

Algoritmo de encaminamiento para redes inalámbricas de sensores inteligentes.

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

¹ Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA), Universidad Nacional de
Rosario (UNR)
Av. Pellegrini 250
2000 Rosario, Argentina
{estelad, giandome, rcorti, belmonte} @fceia.unr.edu.ar
{rmartinez} @dsi.fceia.unr.edu.ar

Resumen. Las redes inalámbricas de sensores inteligentes (RISI) son un tipo de redes Ad_Hoc. Estas redes carecen de infraestructura y están sometidas a fuertes restricciones de energía y de ancho de banda. Están compuestas por nodos sensores que colectan información del entorno y colaboran entre sí para transmitirla hasta la/las estaciones base (sink). En este trabajo se propone un algoritmo de encaminamiento multi-hop para dichas redes que selecciona como ruta óptima desde cada nodo hacia el sink, la de mínima cantidad de saltos. Los nodos están sujetos a fallas por lo que la topología de la red es cambiante. Cuando esto ocurre, los nodos remanentes adaptan su comportamiento, encontrando rutas alternativas al sink. Se garantiza de esta forma, que toda la información colectada por los nodos alcanza la estación base para su procesamiento.

Palabras Clave: redes Ad-Hoc, redes sensores inalámbricas, encaminamiento.

1 Introducción

Las redes inalámbricas de sensores inteligentes (RISI) son un tipo de red Ad_Hoc. Nacieron gracias al avance extraordinario de la nanotecnología que permite lograr costos adecuados, tamaño reducido, bajo consumo de potencia y procesamiento limitado. Estas redes están compuestas de nodos, llamados nodos sensores, que pueden ser fijos o móviles, y que constituyen una red autoconfigurable sin la ayuda de ninguna infraestructura externa [1]. Para que esto se pueda llevar a la práctica es necesario que los nodos colaboren entre sí para conseguir el objetivo común de comunicación entre ellos [2].

Las RISI se usan en aplicaciones muy variadas, entre las que podemos nombrar, monitoreo ambiental, seguimiento de objetivos o alerta de situaciones críticas. En este

sentido es importante destacar, que las principales características de cada RISI quedan determinadas por los requerimientos de la aplicación para la cual se la desarrolla.

Un nodo sensor está habitualmente constituido de 4 componentes básicos como se muestra en figura 1 [3].

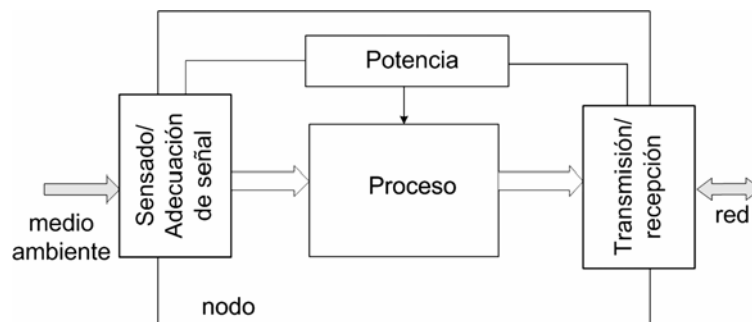


Fig.1. Esquema del nodo sensor: Sensor propiamente dicho, sistema de comunicación, sistema de proceso y sistema de potencia.

Este artículo tratará sobre el proceso de comunicación en la red, analizando como se determinarán y mantendrán en el tiempo las rutas más adecuadas, y las acciones a llevar a cabo por cada nodo cuando recibe mensajes de sus vecinos.

El artículo está organizado de la siguiente forma: la sección 2 versa sobre técnicas de encaminamiento, la sección 3 explica el algoritmo desarrollado, la sección 4 enumera las conclusiones a las que se ha arribado y la sección 5 hace una breve referencia a trabajos futuros

2 Técnicas de encaminamiento

Con el objetivo de que los nodos establezcan una metodología cooperativa para la comunicación, se debe fijar un algoritmo de encaminamiento que cumpla con las condiciones que se establezcan, de acuerdo a las necesidades propias de la aplicación. Un algoritmo de encaminamiento determina el camino de un mensaje desde una fuente a un destino. Este camino se debe pensar en base a un objetivo planeado, como ser máximo tiempo de vida de la red, seguridad en que todos los mensajes lleguen al nodo sink, o mínima sobrecarga de la red. Un buen camino es aquel que proporciona costo mínimo de acuerdo al objetivo planteado. No siempre el camino mas corto es el más conveniente.

