

Time Synchronization in Arduino-based Wireless Sensor Networks

M. S. Pérez, *Member, IEEE*, and E. V. Carrera, *Member, IEEE*

Abstract— Wireless sensor networks have attracted a lot of attention due to their wide variety of applications, ranging from inventory management to battlefield surveillance. In most cases, an accurate time synchronization of the nodes is essential to provide a common time reference and to facilitate coordinated actions. However, important challenges arise when network nodes are clocked by low-cost, low-stability oscillators, besides suffering of strong power consumption and computational capacity constraints. In addition, wireless communication protocols used by those simple nodes often have functional and performance disadvantages. Based on that, this paper presents a synchronization technique for Bluetooth-based sensor networks populated by highly resource constrained sensing nodes. In this paper, the main factors influencing time synchronization are characterized and experimentally validated in a real system, including the Bluetooth communication channels. At the end, the proposed synchronization technique is implemented and evaluated in an Arduino-based wireless sensor network, whose motivational application is the localization of acoustic events.

Keywords— Arduino platform, Bluetooth communication, Time synchronization, Wireless sensor networks.

I. INTRODUCCIÓN

LAS REDES inalámbricas de sensores (WSN) son colecciones de pequeños nodos de procesamiento bastante limitados en recursos y distribuidos espacialmente en entornos específicos [1]. Debido a su operación autónoma, estos nodos deben ser extremadamente eficientes respect del consumo de energía, suficientemente pequeños para mimetizarse en cualquier ambiente, y de bajo costo para permitir grandes despliegues [2].

Una amplia gama de aplicaciones basadas en la utilización de WSN se han propuesto para las áreas de salud, en el hogar y en el campo militar. Algunos ejemplos de estas aplicaciones son la monitorización de zonas de desastre, la vigilancia remota en campos de batalla, el rastreo de vida salvaje, la gestión del tráfico, entre muchas otras [3]. En todos los casos, la función de los nodos de red es coleccionar los valores de determinadas

variables físicas/ambientales y enviarlos a un nodo central para su procesamiento y análisis [4].

La mayoría de las aplicaciones basadas en redes de sensores requieren una sincronización precisa de los tiempos locales en

cada nodo para facilitar operaciones de grupo o actuación coordinada, así como la fusión de datos provenientes de los sensores. Por ejemplo, en WSN densamente pobladas, múltiples sensores pueden observar un mismo fenómeno e informar de ello simultáneamente. Si las referencias de tiempo están sincronizadas, los informes de eventos redundantes son fácilmente reconocidos. Además, mecanismos de sincronización pueden utilizarse para implementar intervalos de reposo con el fin de configurar a los nodos de la red en un modo de mínimo consumo de energía y activarlos únicamente cuando se requiera su participación en el intercambio de información [3].

Para garantizar una sincronización adecuada y precisa entre los nodos de una red, se han propuesto varias técnicas que incluyen mecanismos para compensar los efectos de desviación de frecuencia de los osciladores presentes en los relojes locales [5], [2]. Sin embargo, a pesar de todas estas propuestas, la comunicación en una red de sensores incluye latencias significativas, junto a escasos recursos de cómputo, por lo que no todas las opciones son adecuadas y válidas para WSN genéricas [6], [3]. Otro desafío importante para la sincronización en redes de sensores es el hecho que los nodos generalmente incluyen osciladores de bajo costo y baja estabilidad, lo que provoca desvíos significativos en los relojes internos ante cualquier variación operativa o ambiental.

Considerando las limitaciones mencionadas anteriormente y teniendo en cuenta que cada aplicación demanda diferentes requisitos de sincronización [7], [8], este trabajo presenta la implementación y evaluación de una técnica de sincronización para redes inalámbricas de sensores con recursos de energía, comunicación y computación sumamente limitados. El proceso de sincronización consiste en el envío de mensajes de reseteo para los contadores de tiempo local cada determinado intervalo de tiempo a partir del nodo central.

Con el propósito de evaluar la precisión y utilidad de nuestra propuesta, esta técnica de sincronización fue implementada en una WSN orientada a tareas de localización acústica de eventos. El hardware de cada nodo está basado en las tarjetas Arduino Nano y módulos Bluetooth para las tareas de procesamiento y comunicación, respectivamente. Los resultados obtenidos muestran que la precisión de la técnica de sincronización puede establecerse a través de un modelo simple que requiere el tiempo entre envíos consecutivos de los mensajes de sincronización (*i.e.*, los mensajes para el reseteo de los contadores). Los resultados experimentales muestran que nuestra técnica de sincronización alcanza una precisión en torno de 20 milisegundos cuando se consideran intervalos

El trabajo presentado en este artículo fue financiado por la *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE* como proyecto de investigación interno número 2013-PIT-017.

