

# Consumo de energía en un algoritmo de sincronización

E. Giandomenico<sup>1</sup>, E. D'Agostino<sup>1</sup>, J. Belmonte<sup>1</sup>, R. Corti<sup>1</sup>, R. Martínez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina

## RESUMEN

*Las redes de sensores inalámbricas orientadas a las aplicaciones de supervisión ambiental se utilizan para medir variables del medio y con esos datos realizar actividades de diversa índole. Los nodos que integran la misma trabajan bajo fuertes restricciones de energía. Sincronizar las actividades de los distintos nodos es un tema de importancia, por lo que existen amplias investigaciones de este aspecto. CLUDITEM es un algoritmo de encaminamiento jerárquico, el cual trabaja con un esquema de sincronización emisor-receptor. Se realizó la simulación del algoritmo en el simulador NS2. En este trabajo se explica en detalle el algoritmo de sincronización utilizado y se calcula el consumo de energía del mismo, respecto del caso ideal de despreciar el desfase de los relojes.*

**Palabras claves:** redes sensores inalámbricas, sincronización, clusters.

## ABSTRACT

*Wireless sensors networks aimed at environmental monitoring applications are used to measure the environment variables and do activities of various kinds with these data. The nodes that are members of the network work under strong energy restrictions. Synchronize the activities of the different nodes is an important issue so there are extensive research in this area. CIUDITEM is a hierarchical routing algorithm which works with a sender-receiver synchronization scheme. The simulation of the algorithm was performed in the NS2 simulator. This paper explains in detail the synchronization algorithm that was used and calculates the energy consumption compared with the ideal case of disregard the out of sync of the clocks.*

**Keywords:** WSN, synchronization, clusters.

## 1. Introducción

La sincronización temporal cuenta con una larga trayectoria de investigación en el área de los sistemas distribuidos. Sin embargo, las técnicas existentes, algunas de ellas largamente probadas y con muy buen desempeño, no pueden utilizarse en redes inalámbricas de sensores, por las particularidades de las mismas [YMG2008]. No se ha logrado aún alcanzar un protocolo de sincronización que resulte independiente de la topología de la red y tenga un alto grado de escalabilidad [PK2010]. Los nodos sensores deben trabajar bajo fuertes restricciones de energía, muchas veces en ambientes hostiles o en lugares de difícil acceso, lo que hace imposible realizar mantenimiento o ajustes en los dispositivos. Para garantizar un tiempo de vida acorde con las necesidades, y considerando las limitaciones existentes respecto a la disponibilidad de energía, se requiere realizar un cuidadoso diseño de hardware (HW) y de software (SW). La disponibilidad de recursos en cada dispositivo respecto de almacenamiento, capacidad de procesamiento y comunicación está limitada, no solo por la energía disponible, sino también por las exigencias de pequeño tamaño y bajo costo de los nodos. Por lo tanto el uso de HW dedicado, muchas veces costoso, para sincronizarse con fuentes externas como

el agregado de receptores GPS, es prohibitivo. Tampoco pueden incluirse algoritmos de sincronización cuya complejidad colisione con las limitaciones de la plataforma HW que deberá soportarlos. Por estos motivos, de la misma forma que ha ocurrido en las áreas de algoritmos de encaminamiento, tratamiento de la información y plataformas HW, las redes inalámbricas de sensores inteligentes (RISI) han necesitado de desarrollos específicos para abordar el problema de la sincronización temporal [IST2010].

Las redes de sensores se utilizan para supervisar y controlar actividades y ambientes de diversa índole. Es habitual abordar el seguimiento de fenómenos y eventos del medio para los cuales el tiempo juega un papel muy importante, al abordar las siguientes tareas [A2010]:

- **Recolección de datos:** las mediciones deben realizarse en periodos determinados, y muchas veces es necesario conocer el momento en que se llevaron a cabo para poder reconstruir la historia del fenómeno en estudio. Por ejemplo para supervisión de obras civiles y seguimiento de parámetros de salud en pacientes.
- **Coordinación de tareas:** los nodos deben realizar acciones siguiendo un cierto esquema y, dentro de lo posible, en forma coordinada. Esto ocurre, por ejemplo, cuando se apagan los transceptores para ahorrar energía, y luego los nodos deben entrar en actividad dentro de cierto periodo

de tiempo. Si el desfase de los relojes es muy grande, se perderán muchos de los mensajes intercambiados.

