

# Resultados de simulación sobre el rendimiento de una red de sensores inalámbricos

Dr. Teth Azrael Cortes Aguilar, MSC. Adriana Tovar Arriaga

**Resumen** – Los simuladores de redes de sensores inalámbricos se usan con éxito en la industria para ahorrar tiempo y reducir costos de instalación y mantenimiento, porque ayudan a prevenir errores y predecir comportamientos. Además, en la industria 4.0 el uso de simuladores es afín a los principios de virtualización y digitalización de la fábrica. Una red de sensores inalámbricos típica, está conformada por nodos inferiores conectados a una batería, y que transmiten datos de los sensores hacia un nodo coordinador. No obstante, es necesario comprender que parámetros en la configuración de los transeceptores de radiofrecuencia en los nodos inferiores, contribuyen a mejorar el rendimiento de la red, que se puede medir como el porcentaje de datos correctos que llegan con éxito al nodo coordinador. Sin embargo, este porcentaje se puede ver afectado por factores espaciales y temporales que en un entorno real son imprevisibles, pero que un entorno virtual se pueden simular fácilmente, por ejemplo, ajustando la potencia del ruido o ajustando las pérdidas de la potencia de la señal de acuerdo al modelo de propagación. El análisis de los resultados de simulación, para un escenario virtual, muestran que la configuración adecuada de la carga útil de datos y del periodo de muestreo en los transeceptores, son parámetros importantes para alcanzar una buena relación señal a ruido y prolongar el tiempo de vida de la batería que suministra energía a los nodos inferiores.

**Índice de Términos** – Simulación; Redes de Sensores Inalámbricos; Industria 4.0.

## I. INTRODUCCIÓN

El diseño e implementación de soluciones para la industria 4.0 es un tema de investigación en empresas y universidades alrededor del mundo y es un desafío actual, especialmente para países en vías de desarrollo de Latinoamérica que buscan mejorar sus indicadores de competitividad [1]. Los principios que distinguen a la industria 4.0 de la fábrica tradicional, son su adaptabilidad, flexibilidad, integración, descentralización, virtualización, robustez, autonomía, y rapidez de respuesta para satisfacer órdenes de fabricación personalizada [2] donde la toma de decisiones optimizadas con información confiable en tiempo real es imprescindible.

En la industria 4.0 las redes de sensores inalámbricos WSN (*Wireless Sensor Networks*) tienen un rol muy importante en la digitalización de la planta porque tienen propiedades únicas para adquirir, procesar, transferir y proporcionar información del entorno físico en comparación con su contraparte por cable. Además, la industria 4.0 retoma conceptos probados de los sistemas de fabricación holónica, porque permite que máquinas inteligentes enlazados mediante una WSN puedan enviar datos y conectarse con su entorno [3]. En la fabricación holónica se propone la distribución de la toma de decisiones en entidades virtuales autónomas denominadas holones, que poseen algún grado de independencia, pero supeditadas a ciertas condiciones. En la fabricación holónica el proceso inicia con la creación de un holón-orden, que va preguntando a cada holón-máquina si es capaz de realizar sus operaciones; después de consultar su base de datos, los holones-máquina responden indicando si pueden ejecutar la operación y en su caso, el tiempo de ejecución, de esta forma el holon-orden establece la asociación de la orden

Documento recibido el 29 de Abril de 2023. Este trabajo fue apoyado en parte por el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez (TecMM), el Tecnológico Superior de Jalisco (TSJ) y el Tecnológico Nacional de México (TecNM). Camino Arenero No. 11011, Col. El Bajío, CP. 45019, Zapopan, Jalisco, México. [www.tecmm.edu.mx](http://www.tecmm.edu.mx)

T. A. Cortes Aguilar es profesor con perfil PRODEP en la carrera de Ingeniería Electrónica en la unidad académica Zapopan del TecMM, e-mail: [teth.cortes@zapopan.tecmm.edu.mx](mailto:teth.cortes@zapopan.tecmm.edu.mx)

A. Tovar Arriaga es profesora con perfil PRODEP en la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales en la unidad académica Zapopan del TecMM, e-mail: [adriana.tovar@zapopan.tecmm.edu.mx](mailto:adriana.tovar@zapopan.tecmm.edu.mx)

de fabricación con la máquina disponible que la puede ejecutar [4].

