



Estrategias para prolongar la vida útil de una red de sensores basada en un algoritmo de encaminamiento jerárquico.

Belmonte, Javier**
Corti, Rosa
Giandoménico, Enrique
Martínez, Roberto

Recibido: Octubre 2013 – Aceptado: Febrero 2014

**Profesor Dpto. de Sistemas e Informática, Facultad de Ingeniería, UNR, Rosario, Argentina

✉: belmonte@fceia.unr.edu.ar

Introducción

Las redes inalámbricas de sensores inteligentes (RISI) se utilizan para medir variables del medio, con el objetivo de realizar la supervisión y control de entornos y actividades de la más diversa índole. Las RISI se integran en aplicaciones industriales, médicas, agrícolas, de preservación del medio natural o creación de ambientes inteligentes, entre otras. En muchas de las aplicaciones mencionadas, la adquisición de las variables de interés debe realizarse en ambientes distantes u hostiles que hacen muy difícil el cableado y la atención periódica de los dispositivos de medición ^[1].

Los nodos que constituyen una RISI son capaces de procesar los datos colectados y colaborar con sus vecinos para transmitirlos hacia la/las estación/es base (sink). Estas redes se auto-organizan para adaptarse a topologías cambiantes, y deben trabajar bajo fuertes restricciones de energía, tratando de maximizar su tiempo de vida útil ^{[2] [3]}.

El consumo de energía en una red de sensores debe ser analizado compatibilizando distintos enfoques, ya que cada nodo incluye diversos módulos de software (SW), que implementan las capas del protocolo de comunicaciones, soportados por una plataforma hardware (HW). Una red está constituida por un conjunto de nodos, y no es suficiente minimizar la energía de cada uno de ellos en forma independiente, sino que es importante balancear la carga de trabajo de la red, pues de otro modo se malogrará su conectividad. Este trabajo aborda la reducción del consumo de energía que se puede lograr en una RISI desde el encaminamiento, analizando el comportamiento de CLUDITEM ^{[4] [5]}, un algoritmo jerárquico basado en clusters para adquisición periódica de datos.

Una red de sensores consume energía al realizar tres actividades: medición de los parámetros del ambiente, procesamiento de información, y comunicación entre los dispositivos para hacer llegar los datos hasta la estación base. El consumo asociado con las tareas de comunicación entre los nodos se consideró la principal causa de agotamiento de la energía disponible en cada dispositivo, como se asume en la mayoría de las publicaciones del área ^[6]. Por este motivo, para el análisis del tiempo de vida del sistema y el cálculo de los parámetros del algoritmo no se tuvieron en cuenta los consumos asociados con mediciones y procesamiento de los datos colectados. Los transceptores de los nodos, que son la única fuente de consumo considerada, pueden asumir uno de los siguientes estados: transmisión, recepción, en escucha y apagado. En transmisión, el nodo ha ganado acceso al medio y envía información a la red. En recepción, detecta la llegada de un mensaje

enviado por un vecino, en estado de escucha permanece analizando el medio y cuando se apaga, no realiza actividad alguna consumiendo el mínimo de energía posible [7]. Por lo tanto, para el análisis realizado se tuvieron en cuenta los consumos asociados con los estados de los transceptores y el tiempo que permanecen en cada uno de ellos, de acuerdo con el rol asumido por el nodo y la etapa de funcionamiento del algoritmo en la que se encuentre.

CLUDITEM contribuye a prolongar la vida útil de la red apoyándose en dos aspectos principales:

- Apagar los transceptores de los nodos todo el tiempo posible, ya que el tiempo de vida útil está directamente relacionado con el período de actividad de los dispositivos.
- Balancear la carga de trabajo en la red, logrando estructuras de clusters similares con rotación y distribución uniforme de cabeceras de cluster (CH) en el área estudiada.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera, en la sección dos se reportan los trabajos relacionados con el aquí presentado, la sección tres trata sobre las generalidades del algoritmo de encaminamiento y en la sección cuatro se definen las métricas utilizadas para evaluar su desempeño. La sección cinco presenta los resultados de simulación y finalmente en la sección seis se obtienen conclusiones y se plantean líneas de trabajo futuro