- Cálculos relativos al tiempo: entre las variables a medir se encuentra el tiempo, que es necesario para realizar distintos cálculos. La precisión de los mismos depende de la exactitud del valor medido.

Los relojes de los dispositivos son independientes entre sí y sus valores pueden ser distintos. Esto puede causar dificultades en los casos antes mencionados [RLK\*2009]. Dicha diferencia entre los valores de los distintos relojes se debe a:

- Los nodos inician su actividad en distintos instantes de tiempo.
- La frecuencia de los cristales no es la misma por motivos de fabricación (skew) lo que ocasiona que los valores se desfasen en el tiempo.
- La frecuencia de trabajo es sensible a las variaciones ambientales como la temperatura, introduciendo un error por corrimiento de valores (drift) [PK2010].

La variación en la frecuencia de trabajo de un oscilador, motivado por los dos últimos efectos mencionados anteriormente, se denomina deriva del reloj.

Además de los distintos valores en los relojes por problemas propios de las características de los mismos, se puede producir desfases durante la transmisión. Los procesos de determinación de tiempos se ven afectados por los retrasos en la propagación de los mensajes. Estos procesos deberían poder ser calculados con cierta exactitud pero por su característica de no determinísticos, no se pueden alcanzar niveles confiables de precisión. La latencia en el canal de transmisión se debe a las siguientes causas [RLK\*2009]:

- Tiempo de envío: es el tiempo que consume el emisor en armar el mensaje a enviar
- Tiempo de acceso: es el tiempo que transcurre hasta acceder al canal
- Tiempo de propagación: es el tiempo durante el cual el mensaje viaja del emisor al receptor
- Tiempo de recepción: incluye el tiempo comprendido entre que el receptor recibe el mensaje y lo procesa [IST2010].

Algunas aplicaciones de las RISI son estrictas respecto a la noción de tiempo y necesitan sincronizar los dispositivos con una precisión de algunas decenas de microsegundos. En las aplicaciones de supervisión ambiental, a las cuales se enfoca este trabajo, no es necesaria una noción de tiempo absoluto en los nodos aceptándose un ajuste entre los relojes del orden de milisegundos. Es suficiente garantizar un desfase máximo en cada ronda de medición, para poder tomar factores de seguridad adecuados, y de esta forma, secuenciar las fases de funcionamiento en cada ronda.

Este trabajo se organiza de la siguiente forma en la primera sección se hace una introducción al tema de redes de sensores y sincronización, en la sección dos se trata los esquemas de sincronización en RISI, en la tres se analizan trabajos relacionados. En la sección cuatro se detalla la sincronización en CLUDITEM, en la cinco se describe la sincronización considerando una situación ideal en la cual los relo-

jes no presentan deriva. En la sección seis se analiza la situación real en la cual los relojes tienen deriva y por último en la siete se enuncian las conclusiones.

## 2. Esquemas de sincronización para RISI

Los algoritmos de sincronización pueden ser proactivos o reactivos. Los proactivos realizan las tareas de sincronización continuamente para mantener el desfase de relojes acotado. Por ejemplo un nodo referencia envía periódicamente el valor de su tiempo local en un mensaje y los otros estiman su desfase en base a su tiempo local y el valor recibido. Los reactivos actúan ante cierto evento, un nodo envía su tiempo a la estación base que realiza las correcciones necesarias [A2010]. Además estos esquemas de sincronización se dividen en adaptativos y no adaptativos. Los primeros pueden modificar parámetros importantes del procedimiento de sincronización, como ser periodicidad, en respuesta a ciertos cambios en la red o en el ambiente, en cambio los últimos no modifican el algoritmo en ningún momento.

