



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Maestría en Ciencias de la Computación

Propuesta de tema de tesis:

Diseño de una red de comunicación de sensores
inalámbricos para la identificación de sistemas
estructurales

Presenta: Ing. Benjamín Carpio Flores

Matricula: 203280041

Asesores:

Dr. Ricardo Marcelín Jiménez

Dr. Javier Ramírez Rodríguez

Dr. Manuel E. Ruiz-Sandoval H.

Trimestre 05 -P

Junio-2005

Diseño de una red de comunicación de sensores inalámbricos para la identificación de sistemas estructurales

INTRODUCCIÓN

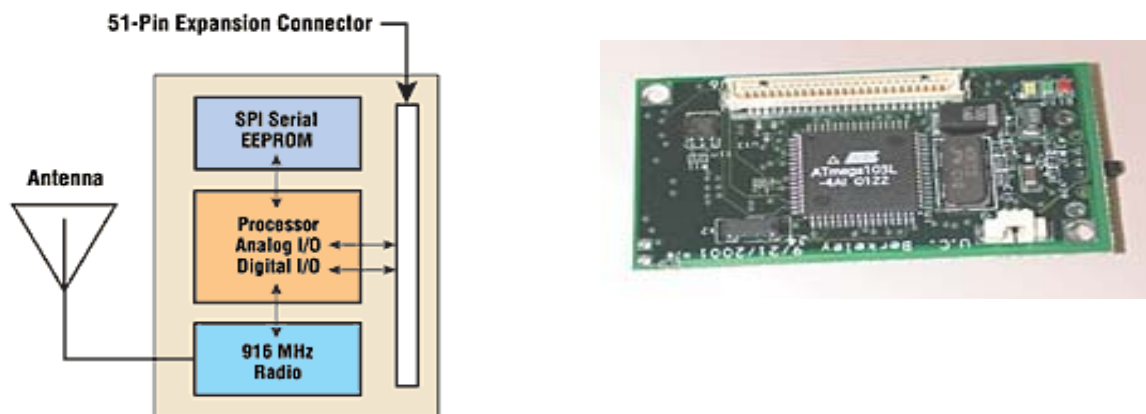
La medición continua de la respuesta dinámica de las estructuras a través de sensores proporciona información útil para la identificación de sistemas estructurales. Mediante el proceso de identificación estructural es posible sentar las bases para la caracterización de daño estructural, al comparar sus características antes y después de un evento sísmico, o después de un largo periodo de uso. En general las características dinámicas son:

- frecuencias resonantes
- formas modales
- amortiguamiento

Las características dinámicas se pueden determinar a través de mediciones de aceleraciones registradas sobre la estructura. Una gran cantidad de estudios pueden realizarse a partir del registro de estas características dinámicas a lo largo de la vida útil de la estructura. Por ejemplo, un análisis estadístico de todas las muestras que se obtengan pueden ser usadas en la Detección de Daño Estructural.

Para eficazmente tener el registro de una estructura se prevé el uso de una gran cantidad de sensores, los cuáles periódicamente producen información relevante que es enviada a un nodo recolector para su procesamiento. Sin embargo, los sistemas tradicionales de redes alambradas no presentan una solución adecuada, pues los sensores utilizados carecen de capacidad de procesamiento de información. Además, los cables son vulnerables a falla y la red en general tiene altos costos de instalación y mantenimiento.

Las redes inalámbricas presentan una solución alternativa. Permiten incrementar la funcionalidad al contar con capacidad computacional local, así como disminuir costos de instalación y mantenimiento. Los propios sensores constituyen nodos muy económicos, cada uno de los cuales tiene su propia memoria, un procesador, un radio de corto alcance y son alimentados por baterías. La figura 1 muestra el sensor inalámbrico MICA2 desarrollado por la Universidad de Berkeley:



DATOS TÉCNICOS	
Memoria flash	128 Kb
Memoria SRAM	4 Kb
Rango de transmisión	100 metros
Consumos de energía:	
Procesamiento	0.024 W
Transmisión	0.036 W
Recepción	0.024 W
medición (sensor)	0.015 W
Capacidad batería	10 J
Ancho de banda	40 kbps a 916 MHz

Figura 1: Sensor inalámbrico MICA2

De la tabla anterior se puede apreciar las grandes limitaciones de energía y de ancho de banda que se disponen para poder establecer una aplicación duradera con sensores inalámbricos. El cambio de baterías puede resultar una tarea muy costosa y a veces imposible de efectuar debido al lugar donde fueron colocados los sensores; por ejemplo, algunos sensores pudieran estar empotrados en concreto.