Trabajos relacionados

Los algoritmos de encaminamiento jerárquicos basados en clusters, proporcionan importantes ventajas para las RISI, respecto a su escalabilidad y eficiencia en la comunicación entre los nodos ^[8]. Por estos motivos, se han desarrollado numerosos algoritmos con estas características, como los mencionados en ^[9], ^[2] y ^[10]. CLUDITEM divide el área bajo estudio en una cuadrícula virtual cuyo uso ya fue propuesto por Al-Karaki en ^[11]. Este último autor desarrolló un algoritmo en el cual los clusters coinciden con las divisiones de la cuadrícula, y el rol de cabecera se rota entre los nodos miembros de la misma teniendo en cuenta su energía remanente. En CLUDITEM, en cambio, cuando se rotan las CH se vuelven a definir los clusters, pudiendo incorporarse nodos de otras divisiones de la grilla ^[12].

Las capas inferiores del protocolo se basan en el estándar de la IEEE 802.15.4, ampliamente utilizado en redes de sensores ^[1] ^[6]. En el trabajo de Deliang ^[13] se clasifican los protocolos de acceso al medio (MAC) en cuatro categorías. La primera corresponde a los protocolos basados en la contención que compiten por el uso del canal, orientados a la solución de conflictos, pero costosos desde el punto de vista del consumo ^[14]. La segunda agrupa a los protocolos que utilizan un esquema de tipo TDMA, asignando slots de tiempo a cada nodo que debe enviar datos, naturalmente libres de colisiones. En tercer lugar se encuentran los protocolos híbridos, como el IEEE 802.15.4, en los cuales se combinan las ventajas de las dos categorías anteriores. Por último se consideran los protocolos de capas relacionadas que son un área de investigación muy promisorio ^[15]. CLUDITEM incorpora para la capa MAC el estándar IEEE 802.15.4 en modo beaconless, recomendado para redes multi-salto como se reporta en ^[16]. La estructura de encaminamiento de la red es responsabilidad de CLUDITEM, y en este sentido se consideró la importancia que tienen las interferencias intra e intercluster, en lo que a pérdida de información se refiere, para los algoritmos jerárquicos basados en clusters ^[17]. Por estos motivos, CLUDITEM incluye un esquema TDMA para prevenir la pérdida de mensajes por colisiones en la fase de definición de clusters y también en las fases correspondientes al envío de mediciones hacia la estación base (sink) ^[4].

Existen pocos trabajos sobre algoritmos basados en clusters que combinan información de encaminamiento con algún mecanismo de acceso al medio para mejorar el desempeño del sistema. El algoritmo presentado en ^[14] incluye clusters con topología estrella, y la asignación de los slots está a cargo del sink y las cabeceras de clusters, que deben conocer la topología completa de la red. Por su parte ^[17] es un algoritmo centralizado que requiere muchos mensajes de control para organizar las transmisiones, incrementando el tráfico en la red.

CLUDITEM combina CSMA/CA sin slots en la capa MAC con un esquema TDMA definido a nivel del encaminamiento. Es un algoritmo distribuido sencillo que sólo utiliza información local a cada nodo para organizar la transmisión de datos, minimizando el número de mensajes de control, de forma de disminuir el tráfico de la red y el consumo de energía. Sin embargo, la definición de slots de transmisión de mediciones incrementa el tiempo en que los dispositivos deben permanecer en actividad, y por lo tanto también aumenta el consumo de energía. En este sentido, se trabajó para lograr un esquema TDMA que apunte a un balance entre la pérdida de información admisible y el tiempo que los nodos deben mantener sus transceptores activos, como se reporta en ^[4].

Generalidades del algoritmo

CLUDITEM es un algoritmo de encaminamiento jerárquico basado en clusters que realiza adquisición de datos en forma periódica, enviando información útil a la estación base en cada período de medición (T). Los nodos de la red son idénticos, respecto a recursos y energía inicial, se distribuyen manualmente una única vez, son fijos y están identificados por un ID. La estación base es única y se encuentra fuera del área a supervisar que se divide en una cuadrícula virtual con el objetivo de lograr una distribución uniforme de las cabeceras de clusters.