Los esquemas de sincronización introducen sobrecarga computacional, incrementan el tráfico en la red por el intercambio de mensajes y elevan el consumo de energía. Se deben aplicar técnicas para mantener un balance adecuado entre los costos de incorporar sincronización en las RISI y la ventaja de mantener acotados los errores de tiempo introducidos por los desfases de relojes locales.

Entre los procedimientos de sincronización más utilizados podemos mencionar:

- Sincronización emisor-receptor: un nodo envía en un mensaje el valor de su reloj. Cuando otro nodo lo recibe, lee su propio reloj y calcula el desfase respecto al emisor. El tiempo de propagación generalmente se desprecia.
- Sincronización de a pares: consiste en un intercambio de mensajes entre dos nodos, colocando en cada mensaje que envían el valor de sus relojes. Tienen en cuenta el tiempo de propagación, que lo asumen igual al transmitir en ambas direcciones, y consideran que la diferencia de los relojes se mantiene constante durante todo el transcurso de la transmisión. Con un cálculo simple se obtiene el desfase.
- Transmisión de referencia: Las asunciones realizadas por el método anterior no siempre son verdaderas y para disminuir el error se introduce un nodo de referencia al que escuchan todos los nodos [A2010].

## 3. Trabajos relacionados

Los algoritmos de sincronización más difundidos en las RISI son Reference Broadcast Synchronization (RBS) y Timing-sync Protocol for Sensor Networks (TPSN).

Los algoritmos de sincronización más difundidos en las RISI son Reference Broadcast Synchronization (RBS) y Timing-sync Protocol for Sensor Networks (TPSN).

En este artículo también se hace referencia al Scalable Lightweight Time Synchronization Protocol for WSN (SLTP) por ser un algoritmo que trabaja con clusters como CLUDITEM, aunque SLTP utiliza los clusters en sincronización y CLUDITEM utiliza clusters para definir la estructura de encaminamiento de la red.

En RBS un nodo de referencia envía un mensaje a sus vecinos, a través de un canal especial de sincronización, sin adjuntar ningún tiempo en el mensaje. Los vecinos usan el tiempo de recepción para sincronizarse, es decir es un algoritmo de sincronización receptor-receptor. Los problemas que puede presentar RBS tienen que ver con el número de vecinos que escuchan, o sea con cuantos nodos van a sincronizarse en base a la recepción de este mensaje. A medida que aumenta el número de nodos es posible que alguno no alcance la sincronización. El mensaje de sincronización es enviado periódicamente como se describe en [EGE2002].

El algoritmo TPSN trabaja en dos fases, en la primera llamada de descubrimiento se define una estructura jerárquica y en la segunda denominada de sincronización se trabaja con un esquema emisor-receptor. En la estructura jerárquica, cualquier nodo de un nivel  $i$  puede comunicarse con al menos un nodo de un nivel  $i-1$  y existe solo un nodo de nivel 0 [GKS2003].

SLTP tiene dos fases, la de configuración y la de sincronización. En la fase de configuración se establecen las cabeceras de clusters (CH). Dicha configuración puede ser estática o dinámica, y en la fase siguiente se sincronizan los nodos.

En la fase de configuración estática de SLTP, para establecer los CH se trabaja con una bandera que se transmite en el mensaje que toma dos valores posibles 0 o 1, marcando de esta forma si el nodo que envía es CH o no. Cada nodo que recibe un mensaje con el valor de la bandera en 1, es decir recibe el paquete de un miembro de cluster (MC), se convierte en CH y retransmite con bandera igual a 0. Cada nodo reconoce cual es su CH y si posee más de uno se transforma en "gateway". En configuración dinámica, es decir cuando la configuración de los clusters cambia a través del tiempo y son distintos los "gateways", solo los CH se establecen en la primer fase, los MC y los "gateways" se determinan en la fase de sincronización. En la segunda fase los CH son los encargados de enviar el mensaje de sincronización que contiene el valor de tiempo de sus relojes locales. Cada MC calcula su frecuencia de oscilación y su desfase en base al valor recibido de su CH [SAL\*2007].

