



Reporte Técnico



Lineamientos de diseño en redes de sensores para supervisión ambiental. Evaluación de un algoritmo.

**Rosa Corti¹, Estela D'Agostino¹, Enrique Giandoménico¹,
Roberto Martínez¹ y Javier Belmonte¹**

¹ Departamento de Sistemas e Informática
Escuela de Ingeniería Electrónica
Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Av. Pellegrini 250,
2000 Rosario, Argentina
{rcorti, estelad, giandome, martinez, belmonte} @fceia.unr.edu.ar

Disciplina: Redes inalámbricas de sensores inteligentes.

26 Julio 2011.

Secretaría de Ciencia y Técnica
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Av. Pellegrini 250 - 2000 Rosario – Argentina
<http://www.fceia.unr.edu.ar/secyt>

Lineamientos de diseño en redes de sensores para supervisión ambiental. Evaluación de un algoritmo.

Resumen.

Las redes inalámbricas de sensores son una herramienta muy promisoría para supervisión ambiental. Las aplicaciones en este dominio se dividen en dos grandes grupos, las dirigidas por eventos y las de mediciones periódicas. En este trabajo, en base a los requerimientos de las aplicaciones, se establecen lineamientos para el desarrollo de un algoritmo de encaminamiento, orientado a la medición periódica de variables del ambiente. Además, se define un conjunto de métricas para evaluar la estructura de encaminamiento lograda, y se las aplica al algoritmo CLUDITEM, desarrollado en base a las pautas de diseño establecidas. Los resultados de la evaluación, obtenidos a partir de la simulación del funcionamiento del algoritmo, se utilizan para establecer los valores más adecuados para sus parámetros de diseño, obtener conclusiones y trazar líneas de trabajo futuras.

Palabras Clave: Redes de sensores inalámbricas – Supervisión ambiental - Encaminamiento - Clustering

1 Introducción.

La investigación sobre ecosistemas y medioambiente ha cobrado cada vez mayor importancia en los últimos tiempos por el impacto provocado por las actividades humanas. Los investigadores necesitan supervisar los parámetros presentes en distintos ecosistemas no sólo para comprender la evolución de los fenómenos que allí ocurren, sino también para estudiar la respuesta de las especies animales y vegetales a los cambios climáticos y ambientales, e incluso alertar sobre situaciones de riesgo [1]. Por otro lado, la necesidad creciente de producir mayor cantidad de alimentos, ha llevado a la industria agroalimentaria a incorporar tecnología con el objetivo de mejorar la producción. La agricultura moderna debe cumplir con altos estándares de calidad, pero además debe controlar el impacto ambiental minimizando los posibles daños sobre el entorno. En este sentido es muy importante la medición de variables ligadas a las áreas productivas, con el fin de mejorar los rendimientos y prevenir efectos ecológicamente indeseables en zonas aledañas [2].

Las redes inalámbricas de sensores inteligentes (RISI) son una herramienta muy promisoría para tareas de supervisión de ambientes, tanto exteriores como interiores. Permiten abarcar áreas extensas, simplifican la instalación de los dispositivos al eliminar el cableado, y pueden alimentarse con baterías funcionando en forma autónoma en locaciones alejadas o de difícil acceso [3] [4]. Además es importante destacar que, en muchos casos, la presencia humana puede distorsionar e incluso dañar el ambiente bajo estudio, como ocurre cuando se trabaja con poblaciones de animales silvestres. Estas redes obtienen datos en forma dinámica, durante períodos prolongados, lo que permite a los científicos acceder a información antes impensable para realizar sus estudios, hacer seguimiento de situaciones o construir modelos, contribuyendo a mejorar distintas actividades ligadas al desarrollo de la vida humana y a la preservación del ambiente natural [5][6].