Los nodos que se deben comunicar para el envío de un mensaje deben realizar dos procesos que es útil diferenciar, el enrutamiento propiamente dicho, que es decidir que rutas utilizar y la acción o acciones a tomar cuando llega un paquete y se lo debe enviar a un próximo nodo.

Toda técnica de encaminamiento propuesta para trabajar en una red RISI debe ser eficiente en cuanto al gasto de energía, ya que generalmente los sensores están alimentados a baterías y habitualmente se encuentran en lugares donde es difícil su reposición [4] [5]. La energía es utilizada por los nodos en tres funciones principales: sensado, procesamiento y comunicación. Se ha establecido que la transmisión consume la mayor parte de la energía disponible, así que se intenta minimizar la tarea de diseminación realizando todo el procesamiento local posible [6][7]. En este sentido se han desarrollado técnicas de agregación de datos que trasladan el procesamiento y filtrado de los datos colectados, desde las estaciones base a los nodos sensores de la red. La eficiencia y aplicabilidad de estas técnicas, dependen del problema a abordar, por lo que deben ser cuidadosamente elegidas teniendo siempre en cuenta el dominio de trabajo [8].

Por lo tanto, en la definición de un algoritmo de encaminamiento existen muchas condiciones que es necesario tener en cuenta. Entre ellas se puede mencionar: distribución de los nodos, heterogeneidad de los mismos, tolerancia a fallas, escalabilidad de la red, topologías cambiantes, medio de transmisión, conectividad, área de cobertura, agregación de datos y calidad de servicio, como se detalla en [2].

2.1 Algoritmos de enrutamiento

El algoritmo de encaminamiento más difundido, disemina los mensajes utilizando inundación, donde cada nodo envía la información que recibe o genera, a todos sus vecinos. Este comportamiento puede llevar rápidamente a provocar una implosión en la cantidad de mensajes, cuando la red se utiliza atacando un problema del mundo real. Existen distintas formas de limitar esta implosión, como ser, no enviar el mensaje al nodo del cual se recibió, o no enviar un mensaje ya enviado con anterioridad [9].

Otras técnicas de encaminamiento buscan un camino óptimo para transportar la información hasta la estación base. Para ello tienen en cuenta algunas características, como ser cantidad de saltos, máximo ahorro de energía, máxima calidad de comunicación.

Las redes de sensores inalámbricas deben utilizar algoritmos que optimicen el consumo de energía. La misma se consume mayormente durante la transmisión de datos de un nodo a otro y por lo tanto se buscan técnicas que minimicen la cantidad y el tamaño de los mensajes a transmitir.

Los algoritmos para este tipo de redes se denominan algoritmos centrados en datos, ya que al estar constituidas por una gran cantidad de nodos, es impracticable tener una dirección que identifique cada uno de ellos [7].

2.2 Protocolos centrados en datos

En los protocolos centrados en datos, generalmente se busca aplicar algún tipo de procesamiento en los nodos de forma que los tiempos de comunicación y tamaño de los mensajes sean lo más pequeños posibles [10].

Estas redes pueden trabajar detectando eventos del ambiente, por requerimiento de la estación base o en forma periódica. En todos estos casos, el flujo de comunicación que se puede establecer, es desde un nodo a varios, llamado multicast o desde varios nodos a uno, que se conoce como multicast inverso.

Los nodos funcionan como encaminadores (*routers*) y se ven involucrados tanto en el descubrimiento como en el mantenimiento de rutas, además de cumplir con su tarea de nodo sensor.

Entre los protocolos de este tipo más difundidos se encuentra la familia de protocolos SPIN y la difusión dirigida [6].