M. S. Pérez, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador, salome.perez8@gmail.com

E. V. Carrera, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador, evcarrera@espe.edu.ec

entre mensajes de sincronización de 5 segundos. Es necesario notar que nuestra propuesta es robusta frente a las latencias de red significativas y al costo de procesamiento (*overhead*) del protocolo Bluetooth. Para demostrar esta afirmación, el nodo central implementa una funcionalidad de ordenamiento que garantiza una visualización en tiempo real de la ocurrencia de eventos provenientes de todos los nodos.

Es importante destacar que la técnica de sincronización propuesta en este trabajo no considera modificaciones al hardware o protocolos de comunicación como usualmente se asume en otras propuestas. Las modificaciones sugeridas en otros trabajos normalmente demandan mayores capacidades de procesamiento y/o consumo de energía. La implementación actual de nuestra propuesta utiliza componentes comerciales de electrónica abierta sin ninguna modificación.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. La sección II repasa los conceptos generales de las técnicas de sincronización. La sección III describe los detalles de nuestra implementación. La evaluación correspondiente se presenta en la sección IV. Algunos trabajos relacionados son analizados en la sección V. Finalmente, la sección VI concluye este artículo.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

A. Sincronización en redes inalámbricas de sensores

Las redes inalámbricas de sensores requieren manejar una noción común de tiempo para que los datos provenientes de los sensores puedan ser interpretados correctamente con relación a su tiempo de ocurrencia [4]. Algunas aplicaciones requieren operar en base a una sincronización de tiempos sumamente precisa, mientras que en otras, la eficiencia energética es más importante que la exactitud de la sincronización. De esta forma, una técnica de sincronización es adecuada a la medida que se ajuste a los objetivos de la aplicación ejecutada en la red de sensores [9], [10].

Uno de los principales problemas que afecta la sincronización en una WSN son los osciladores de bajo costo y baja estabilidad. Estos elementos provocan relojes inconsistentes en los nodos de la red debido principalmente a tres razones: (i) los cristales de cuarzo en cada nodo pueden funcionar a frecuencias ligeramente distintas, (ii) se producen desviaciones en la frecuencia de oscilación debido a cambios en el entorno como temperatura, presión o voltaje, y (iii) debido a que los nodos pueden activarse/desactivarse en tiempos distintos, sus relojes marcan diferentes valores [11].

B. Técnicas de sincronización existentes

Las tres principales técnicas de sincronización para redes inalámbricas de sensores son descritas a continuación.

1) RBS (*Reference Broadcasting Synchronization*):

Consiste básicamente en transmitir mensajes de notificación a todos los elementos receptores. Las notificaciones no contienen información de temporización, pero permiten que los nodos receptores intercambien información de tiempo con

sus nodos vecinos, compartiendo el valor de sus relojes y calculando las diferencias de tiempo creadas. Mediante el aumento de la frecuencia de envío de notificaciones, la precisión de esta técnica de sincronización normalmente incrementa [12].

2) TPSN (*Timing-Sync Protocol for Sensor Networks*):

Se basa en un esquema tradicional de sincronización que utiliza un árbol para organizar la topología de la red. El funcionamiento de esta técnica se divide en dos fases: descubrimiento de la profundidad en el árbol y sincronización propiamente dicha [13], [12]. La fase de descubrimiento de la profundidad crea la topología jerárquica de la red. En esta fase se asigna a cada nodo un nivel o profundidad, donde solo el nodo central reside en el nivel cero y es el encargado de enviar los mensajes de descubrimiento de profundidad a sus nodos vecinos. En la fase de sincronización, cada nodo a profundidad i se sincronizará con los nodos de profundidad $i - 1$ de forma recursiva hasta que todos se hayan sincronizado con el reloj del nodo central [12]. El proceso de sincronización se realiza esperando un tiempo aleatorio para enviar los mensajes de sincronización al nodo superior y evitar colisiones causadas por la contención de acceso al medio. Por su parte, el nodo superior responde con paquetes de acuse de recibo para que todos los nodos que se encuentran a dicha profundidad puedan corregir sus relojes de acuerdo con la referencia central.