Las particularidades de las RISI motivan el desarrollo de técnicas y herramientas que si bien pueden aplicarse a otras redes ad-hoc, suelen estar específicamente diseñadas para ellas [7]. En este sentido, el diseño e implementación de una red de sensores, implica el desarrollo, adaptación y/o utilización de componentes de Software, y también de la plataforma Hardware asociada. En particular, los algoritmos de encaminamiento para RISI, han recibido mucha atención en los últimos años como se reporta en [7] [8] [9]. Las técnicas elegidas por los autores y las características de funcionamiento de cada algoritmo están fuertemente influenciadas por los requerimientos de las aplicaciones, pese a lo cual es importante alcanzar la mayor generalidad posible, para que las técnicas seleccionadas resulten de utilidad en un conjunto de aplicaciones de similares características. Por estos motivos, como ya se ha demostrado extensamente, las decisiones de diseño que se adopten deben basarse en un análisis temprano de requerimientos, para prevenir fracasos o incrementos desmedidos en los tiempos y costos del desarrollo [10]. De hecho, en los

últimos años, varios autores han comenzado a trabajar sobre la aplicación de los principios de la Ingeniería del Software en el campo de las RISI, teniendo en cuenta las particularidades de estas redes [11] [12].

En este documento se describe el trabajo realizado a partir de los requerimientos correspondientes a las aplicaciones de supervisión ambiental, con el objetivo de proponer lineamientos de diseño para un algoritmo de encaminamiento en dicho dominio. Además, se define un conjunto de métricas para evaluar la estructura de encaminamiento lograda, y se las aplica al algoritmo CLUDITEM, desarrollado en base a los lineamientos establecidos. CLUDITEM, es un algoritmo de encaminamiento jerárquico basado en clusters, descrito detalladamente en [13] y [14], en cuya implementación se han incluido un número importante de parámetros, que permiten ajustar su funcionamiento. Los resultados de la evaluación realizada, logrados a partir de la simulación del funcionamiento del algoritmo, se utilizaron para establecer los valores más adecuados para sus parámetros de diseño y obtener conclusiones.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente forma, en la sección 2 se analizan las aplicaciones de supervisión ambiental, y se puntualizan los requerimientos del subconjunto orientado a medición periódica de variables del ambiente. En la sección 3 se establecen los lineamientos de diseño para un algoritmo en el dominio elegido y en la sección 4 se proponen las métricas de evaluación. La sección 5 resume los resultados de la simulación del algoritmo utilizados para establecer los valores de los parámetros que permiten ajustar su funcionamiento. Finalmente en la sección 6 se obtienen conclusiones y se plantean líneas de trabajo futuro.

2 Aplicaciones de Supervisión Ambiental

Las RISI encuentran cada vez mayor campo de aplicación, y existe una amplia bibliografía sobre sus características y las técnicas que se desarrollan para mejorar su desempeño. Sin embargo, la mayoría de los autores aborda la temática desde la perspectiva de las redes de comunicaciones y las distintas capas de los protocolos utilizados. En contraste algunos trabajos como [11], [12] y [15], destacan la importancia de abordar el estudio del espacio de diseño de las aplicaciones, haciendo énfasis en el análisis de los requerimientos para establecer las características más adecuadas para el algoritmo de encaminamiento, cuya responsabilidad es la de definir las rutas que se utilizarán para llevar la información del ambiente hasta la estación base.

Nuestro interés está centrado en las aplicaciones de supervisión ambiental, que pueden dividirse en dos grandes grupos de acuerdo con la modalidad de medición:

- Aplicaciones que responden a eventos específicos: Ejemplos típicos son las redes de alerta sobre situaciones de peligro como incendios o inundaciones, en las cuales la velocidad de respuesta es fundamental. Los sistemas deben ser capaces de reconocer las situaciones problemáticas a partir de las mediciones realizadas y transmitir la alarma hasta la estación central lo antes posible. Por lo tanto el requerimiento de latencia es crítico.
- Aplicaciones que colectan datos periódicamente en un área específica de trabajo: Estos sistemas realizan mediciones periódicas de las variables de interés, que pueden utilizarse con fines tan diversos como construir modelos de los ambientes, estudiar los fenómenos que se desarrollan en los mismos o controlar dispositivos que pueden actuar para alterar algunos de los parámetros en cuestión. En estas aplicaciones el acento está puesto en la calidad de la información y no en la velocidad de respuesta, por lo que la latencia es irrelevante.