Los mecanismos de sincronismo descritos en esta sección proveen sincronización en el orden de los microsegundos para los protocolos de encaminamiento sobre los que se utilizan. En contraste con ellos, el protocolo CLUDITEM está orientado a las aplicaciones de supervisión ambiental con medición periódica de variables, por lo que los requerimientos de sincronismo son menores. Para estas aplicaciones se necesita un ajuste de relojes del orden de los milisegundos o segundos y por lo tanto, los mecanismos imple-

mentados y analizados en el presente trabajo están alineados con esta particularidad.

#### 4. Sincronización en CLUDITEM

CLUDITEM es un algoritmo de encaminamiento que utiliza clusters para la recolección periódica de información que envían distintos nodos. Dichos nodos están agrupados geográficamente en celdas y envían sus datos a las cabeceras de clusters. Los CH agrupan la totalidad de los mensajes recibidos de los nodos comunes (NC) y lo transmiten a la estación base o nodo SINK. La condición de CH se rota en los clusters para lograr un consumo de energía uniforme.

El proceso por el cual cada uno de los nodos envía su dato, se denomina tanda y el conjunto de tandas realizadas con la misma configuración de nodos cabeceras se denomina ronda. Una tanda puede entonces incluir el proceso de reconfiguración de CH antes de enviar los datos (TCR) o puede ser solo envío de datos (TSR).

Cada ronda tiene una tanda de reconfiguración, TCR, seguida por varias tandas sin reconfiguración, TSR. Se denominará con  $X$  a la cantidad de tandas que conforman una ronda. La energía consumida por un nodo durante una ronda (ECR) dependerá de la función que haya desempeñado, cabecera de cluster o nodo común.

Si fue cabecera será:

$$ECR_{CH} = E_{CHTCR} + (X-1) * E_{CHTSR}$$

Si fue nodo común será:

$$ECR_{NC} = E_{NCTCR} + (X-1) * E_{NCTSR}$$

$E_{CHTCR}$ : Energía consumida por Nodo Cabecera en una Tanda Con Reconfiguración

$E_{CHTSR}$ : Energía consumida por Nodo Cabecera en una Tanda Sin Reconfiguración

$E_{NCTCR}$ : Energía consumida por Nodo Común en una Tanda Con Reconfiguración

$E_{NCTSR}$ : Energía consumida por Nodo Común en una Tanda Sin Reconfiguración

Cada reconfiguración implica un mayor consumo de energía, por lo que se deben reducir las mismas al máximo. Por otro lado se debe mantener la uniformidad en el consumo de energía para todos los nodos, por lo cual resulta que lo ideal es que el número de reconfiguraciones sea igual a la cantidad de nodos en la grilla. Cada ronda implica una única reconfiguración lo que equivale a decir que el número de rondas ( $Q$ ) debe ser igual a la cantidad de nodos por celda. El promedio de veces que un nodo es cabecera en las  $Q$  rondas se representa con  $Z$ .

El promedio de energía total consumida (ETC) por nodo en las  $Q$  rondas será:

$$ETC = Z * ECR_{CH} + (Q - Z) * ECR_{NC}$$

Como se pretende que la red permanezca activa solamente  $Q$  rondas, la situación ideal es que los nodos consuman toda la energía disponible en el transcurso de las mismas. Por lo tanto ETC deberá ser igual a la energía que puedan suministrar los elementos que se utilicen para alimentar a los nodos. Fijado el valor de ETC es posible despejar  $X$  en función de  $Q$ ,  $Z$  y la energía consumida por cada tipo de nodo en cada tipo de tanda. Los valores de energía y  $Z$  se obtienen por simulación.

