

Protocolos de enrutamiento para sistemas de monitoreo de estructuras civiles

Harold Enrique Castro Barrera*, Miguel Saumett León**

Fecha de envío: 18 de octubre de 2009

Fecha de aceptación: 1º de marzo 2010

RESUMEN

El desarrollo de sistemas de monitoreo de estructuras civiles en conjunto con las redes inalámbricas de sensores se ha convertido en una alternativa para determinar y monitorear los daños que puede sufrir una estructura debido al uso al cual se ve sometida. En este contexto, la selección del protocolo de enrutamiento utilizado desempeña un papel crítico por cuanto determinará al final de cuentas la efectividad de la red inalámbrica para realizar este monitoreo. Este artículo analiza las características deseables de dicho protocolo, propone un método para facilitar esta selección y compara escenarios con los protocolos más adecuados para estas aplicaciones.

Palabras clave: redes inalámbricas de sensores (WSN), sistemas de monitoreo de estructuras civiles (SHM), protocolos de enrutamiento, simulación.

ROUTING PROTOCOL FOR CIVIL SYSTEM MONITORING

ABSTRACT

The development of systems for monitoring civil structures in conjunction with wireless sensor networks has become an alternative to determine and monitor the damage that could result in a structure because of its use. In this context the selection of a routing protocol has a critical role because it will determine the effectiveness of the wireless network to perform this monitoring. This article discusses the desirable characteristics of such protocol, and then proposes a method to facilitate this selection and compares sceneries with the most suitable protocols for these applications.

Keywords: Wireless Sensor Networks (WSN), Structural Health Monitoring (SHM), Routing Protocol, simulation.

* Ingeniero de Sistemas, Universidad de los Andes. Docteur en Informatique del Institut National Polytechnique de Grenoble, France. D.E.A. en Informatique E.N.S.I.M.A.G, Grenoble, France. Profesor del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: hcastro@uniandes.edu.co

** Ingeniero de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Magíster en Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad de los Andes. Profesor Facultad de Ingeniería Electrónica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: msaumett@escuelaing.edu.co

INTRODUCCIÓN

Actualmente es notable la proliferación y penetración de las diferentes tecnologías inalámbricas en todo el mundo, entre las cuales se encuentran las redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Network, WSN), así como un acelerado desarrollo de las diferentes aplicaciones y servicios que estas redes pueden ofrecer. Dicha evolución ha hecho favorable que este tipo de redes sean atractivas para el desarrollo de sistemas de monitoreo de estructuras civiles, dadas la naturaleza y condiciones ambientales, de acceso y de espacio bajo las cuales este tipo de sistemas deben operar y entregar la información para su posterior análisis y procesamiento. Pero para que las WSN sean efectivas se deben evaluar ciertos aspectos operacionales que les permitirán poder conocer sus limitaciones y sus capacidades para detectar cualquier situación que pueda conducir a algún tipo de daño sobre la estructura que sea monitoreada. Uno de estos aspectos es el protocolo de enrutamiento utilizado en estas redes *ad-hoc* para asegurar su efectividad en estos entornos críticos.

En este artículo se llevará a cabo una revisión de los trabajos previos que sobre la materia se han venido desarrollando hasta el momento, para poder identificar los elementos a tener en cuenta en la selección de los protocolos de enrutamiento que más se ajusten a este tipo de aplicaciones. Con estos criterios se calificarán los distintos protocolos de enrutamiento existentes y se seleccionarán los más prometedores para un análisis más exhaustivo. Finalmente mostraremos cómo no es posible definir un protocolo único de enrutamiento válido para todos los escenarios y mostraremos la necesidad de aplicar nuevos criterios para la selección de un protocolo de enrutamiento que apoye efectivamente el monitoreo de una estructura civil por medio de una WSN.

SISTEMAS DE MONITOREO DE ESTRUCTURAS CIVILES

Los sistemas de monitoreo de estructuras civiles (Structural Health Monitoring, SHM) tienen como propósito detectar daños en las estructuras. Estos sistemas tienen múltiples usos y están diseñados para identificar estos daños con o sin intervención de los usuarios. Tienen una ventaja sobre los métodos de inspección tradicionales, ya que ofrecen en tiempo real análisis continuo y detección de daños sin dañar la estructura. Un sistema SHM puede ser global (cientos de sensores registran aceleraciones en cada parte de la estructura) o realizarse por secciones (se divide la estructura en secciones y se sensa cada sección para detectar daños). La ubicación y eficiencia de los esquemas de localización de daños depende de la densidad y ubicación de los sensores.