El trabajo aquí presentado se focaliza en el segundo grupo de aplicaciones que tiene habitualmente asociado un conjunto de requerimientos con características similares:

- Distribución de los nodos: los dispositivos se ubican manualmente en determinados puntos de interés.
- Frecuencia de las mediciones: periódicamente todos los nodos abocados a supervisar una variable del medio envían información a la estación base, ya que se necesitan datos sobre toda el área bajo estudio. Esto significa que cuando corresponda enviar información hacia la estación base o nodo sink, se producirá un tráfico importante en la red, mientras que en los períodos en los que no se realizan mediciones no existirá intercambio de mensajes entre los nodos.
- Variables a medir: Los parámetros a supervisar tienen variación lenta en el tiempo y en el espacio y es habitual que los valores estén fuertemente correlacionados.

- Área a supervisar: Posee dimensiones variables, por lo que el diseño de la red de sensores debe prever su escalabilidad.
- Autonomía de funcionamiento: La red puede ser desplegada en zonas alejadas y se necesita que cumpla con sus tareas sin mantenimiento durante varios meses.
- Calidad de la información colectada: Las aplicaciones requieren cierta calidad de servicio (QoS) relacionada con los datos que llegan a la estación base, y por lo tanto, el tiempo de vida de la red se define en base a dicha especificación.

Este último conjunto de requerimientos permite definir algunas características importantes para el algoritmo de encaminamiento a diseñar.

3 Líneas de Diseño para un Algoritmo de Encaminamiento

Las características de un algoritmo de encaminamiento adecuado para las aplicaciones elegidas se definieron en base a los requerimientos enumerados en el apartado anterior. Para ello se trabajó sobre la base de nodos sensores homogéneos en cuanto a sus recursos, y se definió la QoS de las aplicaciones como un porcentaje máximo admisible de pérdida de información, por zona del área bajo estudio. Este último requerimiento es típico en aplicaciones que necesitan información sobre toda la región donde se ha desplegado la red, para obtener un mapa de variación de las variables con el fin de construir un modelo de comportamiento del sistema, tomar decisiones o llevar adelante acciones correctivas.

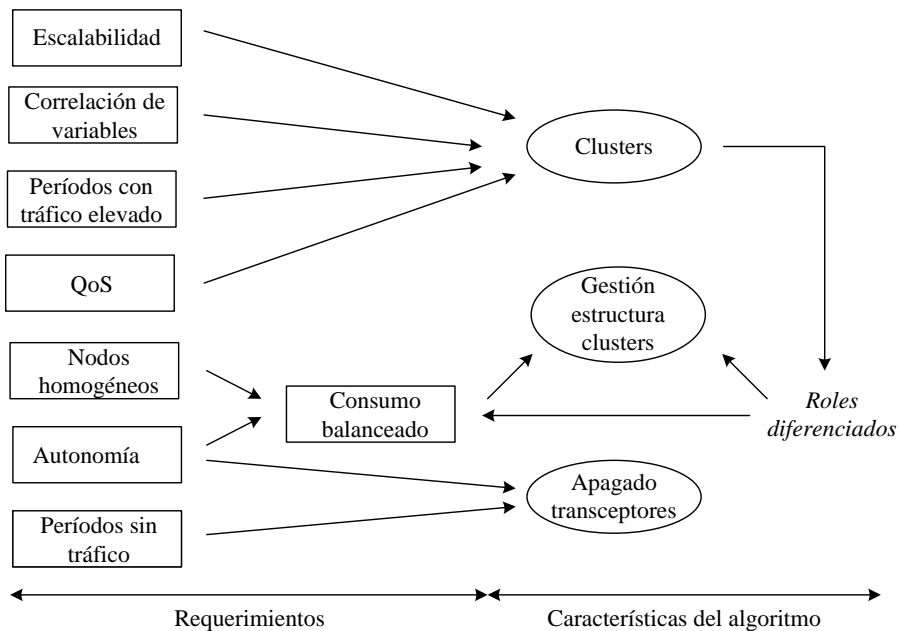


Fig. 1. Relación entre los requerimientos de las aplicaciones elegidas y las características del algoritmo. Los requerimientos se destacan con un rectángulo, mientras que las características a implementar en el algoritmo se representan con óvalos.