Una WSN tiene una estructura jerárquica, en donde la comunicación ocurre entre dos tipos de dispositivos, un nodo coordinador **C**, que administra la comunicación con los nodos inferiores **S<sub>i</sub>**, los nodos inferiores que se encargan de transmitir las señales de los sensores hacia el coordinador, como se muestra en la Fig 1. Sin embargo, cada nodo sensor tiene limitaciones debido a su entorno [5], 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, así como el consumo de energía que se relaciona con el tiempo de vida de la batería de alimentación del nodo sensor [6]. Estos parámetros permiten establecer la confiabilidad de la WSN como una medición del porcentaje de datos correctos que llegan con éxito a su destino.

Sin embargo, la calidad de un enlace por radiofrecuencia entre dispositivos de baja potencia en una WSN puede verse afectada por factores espaciales y temporales. Los factores espaciales se refieren al entorno circundante, como obstáculos, superficies reflejantes, fuentes de ruido electromagnético y atenuación debido a la distancia entre el transmisor y el receptor. Por otra parte, los factores temporales se refieren a cambios ambientales, como la temperatura y la humedad relativa que influyen en el funcionamiento de los circuitos electrónicos y en la propagación de las señales. Además, el consumo de energía y la probabilidad de que el nodo coordinador reciba datos erróneos también se incrementa en función de la longitud de la trama del paquete de datos y de la tasa de cambio del transceptor de su estado inactivo a su estado activo [7]. Algunos parámetros de configuración de los transceptores usados en las WSN tienen un mayor impacto en su desempeño, pero la optimización de estos parámetros se puede llevar a cabo mediante simuladores. Algunas investigaciones, reportan resultados de simulación, donde ajustar el nivel de potencia del transmisor puede mejorar la calidad del enlace y reducir el consumo de energía, así como la demanda excesiva de paquetes de datos [8]. Otras investigaciones también reportan que el uso de subredes en estrella con nodos coordinadores que se comunican entre sí bajo una topología de árbol, es una alternativa para superar las limitaciones de alcance y de obstáculos [9].

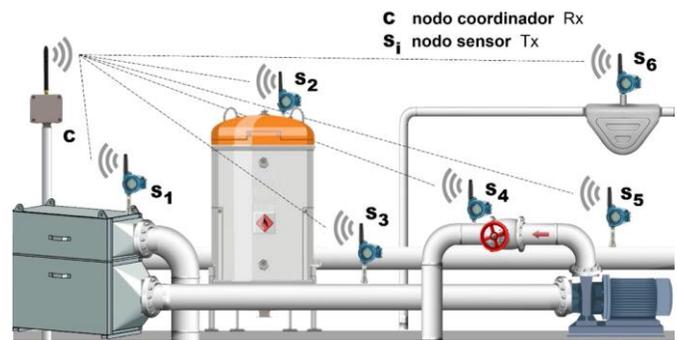


Fig. 1. Representación de una red de sensores inalámbricos en la industria. Fuente: elaboración propia.

Normalmente el desarrollo de una WSN consta de tres etapas. En la primera etapa ocurre la conceptualización de la idea. En la segunda etapa se diseña la red y en la tercera etapa se lleva a cabo la instalación y prueba. Sin embargo, durante las pruebas de la red pueden surgir problemas, que además de provocar retrasos, incrementan el costo de la instalación final. Por otro lado, las WSN diseñadas con el soporte de un software de simulación pueden prevenir muchos de estos problemas. La virtualización de las WSN afín a los principios de la industria 4.0, puede ayudar a mejorar el consumo de energía y el rendimiento de la red, a partir del análisis teórico sobre un escenario que simula, por ejemplo un área de almacén y producción para una fábrica farmacéutica [10].

Los simuladores de WSN pueden usarse con éxito en la industria para ahorrar tiempo y reducir costos de instalación y mantenimiento, porque tienen como propósito prevenir errores, modificar parámetros y predecir comportamientos [11]. La implementación de una WSN confiable para la industria 4.0 en los sistemas de fabricación holónica, facilitaría redirigir la producción de una máquina o proceso, reaccionando de manera oportuna ante una falla.