LOS SHM Y LAS REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

Las redes inalámbricas de sensores se adaptan perfectamente para el monitoreo estructural ya que ofrecen mucha flexibilidad en el posicionamiento de los sensores. También ofrecen la capacidad de dar múltiples saltos donde la conectividad puede variar con el tiempo al igual que el lugar de ubicación del sensor, haciendo que éste no se encuentre a un salto de la estación base.

La figura 1a muestra una red de sensores conectados directamente al hardware central de procesamiento. Este sistema es el más utilizado para estudios de monitoreo de estructuras civiles. La ventaja de este sistema es la gran variedad comercial disponible. Dentro de las limitaciones están su difícil despliegue de tal forma que se puedan readaptar, un punto sensible de fallo como lo es el cable y el hecho que la mayor parte del tiempo se utiliza en la instalación del sistema cableado.

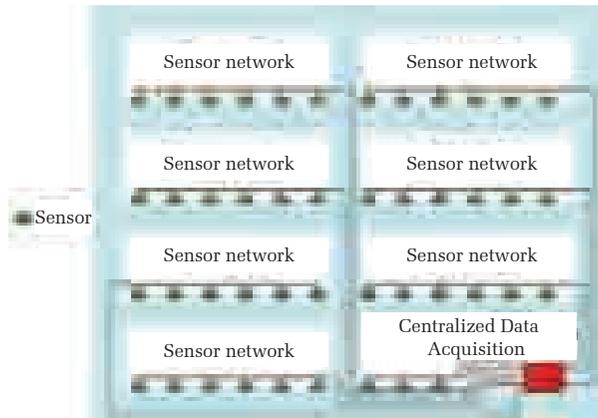


Figura 1a. Sistemas SHM (alambrado)

La comunicación inalámbrica puede resolver el problema del cableado de los sistemas tradicionales de monitoreo y reducir significativamente el costo de su mantenimiento. El esquema de un sistema de monitoreo inalámbrico descentralizado se muestra en la figura 1b. Los sistemas de SHM plantean varias cuestiones con respecto al diseño y despliegue del sistema descentralizado de redes inalámbricas de sensores. Además, el tiempo de sincronización entre múltiples unidades de sensores se vuelve una tarea difícil debido a la programación del procesador y al uso de múltiples canales con un sensor reduciendo la tasa de muestreo, lo cual no es favorable para las técnicas de sensado activo (Spencer, 2004).

PROTOS DE ENRUTAMIENTO PARA WSN

Son varias las características que se deben tener en cuenta al analizar un sistema SHM. Por un lado está el escenario de funcionamiento que puede ser de monitoreo de eventos extremos (i. e. terremotos) o de monitoreo periódico (i. e. viento, tráfico). Las condiciones ambientales de temperatura, humedad, el tamaño de la estructura a monitorear, la tasa a la que se generan datos, costos de mantenimiento (i. e. consumo de energía) del sistema de monitoreo e incluso las necesidades de sincronización de las distintas medidas, hacen parte del

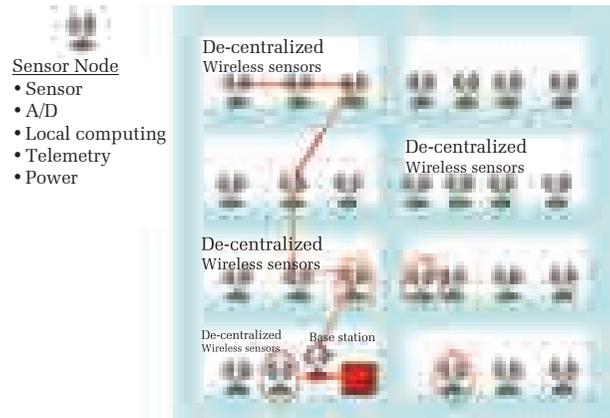


Figura 1b. Sistemas SHM (inalámbrico)

conjunto de elementos que deben ser tenidos en cuenta para analizar este tipo de sistemas (Kotcapalli, 2001).

Para analizar los protocolos de enrutamiento se deben considerar las características de las WSN de acuerdo con los requerimientos de la aplicación y su arquitectura.