La Fig. 1 muestra que los requerimientos de escalabilidad, QoS definida como un porcentaje máximo de pérdida de datos por sector, alta correlación de variables y necesidad de acotar el tráfico cuando los nodos transmiten hacia el sink, apuntan a definir un algoritmo jerárquico basado en clusters constituidos por nodos próximos.

Esto se fundamenta en que los clusters proporcionan un conjunto de ventajas acordes con los requerimientos planteados, a saber [16]:

- Permiten aprovechar la correlación de los datos, simplificando su procesamiento al aplicar agregación.
- Se orientan al procesamiento local de la información, reduciendo la circulación de mensajes de datos y

acotando la congestión de la red.

- Facilitan el control por zona del porcentaje de pérdida de datos, ya que están constituidos por nodos próximos físicamente.
- Proporcionan escalabilidad a la red ya que ampliar el área de trabajo se reduce a agregar clusters, cuya gestión es simple ya que están constituidos por grupos acotados de nodos próximos físicamente.

La elección de una red jerárquica basada en clusters, supone la definición de roles diferenciados entre los nodos que la constituyen. Los nodos que asumen la tarea de ser cabeceras de cluster (CH), están más exigidos en cuanto al consumo de energía que los nodos comunes (NC) [16]. Esta propiedad de las redes basadas en clusters, sumada a los requerimientos de autonomía y homogeneidad de recursos en los nodos, ocasionan el agregado de un nuevo requerimiento, en principio no considerado, que es la necesidad de balancear el consumo de los dispositivos. De no ser así, los nodos más exigidos agotarían su energía en forma prematura, produciendo desconexiones en la red. Por su parte, este último requerimiento, apunta a la necesidad de realizar una gestión de la estructura de clusters, teniendo en cuenta los dos tipos de nodos presentes en la red (CH y NC). Finalmente, la Fig. 1 muestra que los requerimientos de autonomía de funcionamiento y presencia de períodos de inactividad en la red, apuntan a la necesidad de apagar los transceptores de los nodos todo el tiempo posible.

4 Evaluación de CLUDITEM

El algoritmo que se analiza es CLUDITEM, que se diseñó en base a los lineamientos definidos en el apartado anterior, y que se describe en detalle en [13] y [14]. Este algoritmo divide su funcionamiento en fases de trabajo, lo que permite implementar el apagado de transceptores el mayor tiempo posible sin perjudicar su desempeño. Además, para realizar la gestión de la estructura de clusters que define, divide el área de trabajo en una grilla virtual en la cual cada división o celda corresponde a una zona en la que debe respetarse la QoS establecida, y agrega una técnica de rotación periódica de CH. La rotación de cabeceras fue propuesta por Heinzelman para su algoritmo LEACH [17], pero CLUDITEM incorpora el uso de la grilla virtual para lograr una distribución de CH en toda el área a supervisar, y para balancear el tamaño de los clusters. Para evaluar el desempeño de CLUDITEM respecto de la gestión de la estructura de encaminamiento que establece, se definieron las siguientes métricas:

- Cantidad de CH
- Cantidad de nodos desconectados
- Cantidad de hijos con CH en la misma celda
- Cantidad de hijos por CH.

Los nodos CLUDITEM no son conscientes de su ubicación física, pero conocen la celda de la grilla a la que pertenecen. El algoritmo implementa estrategias para que en cada reconfiguración de la red, los nodos comunes elijan el cluster al que adhieren favoreciendo el establecimiento de conjuntos de nodos balanceados en profundidad y cantidad de miembros. La situación ideal, corresponde al logro de clusters con igual número de hijos, cuyos CH estén distribuidos en el área de trabajo, uno por celda de la grilla. Además para favorecer el control de la información obtenida por zona, es deseable que mayoritariamente los miembros de cada cluster pertenezcan a la misma división de la grilla que su cabecera. Se agrega la métrica de cantidad de nodos desconectados que impacta directamente sobre la QoS de la aplicación.