Este algoritmo se desarrolló teniendo como objetivo aplicaciones de supervisión ambiental en las cuales la medición periódica de variables del entorno es muy utilizada. Una red de sensores que trabaja con este algoritmo queda constituida por nodos que cumplen roles distintos, nodos cabeceras de cluster y nodos comunes (NC), que se comunican por radiofrecuencia. Los nodos que asumen la tarea de CH, están más exigidos en cuanto al consumo de energía, por lo que se agregó al algoritmo de encaminamiento básico, una técnica de rotación periódica del rol de CH para balancear la carga de trabajo en la red.

El funcionamiento de CLUDITEM se divide en tres fases bien diferenciadas. La primera se ocupa del establecimiento del árbol de encaminamiento, que se describe detalladamente en ^[5] y ^[18]. La segunda fase se encarga del envío de datos al sink analizada extensamente en ^[4], y durante la tercera los dispositivos permanecen en estado de bajo consumo. Estas fases se repiten periódicamente maximizando la duración de la tercera, con el objetivo de prolongar el tiempo de vida útil del sistema.

La definición de la estructura de encaminamiento se repite cada X rondas de medición. Si las cabeceras mantienen su rol demasiado tiempo, se agotan y se producen desconexiones en la red. Si X es demasiado pequeño, se consume mucha energía en el rearmado del árbol de encaminamiento. Por lo tanto existe un valor de X que equilibra el gasto de energía en la red que se obtuvo analíticamente en ^[5].

3.1. Fase de establecimiento del árbol de encaminamiento

El encaminamiento se define en dos niveles. El primer nivel establece la estructura de cada cluster. Cada cluster se define seleccionando en primer lugar su CH. Las cabeceras se postulan respetando un esquema de tipo TDMA mediante un mensaje de estructura de cluster (EC). Los nodos comunes adhieren a una cabecera y eligen su nodo de enlace (NDE). Dentro del cluster la comunicación es multisalto, y los nodos comunes poseen un nivel, definido por la cantidad de saltos que los separan de su CH. Para definir la estructura del cluster, cada NC que escucha la postulación del CH reenvía el mensaje EC con la información necesaria para que otros nodos puedan adoptarlos como NDE.

Tipo de Mensaje	CH elegido	Emisor	Nivel del Emisor
-----------------	------------	--------	------------------

Fig. 1. Formato del mensaje de EC

El formato del mensaje EC es el que se muestra en ^{Fig. 1}. Se definieron estrategias para lograr clusters balanceados en profundidad y cantidad de miembros. La situación ideal corresponde a una única cabecera por división de la grilla virtual, pero se admite más de una postulación en base a las conclusiones obtenidas a partir de un análisis detallado de la definición de los clusters que se presentó en ^[18].

El segundo nivel del encaminamiento se ocupa de la definición del árbol de CH, que se encarga de enviar los datos agregados hasta la estación base. La fase se inicia con un mensaje que envía el sink. Las CH que lo escuchan asumen el nivel 1 en el árbol y reenvían el mensaje, colocando su ID y su nivel, de forma que otras cabeceras los adopten como NDE para envío de los mensajes agregados. Este nivel se considera crítico, ya que un fallo en el mismo puede producir subredes desconectadas que afectan seriamente el funcionamiento de la red ^[5].

3.2. Fase de envío de datos

El envío de datos hacia la estación base se realiza en dos etapas: en la primera los nodos comunes envían sus datos hacia su cabecera de cluster, y en la segunda los CH utilizan el árbol de cabeceras para hacer llegar hasta el sink el mensaje agregado, que resume la información recolectada por el cluster que coordinan. Esta fase se desarrolla a continuación de la definición del árbol de encaminamiento si se trata de una ronda de reconfiguración, o al inicio del período T de recolección de información en una ronda de transmisión exclusiva de mediciones.

En cada período de recolección de datos T, los nodos comunes envían las mediciones realizadas a su CH utilizando un mensaje de datos cuya estructura se muestra en ^{Fig. 2}. El envío de los valores medidos por cada NC se realiza en base a un esquema de tipo TDMA. Se adopta este criterio para reducir las eventuales colisiones que podrían producirse si varios nodos enviaran su información al mismo tiempo.