Las distintas tareas que se realizan para enviar los datos desde los nodos al SINK requieren de sincronismo [CDG\*2010], para ello se incorpora a CLUDITEM un esquema de sincronización emisor receptor. Como se dijo anteriormente el reloj del nodo varía su valor pues existe en él una deriva respecto del tiempo, esto puede ser debido a que varía la frecuencia de oscilación de cristales o varía la temperatura, se evaluará entonces la incidencia de ella en la sincronización. Para ello se analizará primero el caso teórico en el cual se desprecia la deriva para luego poder valorizar las diferencias producidas con derivas no nulas.

Se supone también que, por algún procedimiento no descrito en el presente trabajo, los relojes de todos los nodos arrancan con un desfase, entre ellos, no mayor a 60 milisegundos.

### 5. Simulación Considerando Relojes Sin Deriva

La desviación máxima de 60 milisegundos entre los distintos relojes considerada al inicio del proceso se mantendrá constante a lo largo del tiempo, ya que se desprecia la deriva de los relojes.

La simulación se generó, entonces, haciendo que cada nodo desarrolle las tandas una detrás de otra, respetando la secuencia de una tanda con reconfiguración por cada  $X-1$  tandas sin reconfiguración. Cada simulación consistió en 16 rondas de 16 tandas cada una. La red se conformo con 9 celdas de 16 nodos cada una. Por lo tanto en cada simulación se analizo la situación de los 144 nodos.

Energía calculada	Tipo Nodo	Tipo de tanda	Promedio Tanda	Máximo en una Tanda
$E_{CATCR}$	CH	SR	0.066973129	0.066992
$E_{CATSR}$	CH	CR	0.072251492	0.072294
$E_{NCTCR}$	NC	SR	0.024654263	0.024664
$E_{NCTSR}$	NC	CR	0.02993477	0.029979

**Tabla 1:** Valores de las distintas energías consumidas obtenidos con la simulación realizada con  $X=17$ .

Como el nodo SINK no tiene restricciones de consumo de energía nunca entra en estado de bajo consumo y por lo tanto está en condiciones de emitir los mensajes que permiten el armado del árbol de CH (ACH), en los momentos correspondientes ya que conoce la duración de cada una de

las actividades de las distintas tandas y la cantidad  $X$  de tandas por ronda.

	Con Consumo Promedio	Con Consumo Máximo
$X$	22.437	22.429
Vida Útil	3.739 días	3.738 días

**Tabla 2:** Tandas por Rondas y Vida útil con ETC correspondiente a una pila tipo AA.

Se consideró un valor de ETC muy bajo, para limitar el tiempo de simulación a valores razonables.

Se obtuvieron los valores que muestra la Tabla 1, considerando rondas con reconfiguración (CR) y sin reconfiguración (SR).

Usando estos valores de energía y tomando como ETC el valor correspondiente al de una pila tipo AA se obtiene el resultado mostrado en Tabla 2.

### 6. Simulación Considerando Relojes Con Deriva

Para considerar el efecto de la deriva en los relojes de los nodos se supuso que cada uno de ellos tiene una deriva que puede variar entre los valores  $-40$  y  $+40$  partes por millón. Una vez establecida la deriva correspondiente a un reloj la misma permanece constante durante toda la simulación. La presencia de deriva hace que el desfase entre los relojes varíe permanentemente. Es necesario, entonces, sincronizar periódicamente los relojes, para lo cual se implementó el siguiente procedimiento.

Al finalizar cada tanda, cuando los nodos se encuentran todos en estado activo, en lugar de iniciar automáticamente una nueva tanda, se quedan a la espera de una señal de sincronismo de parte del SINK. De esta forma al inicio de cada tanda todos los relojes se encuentran sincronizados. birlo.