Para ajustar el funcionamiento de CLUDITEM, se definieron en su implementación dos conjuntos de parámetros perfectamente diferenciados, uno trata sobre el escenario de distribución de los nodos y el otro se relaciona con las fases de funcionamiento del algoritmo. El primer grupo se refiere a las dimensiones del área a supervisar, cantidad de celdas y tamaño de la grilla virtual, número de nodos por celda y distancia entre ellos. El segundo grupo incluye la cantidad de postulantes a CH por celda, profundidad máxima de los clusters y, valores de la potencia de transmisión y de los tiempos que disparan los temporizadores que definen las distintas fases del algoritmo.

5 Resultados de simulación

Se utilizó NS2 v2.31 [18], un simulador de eventos discretos orientado al análisis de protocolos para redes de comunicación, y se implementó CLUDITEM como un agente ligado a cada nodo de la red. La versión

del simulador utilizada incorpora el estándar IEEE 802.15.4, elegido para las capas inferiores del algoritmo, a partir del desarrollo del módulo WPAN de Zheng [19] y la actualización de Ramachandran [20]. La integración de CLUDITEM, como protocolo de encaminamiento, con las capas inferiores del estándar 802.15.4, permitió simular el funcionamiento del algoritmo en condiciones cercanas a la realidad para ajustar sus parámetros de trabajo.

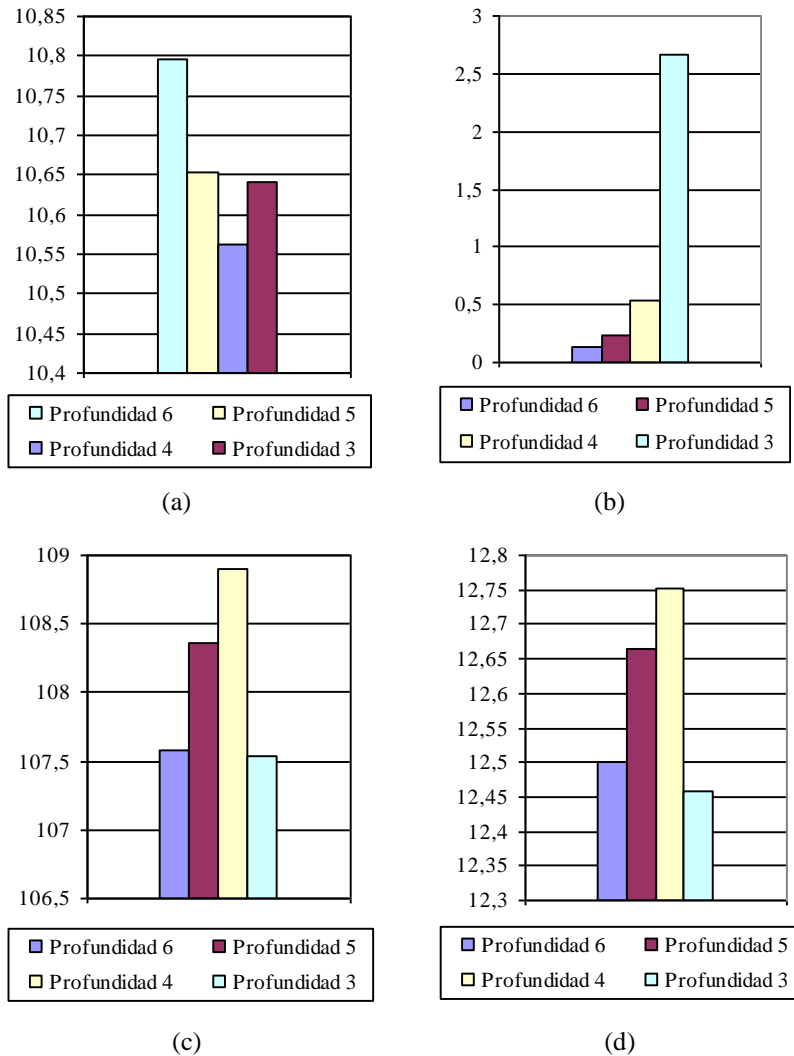


Fig. 2. Análisis de la máxima profundidad de los clusters. (a) Promedio de cabeceras por celda, (b) Promedio de nodos desconectados, (c) Promedio de nodos con cabecera en la misma celda (d) Promedio de hijos por cabecera.