ANÁLISIS DE PROTOCOS DE ENRUTAMIENTO PARA WSN

Lo primero que se debe analizar de un protocolo es su estructura de red, ya que puede desempeñar un papel importante en el enrutamiento. Se identifican tres estrategias: enrutamiento de redes planas, en el que cada nodo desempeña la misma función y los nodos sensores colaboran para realizar la tarea de sensado (enrutamiento centralizado de datos); enrutamiento de redes jerárquicas o basado en cluster, es una técnica que ofrece escalabilidad, una comunicación eficaz y un uso eficiente de la energía; y enrutamiento basado en localización, en el que el sensor es direccionado por medio de su localización.

Por otra parte hay que mirar los protocolos de acuerdo con su operación o funcionalidad. Aquí tenemos: enrutamiento basado en múltiples rutas, con el fin de mejorar la tolerancia a fallos (resistencia) del protocolo, la cual se mide por la probabilidad de usar un

camino alternativo entre la fuente y el destino cuando la ruta primaria falla; enrutamiento basado en peticiones, en el cual los nodos destino propagan una petición de datos (tarea de detección) desde un nodo a través de la red y el nodo que tiene los datos los envía al nodo que hace la solicitud; enrutamiento basado en negociación, en éste se utilizan descriptores de datos de alto nivel con el fin de eliminar las transmisiones de datos redundantes a través de la negociación; enrutamiento basado en QoS, en el que se tiene un equilibrio entre el consumo de energía y la calidad de los datos; y enrutamiento basado en coherencia, donde el procesamiento de datos es el principal componente en la operación de las redes inalámbricas de sensores.

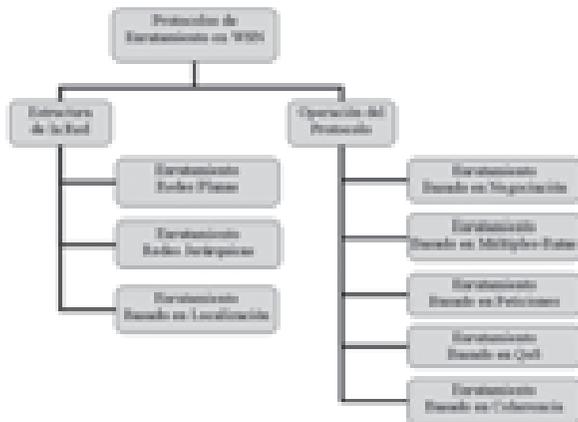


Figura 2. Taxonomía para protocolos de enrutamiento en WSN [1]

ANÁLISIS DE SISTEMAS SHM

El uso de WSN para SHM a largo plazo se hace como un intento de minimizar los costos y maximizar la utilidad del sistema en su conjunto, por lo que el diseño de la WSN debe estar estrechamente vinculada con el diseño de la metodología de monitoreo y no necesariamente debe seguir conceptos formulados para otras aplicaciones (Sasonov, 2007).

La red de sensores debe proporcionar un sistema de adquisición de datos autónomo de bajo costo, de

fácil instalación y mantenimiento. La energía utilizada para alimentar el sensor debe ser mínima y, preferiblemente, proceder de una fuente de energía auto sostenible. La WSN debe coexistir con otros dispositivos que funcionan en el mismo rango de frecuencias de radio para otro tipo de aplicaciones industriales, científicas y médicas, y debe proporcionar una comunicación con tolerancia a fallos, fiable y segura en una red con un gran número de nodos. Los módulos del sensor deben proporcionar un uso eficiente de la energía para la distribución de la carga computacional y para soportar la metodología de monitoreo que se utilice sobre el sensor. La WSN debe proporcionar los medios para la localización de los nodos de sensores, ya que los SHM utilizan métodos que requieren el conocimiento de la posición de los sensores en la estructura. La WSN en su conjunto debe ser capaz de adquirir datos con un error mínimo entre la sincronización de los canales. La WSN y el SHM deben ser construidos en torno a los sensores y a los métodos de monitoreo que no requieran gastos adicionales de energía para llevar a cabo las mediciones. El SHM no debe requerir de la intervención humana en cualquier parte de la toma de decisiones, caracterización del análisis de daños, adquisición de datos, generación de energía y debe ser capaz de funcionar de forma autónoma.