En este artículo se presenta un análisis sobre los resultados de simulación de una red de sensores inalámbricos WSN. Se utilizó el simulador sWSN3 [12], que mediante una interfaz gráfica intuitiva permite colocar los nodos sobre la imagen de una distribución de planta y configurar los parámetros de cada enlace para calcular indicadores de rendimiento como: la relación señal a ruido SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), la tasa de paquetes recibidos sin error PRR (*Packet Received Rate*) y el tiempo de vida de la batería de alimentación. Estimar las tendencias de estos parámetros a través de un simulador tiene como ventajas la optimización de los

transceptores y ayudar a la toma de decisiones en el diseño de la red para incrementar su confiabilidad, antes de su implementación real, permitiendo evaluar su rendimiento en un escenario virtual, y afín a los principios de la industria 4.0.

II. METODOLOGÍA

El software de simulación sWSN3 [12] para redes de sensores inalámbricos, utilizado en el presente trabajo, se ejecutó en una computadora portátil con procesador INTEL core i7, con 8GB de RAM y tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE 940MX. El simulador sWSN3 fue desarrollado en MATLAB como una interfaz gráfica GUI (*Graphical User Interface*), para facilitar la captura de datos, como: las posiciones de los nodos y sus parámetros, ver Fig. 2. Por ejemplo, la posición de cada uno de los nodos que conforman la red, se realiza al oprimir el botón izquierdo del ratón sobre una ubicación deseada en la distribución de planta (*layout*), que simula un área de 100x100m de la fábrica.

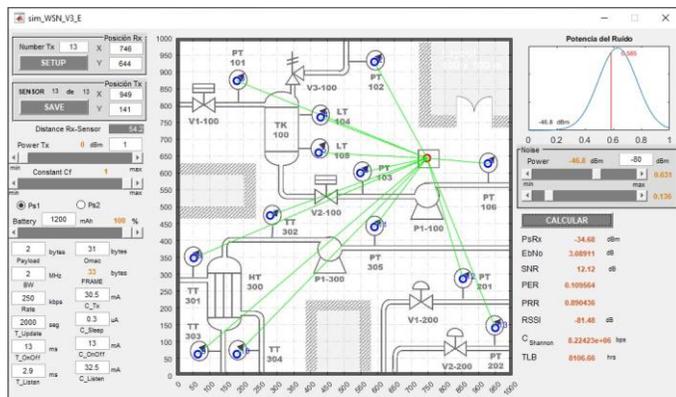


Fig. 2. Imagen de la interfaz gráfica de usuario del simulador sWSN3, con el layout del escenario de simulación analizado en la sección de resultados. Fuente: elaboración propia.

En Fig. 3 se muestra el diagrama de flujo que describen los pasos para el uso del simulador sWSN3. Primero, se debe cargar la imagen del layout de la planta. Después se configura la posición del nodo coordinador y el número de nodos sensores que se conectan en topología de estrella. A continuación, se ingresan los parámetros de configuración para cada uno de los nodos sensores, incluyendo la selección del modelo propagación, así como la media y la desviación estándar de una distribución normal, de la cual se toma aleatoriamente el parámetro de la potencia del ruido. El simulador sWSN3 permite seleccionar dos modelos de propagación entre el nodo sensor y el nodo coordinador. El modelo de propagación de línea de vista se calcula

con (1) y el modelo de propagación con reflexión se calcula con (2), donde  $P_t$  es la potencia de transmisión configurada por el usuario en el nodo sensor y  $d$  es la distancia de separación entre el nodo coordinador y el nodo sensor, calculada por el simulador respecto a la posición de los nodos en el layout.

$$PsRx = P_t/d^2 \tag{1}$$

$$PsRx = P_t/d^4 \tag{2}$$

El simulador sWSN3 trabaja con el protocolo de comunicación IEEE 802.15.4 que opera en la frecuencia de 2.4 GHz y es uno de los más usados en las WSN [13]. Después de ingresar los parámetros de configuración del nodo sensor se oprime el botón CALCULAR en la GUI del simulador sWSN3 y se muestran los cálculos de salida descritos en la Tabla I. Estos cálculos se actualizan cada vez que el usuario oprime el botón CALCULAR y después de realizar algún cambio en algún parámetro de configuración del nodo sensor. Finalmente, al oprimir el botón GUARDAR se almacenan en memoria los datos y el proceso se repite hasta concluir con el total de nodos sensores que conforman la WSN.

