

## Algoritmo para el monitoreo de estructuras lineales a gran escala

### Algorithm for monitoring large-scale linear structures

Leonardo Vera Sánchez<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5823-0461>,

Carlos Egas Acosta<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3540-9768>

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, DETRI, Quito, Ecuador  
[leonardo.vera@epn.edu.ec](mailto:leonardo.vera@epn.edu.ec), [carlos.egas@epn.edu.ec](mailto:carlos.egas@epn.edu.ec)



Esta obra está bajo una licencia internacional  
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Enviado: 2022/07/02

Aceptado: 2022/09/16

Publicado: 2022/11/30

#### Resumen

Se presenta el diseño de un algoritmo que opera a nivel de enlace para sincronizar los nodos que forman parte de una topología lineal multisalto, con el objetivo de que los nodos puedan transmitir y recibir tramas en un mismo intervalo de tiempo y evitar la utilización de protocolos a nivel de red para tener conectividad de extremo a extremo. Para comprobar la validez del algoritmo se implementó un prototipo de red con topología lineal que utiliza el protocolo IEEE 802.15.4. El algoritmo se ejecuta en cada nodo de la red. Para ello, se calculó el intervalo de tiempo en el cual los nodos deben estar activos para que todos los nodos que forman parte de la topología lineal multisalto puedan transmitir los datos de monitoreo al nodo frontera en el mismo intervalo de tiempo. Las pruebas se realizaron en varios escenarios en los cuales uno o varios nodos transmiten sus datos y se comprobó que los estos se activan simultáneamente para operar en modo activo. A partir de los resultados se validó el funcionamiento algoritmo el cual proporciona una herramienta para la creación de aplicaciones asociadas con el monitoreo de infraestructura lineales.

**Palabras clave:** nodos, sensores, enlace, energía, inalámbrico.

#### Abstract

The design of an algorithm that operates at the link level to synchronize the nodes that are part of a multi-hop linear topology is presented. The objective is that the nodes can transmit and receive frames in the same time interval and avoid the use of protocols at the network level to have end-to-end connectivity. To verify the effectiveness of the algorithm, a prototype network with a linear topology using the IEEE 802.15.4 protocol was implemented. The algorithm is

**Sumario:** Introducción, Trabajos relacionados, Metodología, Resultados, Discusión y Conclusiones.

**Como citar:** Vera, L. & Egas, C. (2022). Algoritmo para el monitoreo de estructuras lineales a gran escala. *Revista Tecnológica - Espol*, 34(3), 58-71.  
<http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/951>

executed in each node of the network. Therefore, the time interval in which the nodes must be active was calculated so that all nodes that are part of the multi-hop linear topology can transmit the monitoring data to the border node in the same time interval. The tests were performed in several scenarios in which one or several nodes transmit their data and it was verified that the nodes are activated simultaneously to operate in active mode. Based on the results, the algorithm performance was validated and provides a tool for the creation of applications associated with linear infrastructure monitoring.

**Keywords:** nodes, sensors, link, energy, wireless.

### Introducción

Las redes inalámbricas de sensores (WSN) basadas en el protocolo IEEE 802.15.4 (Alkama & Bouallouche-Medjkoune, 2021) tienen el reto de satisfacer los requerimientos de nuevas aplicaciones que demandan nodos sensores que operen con baterías (Eghonghon Ukhurebor et al., 2021). Al funcionar los nodos operan con baterías, es necesario optimizar el consumo de energía de los nodos con el propósito de que puedan operar por largos períodos de tiempo, lo cual incentiva a los investigadores para desarrollar nuevas tecnologías que permitan disminuir el consumo de energía (Shruti et al., 2019) ocasionado por la transmisión y recepción de datos y por el procesamiento de los datos en el nodo.

En la actualidad, los esfuerzos por disminuir el consumo de energía están enfocados a minimizar su consumo por procesamiento en los nodos con nuevos protocolos de red, transporte y aplicación (Al Imran et al., 2020), debido a que, en redes inalámbricas de sensores, replicar la arquitectura de internet es imposible por la baja capacidad de cálculo que tienen estos nodos.

Por otra parte, no existe una única arquitectura de red para las redes inalámbricas de sensores que operan con el protocolo IEEE 802.15.4. Es por esta razón que, en la actualidad, existen protocolos como 6lowPAN (Chen et al., 2011), Zigbee (Agarwal, 2015), ISA100 (Raptis et al., 2020) y Wireless HART (Luo et al., 2021) que operan en diferentes arquitecturas. Otra manera de optimizar el consumo de energía por procesamiento en el nodo es con arquitecturas propias para cada aplicación, solución que es realizada por los fabricantes, lo que crea sistemas propietarios de redes inalámbricas de sensores.

