

Análisis del Retardo en la Transmisión de Secuencia de Tramas en Redes Inalámbricas de Sensores Lineales Usando iACK

Egas, Carlos^{1*} ; Gil-Castiñeira, Felipe² ; Herrera, Carlos¹ 

¹ Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Quito, Ecuador

² Universidad de Vigo, GTI, Vigo, España,

Resumen: La transmisión confiable con bajo retardo y baja potencia son parámetros que deben cumplirse en el diseño de redes inalámbricas de sensores lineales con múltiples saltos que operan con el protocolo IEEE 802.15.4. Para minimizar el retardo por procesamiento en el nodo debido a la confirmación de la recepción de la trama, se utiliza la confirmación implícita en lugar de la confirmación explícita manteniendo la misma confiabilidad, lo que permite minimizar los retardos de extremo a extremo en redes multisalto con topología lineal con cientos de nodos. Se analiza matemáticamente los retardos cuando un nodo tiene que transmitir o retransmitir secuencias de tramas en topologías lineales utilizando una confirmación implícita y explícita, y se los compara con los resultados obtenidos en un prototipo de red construido para tal efecto. El análisis revela que el uso de la confirmación implícita en la transmisión de secuencias de tramas en topologías lineales disminuye el retardo por procesamiento en el nodo sensor y el retardo de extremo a extremo.

Palabras clave: sensores, inalámbricos, lineal, retardo, enlace

Analysis of the Delay in the Transmission of Frame Sequence in Wireless Networks of Linear Sensors Using iACK

Abstract: Reliable transmission with low delay and low power are parameters that must be met in the design of multi-hop wireless linear sensor networks that operate with the IEEE 802.15.4 protocol. In order to minimize the processing delay in the node due to the confirmation of the reception of the frame, the implicit confirmation is used instead of the explicit confirmation maintaining the same reliability, which allows minimizing the end-to-end delays in multi-hop networks with linear topology with hundreds of nodes. The delays are mathematically analyzed when a node has to transmit or retransmit frame sequences in linear topologies using an implicit and explicit confirmation, and they are compared with the results obtained in a network prototype built for this purpose. The analysis reveals that the use of implicit confirmation in the transmission of frame sequences in linear topologies decreases the processing delay at the sensor node and the end-to-end delay.

Keywords: sensors, wireless, linear, delay, link

1. INTRODUCCIÓN

Una red inalámbrica de sensores (WSN) se utiliza para obtener información de monitoreo para una aplicación determinada. Una WSN está formada por nodos que tienen limitaciones en la capacidad de cálculo, lo que genera retrasos de procesamiento en el nodo, y limitaciones en la energía disponible, debido a que funcionan con baterías, afectando la vida útil de los nodos y por lo tanto al funcionamiento de la red. Para disponer de conectividad extremo a extremo en una WSN, se han creado protocolos de comunicación específicamente diseñados para redes de sensores inalámbricos como Zigbee (Agarwal, 2015) o se ha adaptado el protocolo IPv6 para trabajar en una WSN, creando 6LowPAN (Chen et al., 2011)

para tener compatibilidad con la red de Internet. En las redes de sensores inalámbricos, el estándar para la capa de enlace y capa física es IEEE 802.15.4 (IEEE Standard, 2006). Los protocolos 6LowPAN y Zigbee utilizan IEEE 802.15.4 mientras que los protocolos WirelessHART (Luo et al., 2021) e ISA100.11a (Sen, 2021) solo utilizan la capa física.

Al presente, no existe la estandarización de la arquitectura para redes inalámbricas de sensores (Kumar S. et al., 2014), situación que se evidencia en la actualidad con la utilización de diferentes protocolos a partir de la capa de enlace. Por otro lado, existen dos tendencias relacionadas con la definición de la arquitectura WSN (Acosta et al., 2020). La primera tendencia indica que la arquitectura de la WSN debe ser similar a la

*carlos.egas@epn.edu.ec

Recibido: 13/05/2023

Aceptado: 24/08/2023

Publicado en línea: 14/11/2023

10.33333/rp.vol52n2.07

CC 4.0

arquitectura de Internet, y la otra tendencia indica que la arquitectura depende de la aplicación.

Las redes de topología lineal multsalto a gran escala, denominadas LWSN (Sokullu & Demir, 2018), se caracterizan por tener miles de nodos. Estos sistemas se utilizan en diversas aplicaciones (Imran et al., 2016), incluida la supervisión de carreteras (Abbas et al., 2018), tuberías (Varshney et al., 2021), en la industria del gas (Lee et al., 2020), y se ha convertido en la tecnología preferida debido a los bajos costos de implementación y operación en infraestructuras lineales de cientos de kilómetros debido a que el costo para implementar la infraestructura física cableada para la transmisión de datos y el suministro de energía es alto.

En el caso de las redes inalámbricas de sensores con topología lineal (LWSN), al tener una sola ruta entre el nodo fuente y el nodo frontera, no se requiere el proceso de enrutamiento (Egas Acosta et al., 2021) y el nodo al tener una misma interface inalámbrica para la transmisión y recepción de datos, no requiere realizar el proceso de conmutación. Para optimizar los retrasos de procesamiento en el nodo en LWSN, es necesario definir una arquitectura que no tenga conmutación y enrutamiento las cuales son funciones de la capa de red, la eliminación de la capa de red obliga a que las funciones adicionales del nivel de red que se utilizan para tener conectividad de extremo, deben ser implementadas a nivel de enlace o a nivel de transporte.

En LWSN, el retraso de extremo a extremo y el consumo de energía de los nodos es un problema a resolver por lo cual es necesario crear las condiciones adecuadas que permitan la implementación de nuevas aplicaciones en LWSN.