La comunicación intracluster es multisalto, por este motivo cada nodo común que recibe un mensaje enviado por un vecino, verifica si su ID coincide con el campo nodo de enlace del mensaje de datos, coloca en dicho campo su propio NDE y reenvía el mensaje en forma inmediata. El origen de los datos es importante para que el sink conozca cuantos nodos reportan a cada CH y éste lo utilice para definir el mensaje agregado.

Tipo de Mensaje	Origen de los datos	Nodo de Enlace	Datos
-----------------	---------------------	----------------	-------

Fig. 2. Formato del mensaje de datos

En la fase de envío de datos agregados cada CH procesa los mensajes enviados por los miembros de su cluster, concatenando las mediciones recibidas. Existen otras funciones de agregación, algunas más simples y económicas como ser, el promedio, el máximo o el mínimo valor de los datos. La concatenación, elegida a partir de los requerimientos de las aplicaciones, es una función más costosa, pero permite

obtener beneficios significativos respecto del consumo de energía, como han demostrado He et al. en ^[19].

Tipo de Mensaje	Origen de los datos	Nodo de Enlace	Datos Agregados
-----------------	---------------------	----------------	-----------------

Fig. 3. Formato del mensaje de datos agregados

La información agregada de cada CH se envía a su NDE en el árbol de cabeceras, utilizando la estructura de mensaje mostrada en Fig. 3, con el fin de hacerla llegar a la estación base. Los nodos comunes no participan de las actividades y duermen hasta el siguiente período T. Las cabeceras que escuchan el mensaje que circula comparan su ID con el valor del campo nodo de enlace. Si coincide lo reenvían a su propio NDE, en caso contrario lo descartan. Si algún CH está desconectado del árbol de cabeceras, envía su mensaje agregado con un código de ayuda en el campo nodo de enlace. Todas las cabeceras que escuchan un mensaje agregado que contiene el código de ayuda, lo reenvían a sus NDE. De esta forma los agregados de los CH sin enlace llegan a la estación base, que es la responsable de filtrar eventuales repeticiones.

Los nodos que participan en esta etapa son aquellos que se han postulado para CH, que según se espera serán aproximadamente uno por cuadro de la grilla. La potencia de transmisión es mayor a la correspondiente a la fase de envío de datos intracluster, por lo tanto, pese a la disminución de nodos participantes, pueden producirse colisiones que degradan la cantidad de mensajes que llegan al sink. Por este motivo, se implementó un esquema TDMA para el envío de los mensajes agregados.

3.3. Fase de bajo consumo de los dispositivos

Una vez finalizada la etapa de envío de datos agregados todos los CH entran en estado de bajo consumo, de la misma forma que hicieron los NC al finalizar la etapa de envío de datos, esperando el cumplimiento del período de adquisición de datos T. Cuando esto ocurre, si se han cumplido las X rondas necesarias para realizar la rotación de cabeceras, se aborda una nueva definición del árbol de encaminamiento, en caso contrario se inicia una nueva fase de envío de datos.

Métricas referidas al consumo de energía

Los valores de consumo del transceptor CC2420 que se utilizó para definir los parámetros del modelo de energía en simulación, se resumen en la tabla 1 y ponen en evidencia que el consumo más relevante corresponde al estado de escucha. Esto se debe a que la potencia consumida por el transceptor en ese estado es similar, e incluso superior, a las correspondientes a recepción y transmisión, y el estado de escucha es el que asumen los nodos la mayor parte del tiempo que están activos. En este sentido, el tiempo que los dispositivos permanecen despiertos, es fundamental en la definición de la energía que consumen.

