establece un diagrama de árbol, en la segunda fase se selecciona el nodo que funcionará como la estación base y en la tercera fase se selecciona la mejor ruta para la entrega de los paquetes de datos (Villas et al., 2013).

Materiales

En el presente trabajo, para encontrar la confiabilidad de una red de comunicación inalámbrica; se utilizó el circuito de prueba de la Figura 3. Tanto el transmisor como el receptor se construyó con un módulo NRF24L01 conectado a una tarjeta arduino usando la conexión SPI (*Serial Peripheral Interface*) y alimentado por una batería BAT-LI-9V USB recargable de Li-ion de 9V con 400 mAh de carga. En la Figura 3, el transmisor hace la función del nodo inferior o nodo sensor y el receptor hace la función de nodo coordinador en una WSN. Para las mediciones, el módulo NRF24L01 del transmisor enviaba 100 paquetes de prueba a través de un canal seleccionado en la banda de 2.4 GHz, hacia el receptor. La tarjeta arduino era la encargada de generar los paquetes de prueba. La tasa de paquetes recibidos con éxito PRR (*Packet Reception Rate*), y la latencia, que se refiere al tiempo que tarda un paquete de datos en llegar del transmisor al receptor, así como el porcentaje de carga de la batería, se calculó en el receptor. Las mediciones se hicieron para distancias de 10 a 15 metros entre el transmisor y el receptor. Cabe mencionar que el módulo NRF24L01 es un transceptor de bajo costo que no soporta más de 100 metros de transmisión en línea de vista.

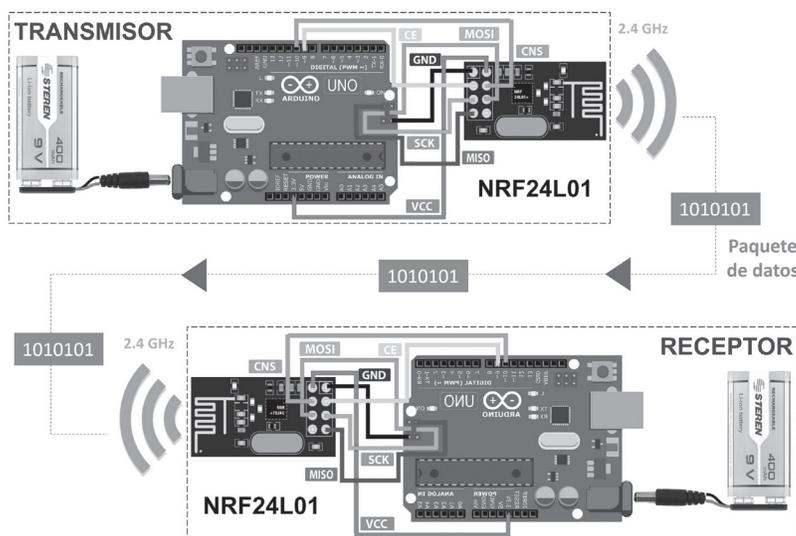


Figura 3. Esquema del sistema de comunicación utilizado para la medición de la tasa de paquetes recibidos con éxito PRR, latencia y porcentaje de carga de la batería.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

La Figura 4 muestra que un incremento en el tiempo que tardan en llegar los 100 paquetes de datos al receptor o latencia, se relaciona con la disminución en la tasa de paquetes recibidos con éxito PRR. En otras palabras, cuando los paquetes de datos se reciben con éxito, los tiempos de latencia suelen ser más cortos y en consecuencia se mejora la comunicación.

Sin embargo, la tasa de paquetes recibidos con éxito PRR depende del porcentaje de carga remanente en la batería, como se muestra en la Figura 5, donde se observa que el porcentaje de paquetes recibidos PRR decae conforme se reduce el porcentaje de carga de la batería. Cabe mencionar, que la batería BAT-LI-9V USB tiene un circuito de protección que bloquea la salida de energía cuando su voltaje disminuye por debajo de los 6 volts. En este caso, es necesario desconectar la batería del circuito y utilizarla nuevamente hasta que se cargue por completo.