Energía calculada	Tipo Nodo	Tipo de tanda	Promedio por Tanda	Máximo en una Tanda
$E_{CHTCR}$	CH	SR	0.06909231	0.069188
$E_{CHTSR}$	CH	CR	0.07439155	0.074559
$E_{NCTCR}$	NC	SR	0.02677037	0.02686
$E_{NCTSR}$	NC	CR	0.03207136	0.032243

**Tabla 3:** Valores de las distintas energías consumidas obtenidos con la simulación realizada con  $X=16$ .

El tiempo que transcurre entre que los nodos se activan, al final de cada tanda y el momento en el que reciben la señal de sincronismo del SINK, incrementa el tiempo total que los nodos permanecen activos por tanda y por lo tanto la energía consumida. Con el objetivo de minimizar este efecto, el SINK deberá enviar el mensaje de sincronismo lo

antes posible a partir del momento que se tenga la seguridad que todos los nodos están activos y en condiciones de reci

En una primera instancia se adoptó que el mensaje de sincronismo llega a todos los nodos de la red, es decir están todos a un salto del SINK. Con este esquema todos los nodos lo reciben casi simultáneamente. El único desfase es el debido a las distintas distancias a recorrer para llegar a cada uno de los nodos. Este desfase es totalmente despreciable. Finalizada la simulación se obtuvieron los valores mostrados en Tabla 3.

Usando estos valores de energía y tomando como ETC el valor correspondiente al de una pila tipo AA se obtiene el resultado mostrado en Tabla 4. Pese a que la estación base dispone de energía sin limitaciones, dotarla de la potencia necesaria para que el mensaje de sincronismo llegue a todos los nodos puede no ser factible si la red tiene una extensión geográfica amplia.

Para evitar este inconveniente se implementó lo siguiente:

El SINK emite el mensaje de sincronismo con la misma potencia con que los CH emiten sus mensajes agregados. Cada nodo, independientemente de si es cabecera o no, cuando recibe el mensaje de sincronismo lo retransmite una única vez e inicia su nueva tanda. Si recibe un nuevo mensaje de sincronismo lo descarta.

	Con Consumo Promedio	Con Consumo Máximo
X	20.853	20.790
Vida Útil	3.475 días	3.465 días

**Tabla 4:** Tandas por Rondas y Vida útil con ETC correspondiente a una pila tipo AA.

El procedimiento descrito presenta dos inconvenientes:

- Los nodos reciben el mensaje de sincronismo en momentos diferentes. Desde que un nodo recibe el mensaje de sincronismo hasta que lo retransmite transcurre cierto tiempo. Además existirán nodos que reciben dicho mensaje luego que haya sido retransmitido por varios nodos, por lo que se sincronizarán desfasados de aquellos que lo recibieron antes. El 15% de los nodos se sincroniza 2.53 milisegundos después que el SINK emitió su mensaje de sincronismo y todos los nodos se sincronizan antes de los 4.51 milisegundos.
- Debido a las colisiones que se presentan no todos los nodos reciben su mensaje de sincronismo y por lo tanto se quedan sin participar en la tanda respectiva. Esto es grave si ocurre cuando el nodo en cuestión está cumpliendo la función de CH.

Realizando la simulación correspondiente se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 5.

El punto a) obliga a tener en cuenta los tiempos indicados y por lo tanto se incrementa el tiempo total que cada nodo debe permanecer en estado activo. Esto repercute en un mayor consumo de energía.

Energía calculada	Tipo Nodo	Tipo de tanda	Promedio por Tanda	Máximo en una Tanda
$E_{CATCR}$	CH	SR	0.072558257	0.074123
$E_{CATSR}$	CH	CR	0.079959267	0.0813009
$E_{NCTCR}$	NC	SR	0.030241868	0.032005
$E_{NCTSR}$	NC	CR	0.03765413	0.039153

**Tabla 5:** Valores de las distintas energías consumidas obtenidos con la simulación realizada con  $X=14$ .

Por otro lado para tener en cuenta el punto b) se realizó la siguiente modificación.