Teniendo en consideración las condiciones bajo las cuales los protocolos de enrutamiento para los sistemas SHM que utilizan WSN y la taxonomía general de estos para WSN, se puede obtener un panorama de las fortalezas y debilidades de cada uno de los protocolos con respecto a la aplicación de interés. Además, conociendo la forma en que se caracterizaron los SHM se pueden obtener de forma un poco más detallada los parámetros generales que van a servir para la selección del protocolo de enrutamiento que mejor se acomode o comporte para las aplicaciones de SHM; con esto reunido se puede llegar a obtener la ponderación que se presenta en la tabla 1.

De acuerdo con la ponderación dada a cada protocolo se observa que los protocolos Fast Local Clustering Service (FLOC) y Tow-Tier Data Dissemination (TTDD) son los que más se ajustan a las condiciones requeridas. El protocolo FLOC muestra que es jerárquico, que permite la movilidad del sistema, permite conocer la posición del nodo, realiza agregación de datos, tiene una buena escalabilidad y su estado de complejidad está dado por CH (cluster head) mientras que, por otra parte, no tiene en cuenta dentro su métrica la energía, el uso de múltiples rutas ni el QoS. Por el lado del protocolo TTDD se tiene que es jerárquico, que permite la movilidad del sistema,

permite conocer la posición del nodo, tiene en cuenta dentro su métrica la energía, tiene una baja escalabilidad, su estado de complejidad es moderado y podría permitir múltiples rutas, pero no hace agregación de datos ni QoS (Suamett, 2009).

El protocolo FLOC divide una WSN en clusters no sobrepuestos y aproximadamente del mismo tamaño. Cada cluster tiene un CH tal, que todos los nodos dentro de un radio m de distancia del CH pertenecen al cluster pero no más allá. Con esta distancia FLOC alcanza localmente efectos sobre la formación de cluster en cualquier parte de la red.

Tabla 1. Taxonomía para protocolos de enrutamiento en redes inalámbricas de sensores para aplicaciones de monitoreo de estructuras civiles

Protocolo	Clasificación	Movilidad	Conocimiento Posición	Agregación Datos	Escalable	Estado de Complejidad	Energía	Múltiples-Rutas	QoS	Total
FLOC [4] [5]	Jerárquica	Si	X	X	Buena	Cluster Head	N/A			17
TTDD [23]	Jerárquica	Si	X		Buena	Moderada	Limitada	Posible		15
LEACH [8]	Jerárquica	BS Fija		X	Buena	Cluster Head	Máxima			14
TEEN, APTEEN [14] [15]	Jerárquica	BS Fija		X	Buena	Cluster Head	Máxima			14
VGA [2]	Jerárquica	No		X	Buena	Cluster Head	N/A	X		14
Sensor Aggregate [6]	Jerárquica	Limitada		X	Buena	Baja	N/A			13
PEGASIS [13]	Jerárquica	BS Fija			Buena	Baja	Máxima			12
GAF [22]	Localización	Limitada			Buena	Baja	Limitada			11
SAR [18]	QoS	No		X	Limitada	Moderada	N/A		X	11
GEAR [24]	Localización	Limitada			Limitada	Baja	Limitada			10
HPAR [12]	Jerárquica	No			Buena	Baja	N/A			9
MECN, SMECN [11] [16]	Jerárquica	No			Baja	Baja	Máxima			8
SPAN [3]	Localización	Limitada			Limitada	Baja	N/A			8
GOAFR [10]	Localización	No			Buena	Baja	N/A			8
SPEED [7]	QoS	No			Limitada	Moderada	N A		X	8
MFR, DIR, GEDIR [20]	Localización	No			Limitada	Baja	N/A			7
SOP [21]	Jerárquica	No			Baja	Baja	N/A			7

Convenciones		
Valor parámetro	Alto/ deseable	3
	Medio/ Promedio	2
	Bajo/ No deseable	1
	Sin valor	0

Tomando una unidad de distancia para ofrecer un radio de comunicación confiable y $m+n$ (con $n < m$), como el máximo radio de comunicación, FLOC explota el modelo de radio de doble banda y alcanza la formación de los clusters en un tiempo constante a pesar del tamaño de la red. Esta estrategia minimiza el traslape entre clusters y se garantiza un límite sobre el número de clusters, en un contexto de clusters jerárquicos, que minimiza su cantidad a un nivel que permite que los cluster del siguiente nivel se formen a un bajo costo (Demirbas et ál, 2004).