3) FTSP (*Flooding Time Synchronization Protocol*):

Es una mejora al protocolo TPSN. De hecho, FTSP es similar a TPSN en su estructura de incorporar un nodo central y mantener todos los nodos de la red sincronizados a esa referencia central. El nodo central transmite la información de sincronización a través de un único mensaje que se envía a todos los nodos de la red. Estos a su vez, toman nota del tiempo local cuando reciben el mensaje para estimar su correspondiente diferencia de tiempo [10], [14]. Para mantener una buena precisión, FTSP implementa mecanismos de compensación ante los efectos de la desviación de frecuencia utilizando el concepto de regresión lineal. FTSP fue diseñado para grandes redes multi-salto donde el nodo central es elegido de forma dinámica y periódicamente. El elemento central es responsable por mantener el tiempo global de la red, mientras que los nodos se sincronizan con esta referencia central y adoptan una topología *ad hoc* para comunicar la información de temporización a toda la red [9].

C. Discusión

Si bien TPSN proporciona un protocolo de sincronización para redes multi-salto, no maneja bien los cambios de topología. Un inconveniente de TPSN es el hecho de reiniciar la fase de descubrimiento de profundidad si el nodo central o la topología de la red cambian, provocando un aumento en el tráfico en la red. Por otro lado, FTSP es robusto por utilizar un procedimiento de inundación de mensajes de sincronización para combatir los posibles fallos de los enlaces. Al igual que TPSN, FTSP también proporciona etiquetas de tiempo en la capa MAC para incrementar la precisión y reducir las diferencias de retardo entre los mensajes de sincronización [12], [15].

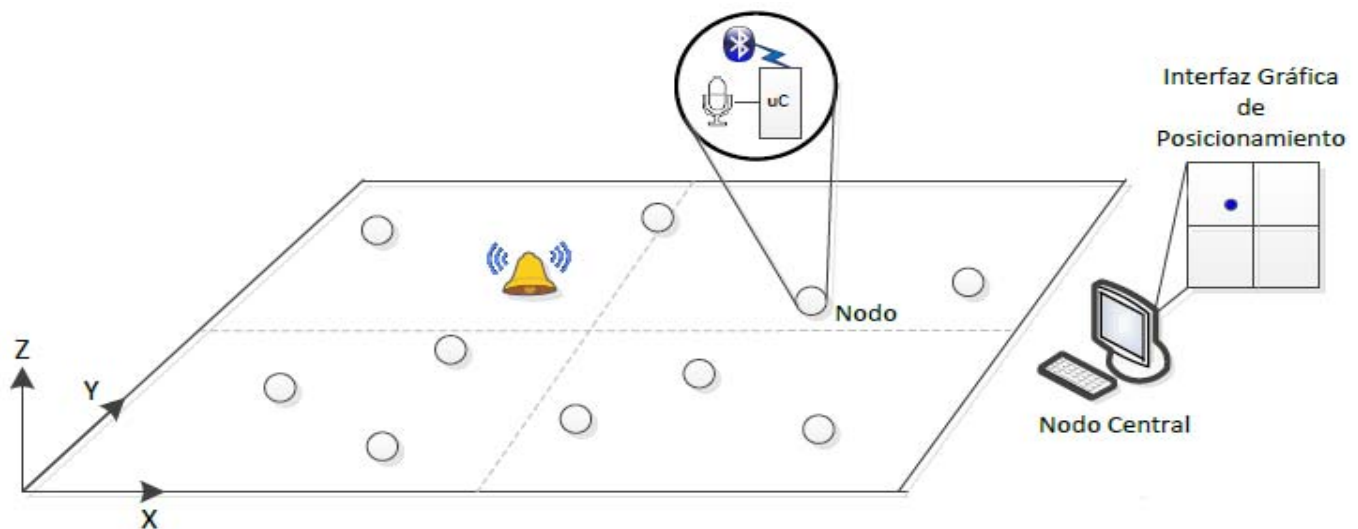


Figura 1. Esquema general del sistema de localización acústica de eventos mediante una red inalámbrica de sensores.

Finalmente, es importante notar que la mayoría de las técnicas de sincronización para redes de sensores permiten que sus nodos de red participen en esquemas de comunicación tipo difusión (*broadcast*). De esta manera se evitan errores en la sincronización por causa de tiempos diferentes en la recepción de la información referente al proceso de sincronización.

III. IMPLEMENTACIÓN

La Figura 1 presenta la visión general del sistema de localización de eventos acústicos [16] en el que se implementará la técnica de sincronización propuesta. El objetivo de este sistema es estimar la ubicación de una fuente sonora a través de la utilización de una red inalámbrica de sensores conformada por un elemento central o nodo sumidero, y múltiples nodos sensores conforme la exactitud de localización deseada. En la Figura 1, la campana representa la fuente sonora a localizar.