El escenario de simulación en NS2 se definió como un área cuadrada de 135 metros de lado dividida en 9 celdas iguales con 16 nodos, separados 12 metros entre sí. El sink se ubicó fuera del entorno supervisado, dentro del alcance de transmisión de los CH más cercanos, garantizando un árbol de cabeceras conectado. Estos valores se establecieron a partir del trabajo con expertos sobre algunas de las aplicaciones seleccionadas. En el escenario propuesto los valores ideales para las métricas son: 9 cabeceras, uno por celda, ningún nodo desconectado, 15 hijos por cada CH, pertenecientes a la misma celda de su cabecera [13]. Además, el funcionamiento de CLUDITEM incluye la definición de dos valores de potencia de transmisión, uno para las comunicaciones intracluster, y otro para el envío de

mensajes entre cabeceras, que se establecieron en base a los parámetros de los módulos XBee de la empresa MaxStream [21].

Se realizaron 1920 configuraciones del árbol de encaminamiento analizando a través de las métricas definidas el impacto de la máxima profundidad permitida en los clusters como muestra Fig. 2.

Analizando la profundidad de los clusters, se observa que el valor 4 es el que brinda mejor resultado para el promedio de nodos con CH en la misma celda, reforzando la idea de medición por zona. Además obtiene valores aceptables en las otras métricas, por lo cual se adoptó este valor como la cantidad máxima de saltos intracluster.

A continuación, para igual número de reconfiguraciones del árbol de encaminamiento, se estudió la influencia del número de postulantes por celda de la grilla variando la cantidad entre 1 y 3. Los resultados obtenidos se resumen en Fig. 3.