2.2.1 Diseminación de la información en redes de sensores utilizando negociación

Heinzelman y sus colaboradores desarrollaron una familia de protocolos adaptativos que distribuyen la información de cada nodo de la red a todos los nodos. La familia de protocolos Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) usa negociación para distribuir los datos y selecciona la ruta según la disponibilidad de energía de los nodos [11].

SPIN trabaja con distintos mensajes, cada uno de los cuales tiene una función específica. Ellos son:

Advertencia (new data advertisement - **ADV**): Cuando un nodo SPIN tiene algún dato para transmitir, envía un mensaje ADV a sus vecinos conteniendo descriptores del dato.

Requerimiento (request for data - **REQ**): Cuando un nodo SPIN desea recibir datos, envía un mensaje REQ.

Datos (data message - **DATA**): Es el mensaje de datos

2.2.2 Difusión dirigida

Difusión dirigida es un protocolo de diseminación de datos reactivo, donde las rutas se calculan cuando son necesarias. Consiste de varios elementos: intereses, mensajes de datos, gradientes. La comunicación la inicia el nodo sink, difundiendo un interés en la red, el cual representa un pedido de información específica. Todos los nodos tienen una memoria intermedia de intereses. Cada interés contiene distintos campos, además del propio interés:

Marca de tiempo - Timestamp: tiempo en que se recibió el interés

Gradiente - Gradient: valoración de los datos dada por cada vecino y el identificador del nodo desde donde recibió el interés

Duración - Duration: tiempo de vida del interés. Es utilizado por los nodos para determinar cuando pueden eliminar de la memoria intermedia los intereses almacenados.

Los nodos detectan eventos de su entorno, buscan en su memoria intermedia para ver si tiene algún interés que se corresponda con este evento y si lo encuentran comienzan a transmitir la información a sus vecinos con el objetivo de alcanzar el sink.

Cuando un nodo recibe un interés, busca en su memoria intermedia si ya existe. Si no existe lo guarda, colocándole un gradiente así como marca de tiempo y duración. En

caso contrario, actualiza marca de tiempo y duración. Además transmite el interés recibido a sus vecinos estableciéndose la difusión en la red [12].

3 Algoritmo de encaminamiento desarrollado

El grupo de trabajo de redes inalámbricas de sensores inteligentes (GRISI), perteneciente a la FCEIA/UNR, comenzó a trabajar durante el año 2006. El objetivo inicial fue desarrollar un algoritmo de encaminamiento para estas redes, poniendo énfasis en el aseguramiento de la recepción de la información colectada en la estación base.

Se fijaron algunas características de la red que permitieron comenzar a trabajar con un algoritmo de menor complejidad, ya que no se tuvo en cuenta el consumo de energía. Por lo tanto, el algoritmo se desarrolló para una red que cumple las siguientes condiciones:

- Nodo sink único. No se muere nunca, su muerte implica la muerte de toda la red.
- Cada nodo será identificado unívocamente en la red por un número entero.
- Cantidad finita de nodos homogéneos y fijos.
- Los nodos pueden fallar.
- Aseguramiento de la llegada de la información a la estación base.

Cada nodo puede determinar cual es su ruta más conveniente al sink. En este caso se consideró más adecuado el camino que requiere la menor cantidad de saltos para llegar a la estación base [13].

En este contexto fue de gran importancia el concepto de nivel de cada nodo, que es la menor cantidad de saltos que lo separan del sink. De la misma forma resultó relevante que cada nodo identifique al vecino que usará para enviarle mensajes a la estación base, al que se llamó Ruta Al Host (RAH).

El formato de los mensajes a intercambiar y el almacenamiento de los mismos, se determinaron teniendo en cuenta las condiciones fijadas. Esto determinó una estructura de datos que el nodo debe mantener.

3.1 Configuración del nodo:

Cada nodo tendrá las siguientes variables que permiten almacenar la información que debe conocer:

Ruta actual al sink (nodo al que debe comunicarse para llegar al sink, RAH)

Nivel (mínima cantidad de saltos que le permiten enviar un mensaje al sink.)