Con respecto al hardware utilizado, el nodo central está implementado por un computador core i7 con Fedora 17 como sistema operativo. Los nodos de red están formados por tarjetas Arduino Nano, transductores acústicos (*i.e.*, micrófonos) de bajo costo y módulos de comunicación Bluetooth v2.0 con una interfaz RS-232. Cada nodo de la red adquiere señales acústicas para convertirlas en señales digitales con 8 bits por muestra y una tasa de muestreo de 312 kHz. Luego de coleccionar 1024 muestras, se calcula la potencia acústica media y se asigna la etiqueta de tiempo local correspondiente para luego transmitir esos valores de potencia y tiempo a través del protocolo Bluetooth. El tiempo existente entre mensajes consecutivos es aproximadamente 10 *mseg*.

Debido a que la distancia entre los nodos de la red es menor a 10 *m* en el ambiente desplegado, la topología de la red se basa en un esquema centralizado donde enlaces directos se establecen entre los nodos sensores y el elemento central. La principal desventaja de este esquema centralizado es la

generación de cantidades considerables de tráfico debido a los enlaces punto a punto. Sin embargo, su simplicidad y menor complejidad de programación hacen que este esquema sea atractivo para nuestro prototipo.

Con relación al protocolo de comunicación inalámbrica, Bluetooth fue seleccionado para interconectar los nodos debido a su fácil procedimiento de conexión, bajo costo, y al gran número de dispositivos que actualmente incluyen esta tecnología y que podrían emplearse como nodos en nuestro sistema con pequeñas modificaciones. Además, Bluetooth es seguro y fácil de administrar a través de interfaces de comunicación específicas que garantizan la fiabilidad en el intercambio de información [17], [18].

Uno de los módulos principales en el sistema de localización de eventos acústicos son los protocolos que coordinan el proceso de localización. Estos protocolos están estrechamente relacionados con la sincronización de la red de sensores, ya que al disponer de una sincronización de tiempos precisa, la información de cada evento detectado (junto con su correspondiente etiqueta de tiempo) se envía desde cada uno de los nodos sensores al elemento central. De esta forma, el nodo central puede asociar los datos recibidos con el verdadero tiempo de ocurrencia y proporcionar esta información a los algoritmos de localización correspondientes.

La técnica de sincronización que se propone en este trabajo se basa en los fundamentos del protocolo RBS sin considerar un esquema de comunicación por difusión (*broadcast*). En nuestra implementación, esta particularidad se debe a que los recursos de hardware y software que se disponen en los módulos de comunicación Bluetooth, compatibles con la plataforma Arduino, son bastante limitados (*e.g.*, interfaz de comunicación RS-232). Concretamente, nuestra técnica de sincronización consiste en el envío de mensajes de reseteo de los contadores locales a todos los nodos de la red a partir del elemento central y con una frecuencia determinada.

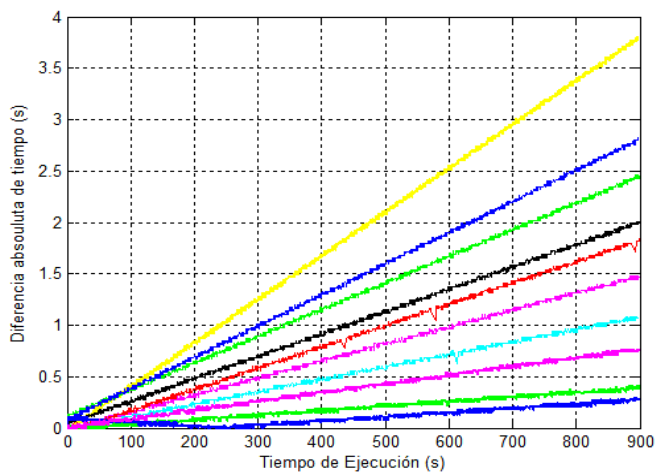


Figura 2. Diferencia absoluta de tiempo respecto a la referencia central cuando no existe una técnica de sincronización.

IV. RESULTADOS

Con la finalidad de evaluar los factores que influyen durante el proceso de sincronización, se efectuaron cuatro experimentos: el primero evidencia la necesidad eminente de sincronización en nuestra red de sensores, el segundo muestra las limitaciones de la comunicación Bluetooth en la plataforma Arduino, el tercer experimento está relacionado con la estimación matemática del tiempo adecuado entre envíos de mensajes de sincronización, y finalmente el cuarto experimento comprueba la utilidad y precisión de la técnica de sincronización propuesta en una aplicación real orientada a tareas de localización de eventos acústicos.