TABLA. I. DESCRIPCIÓN DE CÁLCULOS DE SALIDA PARA CADA NODO SENSOR

Parámetro	Descripción
PsRx	Se refiere a la potencia esperada en el receptor (nodo coordinador) de acuerdo al modelo de propagación seleccionado.
EbNo	Es el producto de la energía requerida por bit de información Eb sobre el ruido térmico a 1 Hz de ancho de banda No.
SNR	Relación señal a ruido, que se calcula como (EbNo)(R/B) donde R es la tasa de transmisión del transceptor en bps y B es el ancho de banda en Hz.
PRR	Tasa de paquetes recibidos en el nodo coordinador sin errores.
PER	Tasa de paquetes recibidos con error en el nodo coordinador, se calcula como PER= 1 –PRR.
RSSI	Indicador de intensidad de la potencia recibida, incluye tanto la energía de la señal de información como la energía del ruido.
Cshannon	Límite de Shannon, se refiere a la capacidad máxima de transmisión del enlace en bps.
TLB	Se refiere al tiempo de vida de la carga de la batería, que suministra energía para cada

uno de los nodos sensores que conforma la WSN.

Fuente: elaboración propia

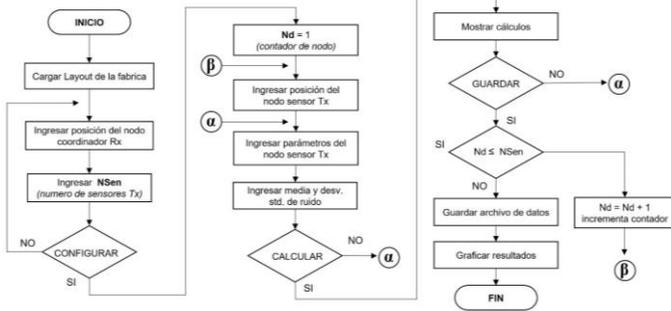


Fig. 3. Diagrama de flujo del simulador sWSN3. Fuente: elaboración propia.

### III. RESULTADOS

Los graficas que se muestran en esta sección corresponden al escenario de simulación de la Fig. 2. En el modelo de propagación de línea de vista (1) la potencia recibida es proporcional a la potencia transmitida entre el cuadrado de la distancia de separación del transmisor y el receptor. Con  $P_t=100\text{mW}$ , de la Fig. 4 se deduce que un incremento en la distancia de transmisión requiere un incremento en SNR para garantizar un enlace confiable. Es decir, conforme se reduce la potencia de la señal recibida respecto a la potencia del ruido  $P_n$ , se reduce SNR y la distancia de transmisión. Por ejemplo, para  $\text{SNR}=3\text{dB}$  se espera que la máxima distancia sea de 1.4m, pero si  $\text{SNR}=43\text{dB}$  entonces la distancia máxima se incrementa hasta 141.3m. También se observa en la Fig. 5 un comportamiento similar en la dependencia de SNR contra la distancia para el modelo de propagación con reflexión (2), sin embargo, para alcanzar una distancia de transmisión confiable máxima de 141.3m se requiere un valor mayor de SNR de 86dB. En la Fig. 4 y en la Fig. 5 cada línea de la gráfica corresponde a un valor constante en la potencia del ruido  $P_n$ , señalado en el eje vertical derecho. El valor de SNR decae hasta cero, conforme la potencia de la señal recibida disminuye respecto al incremento de la distancia, la cual se muestra en escala logarítmica en el eje horizontal.