Una de las aplicaciones en las que se puede utilizar las redes inalámbricas de sensores que operan con el protocolo IEEE 802.15.4 es el monitoreo de oleoductos, tuberías de agua, carreteras, túneles etc., lo cual da lugar a estructuras lineales. En la mayoría de los casos, para el monitoreo de estructuras lineales a gran escala que requieren cientos de nodos se utilizan redes cableadas, pero su costo de implementación en comparación con la tecnología inalámbrica es elevado, debido a la necesidad de tener una infraestructura física para la transmisión de datos desde el nodo sensor a la estación de monitoreo y para la provisión de energía a los nodos sensores. De esta manera la utilización del protocolo IEEE 802.15.4 para formar una red inalámbrica de monitoreo para estructuras lineales, es ventajoso desde el punto de vista económico tanto para su operación como para su gestión. Este tipo de redes forma parte de las redes sensores inalámbricos lineales (LWSN) (Egas & Gil-Castiñeira, 2020).

La utilización de las redes inalámbricas de sensores que emplean el protocolo IEEE 802.15.4, se caracterizan porque la zona de cobertura del nodo es limitada. Por lo tanto, si se utiliza este protocolo para el monitoreo de estructuras lineales de grandes longitudes, es necesario las redes con topología lineal multisalto con cientos de nodos que operan con baterías, en las cuales, aparecen problemas relacionados con altos retardos de transmisión,

protocolos de control de acceso al canal ineficientes, mala sincronización de los nodos debido al número de nodos retransmisores por donde tienen que pasar el mensaje para llegar a su destino. Además del problema de los altos retardos por procesamiento en los nodos debido a que tienen baja capacidad de cálculo porque los nodos utilizan procesadores de 8 bits.

Si bien la utilización del protocolo 6LowPAN permite tener conectividad extremo a extremo en una red con topología lineal multisalto, se tiene el problema de que los nodos deben estar siempre en un estado en el cual todos los procesos del nodo sensor son ejecutados. En especial los procesos del nivel de red, los cuales contribuyen en el consumo de energía, ya que el nodo debe encontrar la mejor ruta para enviar los mensajes y el puerto de salida adecuado. Estos procesos requieren tiempo para su ejecución, lo que afecta al retardo de extremo a extremo ya que el mensaje debe pasar por cientos de nodos para llegar a su destino en una topología multisalto.

En una topología lineal formada por nodos sensores con transmisión inalámbrica que operan con el protocolo IEEE 802.15.4 existe una sola ruta y cada nodo tiene una sola interface física por la cual se transmiten o se reciben tramas no simultáneamente (half dúplex). Por lo tanto, no es necesario un proceso para seleccionar la mejor ruta (enrutamiento) y no existe la necesidad de recibir los datos por una interface y enviarle por otra interface (conmutación). Es así que los procesos de conmutación y enrutamiento que se realizan a nivel de red pueden ser innecesarios en topologías lineales multisalto (Egas Acosta et al., 2021).

En este contexto, la propuesta de utilizar únicamente el nivel de enlace con el protocolo IEEE 802.15.4 para permitir la conectividad entre el nodo sensor y el nodo frontera en topologías lineales multisalto, genera las siguientes contribuciones:

1. Disminuye el retardo de entre el nodo fuente y nodo frontera, al eliminar los retardos por procesamiento en el nodo para realizar conmutación y enrutamiento.
2. Disminuye el consumo de energía en el nodo al eliminar el consumo de energía de procesos innecesarios.
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.

En el monitoreo de estructuras lineales a gran escala, por ejemplo, para la detección de perforaciones en un oleoducto para el robo de gasolina, el derrumbe de un túnel, el paso no autorizado por una frontera etc., los nodos no tienen datos que transmitir a la estación de central de manera periódica, por lo que los nodos únicamente deberían estar activos el momento que tienen que transmitir o retransmitir datos y ahorrar energía.

En el caso de realizar un monitoreo periódico, el nodo debe estar activo únicamente si el nodo necesita monitorear y transmitir dichos datos, el resto de tiempo podría estar apagado. En ambos casos hay momentos en los cuales el nodo no necesita ni transmitir y procesar datos. Por lo tanto, la propuesta de sincronizar todos los nodos para que operen en un estado activo el momento que tienen que transmitir y procesar datos en una topología lineal multisalto genera la siguiente contribución.

4. Disminuye el consumo de energía en el nodo debido a que el nodo funciona únicamente en los momentos que tiene que transmitir y procesar datos, el resto del tiempo el nodo no está activo con el respectivo ahorro de energía.

El objetivo del presente trabajo es proponer un algoritmo para realizar la transmisión de datos desde el nodo sensor al nodo frontera en redes inalámbricas de sensores con topología lineal multisalto con el IEEE 802.15.4 en capa de enlace, sin la utilización de protocolos de red. Se pretende que la propuesta permita disminuir el consumo de energía de los nodos sin procesos a nivel de red y utilizar únicamente los procesos del nivel de enlace, debido a que en este tipo de redes no es necesario la conmutación y el enrutamiento. El nodo está activo únicamente en los momentos en los cuales tiene que transmitir o recibir datos.

El presente artículo tiene la siguiente estructura: en la sección 2 se presentan los trabajos relacionados; en la sección 3, la metodología utilizada; en la sección 4, los resultados; en la sección 5, se discuten los resultados obtenidos. Finalmente, en la última sección, se plantean las conclusiones, así como futuros trabajos a realizar.