El protocolo IEEE 802.15.4 permite que el nodo receptor, confirme al nodo transmisor la recepción exitosa de la trama utilizando la trama de confirmación conocida como ACK. Esta técnica se conoce como confirmación explícita eACK, el uso de eACK es opcional. En una estructura lineal como se observa en la Figura 1, cuando el nodo intermedio v_i tiene varias tramas para retransmitir al nodo fronterizo v_{n+1} , debe esperar a que el nodo v_{i+1} confirme la recepción de la primera trama con eACK y de esta manera, el nodo retransmite la segunda trama, proceso que se repite con todas las tramas que están almacenadas en v_i para ser retransmitidas. El tiempo de espera del nodo v_i para recibir la confirmación eACK del nodo v_{i+1} , es un parámetro que afecta el tiempo que tarda el nodo v_i en transmitir varias tramas y por lo tanto a su consumo de energía.

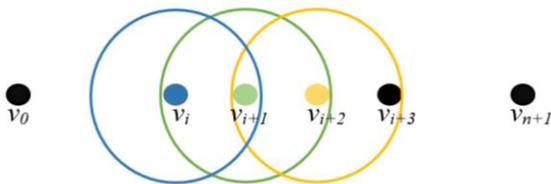


Figura 1. Estructura lineal multsalto

Cuando el nodo v_{i+1} recibe la trama de v_i , el momento en que el nodo v_{i+1} retransmite la trama al nodo v_{i+2} , la señal es captada por el nodo v_i y por tanto, este nodo sabe que su transmisión al nodo v_{i+1} fue exitosa, dando lugar a la confirmación implícita de la trama, denominada como iACK.

En una topología lineal multsalto formada por $n+2$ nodos, cuando el nodo v_i detecta un evento, y tiene que transmitir la información utilizando k tramas, el nodo las transmite al nodo

v_{i+1} y este nodo retransmite las tramas al nodo v_{i+2} y así sucesivamente hasta que todas las tramas lleguen al nodo de borde v_{n+1} . El nodo v_{i+1} debe tener prioridad sobre v_i en el uso del canal para retransmitir la trama al nodo v_{i+2} con el propósito de disminuir los retardos de extremo a extremo.

Estudios anteriores han demostrado la ventaja de usar iACK en lugar de eACK en condiciones de ruido y diferentes tipos de tráfico (Rosberg et al., 2008), del mismo modo, se ha encontrado que la confirmación de mensajes de nodo a nodo (capa de enlace) es mejor que la confirmación de mensajes de extremo a extremo (capa de transporte), optimizando el consumo de energía y los retardos de transmisión (Shanti & Sahoo, 2014). En el caso de las topologías lineales, se ha demostrado que el uso de iACK disminuye el retardo en el nodo por retransmisión de una trama y en el retardo de extremo a extremo, además reduce el consumo de energía de los nodos intermedios que tienen que retransmitir la trama a lo largo de la infraestructura lineal (Acosta et al., 2020). Estas investigaciones son las premisas en las cuales se basa nuestra propuesta que permite minimizar los retardos.

Analizamos la ventaja de usar iACK en lugar de eACK en topologías lineales cuando un nodo necesita enviar un mensaje al nodo frontera utilizando k tramas de datos con el protocolo IEEE 802.15.4. Cuantificamos las ventajas de usar iACK, en el retardo por procesamiento en el nodo y en el retraso en la transmisión de extremo a extremo manteniendo la misma fiabilidad que eACK.

En este contexto, la propuesta de utilizar iACK en estructuras lineales, cuando un nodo tiene que retransmitir varias tramas genera las siguientes contribuciones:

1. Disminuye el retardo de extremo a extremo.
2. Disminuye el retardo por procesamiento en el nodo que retransmite las tramas.
3. Facilita la utilización del estándar IEEE 802.15.4 como una tecnología para el desarrollo de aplicaciones de monitoreo en estructuras lineales a gran escala.
4. Contribuye para la prouesta de una arquitectura de red para LWSN sin capa de red

2. TRABAJOS RELACIONADOS

La mayor parte de las investigaciones realizadas en redes inalámbricas de sensores con topología lineal, con el propósito de optimizar los retardos en el nodo, están relacionadas con nuevos protocolos para la capa MAC diseñados específicamente para topología lineales (Singh et al., 2019). En otros casos, se han definido algoritmos para determinar las ubicaciones óptimas de los nodos en la estructura lineal (Albaseer & Baroudi, 2019). Nuevos esquemas de enrutamiento (Varshney et al., 2019) han sido propuestos. En Li et al. (2019), los autores para equilibrar la fiabilidad y el consumo de energía en una red de difusión con topología de tipo árbol, utilizan iACK y lo comparan con eACK, además de evaluar el consumo de energía en condiciones de ruido.

En Blagojević et al. (2011), se propone el uso de reconocimientos probabilísticos, basados en la calidad del enlace entre nodos, expresados como proporciones de recepción de paquetes que ofrecen varias ventajas en comparación con los métodos tradicionales de ARQ. En Dong et al. (2016), se presenta un protocolo de recopilación de datos

que combina NACK y ACK para una transmisión óptima de varias tramas a lo largo de topologías de tipo árbol de salto múltiple aplicadas a redes de sensores inalámbricos.