El protocolo TTDD provee un envío de datos escalable a múltiples sinks, a diferencia de FLOC en el cual sólo se hace a un único CH al cual pertenece el nodo. Permite la movilidad de los sinks con lo que se generan cambios en la diseminación de los datos, lo cual hace que la información sobre la localización de cada sink sea propagada continuamente a través de los sensores de campo para que todos los sensores estén informados de la dirección en la cual podrán realizar reenvío de información; a diferencia de FLOC, en donde un CH al salir de un radio m de cobertura hace que se reorganicen de nuevo los clusters y los nodos sólo deben buscar el CH al que pertenecen.

Con TTDD cada fuente de datos construye una estructura grid, la cual le permite al sink móvil recibir continuamente datos haciendo solicitudes tipo inundación (*flooding*) en una celda local únicamente, explotando el hecho de que los sensores son estacionarios y manteniendo la información de la localización para construir y mantener el grid con baja sobrecarga. Por su parte, FLOC sólo utiliza dos niveles en la jerarquía del cluster, con lo cual el nodo únicamente envía datos al CH y esto le permite al nodo tener movilidad.

COMPARACION DE FLOC Y TTDD

Se utiliza la simulación como medio para comparar los protocolos de enrutamiento seleccionados, utilizando ciertos parámetros que son susceptibles de modificar

para tratar de tener las condiciones reales sobre las cuales se probarán estas redes inalámbricas de sensores. Con estas simulaciones se puede apreciar, bajo diferentes parámetros, el comportamiento de los protocolos de acuerdo a las métricas que se utilizarán para comparar y medir el desempeño de cada uno de éstos. El simulador utilizado fue Network Simulator NS2.

Se utilizan trabajos previos para establecer puntos de comparación entre los protocolos, es así que para TTDD se recrearon y utilizaron los resultados obtenidos en [23] y en el caso de FLOC se desarrolla una librería para NS2 que permita llevar a cabo la simulación y el análisis.

MÉTRICAS DE COMPARACIÓN

La aplicación presentada en este trabajo y la selección de los protocolos que más se ajustan a ella, hacen que se deba seleccionar ciertas métricas que permitan la comparación de los protocolos de enrutamiento acordes con las métricas que se utilizan para medir un SHM.

La tasa de efectividad y el retardo extremos a extremo muestran la efectividad en la recepción de los datos sensados, ya que si la totalidad de los datos generados por el sensor son recibidos en la estación base con un tiempo de viaje relativamente bajo, a nivel de procesamiento en datos no se van a presentar problemas de sincronización, los cuales pueden afectar a un sistema SHM que usa WSN. Por otro lado, la carga de enrutamiento muestra la eficiencia del protocolo, ya que ésta puede influir sobre las dos primeras métricas debido a que la generación de una gran cantidad de paquetes de enrutamiento puede llegar a congestionar la red y a que se presenten pérdidas de datos debido a la congestión en los buffers y múltiples accesos a la interfaz, por ende que el tiempo de viaje de los datos del origen al destino aumente considerablemente, con lo que se podrían presentar

pérdidas de paquetes de datos. También asociado a esto se encuentra la probabilidad de pérdida de datos, la cual, si aumenta, hace que la carga de enrutamiento aumente debido a las tareas que debe realizar el protocolo de enrutamiento para buscar nuevas rutas para enviar los datos del origen al destino.

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES ENTRE LOS PROTOCOLOS TTDD Y FLOC

Se presentan cuadros de resultados de las simulaciones realizadas en las cuales se tiene, en primer lugar, los datos del protocolo TTDD que están basados en las librerías desarrolladas para NS2 en (Ye et ál, 2002). A continuación se presentan los resultados

para el protocolo FLOC en el cual se hizo especial énfasis para observar su desempeño utilizando diferentes parámetros. Para las simulaciones de TTDD se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en (Ye et ál, 2002) y se realizó una validación de estos resultados acorde a los trabajos previos; también con estos mismos parámetros se llevan a cabo las simulaciones del protocolo FLOC. En el caso del protocolo FLOC, los trabajos anteriores se habían realizado sobre un simulador para WSN que se ejecuta sobre Matlab, llamado Prowler; así que para llevar a cabo las simulaciones se desarrolló una librería que le permitiera a NS2 simular este protocolo. A continuación se presenta una tabla con los parámetros utilizados en los protocolos TTDD y FLOC.