### Trabajos relacionados

En (Pandey et al., 2020) los autores destacan la complejidad de sincronizar los nodos en redes inalámbricas de sensores y proponen un método de localización de nodos sincronizados en el tiempo para redes pequeñas. Una propuesta de sincronización de tiempo asimétrica inversa para redes inalámbricas de sensores de múltiples saltos con recursos limitados basado en la difusión inversa de mensajes unidireccionales y eficientes en energía se propone en (Huan et al., 2020). En (Co et al., 2021) se presenta un protocolo de recolección de datos y enrutamiento ad hoc con una función de sincronización de tiempo híbrida basada en paquetes, en la que el tiempo de referencia proviene del nodo sumidero (centralizado) y de los nodos adyacentes (distribuido). Los trabajos presentados, se pueden aplicar a redes inalámbricas de sensores con topología lineal, sin embargo, han sido propuestos para redes que tienen gran cantidad de nodos sensores dentro de la zona de cobertura y para su funcionamiento utilizan protocolos de enrutamiento.

### Metodología

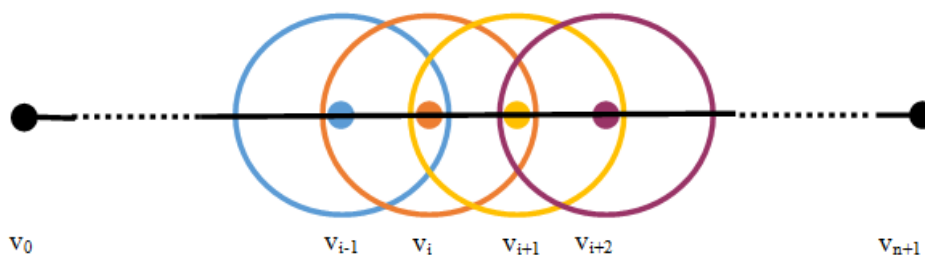
Para implementar el algoritmo, se analizó las características de la red inalámbrica de sensores con topología lineal multisalto y las características de funcionamiento del protocolo IEEE 802.15.4, a partir de lo cual se planteó el escenario del problema a resolver.

### Topología lineal

En una red inalámbrica con topología lineal Figura 1, con  $n+2$  nodos, cada nodo interno se puede comunicar con un nodo a la derecha y otro a la izquierda. Los nodos frontera  $v_0$  y  $v_{n+1}$ , pueden enviar la información recibida de los  $n$  nodos sensores internos a la estación central. El momento que un nodo sensor  $v_i$  sensa un evento, los datos pueden ser enviados al nodo  $v_0$  o al nodo  $v_{n+1}$ . Para efectos de análisis, se va a considerar que los nodos sensores tienen que enviar los datos al nodo  $v_0$ .

**Figura 1**

*Red con topología lineal multisalto*



Los nodos sensores monitorean la infraestructura lineal de manera periódica con bajo consumo de energía. Una vez que el nodo  $v_i$  ha detectado un evento, lo transmite al nodo  $v_{i-1}$  y este a su vez lo retransmite a su nodo vecino para que de esta manera llegue al nodo  $v_0$ .

#### IEEE 802.15.4

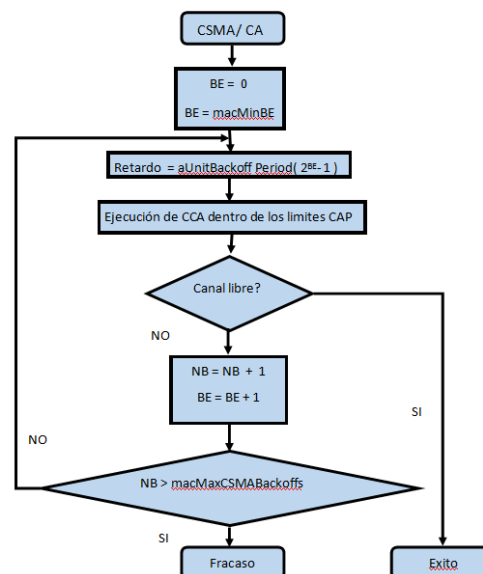
En el estándar IEEE 802.15.4 los nodos pueden operar en el Modo Beacon Activado (modo ranurado) en el cual el nodo el coordinador de la red es el responsable de sincronizar de manera periódica los nodos asociados a la red y en el Modo Beacon Desactivado (modo no ranurado) todos los nodos utilizan el mecanismo de acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones (CSMA/CA) para realizar un control de acceso al medio y que el nodo pueda realizar la transmisión en cualquier momento sin colisiones. En este punto se debe considerar que el modo no ranurado considera que dentro de la zona de cobertura del nodo existen cientos de nodos, en este caso, en la zona de cobertura del nodo existen solo 2 nodos, por lo que, los procesos que se ejecutan en el nodo son demasiados complejos para el escenario planteado.