Inicialización.

El primer problema que se debe resolver al colocar los sensores en la estructura es la inicialización de la red. (Wattenhofer, R. et al en [4]) refiere este proceso como la transición de un estado no estructurado a uno estructurado de la red a partir del cuál los sensores puedan realizar sus tareas. Cada uno de los sensores que se va activando necesita determinar su posición física, detectar a sus vecinos, coordinar el envío de mensajes para prevenir problemas de colisión y formar grupos con líderes encargados de enviar la información a la base central de procesamiento. La auto-organización de una Red Inalámbrica de Sensores (RIS) es la habilidad para efectuar los cambios en su organización sin la intervención humana, con el fin de hacerla escalable y robusta a los cambios en la topología y conectividad de la red, en otras palabras, auto-configurable (Silva, F. et al, en [8]).

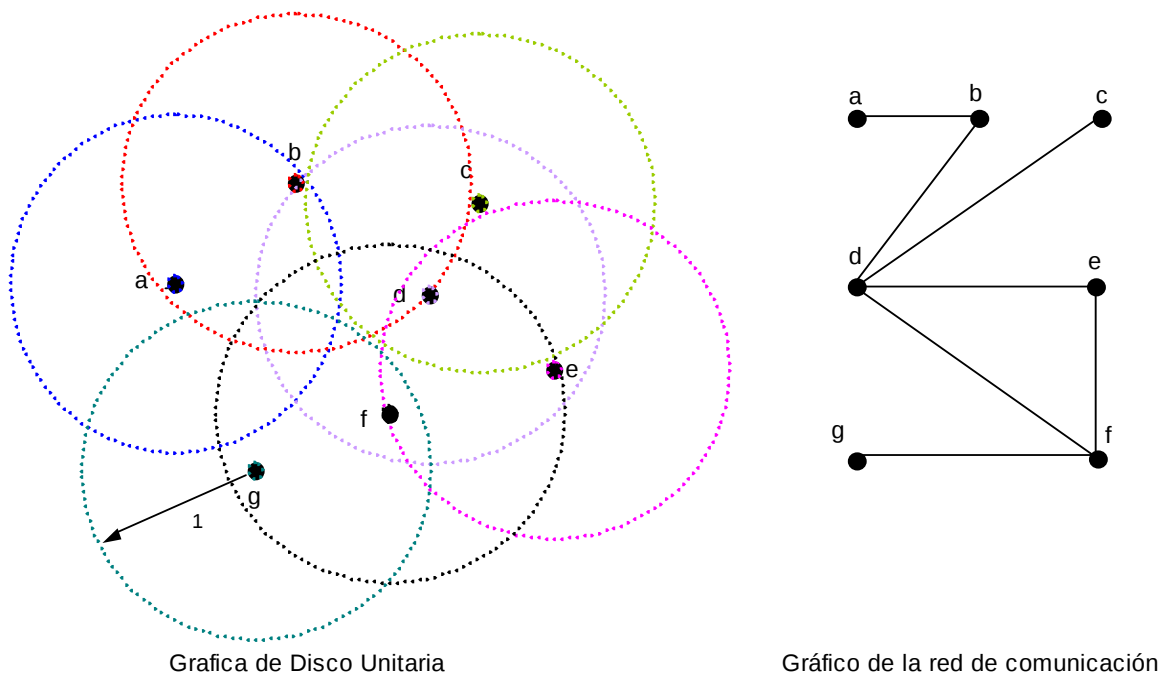


Figura 2.- Gráfica de Disco Unitaria, conocida también como Gráfica de Distancia Unitaria.