Tabla 2. Parámetros utilizados por los protocolos

Protocolo	TTDD	FLOC
Tiempo simulación (s)	200	200
Área simulación (m)	2000 X 2000, 1200 x 1200, 600 x 600	2000 X 2000, 1200 x 1200, 600 x 600
MAC	802.11 DCF	802.11
Cantidad nodos	200, 100, 50, 25	200, 100, 50, 25
Tasa de datos (evento/s)	1	1
Energía transmisión (W)	0,66	Características físicas de una interfaz de radio inalámbrica [25]
Energía recepción (W)	0,395	
Energía Idle (W)	0,035	
α (tamaño celda m)	600	
Modelo de movilidad	Radom Way Point	Radom Way Point
Velocidad sink (m/s)	10	5, 10, 15, 20
Pausa (s)	5	5
Sink	1 a 8	1 a 8
Source Data	1 a 8	1 a 8

En la comparación de los protocolos de enrutamiento para SHM se encontró, de acuerdo a los resultados obtenidos de nuestros dos protocolos, TTDD y FLOC, que éstos se comportaron de una determinada forma para unos parámetros específicos como la cantidad de nodos, para observar la densidad, y el área de simulación, para mirar la extensión.

Esto se puede observar en las siguientes tablas, en donde se encuentran los resultados consolidados para cada uno de los parámetros que se midieron en cada una de las simulaciones hechas para los protocolos.

Dentro de las tablas de resultados se pueden apreciar las columnas que reflejan los resultados consolidados de las simulaciones realizadas y dentro de las cuales

se tiene las siguientes: Protocolo, en esta columna se muestra el protocolo que de acuerdo a la cantidad de Nodos y al Área de simulación obtuvo un mejor comportamiento (entre los protocolos examinados TTDD y FLOC) y, para determinar esto, se tomó la medida de la métrica examinada y se buscó el mejor valor dentro de las simulaciones realizadas para cada uno de los protocolos de interés, de donde se obtuvo una diferencia entre estas dos, la cual se puede apreciar en la columna Dif. Por último, se tiene una columna en la cual se hace explícito si en el escenario de simulación los nodos eran móviles o estáticos. La columna de Dif se da en términos de porcentaje para todas las métricas, que son la tasa de efectividad, la carga de enrutamiento y el promedio de retardo de extremo a extremo de paquetes de datos.

De acuerdo al resultado de la tabla 2, para la tasa de efectividad se encuentra que TTDD predomina para áreas extensas, mientras que FLOC se muestra con una efectividad comparativamente alta para áreas pequeñas, con lo cual se puede decir que el parámetro de efectividad está relacionado con el área sobre la cual se despliegue la WSN. Cuando se observa la tabla 3, el promedio de retardo extremo a extremo de paquetes de datos, se sigue presentando el mismo comportamiento que con la tasa de efectividad; además de esto se puede ver cómo la diferencia de la métrica de retardo llega hasta el orden de los 24 segundos, lo que a su vez tiene un gran impacto sobre este tipo de aplicaciones que son sensibles a la sincronización de los nodos que adquieren los datos.

En la tabla 4, se tiene que FLOC es el protocolo que menor sobrecarga de enrutamiento genera sobre la red y dentro de lo cual se pueden llegar a observar valores cercanos a los cuatrocientos paquetes de enrutamiento por cada paquete de datos que efectivamente llega al destino. Estos valores tan elevados hacen que la latencia al interior de la red aumente y por ende se puedan producir pérdidas de paquetes de datos por colisiones o por tiempo de vida del paquete agotado;

además esto tiene un gran impacto sobre el tema de la sincronización de los sensores que están adquiriendo los datos de interés. Otro efecto que tiene esta sobrecarga de enrutamiento y la latencia es sobre el tiempo de vida útil de la batería, que se ve impactada por estas tareas adicionales generadas por dichos fenómenos.

Ahora, en las configuraciones donde se comporta bien cada uno los protocolos simulados, se puede hacer una correlación directa entre el protocolo y su aplicación a los sistemas de SHM. Entonces, utilizamos FLOC si se desea monitorear un área por encima de los 600 m X 600 m y con mínimo 50 nodos; si se desea monitorear un área por encima de los 1200 m X 1200 m se debe utilizar TTDD con mínimo 100 nodos; si el área a monitorear es mayor a 2000 m X 2000 m se recomienda utilizar TTDD con mínimo 200 nodos.