Ruta alternativa al sink (nodo al que debe comunicarse para llegar al sink, si el RAH no está disponible, que se llamó Ruta Al Host Alternativa (RAHA))

Nivel-RAHA (nivel que tendría el nodo si usara RAHA)

Status-conexión: indica si el nodo está aislado. No es posible establecer una RAHA alternativa.

Status-nodo: indica si el nodo está en condiciones de transmitir y/o recibir, no si tiene ruta válida.

3.2 Establecimiento de la estructura de la red y tipos de mensajes

La red debe en primer lugar establecer su estructura de comunicación, para lograrlo, el sink envía un mensaje por inundación que se identificó como mensaje tipo E. Este mensaje es como muestra la figura 2.

Tipo Mensaje	Emisor	Nivel emisor
--------------	--------	--------------

Fig. 2. Estructura de mensaje tipo E

Cada nodo que recibe un mensaje tipo E, adopta como RAH al nodo emisor, y su nivel lo calcula sumándole uno al nivel del nodo emisor. Luego reenvía el mensaje, colocándose él como nodo emisor.

Un nodo puede recibir mensajes de este tipo más de una vez desde diferentes nodos. Puede tomar entonces dos actitudes, desechar el mensaje si su nivel no mejora, o actualizar su nivel y reenviar el mensaje. Para que un nodo mejore su nivel se debe cumplir la ecuación (1).

$$\text{NivelNodoEmisor} < \text{NivelNodoReceptor} - 1 \quad (1)$$

Cuando finaliza la diseminación del mensaje E, cada nodo habrá establecido y almacenado su nivel y RAH de la forma descripta. Por lo tanto, luego de la circulación de este mensaje entre los distintos nodos, queda perfectamente definida la topología de la red.

Una vez establecida la topología de la red, es posible el envío de datos hacia la estación base. Esto se implementó utilizando mensajes denominados tipo D, cuya estructura se muestra en la figura 3.

Código mensaje	Emisor	Receptor	Nodo que espera respuesta	Tramos recorridos	Id del mensaje	Mensaje
----------------	--------	----------	---------------------------	-------------------	----------------	---------

Fig. 3. Estructura de los mensajes tipo D

Nodo que Espera Respuesta: El nodo que inicia la transmisión de un mensaje hacia el sink coloca su ID en este tramo.

Cuando un nodo recibe un mensaje tipo D lo almacena y lo retransmite a su RAH colocando en este tramo su propio ID.

ID del Mensaje: Este dato identifica perfectamente a cada mensaje como único.

El nodo que colecta información del ambiente envía un mensaje tipo D a su RAH. Cada nodo receptor repite este comportamiento hasta que los datos alcanzan la estación base.

Los mensajes tipo D incluyen el dato de los tramos recorridos por un mensaje. Esta información, se puede utilizar en un futuro con fines estadísticos.

Para asegurar la llegada de los mensajes tipo D, el sink notifica de la llegada de cada mensaje de este tipo enviando un mensaje tipo R. Este mensaje deberá recorrer la misma ruta que el D que le da origen, pero en sentido inverso (desde el sink hasta el nodo emisor). Cada nodo debe tener capacidad de almacenamiento para guardar los mensajes tipo D que ha enviado, y desecharlos sólo después de haber recibido el mensaje tipo R correspondiente. El reenvío por parte de los nodos intermedios de mensajes R se detiene cuando el nodo detecta que fue él quien originó el mensaje D correspondiente.

3.3 Fallos en la red

Cualquier nodo puede fallar y entonces la red puede perder conectividad. Por lo tanto, es posible que en el almacenamiento de un nodo existan varios mensajes tipo D que aún no han recibido respuesta. Para controlar esta situación se establece un tiempo de expiración de mensajes. Este tiempo representa el tiempo máximo que un nodo ha de esperar la respuesta R a un mensaje D, antes de considerar que algo no está funcionando correctamente. Por lo tanto, con cierta frecuencia se deben recorrer los almacenamientos de mensajes tipo D de cada nodo, para verificar si tienen mensajes expirados. Si en el almacenamiento de mensajes tipo D de un nodo "N" existen mensajes expirados, implica que existen problemas en la red. Éstos pueden deberse a que el nodo que es su RAH sea el que tenga inconvenientes o que el problema esté en los nodos subsiguientes en el camino hacia el sink. Es imprescindible detectar cual de las dos situaciones es la que se presenta, pues en el primer caso es el nodo "N" quien debe buscar rutas alternativas hacia la estación base, mientras que en el segundo caso el nodo no tiene que hacer nada.