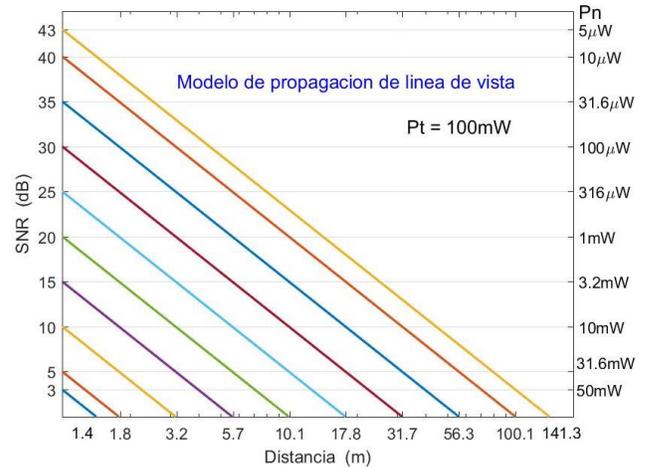


Fig. 4. SNR contra distancia para el modelo de propagación de línea de vista. Fuente: elaboración propia.

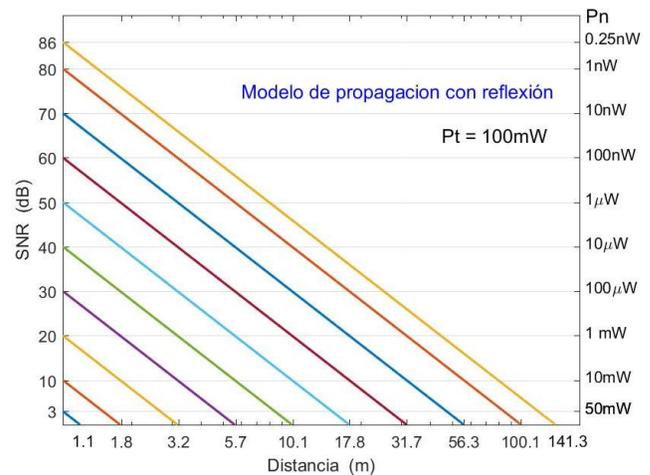


Fig. 5. SNR contra distancia para el modelo de propagación con reflexión. Fuente: elaboración propia.

La carga útil de datos (*Payload*) se refiere a la cantidad de bytes que genera el sensor como información para el nodo coordinador. La trama de un paquete de datos está conformado por los bytes del encabezado, que llevan información del origen y el destino; más los bytes de la carga útil. En la Fig. 6 se muestra la gráfica PRR contra SNR para diferentes valores de la carga útil de datos  $n$ , con una tasa de transmisión de  $R=9,600\text{bps}$  y un ancho de banda de  $B=2\text{MHz}$ . Se observa que al incrementar la carga útil de datos, la curva se desplaza hacia valores más grandes de SNR. Un enlace confiable requiere un PRR cercano a 1 y valores de SNR más grandes. Por ejemplo en la Fig. 6 valores de SNR mayores a 28dB conducen a valores de PRR mayores a 0.9 y en consecuencia, se reciben menos paquetes de datos con errores en el nodo coordinador.

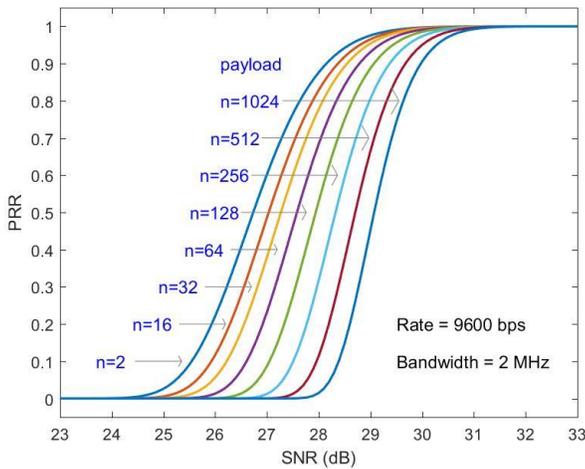


Fig. 6. PRR contra SNR para diferentes valores de carga útil de datos. Fuente: elaboración propia.