Tabla 3. Resultados comparativos de las simulaciones para la tasa de efectividad

Protocolo	Nodos	Área (m)	% Dif.	
TTDD	200	2000 X 2000	30,0	Estático
	100	1200 X 1200	23,0	Estático
	50	1200 X 1200	53,0	Estático
	25	1200 X 1200	15,0	Estático
	200	2000 X 2000	40,0	Móvil
	50	1200 X 1200	14,0	Móvil
	50	600 X 600	6,0	Móvil
	25	1200 X 1200	25,0	Móvil
FLOC	100	600 X 600	95,0	Estático
	50	600 X 600	49,0	Estático
	25	600 X 600	94,0	Estático
	100	600 X 600	95,0	Móvil
	25	600 X 600	95,0	Móvil
TTDD y FLOC	100	1200 X 1200	0,0	Móvil

Tabla 4. Resultados comparativos de las simulaciones para el promedio de retardo extremo a extremo de paquetes de datos

Protocolo	Nodos	Área (m)	% Dif.	
TTDD	200	2000 X 2000	34185,7	Estático
	100	1200 X 1200	328,5	Estático
	50	1200 X 1200	6000,0	Estático
	50	600 X 600	70,0	Estático
	25	1200 X 1200	45614,2	Estático
	200	2000 X 2000	18150,0	Móvil
	100	1200 X 1200	900,0	Móvil
	50	1200 X 1200	5400,0	Móvil
	50	600 X 600	5100,0	Móvil
	25	1200 X 1200	26000,0	Móvil
FLOC	100	600 X 600	10,0	Estático
	25	600 X 600	30,0	Estático
	100	600 X 600	5,0	Móvil
	25	600 X 600	10,0	Móvil

Tabla 5. Resultados comparativos de las simulaciones para la carga de enrutamiento

Protocolo	Nodos	Área (m)	% Dif.	
FLOC	200	2000 X 2000	30,0	Estático
	100	1200 X 1200	49,1	Estático
	100	600 X 600	0,5	Estático
	50	1200 X 1200	38,0	Estático
	50	600 X 600	399,5	Estático
	25	1200 X 1200	5,0	Estático
	25	600 X 600	0,4	Estático
	200	2000 X 2000	29,0	Móvil
	100	1200 X 1200	18,0	Móvil
	100	600 X 600	0,8	Móvil
	50	1200 X 1200	16,9	Móvil
	50	600 X 600	9,5	Móvil
	25	1200 X 1200	5,2	Móvil
	25	600 X 600	0,4	Móvil

CONCLUSIONES

El desarrollo de los SHM se ha centrado en el diseño de los sensores para que su grado de sensibilidad y precisión sean similares a los sensores tradicionales cableados, por lo cual se han dejado de lado la selección de los protocolos de enrutamiento más adecuados para este tipo de aplicación, puesto que dentro de los trabajos previos que se han realizado no se había tenido en cuenta este aspecto.

Al determinar las condiciones bajo las cuales operan las aplicaciones de SHM se pudo hacer una selección de los protocolos de enrutamiento más apropiados, dentro de los cuales se encontraron TTDD y FLOC.

Con los resultados obtenidos por medio de simulaciones se pudieron establecer los parámetros dentro de los cuales cada uno de los protocolos, TTDD y FLOC, tiene un mejor desempeño. Es así como TTDD se comporta bien para áreas extensas y FLOC lo hace para áreas pequeñas.

Dentro de la revisión de los trabajos previos se encontró que TTDD es el protocolo más usado para este tipo de aplicación, sin embargo con este trabajo se muestra cómo la selección del protocolo tiene un impacto directo en el desempeño de la aplicación de SHM.

REFERENCIAS

- Al-Karaki, J. y Kamal, A. (2004): "Routing Techniques In Wireless Sensor Networks: A Survey". *IEEE Wireless Communications*. Volumen 11. 6-28.
- Al-Karaki, J. et ál. (2004): "Data Aggregation In Wireless Sensor Networks - Exact And Approximate Algorithms". *Proceedings Of IEEE Workshop On High Performance Switching And Routing (HPSR)*. 241-245.
- Chen, B. (2002): "Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm For Topology Maintenance In Ad Hoc Wireless Networks". *Wireless Networks*. Volumen 8. 5 481-494.
- Demirbas, M. (2004). "Scalable Design Of Fault-Tolerance For Wireless Sensor Networks". Thesis (Doctor Of Philosophy). Ohio: The Ohio State University. Graduate School. 163 p.
- Demirbas, M. et ál. (2004): "Floc: A Fast Local Clustering Service For Wireless Sensor Networks". *Workshop On Dependability Issues In Wireless Ad Hoc Networks And Sensor Networks (DIWANS/DSN)*.
- Fang, Q. et ál. (2003): "Lightweight Sensing And Communication Protocols For Target Enumeration And Aggregation". *Proceedings Of The 4th ACM International Symposium On Mobile Ad Hoc Networking And Computing (MOBIHOC)*. 165-176.
- He, T. et ál. (2003): "SPEED: A Stateless Protocol For Real-Time Communication In Sensor Networks". *Proceedings Of International Conference On Distributed Computing Systems*. 46-55.
- Heinzelman, W. (2000): "Energy-Efficient Communication Protocol For Wireless Microsensor Networks". *Proceedings Of The 33rd Hawaii International Conference On System Sciences (HICSS)*. Volumen 8. 8020-8039.
- Kottapalli, V. et ál. (2003): "Two-Tiered Wireless Sensor Network Architecture For Structural Health Monitoring". *SPIE's 10th Annual International Symposium On Smart Structures And Materials*. Volumen 5057. 8.
- Kuhn, F. et ál. (2003): "Worst-Case Optimal And Average-Case Efficient Geometric