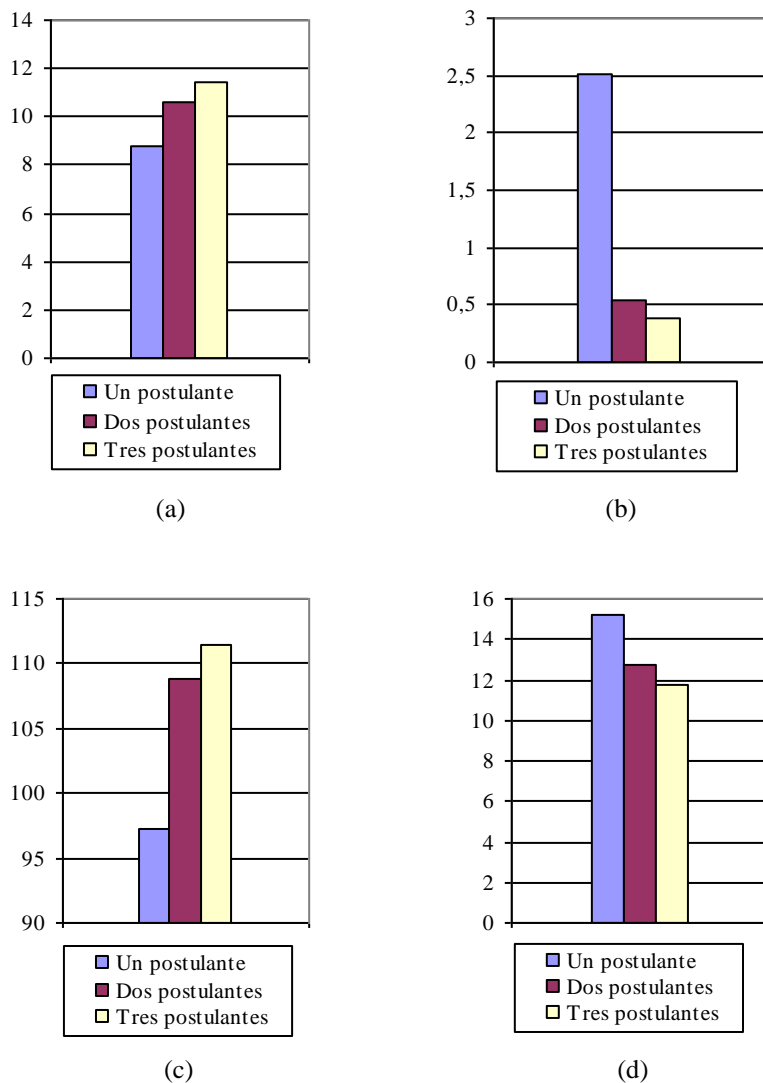


Fig. 3. Análisis del número de postulantes por celda. (a) Promedio de cabeceras por celda, (b) Promedio de nodos desconectados, (c) Promedio de nodos con cabecera en la misma celda (d) Promedio de hijos por cabecera.

La opción de un único postulante se descartó ya que reducía notablemente el número de nodos con cabecera en la misma celda, y elevaba la cantidad de nodos desconectados en la red. Los valores de las

métricas para dos y tres postulantes resultaron en cambio bastante aproximados. Por lo tanto, para elegir el valor del parámetro, se le dio peso al hecho de que al permitir dos postulantes por celda, disminuía el promedio de cabeceras resultante en la red. Si bien esta característica no apunta directamente al requerimiento de controlar las mediciones por zona, es importante respecto del ahorro de energía, ya que los CH son nodos más exigidos en cuanto al consumo.

Es importante destacar que los parámetros definidos aportan un interesante grado de flexibilidad al algoritmo respecto a variaciones de las especificaciones, siempre dentro del grupo de aplicaciones elegidas. Por ejemplo, si no se desea realizar un control por zona de las mediciones que llegan al sink, y en cambio resulta fundamental reducir la pérdida de mensajes, podría considerarse utilizar una profundidad máxima de 5 para los clusters, que disminuye notablemente el número de nodos desconectados. O sea, al ponderar la importancia de cada métrica de acuerdo con las variaciones de las especificaciones en el grupo de aplicaciones elegido, puede personalizarse el funcionamiento del algoritmo, para obtener mejores resultados.

6 Conclusiones y Trabajo Futuro

Los requerimientos de las aplicaciones orientadas a supervisión ambiental, permitieron definir lineamientos de diseño para un algoritmo de encaminamiento en el dominio elegido. A partir de los mismos se definieron un conjunto de métricas, que se aplicaron para evaluar el desempeño de un algoritmo desarrollado a partir de las pautas establecidas. Las métricas se utilizaron exitosamente para evaluar la estructura de clusters obtenida por CLUDITEM, y establecer los valores más adecuados para sus parámetros de funcionamiento considerando los requerimientos existentes. Además, se concluyó que dichos parámetros aportan al algoritmo un grado importante de flexibilidad, permitiendo ajustarlo en base a las mismas métricas, para otras condiciones de funcionamiento. Finalmente, es interesante destacar, que las métricas definidas pueden aplicarse a otros algoritmos basados en clusters orientados a las aplicaciones ambientales de medición periódica, que deban gestionar la estructura de los grupos de nodos que definan.

La próxima tarea será evaluar el funcionamiento completo del algoritmo, ajustando el resto de los parámetros definidos. En este sentido, se trabajó sobre la fase de envío de datos para ajustar sus características [22]. Actualmente se analizan los valores más adecuados para los temporizadores que disparan las tareas de los nodos, en las distintas fases de las rondas de recolección de información. Por otro lado, no se ha implementado todavía el apagado de los transeptores, que es una característica importante del algoritmo. Por lo tanto, el estudio del consumo de energía en las distintas fases de funcionamiento para los roles de CH y NC, así como las verificaciones ligadas a la definición del tiempo de vida de la red, están previstas para una etapa de trabajo futuro. Se prevé que este último análisis, puede introducir la necesidad de realizar nuevos ajustes a la temporización de las fases de CLUDITEM, con el fin de cumplir los requerimientos de las aplicaciones.