En Bagci (2016), se propone un protocolo MAC para el ahorro de energía basado en token ring en el que se optimizan los tiempos en los que el nodo tiene que estar en modo de recepción. Tharatipayakul et al. (2014) analizan la disminución del retardo y el aumento efectivo del porcentaje de paquetes recibidos cuando se utiliza iACK en una red inalámbrica de sensores IP multidifusión. En Rosberg et al. (2008) se compara la eficiencia energética de ARQ al trabajar en el modo para y espera, con el esquema iACK utilizado en la capa de enlace en redes multisalto, analizando las consecuencias de usar iACK con las altas pérdidas de paquetes.

Todas las investigaciones anteriores consideran escenarios con topologías de malla, árbol o estrella, las redes inalámbricas de sensores con topología lineal, tienen la característica especial de tener una única ruta multisalto por la cual la trama debe llegar a su destino, por lo tanto se considera que los protocolos de enrutamiento son demasiado complejos para ser utilizados en redes con topología lineal. Por otro lado, en el diseño de los protocolos para la capa de enlace, se consideran cientos de nodos dentro del área de cobertura de un nodo sensor, en topologías lineales, en la mayoría de aplicaciones, el número de nodos sensores que están dentro del área de cobertura de un nodo es mínimo lo que genera redes multisalto como se aprecia en la Figura 1 y las aplicaciones que generan de alarmas generan poco tráfico como por ejemplo la detección perforaciones no autorizadas en tuberías para el robo de gasolina.

3. PROPUESTA

Nuestra propuesta valida la utilización del estándar IEEE 802.15.4 en redes multisalto con topología lineal con cientos de nodos sensores retransmisores optimizando el retardo por procesamiento en el nodo y el retardo extremo a extremo, cuando se tiene que transmitir un mensaje utilizando varias tramas sin la utilización de los procesos del nivel de red.

El análisis realizado, considera redes de monitoreo en una estructura lineal a gran escala que tienen las siguientes características:

- Cuando el nodo v_i tiene k tramas para transmitir al nodo v_{i+1} , en el momento que v_{i+1} retransmite la trama al nodo v_{i+2} , el nodo v_i puede empezar a transmitir la siguiente trama al nodo v_{i+1} , por lo tanto, existe la posibilidad de colisiones de la señal de los nodos v_i y v_{i+1} .
- Cuando el nodo v_i tiene que seguir transmitiendo varias tramas al nodo v_{i+1} , en el momento en que v_{i+2} retransmite una trama al nodo v_{i+3} , existe la posibilidad de tener problemas relacionados con el nodo oculto en el nodo v_{i+1} con los nodos v_i y v_{i+2} .
- Los nodos están ubicados en zonas despobladas donde la presencia de interferencias es mínima (por ejemplo, en redes de monitorización de tuberías, bordes de carreteras, etc.), por lo que la probabilidad de error al transmitir una trama en cada enlace es la misma, y se considera despreciable.

- La probabilidad de que ocurran eventos simultáneos a lo largo de la infraestructura lineal en el mismo instante es poco probable.

El nodo v_i al detectar un evento de monitoreo o alarma, genera información que requiere de k tramas para transmitir los datos obtenidos. Esta condición es consecuencia de que la trama IEEE 802.15.4 tiene una longitud máxima de 127 bytes, lo cual no puede ser suficiente para transmitir en una sola trama la información.

Para realizar el análisis matemático, consideramos una LWSN que opera con el estándar IEEE 802.15.4, en el modo no ranurado, el nodo receptor se encuentra en el extremo de la zona de cobertura y se considera que los nodos pueden estar ubicados hasta una distancia máxima de 50 metros.

En el análisis se definen las siguientes variables; x representa el número de bytes que deben ser encapsulados en la trama IEEE 802.15.4, T_{BO} es período de espera (backoff), T_{CCA} representa el tiempo requerido para evaluar si el canal está libre, $T_{tra(x)}$ es el tiempo requerido para la transmisión de una trama con una carga útil de x byte, T_{TA} es el tiempo que se requiere para pasar del modo de TX al modo RX, T_{ACK} es tiempo de transmisión para una trama ACK, T_{IFS} (Interframe Space time) es el tiempo de procesamiento que requiere el nodo para procesar una trama. Debido a que la distancia entre los nodos es pequeña, el tiempo de propagación se considera insignificante. La velocidad utilizada en el análisis es de 250 kbps, por lo tanto, 1 símbolo que se compone de 4 byte, tiene un período $T_s = 16\mu s$. El período de backoff se calcula como el producto entre el número de ranuras de backoff y el tiempo de cada ranura (20 símbolos). El número de ranuras que forman parte del tiempo de backoff es un número aleatorio que se obtiene de la siguiente expresión $(0, 2^{BE}-1)$, con un valor mínimo de BE igual a 3. El tiempo sugerido para que un nodo procese una trama y , por lo tanto, pase al estado de recepción o transmisión está dado por el período mínimo de separación entre tramas (IFS). La duración del período IFS depende del tamaño de la trama. La trama IEEE 802.15.4 con una longitud de hasta 18 bytes debe ir seguida de un período SIFS de al menos 12 períodos de símbolos. Las tramas con longitudes superiores a 18 bytes deben ir seguidas de un LIFS de al menos 40 períodos de símbolos. En casos reales, este retraso mínimo de IFS generalmente es absorbido por el tiempo de acceso al canal CSMA-CA. El análisis del retardo se realiza cuando se transmiten dos tramas luego se generaliza para k tramas.