- Ad-Hoc Routing”. *Proceedings Of The 4th ACM International Conference On Mobile Computing And Networking*. 267-278.
- Li, L. y Halpern, J. (2001): “Minimum-Energy Mobile Wireless Networks Revisited”. *IEEE International Conference On Communications (ICC)*. Volumen 1. 278-283.
- Li, Q. (2001): “Hierarchical Power-Aware Routing In Sensor Networks”. *Proceedings Of The DIMACS Workshop On Pervasive Networking*.
- Lindsey, S. y Raghavendra, C. (2002): “Pegasis: Power-Efficient Gathering In Sensor Information Systems”. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. Volumen 3. 1125-1130.
- Manjeshwar A. y Agarwal, D. (2001): “Teen: A Routing Protocol For Enhanced Efficiency In Wireless Sensor Networks”. *1st International Workshop On Parallel And Distributed Computing Issues In Wireless Networks And Mobile Computing*. 2009-2015.
- Manjeshwar A. y Agarwal, D. (2002): “Apteen: A Hybrid Protocol For Efficient Routing And Comprehensive Information Retrieval In Wireless Sensor Networks”. *Proceedings International Parallel And Distributed Processing Symposium, IPDPS*. 195-202.
- Rodoplu, V. y Meng, T. (1999): “Minimum Energy Mobile Wireless Networks”. *IEEE Journal Selected Areas In Communications*. Volumen 17. 8 1333-1344.
- Sazonov, E. et ál. (2007): “Wireless Intelligent Sensor Network For Autonomous Structural Health Monitoring”. *Smart Structures And Materials 2004: Smart Sensor Technology And Measurement Systems*. Volumen 5384. 305-314.
- Sohrabi, K. et ál. (2000): “Protocols For Self-Organization Of A Wireless Sensor Network”. *IEEE Personal Communications*. Volumen 7. 5 16-27.
- Spencer, B. et ál. (2004): “Smart Sensing Technology: Opportunities And Challenges”. *Structural Control And Health Monitoring*. Volumen 11. 4 349-368.
- Stojmenovic, I. y Lin, X. (1999): “Gedir: Loop-Free Location Based Routing In Wireless Networks”. *IEEE Transaction International Conference On Parallel And Distributed Computing And Systems*. Volumen 12. 10 1023-1032.
- Subramanian, L. y Katz, H. (2000): “An Architecture For Building Self Configurable Systems”. *Proceedings Of IEEE/ACM Workshop On Mobile Ad Hoc Networking And Computing*. 63-73.
- Xu, Y. et ál. (2001): “Geography-Informed Energy Conservation For Ad-Hoc Routing”. *Proceedings Of The Seventh Annual ACM/IEEE International Conference On Mobile Computing And Networking*. 70-84.
- Ye, F. et ál. (2002): “A Two-Tier Data Dissemination Model For Large-Scale Wireless Sensor Networks”. *Proceedings Of ACM/IEEE MOBICOM*. 148-159.
- Yu, Y. (2001): “Geographical And Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol For Wireless Sensor Networks”. *UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023*.
- Tuch, B. (1993): “Development Of Wave Lan, An Ism Band Wireless Lan”. *AT&T Tech Journal*. Volumen 72. 4 27-33.
- Saumett, M. “Redes Inalámbricas De Sensores Para Sistemas De Monitoreo De Estructuras Civiles”. Tesis de Maestría. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación. 2009.