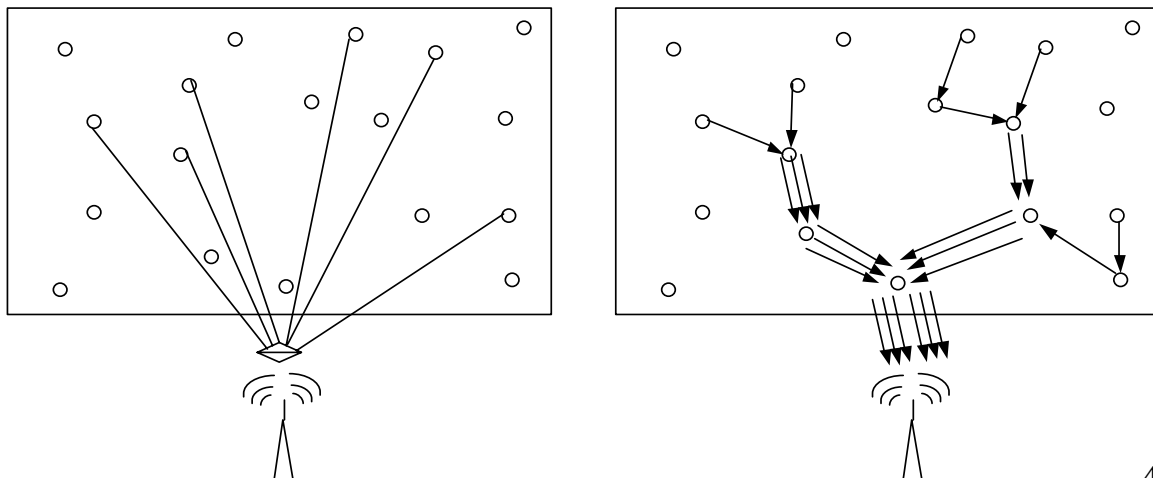
Una red de comunicaciones puede ser representada por una gráfica $G=(V,E)$, donde V es un conjunto de vértices con coordenadas (x,y) representando a la posición de un sensor en la estructura. El conjunto E contiene las aristas que unen pares de vértices y que representan enlaces de comunicación efectiva. El modelo más

empleado es el de la Gráfica de Disco Unitaria (figura 2), donde el alcance de transmisión de un sensor se representa por un disco de radio normalizado a 1; si un nodo y está a una distancia $d \leq 1$ de un nodo x , entonces existe una arista entre estos 2 nodos; pero si el nodo y está a una distancia $d > 1$, entonces está fuera del alcance del sensor x , y no se traza una arista entre ellos.

Topologías de red y encaminamiento

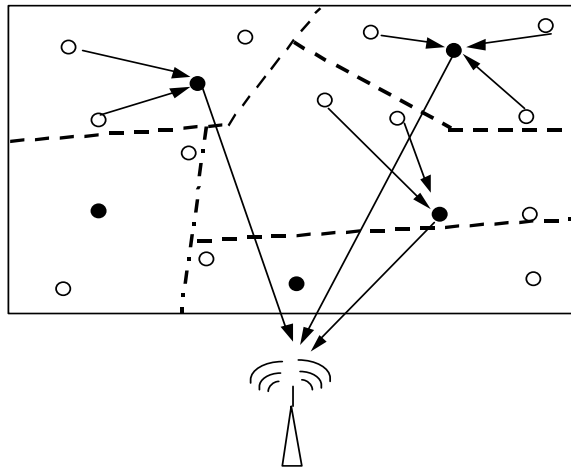
Debido a las limitaciones de transmisión y de energía se requieren técnicas de encaminamiento multisalto (*multi-hop*) para transmitir datos desde todos los nodos fuente hacia la base central de procesamiento de información, para lo cual es de gran ayuda encontrar un árbol generador mínimo que identifique a los líderes o jefes de grupo (*head clusters*) que enviarán a la base los datos de su grupo. Un árbol generador es una subgráfica conexa que contiene un subconjunto de aristas y todos los nodos o vértices de su gráfica original. Para optimizar el envío de los paquetes de datos se utilizan algoritmos de elección de la ruta más corta, como el algoritmo de Dijkstra, para minimizar el costo de transmisión de bits por cada enlace utilizado.

En la figura 3 se muestran algunas arquitecturas de red para las RIS. En la red de salto sencillo sin agrupamiento a), cada nodo envía datos directamente a la base, y en la red de salto sencillo con agrupamiento c), lo hacen a través del líder del grupo. Este tipo de redes se utiliza para áreas pequeñas de cobertura. En los tipos b) y d) se cubren zonas más amplias porque se crean rutas a través de otros nodos hacia la base central. Se observa también cómo las redes con agrupamiento pueden reducir el tráfico de datos y el número de transmisiones.