En el algoritmo CSMA/CA, presentado en la Figura 2, 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 el período de espera (backoff).
- $T_{CCA}$  representa el tiempo requerido para evaluar si el canal está libre.
- $T_{fra}(x)$  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 transmisión (TX) al modo recepción (RX).
- $T_{ACK}$  es tiempo de transmisión para una trama de confirmación (ACK).
- $T_{IFS}$  es el tiempo de procesamiento que requiere el nodo procesar una trama.

**Figura 2**

*Algoritmo CSMA/CA para el modo no ranurado*



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 se compone de 4 byte, y cada símbolo 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 que se compone de 20 símbolos.

### Nodo sensor

Para evaluar el algoritmo propuesto se utilizó el nodo ATZB-256RFR2-XPRO que se presenta en la Figura 3, el cual permite manipular directamente el protocolo IEEE 802.15.4, y procesar directamente los datos de la trama que se transmite o recibe. La codificación del algoritmo requiere la utilización del software de desarrollo ASF® (Atmel Software Framework) (Microchip, 2020) propuesto por el fabricante Atmel™ (Atmel fue adquirido por Microchip), 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 con la herramienta Atmel Studio.

**Figura 3**

*Nodo ATZB-256RFR2-XPRO*



### Resultados

El algoritmo propuesto está específicamente diseñado para ser aplicado en el monitoreo de estructuras lineales a gran escala con las siguientes consideraciones:

- Se consideró una estructura lineal con  $n+2$  nodos, en la cual los nodos frontera tienen conexión con la estación central donde se procesan los datos obtenidos.
- Los nodos trabajan con el protocolo IEEE 802.15.4 y operan en el modo no ranurado.
- La distancia máxima entre nodos está dada por el estándar IEEE 802.15.4.
- Los nodos en la topología lineal tienen asignados identificadores de manera secuencial y son fijos.
- Los nodos utilizan CSMA/CA para el control de acceso al canal sin la utilización de ACK para confirmar la recepción de la trama.
- Dentro de la zona de cobertura de un nodo sensor están máximo dos nodos.

### Algoritmo propuesto

Los nodos sensores se configuran para operar en modo transmisión y recepción (modo activo) para transmitir y recibir datos por periodos de tiempo definidos previamente, esta operación del nodo se define como periodo activo. El modo sensor opera en modo dormido (modo inactivo) por un periodo de tiempo definido como período inactivo, en el cual, el nodo es habilitado únicamente para el sensado de datos mediante la utilización de interrupciones en el microcontrolador. Si existe un evento que es sensado por nodo, el nodo debe esperar estar en el modo activo para que el dato pueda ser transmitido al nodo frontera. La propuesta evita que el nodo esté en todo momento en modo activo, de tal manera de disminuir el consumo de



energía y operar en este modo únicamente si existen datos sensados para transmitir o retransmitir datos de otros nodos.

El período activo se representa como  $T_a$  (modos TX y modo RX) y el período inactivo como  $T_i$  (modo dormido). Mientras el nodo opera en modo inactivo, el módulo del transceptor del nodo (TX y RX) no están operativos, y únicamente se ejecutan los procesos relacionados con las interrupciones en el nodo sensor. Estos periodos de tiempo requieren la utilización de un temporizador en el nodo, el cual indica el momento que empieza y termina cada período. Los modos activo e inactivo se repiten de manera periódica y sus períodos de tiempo que dependen del número de nodos que forman parte de la estructura lineal pueden ser modificados en el algoritmo propuesto.

Es necesario que los nodos se sincronicen para que todos los nodos de manera simultánea estén en modo activo, y sus relojes deben estar sincronizados para permitir que los nodos pasen de modo activo a inactivo en el mismo momento. El momento que el nodo empieza a operar en modo activo, se pone en modo de recepción y espera la recepción de la trama de sincronización (Token) para sincronizar su reloj y actualizar los valores de los periodos activo e inactivo. Luego de esto, se pone en modo recepción a la espera de una trama para ser retransmitida o para transmitir sus datos sensados. Si el nodo que forma parte de la estructura lineal no está en modo activo y le llega una trama, estas no pueden ser recibidas ni procesadas.

El momento en el cual, todos los nodos están en modo activo, el nodo frontera  $v_0$  genera una trama Token que es enviada al nodo  $v_1$ , y este la envía al nodo  $v_2$ , el proceso se repite hasta que el Token es recibido por el nodo frontera  $v_{n+1}$ . Si el nodo  $v_i$  recibe la trama de sincronización del nodo  $v_{i-1}$ , sincroniza su reloj y actualiza los tiempos para el modo activo  $T_a$  e inactivo  $T_i$ , luego reenvía el Token al nodo  $v_{i+1}$ . Si el nodo  $v_i$  tiene datos que ha sentido, una vez recibido el Token transmite sus datos, así como su identificador en la trama de datos al nodo  $v_{i-1}$  para que este lo retransmita y de esta manera llegue al nodo frontera  $v_0$ . Luego, el nodo está atento a la recepción de tramas retransmitidas por el nodo  $v_{i+1}$  con datos generados por nodos  $v_j$  donde  $n \geq j \geq i$  si las hubiere.