Para ello cada nodo que tiene mensajes tipo D expirados, emite un mensaje tipo V a todos sus vecinos con el objetivo de detectar cual es la situación de fallo. Además, almacena el mensaje colocando en el tramo receptor su RAH. Se inicia de este modo lo que llamamos una ronda D, como se muestra en la figura 4 y que analizaremos a continuación.

Cada nodo que recibe un mensaje tipo V responderá con un mensaje tipo B si y solo si el nodo tiene su ruta al sink despejada. Para considerar que un nodo tiene su ruta a la estación base despejada se deben cumplir las siguientes condiciones:

- El nodo no está desactivado
- El nodo no está aislado
- El nodo no tiene en su almacenamiento mensajes D expirados
- El nodo no tiene como su RAH al nodo que le envió el mensaje tipo V

Cuando el nodo "N" recibe los mensajes tipo B, analiza si le contestó el nodo que era su RAH. Si eso es lo que ocurrió, elimina el mensaje tipo V previamente almacenado e infiere que el problema no está en su RAH y por lo tanto nada puede hacer para resolver la situación.

En caso que no haya recibido respuesta de su RAH, debe abocarse a descubrir una nueva ruta (RAHA) hacia la estación base. Cuando el nodo "N" recibe los mensajes

tipo B actualiza la variable (Ruta al Sink Alternativa: RAHA) de forma de seleccionar aquella que corresponda al nodo de menor nivel entre todos los que contestaron sus mensajes tipo V.