A. Necesidad de sincronización

El objetivo de nuestro primer experimento es calcular la cantidad de tiempo que se retrasan/adelantan los nodos en la red de sensores cuando no existe una técnica de sincronización adecuada. El comportamiento obtenido con 10 nodos durante un período de 15 minutos fue el esperado y se expone en la Figura 2. A medida que transcurre el tiempo y sin una técnica de sincronización implementada, los relojes de cada nodo van incrementando linealmente su diferencia de tiempo absoluta respecto a la referencia central. Se observa una diferencia de hasta 3.8 segundos en el transcurso de los 15 minutos que duró la prueba. Esta diferencia de tiempo está relacionada con los efectos de desviación de frecuencia en los osciladores que forman parte del hardware de cada nodo y afectan directamente a la lectura de los relojes locales. A pesar que el hardware es el mismo en todos los nodos de la red, los efectos de desvío de frecuencia son diferentes para cada nodo ya que dependen de variables externas como temperatura, presión e inclusive detalles de fabricación.

B. Canal de comunicación Bluetooth

Siguiendo los lineamientos de caracterización de un canal de comunicación propuestos en [19], se realizaron mediciones de latencia, costo asociado a cada mensaje (*overhead*) y la

capacidad del canal en la comunicación Bluetooth en nuestra red de sensores.

Los resultados obtenidos muestran que la latencia requerida para que un mensaje de apenas 2 bytes atravesase el canal de comunicación Bluetooth desde el nodo central a uno de los nodos sensores es en media 13,4 milisegundos. Igualmente se pudo establecer que el costo de envío de un mensaje en el nodo central es aproximadamente 7 milisegundos, por lo que no se pueden enviar más allá de 140 mensajes por segundo. Finalmente, los datos de capacidad del canal muestran que debido a los altos costos asociados al envío de mensajes y a la interfaz RS-232 de los módulos Bluetooth para Arduino, la tasa máxima de transmisión es 70 Kbps.

Estos valores de desempeño caracterizan a nuestros canales de comunicación Bluetooth como elementos no muy adecuados para alcanzar una sincronización perfecta. Al no soportar una comunicación por difusión (*broadcast*), esta clase rudimentaria de comunicación presenta serias limitaciones para implementar técnicas de sincronización sofisticadas.

C. Estimación del tiempo entre mensajes de sincronización

Continuando con el análisis de la Figura 2, vemos que el comportamiento del nodo representado por la línea amarilla es de especial interés, ya que corresponde al nodo que experimentó mayor variación en la red de sensores. Este nodo alcanzó una diferencia absoluta de 3,8 segundos en 15 minutos de evaluación. De acuerdo a ello, el modelo matemático para definir el intervalo de tiempo requerido entre los mensajes de sincronización se basó en el comportamiento del nodo con mayor diferencia absoluta en la red de sensores. La estimación de este intervalo es importante ya que el objetivo es conseguir una sincronización precisa sin saturar los canales de comunicación Bluetooth. Note que el envío de mensajes de sincronización no es más que el envío de mensajes de reseteo de los contadores locales desde el nodo central hacia todos los nodos de la red.

La formulación matemática para el cálculo del tiempo adecuado entre envíos sucesivos de mensajes de sincronización relaciona principalmente dos factores: la diferencia de tiempo que se desea obtener en la red de sensores y la pendiente de la línea amarilla en la Figura 2. Esta formulación considera como el peor caso en nuestra red de sensores al comportamiento del nodo con mayor diferencia de tiempo. La expresión resultante se expone en la Ecuación 1, donde el valor de la pendiente máxima equivale aproximadamente a 0,0042.

$$\text{Tiempo entre envíos} = \frac{\text{Diferencia de tiempo esperada}}{\text{Pendiente}} \quad (1)$$

Finalmente, considerando que nuestra aplicación para el procesamiento de señales acústicas permite una sincronización con variaciones máximas en el orden de varios milisegundos, la diferencia de tiempo esperada se fijó en 20 *mseg*. Consecuentemente, se obtiene un tiempo ideal entre envíos de mensajes de sincronización igual a 4,74 segundos. Note que muchos de los nodos tendrán errores muy inferiores a 20

mseg. Solamente el nodo que representa el peor caso tendrá una diferencia similar al error máximo permitido.

D. Evaluación de la técnica de sincronización

Debido a que el tiempo programado entre envíos de mensajes de sincronización influye directamente en la precisión de la sincronización y en definitiva sobre el correcto intercambio de la información, es necesario evaluar la exactitud y utilidad de la técnica de sincronización en una aplicación real. Dicha evaluación debe considerar todas las limitaciones del protocolo de comunicación inalámbrico empleado y los posibles inconvenientes que pueden afectar el correcto funcionamiento de la técnica de sincronización propuesta. En nuestro caso particular, evaluaremos la técnica de sincronización en el sistema de localización de eventos acústicos, considerando una WSN poblada por 6 nodos sensores y un elemento central, que se comunican entre sí mediante el protocolo Bluetooth.