El período  $T_a$  incluye el estado del nodo en que transmite, de recibe y procesa los datos, luego el nodo pasa al modo de operación inactivo (dormido) por un tiempo dado por  $T_i$ , en este modo de operación los nodos desactivan sus funciones modo dormido, manteniendo las más imprescindibles para despertarse después de un tiempo necesario.

Mientras el nodo opera en modo dormido, su radio se queda apagada y establece un temporizador para despertarse más tarde. Una vez concluido el período  $T_i$ , el nodo despierta y empieza el período  $T_a$ , inmediatamente comienza a escuchar el medio a la espera de la trama de sincronización. De esta manera la sincronización de los relojes de cada nodo se lo realiza de manera periódica cada  $T_a + T_i$  segundos.

A continuación, se presenta el Seudo Código del algoritmo propuesto:

```

1 Eventosensado == Falso
2 Datosensado == Falso
3 Operación == Verdadero
4 Ta == tiempo en el cual el nodo esta activo
5 Ti == tiempo en el cual el nodo está inactivo
6 while Operación == verdadero
7 Iniciar temporizado t
8 Activar nodo para operar en modo Tx y Rx
9     case t <= Ta

```

```

10      Modo RX
11      case Eventosensado == Verdadero
12      Datosensado == Verdadero
13      endcase
14      case Tramarecibida == token
15      Sincronizar relojes, Actualizar Ti, Ta
16      Modo Tx
17      Enviar token a nodo i+1
18      Modo RX
19      endcase
20      case Tramarecibida == Datosaretransmitir
21      Modo Tx
22      Retransmitir trama a nodo i-1
23      Modo Rx
24      endcase
25      case Datosensado == Verdadero
26      preparar trama con datos sensados
27      modo Tx
28      enviar trama a nodo i-1
29      endcase
30  endcase
31  iniciar temporizador t
32  Activar nodo en modo dormido
33  case t <= Ti
34      case Eventosensado == Verdadero
35      Datosensado == Verdadero
36      endcase
37  endcase
38 endwhile

```

Los nodos permanecerán en un estado de bajo consumo energético durante el tiempo inactivo, luego de ese tiempo se vuelven a activar todos los nodos, con excepción del nodo  $v_0$ , que siempre permanecerá activo y se comunica con la central de monitoreo para lo cual utiliza otra tecnología de comunicación.

### Períodos activo e inactivo

Tomando en cuenta que los nodos operan en el modo no ranurado con CSMA/CA, sin utilizar la trama de confirmación (ACK), el tiempo  $T_a(x)$  en el cual el nodo  $v_1$  debe estar en el modo activo para poder retransmitir y recibir las tramas generadas por los  $n+1$  nodos está dado por la siguiente expresión. El nodo frontera  $v_0$  siempre está activo.

$$T_a(x) = (n + 1)(T_{BO} + T_{CCA} + T_{TA} + T_{fra}(x) + T_{IFS}) \quad (1)$$

En la Tabla 1 se presenta los tiempos mínimos calculados, que un nodo debe estar activado en una estructura lineal que contiene  $n+2$  nodos, de tal manera que si todos los nodos tienen datos que transmitir, a excepción del nodo frontera  $v_0$ , lo puedan hacer. Los valores fueron calculados a base del escenario en el cual los nodos están ubicados cada 25 metros con una carga útil máxima de  $x = \text{bytes}$  que puede ser transportada en la trama IEEE 802.15.4,  $T_{BO} = 96$  mseg es equivalente a 3 slots con el valor del exponente  $BE = 3$ ,  $T_{CCA} = 128$  mseg,  $T_{fra}(x) = 992$  mseg,  $T_{TA} = 192$  mseg,  $T_{IFS} = 192$  mseg. Con estos datos, los valores de  $T_a(x)$  mínimos requeridos para que los nodos estén activos se presentan en la Tabla 1.

En el caso de una estructura lineal de 62 Km de longitud con nodos colocados cada 25 mt. el tiempo en el cual un nodo necesita estar activo para asegurar la retransmisión de todas las tramas al nodo de borde  $v_0$  es de 6.16 mseg.



**Tabla 1***Tiempo de activación mínimo  $T_a(x)$* 

NUMERO DE NODOS	$T_a(x)$ (seg)	LONGITUD (Km)
2	0.007392	0.025
5	0.014	0.1
10	0.027104	0.225
50	0.125664	1.225
100	0.248864	2.475
500	1.234464	12.475
1000	2.466464	24.975
2500	6.1624	62.45
5000	12.322464	124.975