Las rondas con reconfiguración son más prolongadas que las de envío exclusivo de datos, y además las cabeceras permanecen activas más tiempo que los NC en todas las rondas, por lo cual se consideraron las siguientes métricas para analizar el consumo de la red:

- Consumo de los nodos por rol y tipo de ronda
- Energía remanente de los dispositivos al finalizar el tiempo de vida de la red
- Salida de servicio de la red por incumplimiento de la calidad de servicio (QoS) al variar X

Definición	Parámetro	Valor
Ganancia antena de transmisión	G_t	0 dB
Ganancia antena de recepción	G_r	0 dB
Altura antena de transmisión	h_t	0,33 m
Altura antena de recepción	h_r	0,33 m
Pérdida del sistema	L	0 dB
Longitud de onda	λ	$1,25 \cdot 10^{-1}$ m
Frecuencia	freq	$2,40 \cdot 10^9$ Hz
Potencia de transmisión intracluster	tx_power_EC	0,00000316 W
Potencia de transmisión intercluster	tx_power_ACH	0,001 W
Umbral de recepción (sensibilidad)	RXThresh	$3,16 \cdot 10^{-13}$ W
Consumo intracluster en transmisión	tx_consume_EC	0,01516 W
Consumo intercluster en transmisión	tx_consume_ACH	0,03067 W
Consumo en recepción	Pr_consume	0,03528 W
Consumo en escucha	P_idle	0,03528 W
Consumo en apagado	P_sleep	0,000000144 W

Tabla 1.

Valores de los parámetros del modelo de radio y consumo en los estados del transceptor

El requerimiento de calidad de servicio para las aplicaciones elegidas se define en base a un porcentaje admitido de pérdida de mensajes. La vida útil de la red finaliza cuando se cumplen 5 rondas de medición que no alcanzan la QoS establecida.

Los nodos que asumen el rol de CH son los más exigidos respecto del gasto de energía, pero su situación debería equilibrarse respecto a los NC a partir del mecanismo de rotación de roles. Por lo tanto, se decidió analizar la energía

remanente en el conjunto de la red al finalizar una rotación completa de CH, con el fin de evaluar si la técnica incorporada al algoritmo resulta efectiva para balancear la situación de los dispositivos.

Otro aspecto considerado fue el cálculo del valor óptimo del momento de reconfiguración de la red (X), considerando que cada nodo consume el total de su energía al cumplirse una rotación completa de roles. Por lo tanto, se simuló el funcionamiento del algoritmo con los parámetros establecidos para el cálculo teórico, variando únicamente el valor de X y se analizaron los resultados obtenidos.

Resultados de simulación

El comportamiento del algoritmo se analizó utilizando NS2 v2.31, un simulador de eventos discretos orientado al análisis de protocolos para redes de comunicación. CLUDITEM se incorporó al ambiente de NS2 como un agente en el nivel de encaminamiento y se lo integró con las capas inferiores del protocolo.

El escenario de simulación se definió como un área cuadrada de 135 metros de lado dividida en 9 celdas iguales con 16 nodos cada una, separados 12 metros uno del otro, con la estación base ubicada fuera del área a supervisar ^[4].

La ^{tabla 2} muestra los valores adoptados para la simulación. Los slots de transmisión intra e intercluster se ajustaron en base a los archivos de trazado de resultados previos y se utilizaron para definir la duración de las fases de envío de mediciones, tomando en cada caso un factor de seguridad. El período hasta la siguiente ronda de recolección de datos se adoptó igual a 25 segundos, en base a los requerimientos de las aplicaciones de interés.

Definición	Parámetro	Valor [seg]
Duración de la fase de definición de clusters	T_ARMADO_CLUSTER	1,0
Duración de la fase de definición del árbol de CH	T_ARMADO_RUTA_SINK	0,1
Período de transmisión de un dato hasta el CH	T_SLOT_DATOS	0,02
Duración de la fase de transmisión intracluster	T_ENVIO_DATOS	0,8
Período de transmisión de un agregado hasta el <i>sink</i>	T_SLOT_AGR	0,1
Duración de la fase de transmisión de los CH	T_ENVIOS_MSG_AGR	3.0
Período hasta siguiente ronda de medición	T_RONDA	25,0

Tabla 2.

Valores para la temporización del funcionamiento del algoritmo en simulación.

Como resultado se obtuvieron valores promedio y máximos de consumo de los dispositivos, que se presentan en la tabla 3, donde puede apreciarse que los valores clasificados por rol y tipo de ronda tienen poca dispersión en cada categoría. También se muestra que el consumo de los CH, como se esperaba, es significativamente superior al de los NC, lo que resalta la importancia del mecanismo de rotación de roles para lograr balancear la carga de trabajo entre los dispositivos.