En la Figura 2 se presenta la secuencia de transmisión de la segunda trama del nodo v_i al nodo v_{i+1} utilizando eACK. El nodo v_i transmite la trama en t_1 , en t_2 está listo para transmitir la segunda trama. Cuando el nodo v_i recibe el ACK, no puede enviar la segunda trama porque la prioridad de uso del canal es del nodo v_{i+1} para que pueda reenviar la trama al nodo v_{i+2} . Por lo tanto, en t_3 , el nodo v_i no puede comenzar a generar el tiempo de backoff para transmitir la segunda trama para evitar colisiones con el nodo v_{i+1} . Por lo que debe esperar un tiempo para que el momento que el nodo v_i detecte la utilización del canal, el canal ya esté siendo utilizado por el nodo v_{i+1} y de esta manera se evita la transmisión de la segunda trama debido a que el nodo v_{i+1} está ocupado retransmitiendo la trama.

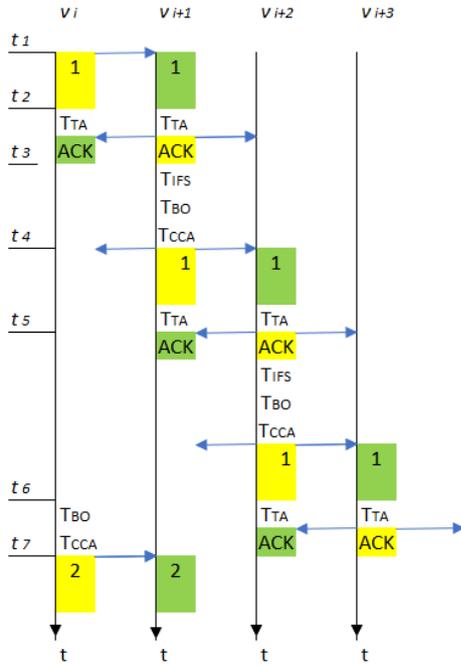


Figura 2. Secuencia de envío de segunda trama con eACK

En t_3 , el nodo v_{i+1} tiene la prioridad de reenviar la trama a v_{i+2} y la envía en t_4 . A partir de t_5 , v_i no puede transmitir la segunda trama para evitar el problema del nodo oculto cuando el nodo v_{i+2} retransmite la trama al nodo v_{i+3} debido a que la señal emitida por v_{i+2} también llega a v_{i+1} . Por lo tanto, con eACK, el nodo v_i en t_6 debe empezar a ejecutar a los procesos para transmitir la segunda trama en t_7 y de esta manera evitar colisiones, el problema del nodo oculto y minimizar los retardos en la transmisión de la primera trama

En la Figura 3, se presenta el proceso de transmisión de la segunda trama por parte del nodo v_i utilizando iACK. En este caso, en t_1 , el nodo v_i transmite la primera trama al nodo v_{i+1} , el nodo v_i no puede transmitir inmediatamente la segunda trama en t_2 al nodo v_{i+1} porque necesita recibir el iACK, además, el nodo v_{i+1} tiene prioridad para retransmitir la trama al nodo v_{i+2} . Después de un tiempo T_w definido por la siguiente expresión:

$$T_w = T_{TA} + T_{BO} + T_{CCA}$$

el nodo v_{i+1} retransmite la trama al nodo v_{i+2} en t_3 y por lo tanto con esta retransmisión el nodo v_i recibe el iACK.

El nodo v_i tiene que esperar a que el nodo v_{i+1} retransmita la trama y reciba el iACK del nodo v_{i+2} . Después de que el nodo v_{i+2} termina de reenviar la trama al nodo v_{i+3} , el nodo v_{i+1} recibe el iACK y está en capacidad de recibir la segunda trama del nodo v_i . Para evitar el problema del nodo oculto, el nodo v_i debe esperar hasta t_5 para comenzar a ejecutar los procesos para transmitir la segunda trama en t_6 . Por lo tanto, con iACK, el nodo v_i puede comenzar a transmitir la segunda trama en t_6 y así evitar colisiones y el problema del nodo oculto que afectan al retardo de extremo a extremo.

3.1 Retardo en el nodo

Utilizando eACK, el tiempo que el nodo v_i tiene que esperar para retransmitir la segunda trama $d_{se}(x)$ para evitar colisiones

y el problema del nodo oculto (Latre et al., 2005), va desde t_3 hasta t_7 Figura 2. Este tiempo se lo calcula con la siguiente expresión:

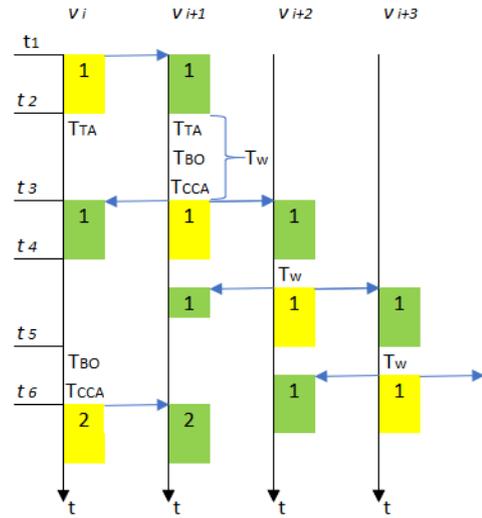


Figura 3. Secuencia de envío de segunda trama con iACK

$$d_{se}(x) = 3(T_{CCA} + T_{BO}) + 2(T_{fra}(x) + T_{TA} + T_{ACK}) \quad (1)$$

Utilizando iACK, el tiempo que el nodo v_i tiene que esperar para retransmitir la segunda trama $d_{si}(x)$, va desde t_2 hasta t_6 Figura 3, luego de que el nodo v_{i+1} confirma al nodo v_i la recepción exitosa de la primera trama se puede evaluar de la siguiente manera:

$$d_{si}(x) = 3(T_{BO} + T_{CCA}) + 2(T_{TA} + T_{fra}(x)) \quad (2)$$

Por lo tanto, el tiempo adicional requerido por el nodo v_i que opera con eACK, para retransmitir la segunda trama IEEE 802.15.4, con x bytes en la carga útil es igual a:

$$\Delta d_{eACK}(x) = d_{se} - d_{si} \quad (3)$$

En Acosta et al. (2020), se evalúa el tiempo adicional requerido, para que el nodo v_{i+1} retransmita la trama recibida correctamente al nodo v_{i+2} cuando se utiliza eACK en lugar de iACK en una topología lineal multisalto. El valor se lo calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta d(x) = T_{ACK} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta una estructura lineal con $n+2$ nodos, donde los nodos v_0 y v_{n+1} son los nodos frontera, el tiempo de retardo adicional utilizando eACK, para que la segunda trama vaya del nodo v_0 al nodo v_{n+1} (retardo de extremo a extremo) es igual a:

$$\Delta D_T(x) = \Delta d_{eACK}(x) + (n-2) \Delta d(x) \quad (5)$$

Cuando el mensaje necesita k tramas IEEE 802.15.4 para ser enviado al nodo frontera, el retardo adicional en la transmisión del mensaje cuando se utiliza eACK se puede calcular como:

$$\Delta D_T(x) = k (\Delta d_{eACK}(x) + (n-2) \Delta d(x)) \quad (6)$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La investigación llevada a cabo es importante para el desarrollo de aplicaciones que utilizan redes de sensores inalámbricos con topologías lineales multiasalto a gran escala. Los resultados obtenidos nos muestran que el uso de iACK en lugar de eACK en el protocolo IEEE 802.15.4 permite disminuir el retardo por procesamiento en el nodo y el tiempo de retardo de extremo a extremo en el escenario en el cual un nodo sensor que forma parte de la infraestructura lineal, tiene que transmitir un mensaje en k tramas al nodo frontera.

Para evaluar la influencia que produce el retardo por el procesamiento en el nodo v_i para transmitir la segunda trama al nodo v_{i+1} utilizando iACK y eACK como método de confirmación de la trama recibida, se utilizan las expresiones anteriormente presentadas para posteriormente compararlas con tiempos de retardo obtenidos experimentalmente en un prototipo implementado para tal efecto y proyectar los resultados a k tramas.

4.1 Retardos calculados

En la Figura 4, se presentan los resultados del retardo en la transmisión de la segunda trama considerando $BO = 3$, $IDnode = 2$ byte y $IDPAN = 2$ byte.

Los resultados indican que el uso de iACK disminuye el tiempo de procesamiento en el nodo para transmitir la segunda trama, mientras se mantiene la misma confiabilidad en comparación con el uso de eACK. La diferencia de retardo de 0.7 mseg, es constante con diferentes valores de carga útil. Debemos recordar que cuando el nodo v_i transmite varias tramas IEEE 802.15.4, todas las tramas, excepto la última tienen una longitud máxima de 127 bytes

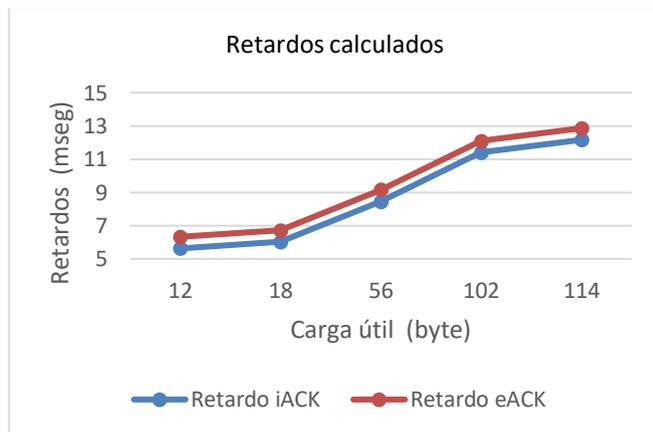


Figura 4. Retardo en el nodo i con $IDPAN = 2$, $IDnode = 2$ y $BO = 3$

En la Figura 5, se calcula el retardo en el nodo v_i para transmitir la segunda trama, con el valor de $IDnode = 8$ bytes, los demás parámetros se mantienen igual. Los retardos de procesamiento para transmitir la segunda trama se reducen con el uso de iACK. La diferencia de retardo tiene un valor de 0,7 ms en todos los casos de carga útil.

Los resultados obtenidos permiten evaluar el retraso de extremo a extremo en la transmisión de la segunda trama. En escenarios reales, los nodos para monitoreo de carreteras, tuberías, están ubicados en lugares donde la interferencia en la

banda de 2.4 GHz es prácticamente nula, y si consideramos que los de todos los nodos retransmisores que se encuentran dentro de la zona de cobertura, solo uno de ellos retransmitirá la trama, las probabilidades de colisión y las probabilidades de tener tramas erróneas son mínimas, por lo que es lógico suponer que los datos se transmitirán con el valor $BOslots = 3$ definido por defecto..