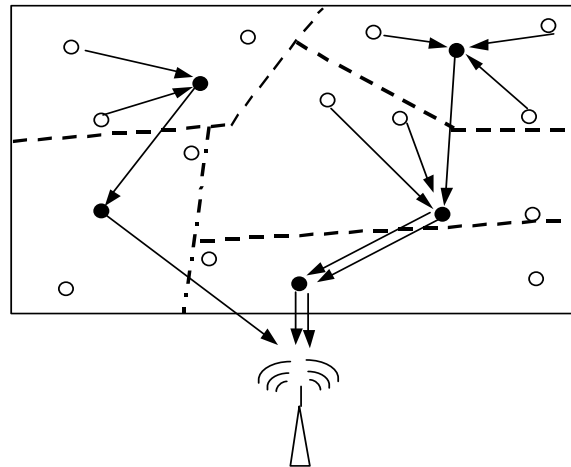


a) Red de salto sencillo, sin agrupamiento

b) Red salto múltiple, sin agrupamiento



c) Red de salto sencillo, con agrupamiento



d) Red salto múltiple, con agrupamiento

Figura 3.-Arquitecturas de red

Agregación de datos

Debido a que varios sensores traslapan su espacio de detección, los datos están a menudo correlacionados y se requiere que sean procesados mientras fluyen hacia la base central de procesamiento, de tal forma que ésta sólo reciba la información relevante. A esta técnica se le conoce como agregación de datos dentro de la red. Adicionalmente, los nodos pueden aplicar una función de codificación o compresión de datos como suma, resta, máximo, mínimo, media, desviación estándar, coordenadas extremas, etc., a los datos disponibles, para reducir el tamaño del paquete que enviarán al siguiente nodo y así contribuir a la reducción de tráfico en la red y a la disminución en el uso de energía. Las estrategias de codificación pueden agruparse en dos categorías: de entrada múltiple y de entrada sencilla. En la primera, la agregación de datos en un nodo sólo se realiza si está presente información de varios nodos; y en la segunda, la agregación de datos en un nodo sólo depende de la información de algún otro nodo (Rickenbach, P. y Wattenhoffer, R., en [7]).

El estándar IEEE 802.15.4

El interés creciente en redes inalámbricas de sensores llevó a la creación de un grupo de trabajo por parte del Comité de estandarización de la IEEE, el cuál

desarrolló el estándar IEEE 802.15.4 (*draft*): "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)". La norma define la capa física (PHY) y una subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC) para redes inalámbricas personales de baja tasa (LR-WPANS). Este tipo de redes se distingue de otras redes inalámbricas estándar por su baja tasa de datos, bajo consumo, bajo costo, son auto-configurables y por sus topologías flexibles. El estándar soporta los tipos de topologías en estrella y "peer to peer" (figura 4). La estructura lógica de esta última se define en la capa de red, en la cuál trabajan otros grupos como ZigBee Alliance.¹

Red en estrella: La comunicación es controlada por un único coordinador, el cuál envía señales de radio para las tareas de sincronización y agrupamiento. Es una excelente alternativa para aplicaciones punto a punto que requieren un bajo costo.

Redes "peer to peer": Estas topologías son aplicables cuando las distancias de comunicación exceden los 10 metros. Entre las variantes se citan las redes malladas, redes agrupadas, y redes agrupadas en árbol.