En la Fig. 7 y Fig. 8 se muestran los parámetros de configuración del transceptor, donde, T es el tiempo de muestreo de los datos, es decir, el tiempo entre dos transmisiones consecutivas detectadas por el sensor, I1 y T1 son la corriente y el tiempo total para encender y apagar el transceptor; I2 y T2 son la corriente y el tiempo para acceder al canal y recibir la confirmación de enlace del coordinador; I3 es la corriente consumida durante la transmisión; Is es la corriente consumida en modo de bajo consumo de energía. La tasa de transmisión se estableció en 9600bps y 28 bytes para el encabezado del paquete de datos. La grafica de la Fig. 7 muestra la reducción del tiempo de vida de una batería de 400mAh respecto al incremento en la carga útil de datos, considerando que el tiempo de actualización o de muestro del sensor ocurre cada T=100ms. Para el caso de una transmisión de  $2^1$  bytes, la carga de la batería se agotará en aproximadamente 2 días. Pero una transmisión de  $2^{16}$  bytes agotará la carga de la batería en 1.5 horas.

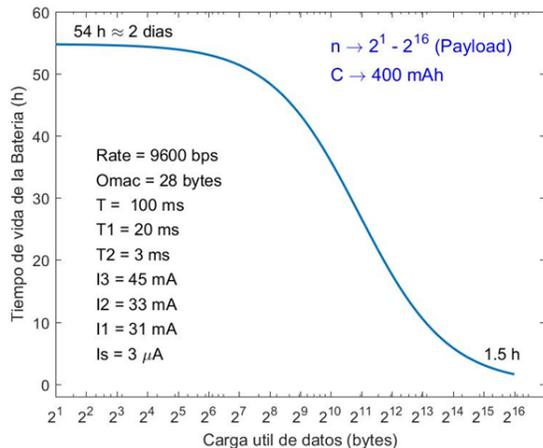


Fig. 7. Tiempo de vida útil de la batería contra la carga útil de datos. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la Fig. 8 muestra que al incrementar el tiempo de actualización o de muestreo del sensor se reduce el tiempo de vida de la batería de alimentación. Así una batería de 400mAh agotará por completo su carga en 45 días si el tiempo de actualización ocurre cada 2 segundos, pero si el tiempo de actualización disminuye a cada 100ms entonces la carga se agotará en aproximadamente 2 días, dejando inhabilitado el nodo sensor de manera prematura.

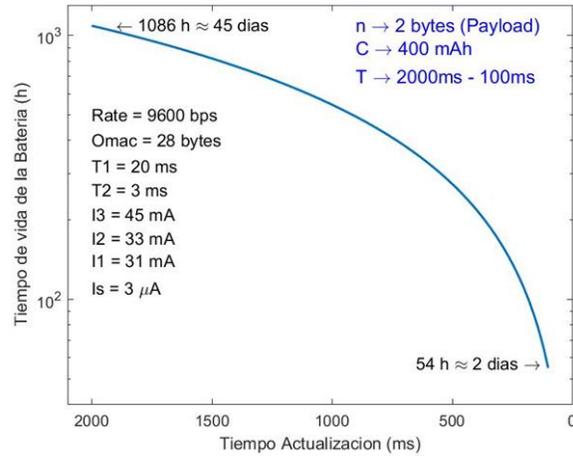


Fig. 8. Tiempo de vida útil de la batería contra el tiempo de actualización. Fuente: elaboración propia.

Como se puede inferir, el conocer por anticipado la tendencia del tiempo de vida de la batería de alimentación de los nodos sensores puede ayudar a decidir el periodo de mantenimiento.

#### IV. CONCLUSIONES

Los resultados de simulación muestran que para una potencia de transmisión de 100mW y distancias equivalentes entre el nodo sensor y el coordinador, el modelo de propagación con reflexión requiere valores de SNR más elevados que el modelo de propagación por línea de vista. En un entorno real, será muy difícil minimizar los efectos del ruido, pero esto se puede compensar incrementando la potencia del transmisor, acortando la distancia de transmisión o mejorando la direccionalidad de la antena para evitar reflexiones no deseadas.