Tomando en consideración lo expuesto en el párrafo anterior, nuestro último experimento consistió en registrar el porcentaje de etiquetas de tiempo enviadas desde los nodos de red y recibidas en el nodo central al variar el tiempo entre envíos de mensajes de sincronización desde 100 milisegundos hasta 10 segundos. Los resultados obtenidos comprueban la estimación teórica de 4,74 segundos como el tiempo más adecuado entre envíos de mensajes de sincronización. Específicamente, intervalos de tiempo en el orden de los milisegundos saturan la red debido al alto costo asociado al envío de cada mensaje. Esta congestión produce que más de la mitad de las etiquetas de tiempo que se envían desde los nodos de red sean descartadas. El comportamiento mejora cuando se consideran intervalos de tiempo mayores a un segundo. Así, para intervalos de 5 segundos, 99,4 % de las etiquetas de tiempo fueron recibidas en el nodo central. Sin embargo, a pesar que para intervalos de tiempo superiores a 5 segundos el uso de la red es sumamente bajo, el reseteo de los contadores locales cada 10 o más segundos aumenta el error de sincronización.

Por otra parte, debido a la variación de la latencia de red y al costo de envío de datos en la comunicación Bluetooth utilizada, las mediciones de potencia acústica y sus correspondientes etiquetas de tiempo llegan al nodo central de forma completamente desordenada. Para resolver este inconveniente y entregar información consistente a los posteriores algoritmos de localización en nuestra aplicación, el nodo central implementa una funcionalidad de ordenamiento que asocia el tiempo de ocurrencia verdadero con la información de los eventos acústicos provenientes desde los nodos sensores.

Específicamente, este algoritmo se encarga de producir vectores de potencia acústica cuyos valores están estrechamente relacionados en tiempo, pero manteniendo cierta tolerancia para las etiquetas de tiempo correspondientes. De esta forma, luego de un análisis exhaustivo de 10000 vectores generados por el algoritmo propuesto, se determinó que la tolerancia de tiempo adecuado es alrededor de 10 *mseg* debido al bajo porcentaje (*i.e.*, 2,35 %) de pérdida de datos que se obtuvo con este valor. Con propósitos de comparación, cuando no se especificó ninguna tolerancia en la selección de

las etiquetas de tiempo, el algoritmo descarta alrededor de 20,80 % de los datos enviados desde los nodos de la red.

V. TRABAJOS RELACIONADOS

Los autores de [20] y [21] manifiestan que la mayoría de las técnicas de sincronización para redes inalámbricas de sensores se basan en modelos continuos de reloj. Estos modelos continuos no son capaces de describir adecuadamente las características y requisitos de los procesos de coordinación de tiempo que se requieren en aplicaciones de WSN. Por lo tanto, nuevas técnicas de estimación de parámetros de sincronización surgen en base a modelos discretos, logrando la misma precisión de sincronización pero con un menor énfasis en el intercambio de mensajes.

Es importante destacar las mejoras a las técnicas de sincronización que han dado lugar a una variedad de enfoques de eficiencia energética en redes inalámbricas de sensores. Por ejemplo, los autores de [22] introducen un esquema de sincronización de alta eficiencia energética en base a procedimientos de escucha de intercambios de mensajes de sincronización entre cada par de nodos. En consecuencia, un grupo de nodos puede sincronizarse sin enviar mensajes adicionales y lograr una sincronización global. De esta forma se reduce el consumo de energía sin incurrir en pérdidas de precisión.

Respecto a las mejoras en la precisión y rendimiento de las técnicas de sincronización en WSN, [23] propone un modelo basado en modificaciones al protocolo FTSP, simulando el uso de mensajes de tamaño reducido para disminuir significativamente los errores de sincronización y aumentar la capacidad de recuperación de la red. Una contribución específica se expone en [24], donde los autores analizan el grado de implicación de una sincronización de tipo RBS de alta precisión en sistemas de localización acústica.

Finalmente, trabajos como [25], contrastan modelos teóricos de sincronización a través del diseño de protocolos de sincronización en redes inalámbricas de sensores. Comparaciones exhaustivas de las características de los protocolos ya existentes son realizadas en función del hardware utilizado y de los cálculos de rendimiento que caracterizan experimentalmente la precisión de la mayoría de las técnicas de sincronización.