Conclusiones

La confiabilidad de las comunicaciones en las redes de sensores inalámbricos WSN es un factor crítico para la digitalización de la fábrica moderna. Sin embargo, dos de las mediciones más importantes que permiten analizar la confiabilidad, como son la latencia y la tasa de paquetes de datos recibidos, dependen del porcentaje de la carga remanente en la batería de alimentación de los nodos que conforma la red. Los resultados experimentales muestran que la reducción en el suministro de energía en los nodos de una WSN, conduce a una disminución en

la tasa de paquetes recibidos y a un incremento en el tiempo de latencia, afectando la confiabilidad. En consecuencia, es recomendable que el suministro de energía para los nodos de una WSN se mantenga constante. Por ejemplo, un sistema híbrido que recolecta energía del entorno, además de alimentar al nodo sensor, también ayudaría a conservar un porcentaje de carga elevado en la batería de respaldo.

Agradecimientos

El presente trabajo se realizó dentro del programa de doctorado en Manufactura Avanzada en la unidad Jalisco de CIATEQ en colaboración con el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Tecnológico Superior de Jalisco, adscrito al Tecnológico Nacional de México.

Referencias

- Anisi, M.H., Abdullah, A.H., Razak, S.A. (2011). Energy-Efficient Data Collection in Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor Network*. 3(10). 329-333.
- Bein, D., Jolly, V., Kumar, B., Latifi, S. (2005). Reliability Modeling in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Information Technology*. 11(2) 1-8.
- Bhatti, N.A., Alizai, M.H., Syed, A.A., Mottola, L. (2016). Energy Harvesting and Wireless Transfer in Sensor Network Applications: Concepts and Experiences. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 12(3): 1-40.
- Cárdenas R., Alvarado, R., Pichardo, R., Martínez, L., Camacho, C., Rodríguez, A., Perez, M., Rico R. (2022). Celdas de combustible microbiano como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *TEMAS de Ciencia y Tecnología*. 26 (76): 3-10.
- Correia, L., Macedo, D.F., dos Santos, A.L., Loureiro, A.A.F., Nogueira, J.M.S. (2007). Transmission power control techniques for wireless sensor networks. *Computer Networks*, 51(17): 4765-4779.

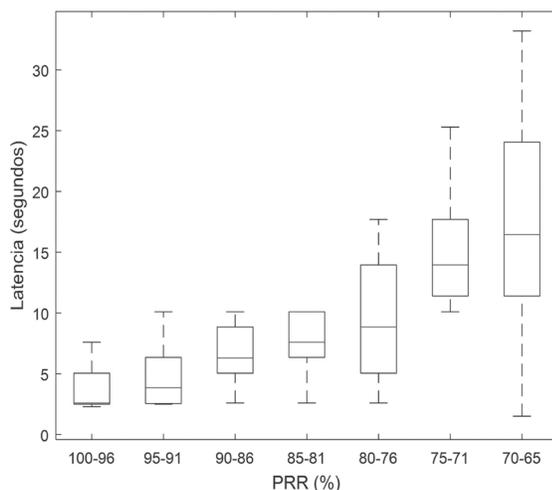


Figura 4. Incremento del tiempo de latencia respecto a la reducción en la tasa de paquetes recibidos PRR.

Fuente: Elaboración propia.

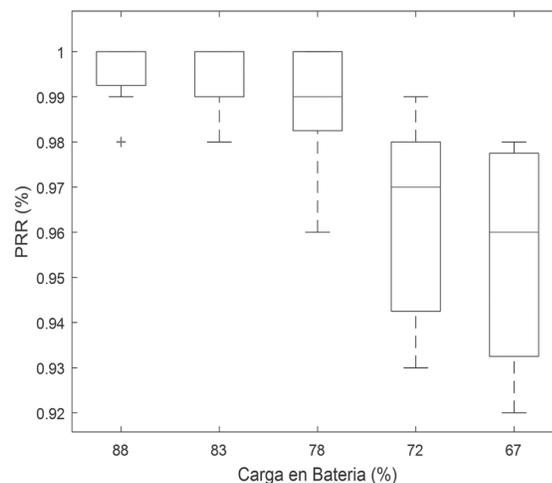


Figura 5. Reducción de la tasa de paquetes recibidos PRR respecto a la disminución en el porcentaje de carga de la batería de alimentación. Fuente: Elaboración propia.