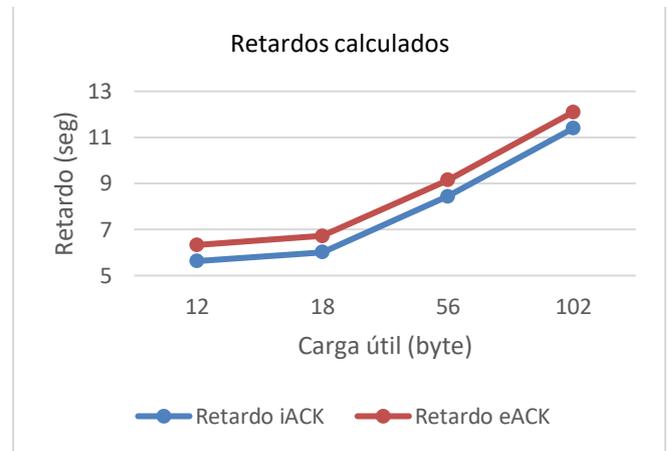


Figura 5. Retardo en el nodo i con $IDPAN = 2$, $IDnode = 8$ y $BO = 3$

Para reconstruir el mensaje, el nodo frontera tiene que esperar a la recepción de las k tramas enviadas que componen el mensaje. En la Figura 6, se puede ver el tiempo adicional que el nodo frontera que opera con eACK tiene que esperar para reconstruir el mensaje. Los resultados se calcularon con un valor de $BO = 3$, $IDnode = 2$ bytes, $IDPAN = 2$ bytes y una longitud de trama de 127 bytes. En el caso de que el nodo necesite transmitir un mensaje que requiera $k = 6$ tramas, para enviar el mensaje al nodo fronterizo ubicado a 80 km, con nodos colocados cada 50 metros de distancia, cuando se usa iACK, todas las tramas llegan 6.72 seg antes, en comparación con el uso de eACK. Hay que tener en cuenta que este valor afecta al período con el que los nodos monitorizan la infraestructura lineal. Se puede considerar que si el nodo v_i envía los datos de monitoreo al nodo frontera más cercano, si la distancia máxima entre v_i y v_{n+1} es de 50 Km, la distancia entre los dos nodos fronteras v_0 y v_{n+1} sería de 100 Km.

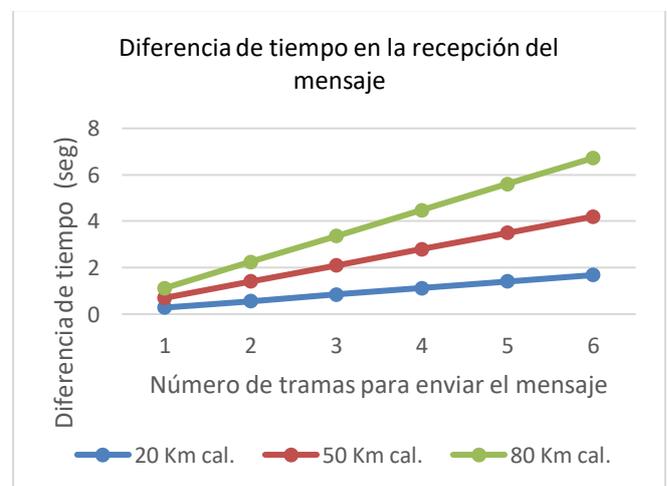


Figura 6. Retardo al utilizar eACK para recibir el mensaje con k tramas

4.2 Resultados medidos

Para medir los retardos del nodo v_i , se implementó un prototipo de LWSN utilizando el nodo ATZB-256RFR2-XPRO (Atmel® Corporation, 2014), Figura 7, el cual permite gestionar directamente la capa de enlace y manipular directamente la cabecera de la trama del protocolo IEEE 802.15.4. Está compuesto por un microcontrolador de 8 bits, ATMega256RFR2 (Atmel®, 2014) y utiliza pilas AAA. En cuanto a la parte de radiofrecuencia, el módulo ATZB-256RFR2-XPRO tiene un transceptor que funciona a 2,4GHz y es compatible con el estándar IEEE 802.15.4.



Figura 7. Nodo ATZB-256RFR2-XPRO

Para implementar el programa que permite al nodo recibir y retransmitir varias tramas, utilizamos el software de desarrollo ASF® (Atmel Software Framework)(Microchip, 2020) propuesto por el fabricante Atmel™, que cuenta con un conjunto de las bibliotecas que facilitan la creación de código y la programación, como por ejemplo la herramienta de desarrollo Wireless Composer (Microchip, 2016) que permite evaluar y utilizar el protocolo IEEE 802.15.4 utilizando el Atmel Studio. El prototipo de red implementado para medir los retardos en el nodo se presenta en la Figura 8. Contiene 5 nodos sensores ubicados en topología lineal configurados para que su alcance sea de 20 cm. Los resultados presentados, son los promedios obtenidos de la realización de varias pruebas y los tiempos fueron obtenidos utilizando el captador de tramas SmartRF de Texas Instruments. Los tiempos de retardo medidos fueron similares en todos los nodos, por lo que no fue necesario colocar mas nodos en el prototipo.



Figura 8. Prototipo de red implementado

El tiempo de retardo que el nodo se demora en transmitir la segunda trama sin recibir un eACK con diferentes valores se presenta en la Figura 9, por ejemplo, si la carga útil es de 114 bytes, con eACK el nodo se demora 15,94 mseg y con iACK es 14.17 mseg.

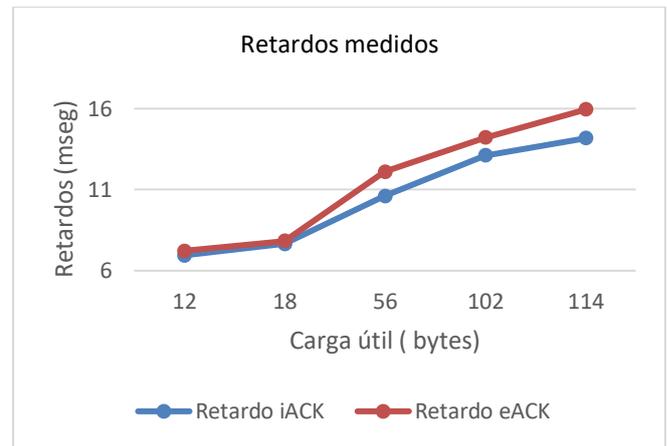


Figura 9. Retardo en el nodo i con IDPAN = 2, IDnode = 2 y BO = 3

En la Tabla 1, se presenta el porcentaje de disminución de retardo con iACK, medidos y calculados, en el nodo al transmitir la segunda trama con IDnode = 2 bytes y BO = 3.