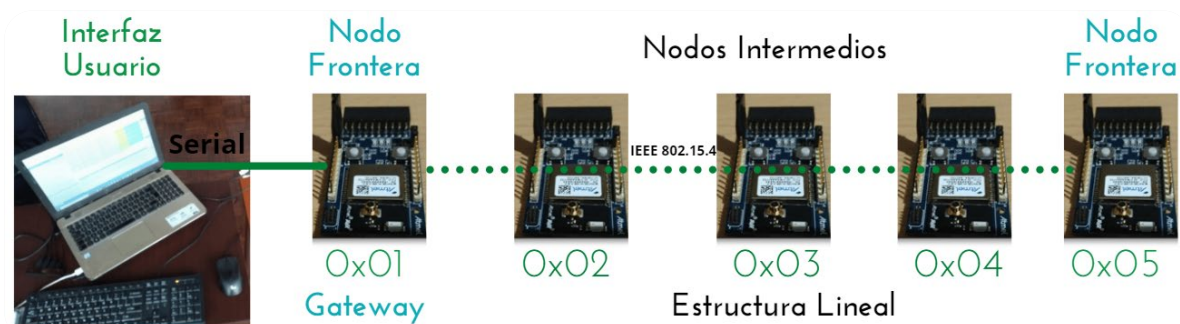
La expresión anterior considera que todos los nodos sienten un evento en el mismo periodo de monitoreo  $T_m$ , y deben transmitir los datos en el periodo activo  $T_a(x)$ , sin embargo el tiempo del periodo inactivo  $T_i$  depende de la aplicación y por lo tanto el valor de  $T_m$  el cual depende del tiempo máximo que puede esperar el nodo  $v_0$  para recibir la información de monitoreo o de alarma. Considerando que  $T_m$ , es el período de monitoreo de la red.

$$T_i = (T_m - T_a(x)) \quad (2)$$

Si se requiere monitorear la infraestructura de la red de 62 Km cada  $T_m = 60$  segundos, con  $T_a(x) = 6.16$  seg y  $T_i = 53.84$  seg, los nodos deberían estar en modo activo solo el 10% del tiempo, lo cual disminuye significativamente el ahorro de energía

### Prototipo implementado

Para evaluar el algoritmo, se implementó un prototipo de red con topología lineal basada en cinco nodos ATZB-256RFR2-XPRO, se configuró la potencia de transmisión de cada nodo, para que el área de cobertura tenga un alcance de 30 cm, y se deshabilitó el envío de tramas ACK de tal manera de tener una red multisalto de 5 nodos como se muestra en la Figura 4. Si se tienen cientos de nodos, lo que cambia en el algoritmo es el tiempo  $T_a(x)$ .

**Figura 4***Prototipo con Topología Lineal*

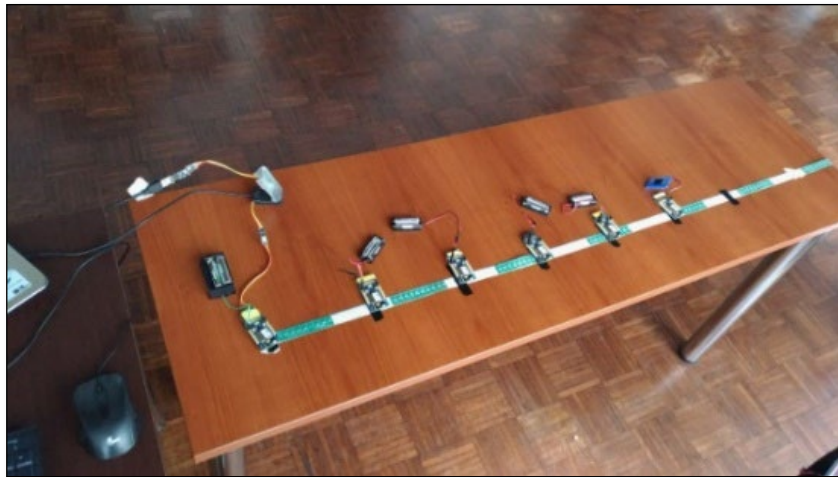
Para la programación de los nodos se utilizó el software ATMEL STUDIO 7 o la versión más reciente de Microchip, con la extensión *Wireless Compossor* en su versión más actualizada. Para capturar las tramas IEEE 802.15.4 se utilizó el software “Packet Sniffer” del fabricante Texas Instruments (Instruments, 2014). La información de las tramas capturadas se

las obtuvo en la pantalla de una computadora configurada para tal efecto, la cual permite visualizar las tramas que contienen el Token y los datos transmitidos.

Para simular que los nodos sensan un evento, se utilizó un interruptor que viene incluido en cada nodo, el cual activa una interrupción que indica que el nodo senso un evento. En el escenario de pruebas se presenta en la Figura 5, los nodos fueron configurados de tal manera que la señal únicamente llegue a sus nodos vecinos y de esta manera tener una red multisalto.

**Figura 5**

*Escenario de pruebas*



### Discusión

Se realizaron varias pruebas para comprobar el funcionamiento del algoritmo propuesto y de esta manera validar cómo los nodos que forman parte de la topología lineal transmiten los datos en un mismo intervalo de tiempo y comprobar la transmisión de datos de extremo a extremo sin la necesidad de utilizar un protocolo de enrutamiento. A continuación, se presentan los resultados más relevantes de las diferentes pruebas realizadas.

En la Figura 6 se presenta la captura de tramas que contienen el Token para iniciar el estado activo en los nodos. Como se puede apreciar, se envía la letra T para indicar que la trama contiene el Token, acompañada con el tiempo para la sincronización.