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo propone una técnica de sincronización simple para redes inalámbricas de sensores con recursos de comunicación, computacionales y de energía sumamente limitados. Con el propósito de evaluar la precisión y utilidad de nuestra propuesta, la técnica de sincronización se implementó en una red inalámbrica de sensores orientada a tareas de localización de eventos acústicos. Como parte del procedimiento de sincronización, cada nodo de la red está encargado de la administración de su tiempo local. A su vez, el nodo central o sumidero envía mensajes de reseteo a los otros nodos de la red cada 5 segundos.

A través de las evaluaciones realizadas, se determinó un modelo para obtener el tiempo ideal entre los envíos de mensajes de sincronización. Este modelo considera la

información obtenida al analizar las diferencias de tiempo experimentadas por los nodos de la red ante la ausencia de un mecanismo de sincronización y la diferencia máxima de tiempo que se desea obtener. La estimación teórica de 4,7 segundos como intervalo de tiempo ideal entre envíos de mensajes de sincronización se validó experimentalmente al recibir un 99,4 % de los datos enviados al nodo central desde los nodos sensores cuando el intervalo se configuró en 5 segundos.

Es preciso destacar también que nuestra propuesta de sincronización es robusta frente a la latencia de la red y al costo de envío de datos en la comunicación Bluetooth seleccionada. Para lograr esto se implementó un ordenamiento de los mensajes en el nodo central que asocia el tiempo de ocurrencia verdadero a cada información de los eventos acústicos. El algoritmo implementado garantiza un bajo porcentaje de pérdida de datos (*i.e.*, 2,35 %). Adicionalmente, nuestra técnica de sincronización alcanza una precisión en el orden de los milisegundos a pesar de no contemplar esquemas de envío de mensajes de sincronización tipo difusión (*broadcast*), como generalmente asumen la mayoría de algoritmos y protocolos de sincronización. Esto se debe a que la pila de protocolos Bluetooth disponible en los dispositivos comerciales y compatibles con el hardware Arduino, no incluye los procedimientos necesarios para establecer una comunicación de este tipo.

Finalmente, la técnica de sincronización propuesta en este trabajo no considera modificaciones en el hardware o protocolos de comunicación como es usual en otras propuestas. La implementación actual utiliza componentes comerciales sin ninguna alteración para evitar elevar el consumo de recursos de procesamiento, energía o añadir complejidad a las funciones de los nodos de red.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo fue financiado por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE como proyecto de investigación interno número 2013-PIT-017.