- Distefano, S. (2013). Evaluating reliability of WSN with sleep/wake-up interfering nodes. *International Journal of Systems Science*, 44(10): 1793-1806.
- Ferrari, G., Malvassori, S.A., Bragalini, M., Tonguz, O.K. (2005). Physical layer constrained routing in ad-hoc wireless networks: a modified AODV protocol with power control. *Proceedings of the International Workshop on Wireless Ad-Hoc Networks*. London, United Kingdom.
- Halder, S., Ghosal, A. (2017). Lifetime enhancement of wireless sensor networks by avoiding energy-holes with Gaussian distribution. *Telecommunication Systems*. 64(1): 113-133.
- Kaur, S., Gangwar, R.C. (2016). A Study of Tree Based Data Aggregation Techniques for WSNs. *International Journal of Database Theory and Application*. 9(1), 109-118.
- Kim, D.Y., Jin, Z., Choi, J., Lee, B., Cho, J. (2015). Transmission Power Control with the Guaranteed Communication Reliability in WSN. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(10).
- Li, S., Da Xu, L., Zhao, S. (2018). 5G Internet of Things: A survey. *Journal of Industrial Information Integration*. 10(1):1-9.
- Lin, S., Miao, f., Zhang, J., Zhou, G., Gu, L., He, T., Stankovic, J.A., Son, S., Pappas, G.J. (2016). ATPC: Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*. 12(1): 1-31.
- Mukherjee, M., Shu, L., Prasad, V., Wang, D., Hanke G.P. (2019). Sleep Scheduling for Unbalanced Energy Harvesting in Industrial Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*. 57(2): 108-115.
- Radmand, P., Talevski, A., Petersen, S., Carlsen, S. (2010). Comparison of industrial WSN standards, *4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies*, Dubai, United Arab Emirates.
- Rivera E., (2020). La tecnología como perpetuadora de la desigualdad entre países. *TEMAS de Ciencia y Tecnología*. 24(71): 17-24.
- Samara, K., Hosseini, H. (2016). Aware Diffusion: A Semi-Holistic Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor Network*, 8(1): 37-49.
- Saniuk, S., Saniuk, A., Caganova, D. (2019). Cyber Industry Networks as an environment of the Industry 4.0 implementation. *Wireless Networks*. 27(3):1649-1655.
- Sheu, J.P., Hsieh, K.Y., Cheng, Y.K. (2009). Distributed transmission power control algorithm for wireless sensor networks. *Journal of Information Science and Engineering*. 25(5): 1447-1463.
- Sumathi, R., Srinivas, M.G. (2012). A Survey of QoS Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. *Journal of Information Processing Systems*. 8(4), 589-602.
- Tandel, R. (2016). Leach Protocol in Wireless Sensor Network: A Survey. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 7(4): 1894-1896.
- Tran, H., Akerberg, J., Björkman, M., Tran, H.V. (2019). RF energy harvesting: an analysis of wireless sensor networks for reliable communication. *Wireless Networks*. 25(1), 185-199.
- Varela, M., Putnik, G., Manupati, V., Rajyalashmi, G., Trojanowska, J., Machado, J. (2019). Integrated process planning and scheduling in networked manufacturing systems for I4.0: a review and framework proposal. *Wireless Networks*. 27(3): 1587-1599.
- Villas, L.A., Boukerche, A., Ramos, H.S., de Oliveira, H.A.B.F., Araujo R.B., Loureiro, A.A.F. (2013). DRINA: A Lightweight and Reliable Routing Approach for in-Network Aggregation in Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Computers*, 62(4): 676 - 689.
- Wang, N., Zhu, Y., Wei, W., Chen, J., Liu, S., Li, P., Wen, Y. (2012). One-to-Multipoint Laser Remote Power Supply System for Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal*. 12(2): 389-396.
- Wategaonkar, D.N., Nandhini, R. (2016). A Survey on Reliability in Wireless Sensor Network. *Indian Journal of Science and Technology*. 9(37): 1-6.
- Xiao, S., Dhamdhere, A., Sivaraman, V., Burdett, A. (2009). Transmission power control in body area sensor networks for healthcare monitoring. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 27(1): 37-48.
- Zhao, Z., Zhang, X., Sun, P., Liu, P. (2007). A Transmission power control MAC protocol for wireless sensor networks. *Proceedings of the 6th International Conference on Networking*. Sainte Luce, Martinique, France.