**Figura 6**

*Captura de tramas con Token*

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	RSSI (dBm)	FCS
RX 1	+0 =0	27	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 1	0x02	0xCAFE	0x0002	0x0001	T 10 12  00:02:37	-87	OK
RX 2	+4564 =4564	27	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 1	0x08	0xCAFE	0x0003	0x0002	T 10 12  00:02:37	-71	OK
RX 3	+4289 =8853	27	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 1	0x08	0xCAFE	0x0004	0x0003	T 10 12  00:02:37	-71	OK
RX 4	+3933 =12786	27	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 1	0x08	0xCAFE	0x0005	0x0004	T 10 12  00:02:37	-69	OK

Como se puede apreciar en las tramas capturadas, los valores de la dirección fuente y de la dirección de destino indican que el Token va desde el nodo 0X01 hasta el nodo 0x05, el tiempo promedio que se tarda un nodo en retransmitir la trama que contiene el Token es de 4.2 mseg. El valor que tarda el Token en llegar al nodo frontera es de 12.78 mseg. por lo tanto, el tiempo necesario para que el Token llegue al nodo frontera y que el mensaje del nodo frontera llegue al nodo 0x01 es de 25.56 mseg.

En la Figura 7 se presenta las tramas de datos enviadas por el nodo 0X05 al nodo frontera.

**Figura 7**

*Captura de tramas de datos retransmitidas*

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	RSSI (dBm)	FCS
RX 1	+0 =0	26	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 1	0x06	0xCAFE	0x0004	0x0005	Evento o currido	-94	OK
RX 2	+1942 =1942	12	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 1	0x05	0xCAFE	0x0003	0x0004	E	-87	OK
RX 3	+1800 =3742	12	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 1	0x04	0xCAFE	0x0002	0x0003	E	-79	OK
RX 4	+2113 =5855	12	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 1	0x03	0xCAFE	0x0001	0x0002	E	-84	OK
RX 5	+2447 =8302	12	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 0 1	0x02	0xCAFE	0x0000	0x0001	E	-79	OK

Al comparar los tiempos de retransmisión de los nodos para que la trama con los datos sensados, llegue del nodo 0x05 al nodo 0x01 nos podemos dar cuenta que los tiempos de retardo por procesamiento en el nodo tienen un valor promedio de 2.73 mseg, este valor difiere del valor calculado para el retardo por procesamiento en el nodo si se retransmite el Token el cual es de 4.25 mseg.

El algoritmo para procesar y retransmitir el Token ejecuta más procesos que el algoritmo para retransmitir la trama. Si se considera que el tiempo para retransmitir el Token desde el nodo 0x001 al nodo 0x005 es 12.78 mseg y el tiempo para enviar los datos sensados desde el nodo 0x005 al nodo 0x01 es 8.302 mseg, al sumar los dos tiempos, el tiempo mínimo en el cual el nodo debería estar en modo activo es la suma de estos dos tiempos, es decir, 21.08 mseg. El valor del tiempo mínimo calculado, que los nodos deben operar en modo activo para este escenario de pruebas es de 14 mseg.

Consideramos que las diferencias se deben a que en los cálculos no se considera el tiempo real que el nodo tarda en procesar la trama para ser transmitida, ya que el análisis teórico se considera que cuando la trama llega al nodo se almacena en el buffer de recepción y automáticamente se retransmite, en este caso la trama se la obtiene del buffer, se la almacena en una variable, se la modifica y se retransmite. Además, en un sistema ya implementado para su aplicación real, los procesos se implementarían por hardware y no por software como se lo realizó para la implementación del algoritmo en el prototipo.

Igualmente hay que considerar que los Timer que indican el inicio del período activo e inactivo en el nodo, en el prototipo se lo implementa por software, por lo que el tiempo de procesamiento en el nodo para realizar esta tarea, influye en el retardo total. Se considera que, en una implementación real, este Timer se lo implementa por hardware de manera independiente y no mediante código de programa en el microcontrolador del nodo.

Se comprobó que el algoritmo diseñado para una red con topología lineal, codificado para ser ejecutado en los nodos ATMEL ATZB-256RFR2-XPRO, permite al nodo frontera sincronizar todos los nodos de la topología lineal que operan con el protocolo IEEE 802.15.4 para que inicien su operación en modo no ranurado en un instante predefinido. El algoritmo no requiere que los relojes de todos los nodos estén sincronizados con un reloj de precisión o una referencia como por ejemplo un GPS.

Se verificó que en el momento que el nodo recibe el mensaje de sincronización (Token), define el tiempo en que el nodo debe estar activo e inactivo. Además de indicarle de manera periódica al nodo, el instante en que debe ponerse nuevamente en modo activo y de esta manera transmitir los datos en este modo.

La novedad científica de la propuesta radica en presentar un algoritmo para el monitoreo de estructuras lineales que se ejecuta en sobre la capa de enlace (protocolo 802.15.4) a diferencia de otras soluciones que trabajan en capa aplicación, sin la necesidad de un protocolo de enrutamiento. Además, el mecanismo de sincronización de los nodos es muy simple, lo cual va de acuerdo con los nodos sensores de baja capacidad de procesamiento sin la necesidad de utilizar otras técnicas como es el posicionamiento global por satélite o utilizar relojes de referencia en la red Internet.