7 Referencias

1. West, B., Flikkema, P., Sisk, T., Koch, G.: Wireless sensor networks for dense spatio-temporal monitoring of the environment: A case for integrated circuit, system, and network design. In: Proceedings of the 2001 IEEE CAS Workshop on Wireless Communications and Networking, IEEE Press, Notre Dame, Indiana (2001)
2. Pawlowski, A., Guzman, J.L., Rodríguez, F., Berenguel, M., Sánchez, J., Dormido S.: Simulation of Greenhouse Climate Monitoring and Control with Wireless Sensor Network and Event-Based Control. *Sensors*. 9, 232--252 (2009)
3. García-Hernández, C. F., Ibarguengoytia-González, P. H., García-Hernández, J., Pérez-Díaz, J.A.: Wireless Sensor Networks and Applications: a Survey. *International Journal of Computer Science and Network Security IJCSNS*. Vol.7, 3, 264--273 (2007)
4. Buratti, C., Conti, A., Dardari, D., Verdone, R.: An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. *Sensors*. 9, 6869--6896 (2009)
5. Liu, H., Meng, Z., Cui, S.: A Wireless Sensor Network Prototype for Environmental Monitoring in Greenhouses. In: Proceedings of the IEEE International Conference of Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom 2007), pp 2334--2347. IEEE Press, Shanghai (2007)
6. Hakala, I., Tikkakoski, M., Kivelä, I.: Wireless Sensor Network in Environmental Monitoring - Case Foxhouse. In: Proceedings of the Second IEEE International Conference of Sensor Technologies and Applications SENSORCOMM '08, pp 202--208. IEEE Press, Cap Esterel (2008)
7. Al-Karaki, J. N., Kamal, A. E.: Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11, No. 6, 6--28, (2004)
8. Aboelaze, M., Aloul, F. : Current and Future Trends in Sensor Networks: A Survey. In: Proceedings of the Second IEEE and IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN 2005), IEEE Press, Dubai (2005)
9. Abbasi, A., Younis, M. : A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer Communication*, Vol 30, Issue 14-15, 2826--2941, Elsevier (2007)
10. Kotonya, G., Sommerville, I., Requirements Engineering: Processes and Techniques. John Wiley and Sons, New York, (2001)
11. Mac Ruairí, R., Keane, M.T., Coleman G.: A Wireless Sensor Network Application Requirements Taxonomy. In: Proceedings of the Second IEEE International Conference on Sensor Technologies and Applications SENSORCOMM '08, pp 209--216. IEEE Press, Cap Esterel (2008)
12. Römer K., Mattern F.: The Design Space of Wireless Sensor Networks. *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11, No. 6, 54--61, (2004)
13. 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, pp 1219--1228 (ISBN 978-959-9770-02-7), Santa Fé (2008)
14. 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, (ISBN 978-987-24611-0-2), Chilecito (2008)
15. Borges, L.M., Velez, F.J., Lebres A.S.: Taxonomy for Wireless Sensor Networks Services Characterisation and Classification. In: Proceedings of the 7th Conference on Telecommunications Conftele' 2009, Vol. 1, pp. 433--436, Vila da Feira (2009)
16. Mhatre V., Rosenberg C.: Design Guidelines for Wireless Sensor Networks: Communication, Clustering and Aggregation. *Ad Hoc Networks Journal*, Elsevier Science, Vol. 2, Issue 1, 45-- 63, (2004)
17. Heinzelman W., Application-specific Protocol Architectures for Wireless Networks. In PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, (2000)
18. The Network Simulator - ns-2, http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/User_Information
19. Zheng, J., Lee, M.J. : A comprehensive performance study of IEEE 802.15. 4. Sensor network operations. 218--237 (2006)

20. Ramachandran, I., Das, A.K., Roy, S.: Analysis of the contention access period of IEEE 802.15.4 MAC. ACM New York, NY (2007)
21. XBee® & XBee-PRO® 802.15.4 OEM RF Modules, <http://www.digi.com/products>
22. Corti, R., D'Agostino, E., Giandoménico, 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. Aceptado para su publicación en: Anales de la XXXVI Conferencia Latinoamericana de Informática CLEI 2010, Asunción (2010)