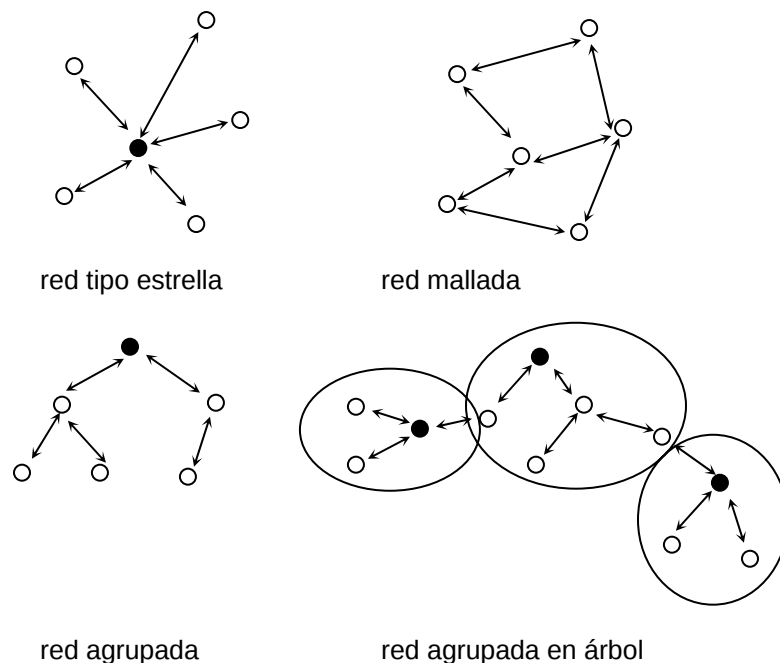


Figura 4.- Topologías de red

¹ ZigBee Alliance es una asociación no lucrativa de compañías que colaboran para habilitar productos de control y supervisión de redes inalámbricas, basándose en un estándar abierto global (Open Source).

En resumen, la aplicación de redes inalámbricas para la identificación de sistemas estructurales no ha sido estudiada. Algunos de los retos en su implementación son los siguientes:

- La red deberá ser auto-configurable y robusta, con diferentes rutas alternativas en caso de falla de un sensor.
- La utilización de un gran número de sensores generará una vasta información que puede saturar la red. Se deberá buscar métodos de agregación de datos que permitan disminuir la cantidad de información enviada.
- La sincronización de los relojes de cada sensor deberá estar dentro de límites aceptables.

Por último, es necesario mencionar que éste es un proyecto multidisciplinario, en el que intervienen dos grupos de trabajo:

Grupo 1:

Dr. Manuel E Ruiz Sandoval Hernández (asesor)

Dr. Ricardo Marcelin Jiménez (asesor)

Ing. Gregorio Xavier Argueta Ortiz (tesista, Maestría en Ingeniería Estructural)

Grupo 2:

Dr. Javier Ramírez Rodríguez (asesor)

Dr. Ricardo Marcelin Jiménez (asesor)

Ing. Benjamín Carpio Flores (tesista, Maestría en Ciencias de la Computación)

Las actividades de cada grupo se describen en la el apartado "Metodología".

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Wattenhofer, R., et al [4] proponen un algoritmo de agrupamiento que considera los problemas de inicialización de una red inalámbrica. Ellos proponen un modelo que considera los problemas más comunes en el proceso de inicialización: el problema de la terminal oculta y la asincronía en el activamiento de los sensores. El algoritmo desarrollado no depende de que los nodos tengan un mecanismo confiable de detección de colisiones. El modelo de la red está basado en una Gráfica de Disco quasi-Unitaria (figura 5). En este tipo de gráfica, existe una arista entre dos nodos si la distancia Euclideana es menor o igual a d ($0 \leq d \leq 1$). Dentro de este radio d , los nodos tienen comunicación casi perfecta (la señal es bastante fuerte). Luego, entre d y 1, la existencia de una arista no está determinada, porque puede o no haber comunicación; y mas allá de una cierta distancia (normalizada a 1), la recepción es imposible, debido a restricciones físicas.

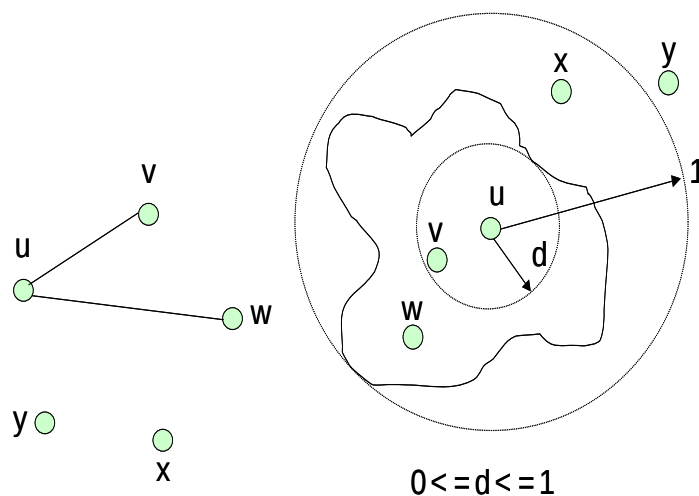


Figura 5: Modelo de Gráfica de Disco quasi Unitaria.