Rol del nodo y tipo de ronda	Consumo promedio [W]	Consumo máximo [W]
NC en ronda sin reconfiguración	0,028182	0,028192
NC en ronda con reconfiguración	0,069103	0,069479
CH en ronda sin reconfiguración	0,134007	0,134024
CH en ronda con reconfiguración	0,174927	0,175217

Tabla 3. Consumos de acuerdo al rol de los nodos y el tipo de ronda.

En la ^{tabla 4}, el valor de $X=17$ corresponde al momento óptimo de reconfiguración de la red obtenido teóricamente para una energía inicial de 12 Joules y los valores de los parámetros del transceptor elegido. Los resultados obtenidos ponen en evidencia que el cálculo teórico de X es efectivamente el más adecuado, ya que si se incrementa o se disminuye su valor, la red sale de servicio antes por incumplimiento de los requerimientos establecidos. Las mayores diferencias ocurridas al disminuir el valor de X se atribuyen al hecho de que los nodos tienen la oportunidad de postularse para cabeceras una mayor cantidad de veces. El rol de CH es más exigente respecto del consumo y por lo tanto es previsible que agoten antes sus reservas provocando desconexiones tempranas en la red. Cuando se incrementa X , los nodos que asumen el rol de CH lo hacen por un número más elevado de rondas, lo que también tiene un impacto negativo sobre sus reservas. Por lo tanto, el valor teórico consigue para la energía inicial adoptada y el esquema de tiempos definido, el mejor balance para la rotación de roles, brindando una vida útil más prolongada para el sistema.

Simulación	Ronda de fin de servicio X = 15	Ronda de fin de servicio X = 16	Ronda de fin de servicio X = 17	Ronda de fin de servicio X = 18	Ronda de fin de servicio X = 19
1	255	266	277	274	267
2	254	266	277	274	268
3	253	266	277	274	268
4	255	266	277	274	268
5	254	266	277	274	268
6	255	266	277	274	266
7	255	266	273	271	267
8	255	266	277	274	268
9	255	266	278	274	268
10	255	266	278	274	267

Tabla 4. Ronda de salida de servicio de la red para distintos valores de X .

Se continuó entonces el análisis con el valor óptimo de $X = 17$ y se enfocó la atención sobre la energía remanente en las 10 simulaciones asociadas, una vez que la red sale de servicio en la ronda indicada en la tabla 4. Los resultados obtenidos que se reportan en la ^{tabla 5}, muestran que el total de energía residual en el sistema es reducido y aproximadamente el mismo para todas las simulaciones.

Simulación	Energía remanente total [J]
1	201,018036
2	210,745063
3	201,435832
4	213,520508
5	213,163628
6	208,352504
7	202,242503
8	215,757158
9	212,008508
10	213,441527

Tabla 5. Energía residual en la red cuando sale de servicio por incumplimiento de QoS.

Esta situación es coherente con el objetivo de balancear la carga de trabajo en la red. Sin embargo, no brinda información respecto del estado particular de los nodos. Por este motivo, se analizó a continuación la energía residual de cada dispositivo, quedando en evidencia que en todas las simulaciones podían definirse claramente cuatro grupos de nodos con energía remanente muy similar entre sí, como muestra la tabla 6.

Simulación	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
	Nro de nodos	Energía prom. del grupo [J]	Nro de nodos	Energía prom. del grupo [J]	Nro de nodos	Energía prom. del grupo [J]	Nro de nodos	Energía prom. del grupo [J]
1	3	3,4968	108	1,6991	6	1,1704	27	0,0000
2	4	3,4961	111	1,6988	7	1,1701	22	0,0000
3	1	3,4962	111	1,6989	8	1,1701	24	0,0000
4	4	3,4962	114	1,6989	5	1,1711	21	0,0000
5	5	3,4692	111	1,6707	10	1,0364	18	0,0000
6	2	3,4966	113	1,6991	8	1,1700	21	0,0000
7	4	3,4958	106	1,6987	7	1,1704	27	0,0000
8	4	3,4968	116	1,6991	4	1,1682	20	0,0000
9	4	3,4689	113	1,6710	9	1,0349	18	0,0000
10	2	3,4686	118	1,6710	9	1,0357	15	0,0000