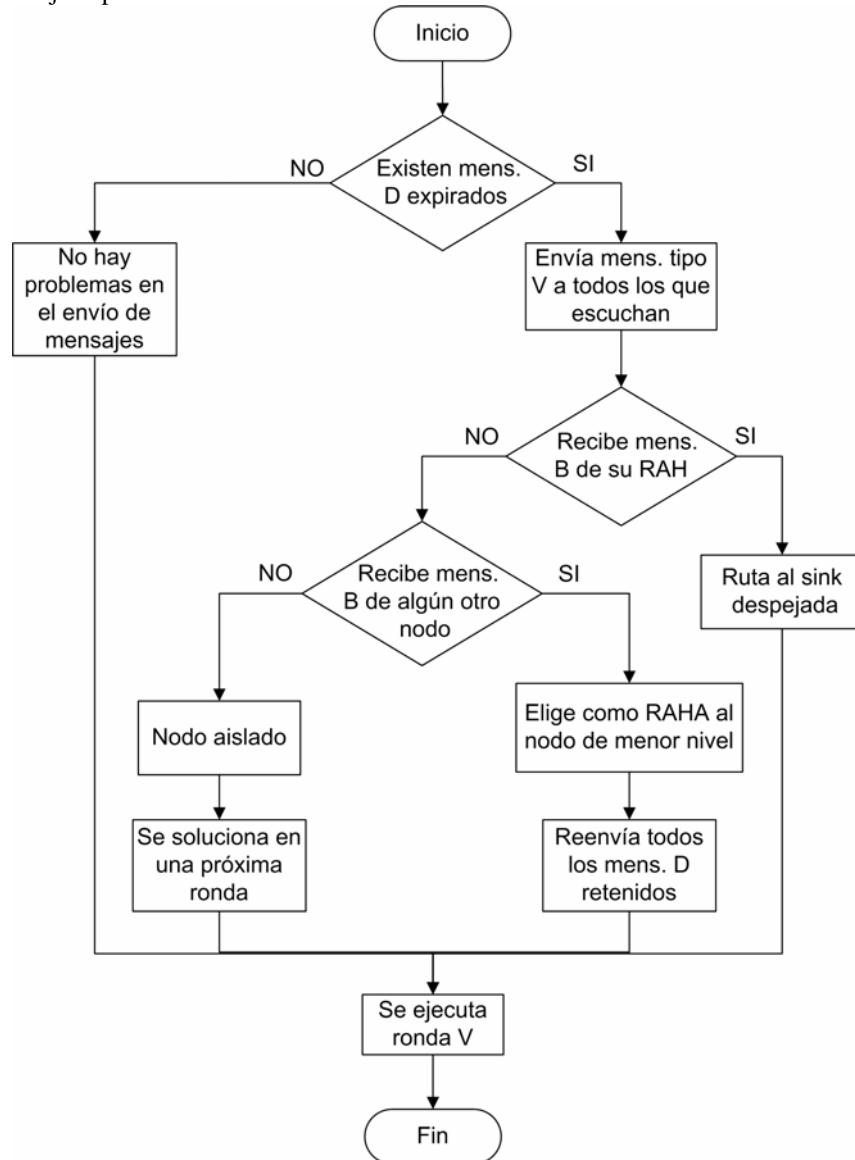


Fig. 4. Diagrama de flujo de la ronda D.

Transcurrida una ronda D se analiza si existe algún mensaje V almacenado. Si no existe, la RAH es válida y se encuentra despejada, como se explicó anteriormente. Si existe un mensaje tipo V expirado implica que la RAH no ha respondido al mensaje V y por lo tanto el nodo “N” debe habilitar una nueva RAH.

En caso que no pueda seleccionar una RAHA válida se declara al nodo en estado de AISLADO. Para permitir la salida del estado aislado de un nodo se procede de la siguiente manera. En el ronda D se emiten mensajes tipo V haya o no mensajes tipo D expirados. Esto hará que en la ronda V siguiente, si existe, se adopte una RAHA y se de por terminado el aislamiento

Si existe RAHA válida, se la adopta como RAH y se reenvían todos los mensajes almacenados en su almacenamiento de mensajes D al nuevo nodo RAH. Las rondas D y V se van alternando como se muestra en la figura 5.

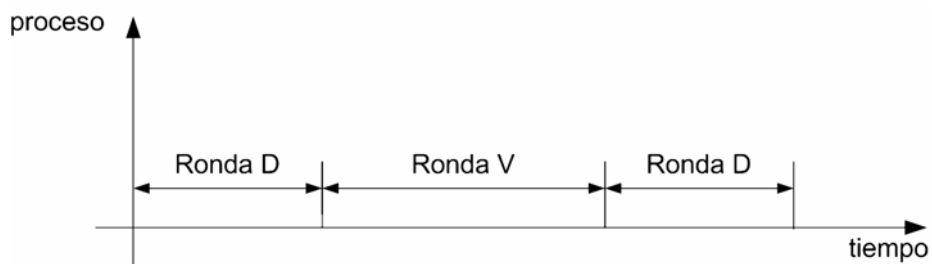


Fig. 5. Sucesión temporal de las rondas D y V.

Ronda D

Se analiza la presencia de mensajes tipo D expirados. Si los hay se emiten los mensajes tipo V. Los nodos cercanos que reciben el mensaje tipo V contestan con B si su ruta esta despejada.

Ronda V

Se analiza la presencia de un mensaje tipo V expirado. Si no existen mensajes tipo V expirados no hubo problemas con el envío de mensajes. Si existen y además no se dispone RAHA se declara al nodo AISLADO. En caso contrario se retransmite todo al nuevo RAH.

4 Conclusiones

El algoritmo desarrollado utiliza una serie de mensajes de control que están motivados por el hecho de asegurar la llegada a la estación base de todos los mensajes de datos emitidos. Para aplicaciones donde esta característica es prioritaria, los mensajes de control son inevitables a pesar de la sobrecarga de tráfico en la red que originan.

El consumo de energía no fue considerado como parámetro a optimizar en el algoritmo propuesto desde el punto de vista del procesamiento distribuido en la red. Este aspecto deberá ser tenido en cuenta en desarrollos futuros para mejorar la performance de la red.