El nodo SINK emite dos mensajes de sincronismo desfasados entre si un pequeño tiempo. Los nodos retransmiten y se sincronizan solo cuando reciben el primer mensaje del SINK. Si se sincronizan con el segundo mensaje respetan el tiempo de inicio de la nueva tanda, esta solución no aumenta el tiempo total que los nodos permanecen en estado activo y por lo tanto no representa ningún incremento de la energía consumida. Usando estos valores de energía y tomando como ETC el valor correspondiente al de una pila tipo AA se obtiene el resultado mostrado en Tabla 6.

	Con Consumo Promedio	Con Consumo Máximo
X	18688	17760
Vida Útil	3.114 días	2.960 días

**Tabla 6:** Tandas por Rondas y Vida útil con ETC correspondiente a una pila tipo AA.

En la Tabla 7 se consignan vida útil de la red y reducción de la misma al implementar los mecanismos de sincronismo analizados en este trabajo.

Situaciones estudiadas	Vida útil de la red en días	% de reducción respecto del caso sin deriva
Sin deriva	3.738	---
El mensaje de sincronismo llega a todos	3.470	7,16
El mensaje de sincronismo es multisalto	3.037	18,75

**Tabla 7:** Costo de la sincronización respecto de tiempo de vida útil.

## 7. Conclusiones

CLUDITEM, un algoritmo de encaminamiento que trabaja con nodos fijos y transmisión periódica de datos, debe necesariamente sincronizar los relojes de sus nodos con el objetivo de que durante la fase de envío de datos todos los nodos estén activos y puedan enviar sus propios datos y los

que les llegan de sus vecinos, al cabecera de cluster correspondiente.

El primer caso presentado, en el cual se desprecia la deriva de los relojes, es una situación ideal. En este artículo se determinó el incremento de consumo al incluir sincronización en los relojes para situarse en condiciones reales de trabajo. En base a los dos mecanismos diseñados fue posible determinar el costo involucrado al implementar los mismos.

## Referencias

- [A2010] AGEV A.: Time Synchronization and Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks. PhD Dissertation. International Doctorate School in Information and Communication Technologies. Università degli Studi di Trento, March 2010
- [CDG\*2010] CORTI R., D'AGOSTINO E., GIANDOMENICO E., MARTÍNEZ R., BELMONTE J.: Clustering Dinámico para Tiempo de Encendido Mínimo en Redes Inalámbricas de Sensores (CLUDITEM). Análisis de las fases de envío de datos, Anales de la 36<sup>o</sup> Conferencia Latinoamericana de Informática, CLEI (2010), Asunción, Paraguay.
- [EGE2002] ELSON J., GIROD L., ESTRIN D.: Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts. Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Boston, Massachusetts, USA, December 9–11, 2002.
- [GKS2003] GANERIWAL S., KUMAR R., SRIVASTAVA M.: Timing-sync Protocol for Sensor Networks. SenSys '03, November 5-7, 2003, Los Angeles, California, USA. Copyright 2003 ACM.
- [IST2010] IKRAM W., STOIANOV I., THORNHILL.: Towards a Radio-Controlled Time Synchronized Wireless Sensor Network: A Work in-Progress Paper. IEEE EFTA Conference, Bilbao, Spain, September 2010
- [PK2010] PRAKASH R., KENDALL N.: Time Synchronization in Wireless Sensor Networks: a Survey. International Journal of UbiComp (IJU), Vol. 1, No. 2, April 2010.
- [RLK\*2009] RHEE I., LEE J., KIM J., SERPEDIN E., WU Y.: Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks: An Overview. Sensors 2009, 9, 56-85; doi:10.3390/s90100056. ISSN 1424-8220
- [SAL\*2007] SEPIDEH N. G., ARASH N. E., LALEH R., SEYED A. Y., MEHDI D.: SLTP: Scalable Lightweight Time Synchronization for Wireless Sensor Network. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [YMG2008] YICK J., MUKHERJEE B., GHOSAL D.: Wireless sensor network survey. Computer Networks, Elsevier, Vol. 52, (2008), pp. 2292-2330.