Tabla 6. Grupos de nodos clasificados por energía residual cuando sale de servicio la red

La situación de los nodos de cada grupo identificado en la tabla 6, puede resumirse de la siguiente manera:

Grupo 1: Compuesto por un conjunto reducido de nodos que nunca asumieron el rol de CH durante el tiempo de vida de la red, y que por lo tanto son los que menos energía consumieron durante el funcionamiento. Esta situación era previsible, ya que se definieron condiciones para postulación a cabecera, que pueden no cumplirse en algunas rondas de reconfiguración.

Grupo 2: Constituido por la mayoría de los dispositivos, que cumplieron el rol de cabecera una única vez, durante una ronda completa de reconfiguración (17 rondas de envío de mediciones).

Grupo 3: Integrado por pocos nodos que asumieron el rol de CH en una ronda de reconfiguración completa la primera vez, pero que se postularon por segunda vez en la última reconfiguración de la vida útil de la red, por lo que, en esa oportunidad, cumplieron con las responsabilidades del rol sólo por 4 o 5 rondas de medición.

Grupo 4: Este conjunto de nodos, cumplió el rol de cabecera por dos rondas de reconfiguración completas. Por este motivo agotaron su energía, pese a lo cual, la red cumplió con el requerimiento de QoS, finalizando su vida útil en rondas posteriores a la correspondiente a una rotación completa del rol de CH.

La presencia de los conjuntos de nodos identificados a partir del análisis de la energía remanente, es coherente con las hipótesis de trabajo planteadas durante el desarrollo del algoritmo. La situación ideal de un único CH por celda, que cumple su rol durante una ronda de reconfiguración completa, es la situación de la mayoría de los dispositivos de la red. Sin embargo, se adoptó la postulación potencial de dos cabeceras por división de la cuadrícula, atendiendo a los resultados obtenidos en [5]. Esta situación, permite que existan nodos que asumen el rol más exigente, en cuanto a consumo de recursos, en más de una oportunidad, ocasionando que algunos grupos reducidos consuman más que el promedio, e incluso, agoten sus recursos por completo. Es importante destacar, que los dispositivos en la misma situación o grupo terminan su funcionamiento con una energía residual muy similar. Esto permite afirmar, que las técnicas aplicadas para balancear la carga de trabajo resultaron exitosas.

Conclusiones

En este trabajo se analiza la eficiencia de las estrategias implementadas en el algoritmo de encaminamiento CLUDITEM para prolongar la vida útil de la red. Para ello se reportan los resultados obtenidos al utilizar la característica de los dispositivos de apagar sus transceptores y colocarlos en modo sleep, en el cual el consumo de energía es mínimo. Además se analiza el consumo de energía en las distintas fases de funcionamiento para los roles de CH y NC, así como las verificaciones relacionadas a la definición del tiempo de vida de la red.

El análisis de los resultados de simulación permite afirmar que las estrategias plasmadas en CLUDITEM para disminuir el consumo de energía y balancear la carga de trabajo entre los miembros de la red resultaron exitosas, permitiendo prolongar el tiempo de vida útil del sistema.

La secuencia de tareas que encara CLUDITEM en sus distintas fases de trabajo requiere que los relojes de los dispositivos estén sincronizados. La versión actual del algoritmo no incluye un mecanismo de sincronización de relojes de los nodos y para la temporización de las tareas se asumió un desfase máximo de relojes que asegura que las actividades se realicen en el momento adecuado. Existen actualmente un conjunto de esquemas de sincronización para RISI con distintas características y costos de implementación asociados. Por lo tanto se plantea como trabajo futuro avanzar en el estudio de dichos esquemas para seleccionar el más adecuado de acuerdo con las características de CLUDITEM, con el fin de incorporarlo en el diseño.