Por otro lado, el rendimiento de las redes de sensores inalámbricos, no depende únicamente de que la potencia de la señal sea mucho mayor que la potencia del ruido, calculado a través de SNR, sino de la cantidad de paquetes que llegan al receptor sin errores, medido a través de PRR. Pero la tasa de paquetes que se reciben con éxito PRR en el nodo coordinador, depende a su vez, de la carga útil de datos. Enviar una mayor cantidad

de bytes en la carga útil no solo eleva el requisito de un mayor SNR, también tiende a reducir la vida de la batería de alimentación que suministra energía a los nodos sensores. El periodo de actualización o muestreo del nodo sensor, también es otro factor a considerar en el diseño de una WSN. Tiempos de muestreo demasiado cortos incrementan la demanda de energía y agotan más rápidamente la reserva de energía de las baterías. En consecuencia, el mejor rendimiento en las WSN se logrará configurando correctamente el transceptor, estableciendo el máximo periodo de actualización aceptable y usando la carga útil al mínimo de bytes necesarios para transmitir la información deseada.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la unidad académica Zapopan del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez (TecMM) por el apoyo parcial para la realización del presente proyecto, así como al Tecnológico Superior de Jalisco (TSJ), al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Centro de Manufactura Avanza, unidad Jalisco (CIATEQ).

#### REFERENCIAS

- [1] E. Buenrostro. "Propuesta de adopción de tecnologías asociadas a la industria 4.0 en las pymes mexicanas" *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*. vol. 10, no. 24 pp. 1-19, 2022. DOI: 10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81347
- [2] C. E. Belman-Lopez, J. A. Jiménez-García, y S. Hernández-González. "Análisis exhaustivo de los principios de diseño en el contexto de Industria 4.0", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 7, no.4, pp. 432-447, 2020. DOI: 10.4995/riai.2020.12579
- [3] H. Wan, M. David, & W. Derigent. "A Holonic Manufacturing Approach Applied to Communicate Concrete: Concept and First Development", *Studies in Computational Intelligence*, 853, pp. 414-425, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-27477-1\_32
- [4] J. A. Araúzo, R. del-Olmo-Martínez, J.J. Laviós, y J.J. de-Benito-Martín. "Programación y Control de Sistemas de Fabricación Flexibles: un Enfoque Holónico". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. vol. 12, pp. 58-68, 2015. DOI: 10.1016/j.riai.2014.11.005
- [5] M.Y. Aalsalem, W.Z. Khan, W. Gharibi, M.K. Khan & Q. Arshad. "Wireless Sensor Networks in oil and gas industry: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges" *Journal of Network and Computer Applications*. vol. 113, pp. 87-97, 2018. DOI: 10.1016/j.jnca.2018.04.004
- [6] P. Radmand, A. Talevski, S. Petersen, & S. Carlsen. "Comparison of industrial WSN standards", *4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies*, Dubai, pp. 632-637, 2010. DOI: 10.1109/DEST.2010.5610582
- [7] I. Leyva-Mayorga, M.E. Rivero-Angeles, C. Carreto-Arellano, y V. Pla. "Análisis de Desempeño de un Protocolo para Redes Inalámbricas de Sensores Basado en TDMA con Capacidades de Radio Cognoscitivo", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. vol. 13 no. 1, pp. 92-102, 2016. DOI: 10.1016/j.riai.2015.11.003
- [8] M. Tahir, N. Javaid, A. Iqbal, Z.A. Khan, & N. Alrajeh. "On Adaptive Energy-Efficient Transmission in WSN". *International Journal of Distributed Sensor Networks*. pp. 1-10, 2013. DOI: 10.1155/2013/923714
- [9] E. Mendoza, P. Fuentes, I. Benítez, D. Reina, y J. Nuñez. "Red de sensores inalámbricos multisalto para sistemas domóticos de bajo costo y área extendida", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. vol. 17, pp. 412-423, 2020. DOI: 10.4995/riai.2020.12301
- [10] Y. Duan, W. Li, X. Fu, Y. Luo & L. Yang. "A methodology for reliability of WSN based on software defined network in adaptive industrial environment" *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 5 no. 1, pp. 74-82, 2018. DOI: 10.1109/JAS.2017.7510751
- [11] M.Z. Khan, B. Askwith, F. Bouhafs, & M. Asim. "Limitations of simulation tools for large-scale wireless sensor networks", *IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, Singapore. pp. 820-825, 2011. DOI: 10.1109/WAINA.2011.59
- [12] T.A. Cortés-Aguilar, J.A. Cantoral-Ceballos, A. Tovar-Arriaga, "sWSN3: A simulation tool for reliability calculation in WSN", *Nova Scientia*, vol. 15, no. 30, Mar. 2023.
- [13] T.S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice Hall, 2002.