REFERENCIAS

- [1] C. Dennis, J. Emil, and M. Aleksandar, "Time synchronization in wireless sensor networks," *Proc. IEEE 37th Southeastern Symposium on System Theory*, vol. 3, pp. 135–138, July 2005.
- [2] L. S. M and C. J. M, "Time synchronization in wireless sensor networks: A survey," in *Proc. IEEE SoutheastCon*, vol. 2, January 2010, pp. 92–102.
- [3] Q. Ye, Y. Zhang, and L. Cheng, "A study on the optimal time synchronization accuracy in wireless sensor networks," in *Computer Networks*, no. 48, Laboratory of Networking Group (LONGLAB). Department of Computer Science and Engineering - Lehigh University, Bethlehem, USA. Elsevier, 2005, pp. 549–566.
- [4] G. J. Z. L. Chen Tao, Jingtai Liu and Z. Bin, "Time synchronization in acoustic localization system based on wireless sensor network," in *6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, vol. 1. IEEE.
- [5] F. Sivrikaya and B. Yener, "Time synchronization in sensor networks: a survey," in *IEEE Network*, vol. 4, December 2004, pp. 45–50.
- [6] S. Severi and D. Dardari, "Performance limits of time synchronization in wireless sensor networks," in *IEEE International Conference on Communications*, vol. 3, November 2008, pp. 8–es.
- [7] L. X. L. Xiaofang, C. C. C. Chunbo, and G. W. G. Wenhua, "Clock synchronization method for star-structure wireless sensor network," in *International Conference on Computational Aspects of Social Networks CASoN 2010*, March 2010, pp. 603–606.
- [8] K. N and S. A. H, "A distributed broadcasting time-synchronization scheme for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*, vol. 5, California, USA, October 2005, pp. 1053–1056.
- [9] M. L. Sichitiu and C. Veerarittiphan, "Simple and accurate time synchronization for wireless sensor networks," M. Eng. thesis, Electrical and Computer Engineering Department - North Carolina State University, North Carolina, USA, February 2011.
- [10] S. Bholane and D. Thakore, "Time synchronization in wireless sensor networks," *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 3, July 2012.
- [11] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Mobile positioning using wireless networks - possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements." *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, pp. 41–53.
- [12] I.-K. Rhee, J. Lee, J. Kim, E. Serpedin, and Y.-C. Wu, "Clock synchronization in wireless sensor networks: An overview," in *Proc. IEEE Sensors*, Daejeon, Korea, September 2009.
- [13] T. M. Ian F Akyildiz and K. R. Chowdury, "Wireless multimedia sensor networks: A survey," in *IEEE Wireless Communications*, Georgia Institute of Technology. IEEE, 2007.
- [14] M. Mock, R. Frings, E. Nett, and S. Trikaliotis, "Continuous clock synchronization in wireless real-time applications," in *Proc. IEEE 19th Symposium on Reliable Distributed Systems SRDS*, vol. 1, October 2000, pp. 125–133.
- [15] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts." in *Proc. IEEE 5th Symposium on Operating System Design and Implementation*, Boston-MA, USA, December 2002.
- [16] M. S. Perez and E. V. Carrera, "Acoustic event localization on an arduino-based wireless sensor network," in *Proc. of the 6th IEEE Latin American Conference on Communications*, vol. 1, Cartagena, Colombia, November 2014.
- [17] D. Kammer, G. McNutt, B. Senese, and J. Bray, *Bluetooth – Application Developer's Guide: The Short Range Interconnect Solution*. MA, USA: Syngress Publishing, Inc., 2002.
- [18] A. Huang and L. Rudolph, *Bluetooth - Essentials for Programmers*. New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [19] C. A. Thekkath and H. M. Levy, "Limits to low-latency communication on high-speed networks," *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, vol. 11, no. 2, pp. 179–203, 1993.
- [20] J. F. J. Feng, R. W. Pazzi, and A. Boukerche, "The impact of discrete clock on time synchronization in wireless sensor networks," in *IEEE 34th Conference on Local Computer Networks*, Ottawa, Canada, October 2009, pp. 1054–1060.
- [21] N. M. Freris, H. Kowshik, and P. R. Kumar, "Fundamentals of large sensor networks: Connectivity, capacity, clocks and computation," in *Proc. IEEE of IEEE*, vol. 98, Illinois, USA, November 2010, pp. 10–es.
- [22] K.-L. N. K.-L. Noh, E. Serpedin, and K. Qaraqe, "A new approach for time synchronization in wireless sensor networks: Pairwise broadcast synchronization," in *Tran. IEEE on Wireless Communications*, vol. 7, Texas, USA, September 2008, pp. 8–es.
- [23] G. D. L, B. Azzedine, O. Horacio, M. Raquel, and L. Antonio, "A small world model to improve synchronization algorithms for wireless sensor networks," in *IEEE Symposium on Computers and Communications*, October 2010, pp. 229–234.
- [24] T. C. T. Chen, J. L. J. Liu, G. J. G. Jing, Z. L. Z. Liu, and Z. B. Z. Bin, "Time synchronization in acoustic localization system based on wireless sensor network," in *6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, vol. 1, California, USA, April 2010, pp. 1965–1970.
- [25] L. Jun, Y. Chao, and H. Yingli, "A guideline for time synchronization design in WSNs," in *IEEE International Conference on Internet Computing and Information Services*, Hong Kong, China, September 2011, pp. 237–538.

María S. Pérez (M¹⁰) nació en Quito-Ecuador el 08 de octubre de 1990. En Febrero del 2014 se graduó como Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador. Actualmente es becaria Fulbright 2014 en proceso de enrolamiento a un programa de maestría en Ingeniería Eléctrica y Computación. Adicionalmente, está vinculada en áreas de investigación relativas a sistemas



de localización, así como en el desarrollo de aplicaciones móviles. Sus áreas de interés incluyen sistemas de comunicación, localización, inteligencia artificial y reconocimiento biométrico.



Enrique V. Carrera (M⁹⁹) nació en Quito-Ecuador el 24 de abril de 1968. En 1992 se graduó como Ingeniero Electrónico en la Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador. En el año 1996 culminó su maestría en ingeniería eléctrica en la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, Brasil. Posteriormente, en 1999 obtuvo su Doctorado en Ciencias en Ingeniería de Sistemas y Computación en la Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil. Entre los años 2000 y 2004 estuvo vinculado al Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Rutgers, USA, como investigador asociado. Actualmente se desempeña como profesor principal en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador. Entre sus áreas de interés destacan los sistemas sensibles al contexto y los sistemas distribuidos móviles.