Referencias

- (1) YICK J.; Mukherjee, B.; Ghosal, D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*. Elsevier, 2008, Vol. 52, pp. 2292-2330.
- (2) ABOELAZE, M.; Aloul F. Current and Future Trends in Sensor Networks: A Survey. In: *Proceedings of The IEEE Wireless and Optical Communications Network.*, WOCN, 2005. Second IFIP International Conference. ISBN: 0-7803-9019-9.
- (3) COOK, D.; Das, S. *Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications*. Wiley-Interscience, 2004. ISBN 0-471-54448-5.
- (4) 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 36ª Conferencia Latinoamericana de Informática CLEI. 2010*, Asunción, Paraguay.
- (5) D'AGOSTINO, E.; Corti, R.; Giandoménico, E.; Belmonte, J.; Martínez, R. Clustering dinámico para tiempo de encendido mínimo en redes inalámbricas de sensores (CLUDITEM): Definición del árbol de encaminamiento. En: *Anales XIV Congreso Argentino de Cs. de la Computación*. 2008., Chilecito, Argentina. ISBN 978-987-24611-0-2.
- (6) BURATTI, C.; Conti, A.; Dardari, V.; Verdone, R. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. *Sensors*. 2009, Vol. 9, pp 6869—6896.
- (7) BOUKERCHE, A.; Cheng, X.; Linus, J. A Performance of a Novel Energy-Aware Data-Centric Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks. *Wireless Networks*. Springer, 2005, Vol. 11, pp 619–635.
- (8) AL-KARAKI, J.; Kamal, A. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Wireless Communications*, 2004.
- (9) ABBASI, A.; Younis M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer Communications*. Elsevier, 2007, Vol.30, pp.2826—2941.
- (10) FASOLO E.; Rossi, M.; Widmer, J.; Zorzi, M. In-Network Aggregation Techniques for Wireless Sensor Networks: A Survey. *IEEE Wireless Communication*. 2005, Vol.14, pp 70—87.
- (11) AL-KARAKI, J.; Kamal, A. Data Aggregation in Wireless Sensor Networks: Exact and Approximate Algorithms. In: *Workshop on High Performance Switching and Routing*. IEEE, 2004, pp. 241–245.
- (12) CORTI, R.; D'Agostino E.; Giandomenico, E.; Martínez, R. Algoritmo de encaminamiento para redes de sensores inalámbricas utilizando técnicas de agregación. *XIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación XIII CACIC. 2007*. Corrientes y Resistencia, Argentina.
- (13) DELIANG, L.; Fei, P.; Energy-efficient MAC protocols for Wireless Sensor Networks. *Information and Communications Technologies*. Beihang University, 2009, pp 32—36.
- (14) ZHOU X.; Xu, J. IISA: An Inter-cluster and Intra-cluster Scheduling Algorithm Cluster-Based for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. IEEE Press, Dalian, China, 2008. pp 1–6.
- (15) DEMIRKOL, I.; Ersoy, C.; Alagoz, F. MAC protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Magazine*. 2006, Vol. 44, Nro. 4, pp 115—121.
- (16) SUN M.; Sun, K.; Zou, Y. Analysis and Improvement for 802.15.4 Multi-hop Network. *International Conference on Communications and Mobile Computing, 2009*. IEEE 2009.
- (17) HAIGANG, G.; Ming, L.; Xiaomin, W.; Lijun, C.; Li X. An Interference Free Cluster-Based TDMA Protocol for Wireless Sensor Networks. *Wireless Algorithms, Systems, and Applications Lecture Notes in Computer Science*. 2006, Vol. 4138/2006, pp 217—227.
- (18) CORTI, R.; D'Agostino, E.; Giandoménico, E.; Belmonte, J.; Martínez R. Clustering dinámico para tiempo de encendido mínimo en redes inalámbricas de sensores (CLUDITEM). En: *Anales de la 34ª Conferencia Latinoamericana de Informática CLEI. 2008*, Santa Fé, Argentina, pp 1219–1228. ISBN 978-959-9770-02-7.
- (19) HE T.; Blum, M.B.; Stankovic, J.; Abdelzaher T. AIDA: Adaptive Application-Independent Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*. 2004, Vol. 3, No. 2, pp 426–457.