### **Conclusiones**

La propuesta soluciona el problema de sincronizar cientos de nodos en topologías lineales multisalto, sin utilizar sistemas de posicionamiento global (GPS), contribuye a minimizar el consumo de energía de los nodos, al evitar que los nodos estén en estado activo cuando no tienen que transmitir datos.

La propuesta utilizó el protocolo de enlace IEEE 802.15.4 para enviar tramas desde un nodo intermedio de la red multisalto con topología lineal al nodo frontera. Permite tener conectividad de extremo a extremo, sin utilizar protocolos de red y por lo tanto disminuir la cantidad de los procesos que tiene que realizar el nodo para brindar conectividad lo cual evidentemente influye en los tiempos de procesamiento en el nodo.

El algoritmo fue implementado en un prototipo creado para tal efecto, en el cual se comprobó el funcionamiento del algoritmo. El tiempo que el nodo está en modo inactivo consume una cantidad mínima de energía, lo cual permite al nodo ahorrar energía, y por lo tanto aumenta su tiempo de vida y de la red. Los escenarios en los cuales todos los nodos transmiten datos, permiten validar el intervalo de tiempo en el que el nodo debe estar en el modo activo.

Las limitaciones del estudio tenían relación con la realización de las pruebas en un prototipo de red que opera en un ambiente controlado, por lo que, es necesario probar el algoritmo en ambientes con mucho ruido para determinar como la pérdidas de tramas afectan a los períodos de tiempo en los cuales los nodos deben estar activos y realizar investigaciones asociadas con la transmisión confiable utilizando confirmaciones implícitas y evitar la utilización de ACK porque influye en el retardo extremo y en el consumo de energía.

Se pretende con los resultados obtenidos, promover la creación de aplicaciones para monitoreo de estructuras lineales de cientos de kilómetros, por ejemplo, para sensar las perforaciones no autorizadas en una tubería para robar gasolina. La propuesta contribuye al desarrollo de una nueva arquitectura de red para topologías lineales.

### Reconocimientos

Este trabajo forma parte del proyecto “Redes de Sensores Inalámbricos para IOT” propuesto por el Grupo de Investigación EoT del DETRI. Los autores desean expresar su agradecimiento Vicerectorado de Investigación de la EPN y a NetSoSe.

### Referencias

- Agarwal, T. (2015). What is ZigBee Technology, Architecture and its Applications? In *El-Pro-Cus*.
- Al Imran, M. A., Dalveren, Y., Tavli, B., & Kara, A. (2020). Optimal operation mode selection for energy-efficient light-weight multi-hop time synchronization in linear wireless sensor networks. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01744-y>
- Alkama, L., & Bouallouche-Medjkoune, L. (2021). IEEE 802.15.4 historical revolution versions: A survey. *Computing*, *103*(1). <https://doi.org/10.1007/s00607-020-00844-3>
- Chen, Y., Hou, K. M., Zhou, H., Shi, H. L., Liu, X., Diao, X., Ding, H., Li, J. J., & De Vault, 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>
- Co, K. J., Ong, A. V., & Peradilla, M. (2021). WSN Data Collection and Routing Protocol with Time Synchronization in Low-cost IoT Environment. *Procedia Computer Science*, *191*, 102–110. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2021.07.016>
- Egas Acosta, C., Gil-Castiñeira, 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). <https://doi.org/10.36825/riti.09.17.006>
- Egas, C., & Gil-Castiñeira, F. (2020). Revisión de requisitos, protocolos y desafíos en LWSN. *MASKAY*, *11*(1). <https://doi.org/10.24133/maskay.v11i1.1728>
- Eghonghon Ukhurebor, K., Odesanya, I., Soo Tyokighir, S., George Kerry, R., Samson Olayinka, A., & Oluwafemi Bobadoye, A. (2021). Wireless Sensor Networks: Applications and Challenges. In *Wireless Sensor Networks - Design, Deployment and Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93660>
- Huan, X., Kim, K. S., & Lee, S. (2020). A Beaconless Asymmetric Energy-Efficient Time Synchronization Scheme for Resource-Constrained Multi-Hop Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Communications*, *68*(3), 1716–1730. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2960344>
- Instruments, T. (2014). *PACKET-SNIFFER*. <https://www.ti.com/tool/PACKET-SNIFFER>
- 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*. <https://doi.org/10.1155/2021/8090547>
- Microchip. (2016). *Wireless Composer*. <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*.
- Pandey, O., Gautam, V., & Jha, S. (2020). Time Synchronized Node Localization Using Optimal H-Node Allocation in a Small World WSN. *IEEE Communications Letters*, *24*(2), 2579–2583. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3008086>

- Raptis, T. P., Passarella, A., & Conti, M. (2020). A survey on industrial internet with ISA100 wireless. *IEEE Access*, 8. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019665>
- Shruti, B. V., Thippeswamy, M. N., & Venkatesh, K. (2019). Energy efficient medium access control protocols for wireless sensor networks – A survey. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8(1.5 Special Issue). <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/6381.52019>