Tabla 1. Porcentaje de disminución del retardo en el nodo

Datos Byte	Medido			Calculado		
	Retardo iACK mseg	Retardo eACK mseg	%	Retardo iACK mseg	Retardo eACK mseg	%
12	6,95	7,23	3,87	5,63	6,33	11,05
18	7,65	7,83	2,29	6,016	6,72	10,47
56	10,61	12,1	12,31	8,44	9,15	7,75
102	13,11	14,22	7,80	11,39	12,096	5,83
114	14,17	15,94	11,10	12,16	12,86	5,44

Como se puede apreciar, con una carga de datos de 114 bytes la disminución porcentual medida es 11,10 % y calculada es 5.44%. Con una carga de datos de 12 bytes la disminución porcentual medida es 3,87 % y calculada es 11.05%. Se observa que el retardo en el nodo es mayor con eACK y que a medida que aumenta los datos, el retardo en el nodo aumenta tanto para los valores medidos y calculados. La disminución del retardo, permiten verificar las ventajas de utilizar la iACK en lugar de eACK

Los cálculos del porcentaje de disminución del retardo cuando se utiliza iACK, indican que, si la longitud de los datos aumenta, el porcentaje basado en retardos calculados tiende a disminuir, en cambio, el porcentaje calculado con los valores medidos tiende a aumentar. Esto se debe a que en la fórmula se considera un tiempo fijo de procesamiento del nodo para tramas de diferente longitud. En el prototipo, el tiempo que requiere el nodo para sacar la trama del buffer de recepción, procesarla y luego retransmitirla depende del número de bytes de la trama. A mayor longitud de trama mayor retardo.

5. CONCLUSIONES

La necesidad de crear soluciones inalámbricas para aplicaciones de monitoreo en estructuras lineales a gran escala utilizando WSN, es un desafío en la industria debido a la considerable cantidad de ventajas de WSN sobre las soluciones tradicionales. Hoy en día, las nuevas aplicaciones en

infraestructuras lineales a gran escala requieren tiempos de retardo mínimos y largos períodos de operación de los nodos sensores. Nuestra propuesta utiliza iACK con el estándar IEEE 802.15.4 para minimizar los retardos en LWSN a gran escala y proporcionar la misma fiabilidad en la transmisión de datos que produce el uso de eACK. Nuestra propuesta utiliza iACK para disminuir el tiempo de retardo por procesamiento en el nodo y el retardo de extremo a extremo cuando tiene que enviar un mensaje que requiere varias tramas IEEE 802.15.4.

Se presenta un modelo matemático para evaluar el tiempo de retardo una infraestructura lineal considerando bajo tráfico y escenarios en los que la presencia de ruido es mínima característica presente en los oleoductos de petróleo, gas, carreteras, fronteras etc. Con los resultados obtenidos, se ha cuantificado la ventaja de utilizar iACK en lugar de eACK para proporcionar la misma fiabilidad de red, optimizando los retardos. Los resultados obtenidos permiten continuar con el desarrollo de una arquitectura para WSN sin capa de red para proporcionar una solución de bajo costo que permita detectar el problema de perforaciones no autorizadas en tuberías que transportan gasolina, agua etc.