Por otro lado el algoritmo propuesto selecciona siempre el camino más corto hacia la estación base, considerando el número de saltos necesarios. Si se puede asegurar el

consumo uniforme de energía en la red, esta característica prolonga el tiempo de vida ya que implica la menor cantidad de retransmisiones de mensajes. En cambio, si el consumo de energía no está distribuido en forma uniforme, puede resultar más provechoso elegir caminos con otros criterios para prolongar el correcto funcionamiento de la red.

5 Trabajos futuros

Se propone evaluar el algoritmo desarrollado ejecutándolo en algún simulador de redes. Se establecerán distintas situaciones de trabajo de la red, como ser: cantidad total de nodos, cantidad de nodos en fallo y cantidad de nodos aislados, para poder evaluar el funcionamiento de la red, en distintas condiciones de trabajo.

Como se ha mencionado, el algoritmo desarrollado no realiza un uso eficiente de energía, ya que cada nodo envía sus propios datos y todos los mensajes que recibe de nodos vecinos. No se realiza ningún procesamiento en los nodos con miras a que la información transmitida sea lo más compacta posible. Esta característica es muy dependiente de la aplicación en la cual se utilice la red de sensores. Se propone entonces realizar agregación de mensajes, respetando la mayoría de las restricciones impuestas al algoritmo. Con ello se mejoraría el consumo de energía de la red y por lo tanto aumentaría el tiempo de vida de la misma.

El algoritmo se modificará con el fin de soportar el establecimiento de clusters, para lo cual se deberán definir algunos nodos como cabeceras de los mismos. Los nodos cabecera serán los encargados de procesar la información recibida desde los integrantes de su cluster, mediante alguna función de agregación acorde con cada aplicación. Posteriormente el resultado se transmitirá hacia la estación base, esperándose una importante reducción de tráfico en la red, tanto en cantidad como en tamaño de los mensajes de datos.

6 Referencias

1. Karl H. & Willig A.: A short survey of wireless sensor networks, (2003) disponible en http://www.tkn.tu-berlin.de/publications/papers/TechReport_03_018.pdf
2. Karaki J. & Kamal A.: Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey disponible en <http://www.ee.iastate.edu/~kamal/Docs/kk04.pdf>
3. Akyildiz.I.F , Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E.: A survey on sensor networks, *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp 102- 114, ISSN: 0163-6804, (2002).
4. Kravets R., Schwan K., Calvert K.: Power-Aware Communication for Mobile Computers, *Proc. MoMUC '99*, (1999).
5. Li L., Halpern J.: Minimum-energy mobile wireless networks revisited, *IEEE International Conference on Communications ICC'01*, Helsinki, Finland, (2001).
6. Krishnamachari B., Estrin D., Wicker S.: Modelling Data-Centric Routing in Wireless Sensor Networks. *IEEE Inforcom 2002*. (2002)
7. Krishnamachari B. Estrin D., Wicker S.:The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the International*.

8. Dunlap R.: In-Network Aggregation in Wireless Sensor Networks. College of computing. Georgia Institute of Technology. USA. Disponible en:
http://www-static.cc.gatech.edu/~rocky/docs/rocky_netagg.doc.
9. Tilak S., Murphy A., and Heinzelman W.: Non-uniform Information Dissemination for Sensor Networks. University of Rochester. (2003)
10. Karl H.,Willig A.: Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. El Wiley & Sons. ISBN 0-470-09510-5 (2005)
- 11.Heinzelman W., Kulik J. & Balakrishnan H.. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks, disponible en
<http://www.comet.columbia.edu/~campbell/e6906/papers/heinzelman99.pdf>
- 12.Intanagonwiwat C., Govindan R. & Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks (2003), disponible en
<http://www.comet.columbia.edu/~campbell/e6906/papers/Intanagonwiwat2003.pdf>
13. D'Agostino E. , Giandoménico E., Corti R., Martinez R.: Ruteo en redes inalámbricas de sensores inteligentes, Universidad Nacional de Rosario, Reporte técnico, RT-ID-06/03, (2007) disponible en http://www.fceia.unr.edu.ar/secyt/rt/2006/rtid06_03.pdf