REFERENCIAS

- Abbas, M. Z., Abu Bakar, K., Ayaz, M., & Mohamed, M. H. (2018). An overview of routing techniques for road and pipeline monitoring in linear sensor networks. *Wireless Networks*, 24(6). <https://doi.org/10.1007/s11276-017-1457-6>
- Acosta, C. E., Gil-Castineira, F., & Gualotuna, C. E. (2020). Optimization of delays and power consumption in large-scale linear networks using iACK. *2020 IEEE ANDESCON*, ANDESCON 2020. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272063>
- Agarwal, T. (2015). What is ZigBee Technology, Architecture and its Applications? In *El-Pro-Cus*.
- Albaseer, A., & Baroudi, U. (2019). Node placement approaches for pipelines monitoring: Simulation and experimental analysis. *International Journal of Sensor Networks*, 29(3). <https://doi.org/10.1504/IJSNET.2019.098281>
- Atmel®, A. (2014). *ATmega 256RFR2 DataSheet*. http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8393-MCU_Wireless-ATmega256RFR2-ATmega128RFR2-ATmega64RFR2_Datasheet.pdf
- Atmel® Corporation. (2014). *ZigBit Extension User Guide*. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42186-ZigBit_Extension-User-Guide.pdf
- Bagci, F. (2016). Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks. *Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks*, 30(3-4), 301-322.
- Blagojević, M., Nabi, M., Geilen, M., Basten, T., Hendriks, T., & Steine, M. (2011). A probabilistic acknowledgment mechanism for wireless sensor networks. *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Networking, Architecture, and Storage*, China, 63-72. <https://doi.org/10.1109/NAS.2011.38>
- Chen, Y., Hou, K. M., Zhou, H., Shi, H. L., Liu, X., Diao, X., Ding, H., Li, J. J., & De Vaulx, C. (2011). 6LoWPAN stacks: A survey. *7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, WiCOM 2011. <https://doi.org/10.1109/wicom.2011.6040344>
- Dong, M., Ota, K., Liu, A., & Guo, M. (2016). Joint Optimization of Lifetime and Transport Delay under Reliability Constraint Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 27(1), 225-236. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2015.2388482>
- Egas Acosta, C., Gil-Castineira, F., & Costa-Montenegro, E. (2021). Red inalámbrica de sensores con topología lineal sin capa de red. *Revista de Investigación En Tecnologías de La Información*, 9(17), 56-65. <https://doi.org/10.36825/riti.09.17.006>
- IEEE Standard. (2006). IEEE standard for local and metropolitan area networks. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE Std 802.15.4-2006*.
- Imran, C. M., Aldukhail, M., Almezeini, N., & Alnuem, M. (2016). Potential Applications of Linear Wireless Sensor Networks: A Survey. *International Journal of Computer Networks and Communications Security*, 4(6), 183-200.
- Kumar S., A. A., Ovsthus, K., & Kristensen., L. M. (2014). An industrial perspective on wireless sensor networks-a survey of requirements, protocols, and challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(3), 1391-1412. <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.012114.00058>
- Latré, B., De Mil, P., Moerman, I., Van Dierdonck, N., Dhoedt, B., & Demeester, P. (2005). Maximum throughput and minimum delay in IEEE 802.15.4. In: Jia, X., Wu, J., He, Y. (eds) *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. MSN 2005*. Lecture Notes in Computer Science. https://doi.org/10.1007/11599463_84
- Lee, M. Y., Azman, A. S., Subramaniam, S. K., & Feroz, F. S. (2020). Performance Analysis of Linear Topology Wireless Sensor Network in Oil and Gas Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 765(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/765/1/012070>
- Li, S., Dou, Z., Wang, F., & Xu, Q. (2019). Energy efficiency of five broadcast-based ARQ protocols in multi-hop wireless sensor networks. *IET Communications*, 13(15), 2243-2253. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2018.6098>
- Luo, F., Feng, T., & Zheng, L. (2021). Formal Security Evaluation and Improvement of Wireless HART Protocol in Industrial Wireless Network. *Security and Communication Networks*, 2021, Article ID 8090547, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2021/8090547>
- Microchip. (2016). *No Title*. <https://onlinedocs.microchip.com/pr/GUID-16A6E967-ABB5-42D8-BBED-6F0DBB16B126-en-US-1/index.html>
- Microchip. (2020). *Microchip Studio for AVR® and SAM Devices*.
- Rosberg, Z., Liu, R. P., Y.dong, A., D.tuan, L., & Jha, S. (2008). ARQ with implicit and explicit ACKs in wireless sensor networks. *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*, USA, 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2008.ECP.18>
- Sen, S. K. (2021). ISA100.11a. In *Fieldbus and Networking in Process Automation*.

<https://doi.org/10.1201/9781003149941-26>

Shanti, C., & Sahoo, A. (2014). Energy Efficient and Reliable Transmission of Data in Wireless Sensor Networks. In: Satapathy, S., Avadhani, P., Udgata, S., Lakshminarayana, S. (Eds.), *ICT and Critical Infrastructure: Proceedings of the 48th Annual Convention of Computer Society of India- Vol I. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 248*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03107-1_37S

Sokullu, R. I., & Demir, E. (2018). Linear wireless sensor networks and protocols in the next-generation networks. In *Enhanced Living Environments*. https://doi.org/10.1049/PBHE010E_ch10

Tharatipayakul, K., Gordon, S., & Kaemarungsi, K. (2014). IACK: Implicit acknowledgements to improve multicast reliability in wireless sensor networks. *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2014*. <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2014.6839749>

Varshney, S., Kumar, C., & Swaroop, A. (2021). Lightning-Based Lion Optimization Algorithm for Monitoring the Pipelines Using Linear Wireless Sensor Network. *Wireless Personal Communications, 117*(3), pages 2475–2494. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07987-8>

Varshney, S., Rajput, P. K., Singh, A., & Varshney, G. (2019). Routing Techniques used for Monitoring the Linear Structures using Linear Wireless Sensor Networks: An Overview. *Proceedings - 2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems, ICCIS 2019, 2019-January*, Greater Noida, India, 126-130.

<https://doi.org/10.1109/ICCIS48478.2019.8974522>



Felipe, Gil-Castiñeira, obtuvo los títulos de Ingeniero de Telecomunicación (especialidad en Telemática), y el Doctorado en Ingeniería de Telecomunicación por la Universidad de Vigo, en 2002 y 2007. Actualmente es profesor titular en el Departamento de Ingeniería Telemática de la misma universidad. Entre 2009 y 2010 actuó una estancia en el Centro de Investigación de Nokia en Palo Alto, y desde 2014 al 2016 fue director técnico del área de "Sistemas Inteligentes en Red" en el Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Galicia. Ha publicado más de 60 artículos y liderado numerosos proyectos nacionales e internacionales en estos campos.



Carlos, Herrera, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones por la Escuela Politécnica Nacional, EPN, 1999. Magister en Conectividad y Redes de Telecomunicaciones por la Escuela Politécnica Nacional, EPN, 2014, Quito-Ecuador. Docente de la Escuela Politécnica Nacional de Quito desde el año 2000, cátedras dictadas: Telemática y Redes TCP/IP, Instructor CCNA, CCNP y CCAI. Decano Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Escuela

BIOGRAFÍAS



Carlos, Egas Acosta, obtuvo el título de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones en el año 1986, en la Escuela Politécnica Nacional, Magister en Informática en la Universidad de Andina Simón Bolívar, Diploma de Estudios Avanzados, Universidad de Vigo, Instructor Cisco. Actualmente es Docente

de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Director del Grupo de Investigación en Internet de Todas las Cosas del DETRI.