Los autores también proponen un algoritmo eficiente que resuelve el problema de agrupamiento (clustering) en ausencia de una capa de Control de Acceso al Medio. Y finalmente describen un protocolo, basado en el algoritmo propuesto, para establecer rápidamente un esquema sincronizado de “escuchar y dormir” entre los nodos de un grupo.

Según los propios autores, sería deseable que se incorporaran al modelo más restricciones que lo acercaran más a la realidad, por ejemplo, el no depender de que los nodos conozcan a priori el número máximo de nodos que pueden llegar a agruparse.

Wattenhofer, R., y Rickenbach, P. en [7] proponen dos algoritmos para el problema de recolección de datos correlacionados en una RSI consumiendo el mínimo de energía. Su modelo se basa en una gráfica simétrica para modelar la red, ya que los nodos receptores implementan el reconocimiento de mensajes y consideran que los costos de transmisión de bits son iguales en ambos sentidos. En el modelo, los nodos pueden ajustar su intensidad de transmisión con el objeto de ahorrar energía. Los autores trabajaron sobre la estrategia de codificación sencilla y distinguen dos clases: codificación propia y codificación sencilla. En la codificación propia, los datos son codificados sólo en los nodos en donde se producen y sólo bajo la presencia de datos de al menos algún otro nodo. En la codificación externa, un nodo es capaz de codificar sólo información de otros nodos usando los propios. Una vez que un paquete ha sido codificado en algún nodo, éste no puede ser codificado otra vez por algún otro nodo en su ruta hacia el nodo recolector. Además es posible que un nodo mande directamente su información al nodo recolector sin que ésta sea codificada. En este caso, se considera que el nodo recolector es el nodo codificador.

Lee, S., y Chung, T. en [5] desarrollaron el algoritmo CODA (Cluster-based self-Organizing Data Aggregation) en donde los nodos son agrupados cada vez que envían información al nodo recolector de acuerdo a la afinidad de los datos medidos, y no tanto por su localización física. Se basan para ello en los mapas auto-organizativos de Kohonen [2]. Se requiere que los nodos conozcan su localización y entrenar a los nodos previamente a la instalación, para que sean capaces de clasificar los datos medidos y entonces poder reagruparse mediante partición o fusión, según sea la afinidad de los datos. De esta forma se logra la

conservación de la calidad de los datos, la reducción del tráfico de datos y el uso eficiente de la energía.

Iyengar, S. y Krishnamachari, B. en [3] desarrollaron un algoritmo para la extracción de datos que es tolerante a fallas. Aseguran que un 90% de las fallas que se presentan en la medición pueden ser corregidas aún cuando un 10% de los sensores fallen. La tarea que consideran no es precisamente la medición continua, sino la extracción de datos relevantes, es decir, en cada vez sólo se enviarán a la base central los datos relevantes, previamente definidos. Para lograr el objetivo es necesario que los sensores puedan distinguir entre fallas y lecturas relevantes, ya que mediciones altas o bajas pueden corresponder a ambos casos. Los autores muestran que las lecturas relevantes, a diferencia de las fallas en la medición, están frecuentemente correlacionadas, es decir, que otros sensores las registrarán también. Los sensores que han registrado datos importantes son entonces agrupados mediante un esquema en donde cada sensor tiene un ID asignado, y se escoge cómo líder o jefe de grupo, encargado de enviar los datos de su grupo al nodo recolector por la ruta más corta, al de menor ID. Después se encuentra un árbol generador para que todos los nodos envíen la información al líder.

Silva, F. et al en [8] proponen una integración de los servicios de auto-organización y auto-configuración (mantenimiento de la zona cubierta), a través de una serie de políticas que describen el comportamiento de los nodos en una red heterogénea y balanceada. La red es heterogénea porque se consideran nodos líderes de grupo con mayor capacidad de hardware, debido a que realizan un mayor número de tareas. Estos nodos reciben mensajes de los nodos a su alcance conteniendo la posición en los ejes X y Y. Los líderes integran una lista con nodos activos y nodos de respaldo; luego las intercambian y negocian aquellos que sean comunes. Los nodos de respaldo se determinan con un algoritmo que toma como criterio la cercanía entre nodos que monitorizan zonas muy cercanas. Los nodos de respaldo contribuyen a balancear la red, porque se desactivan sensores en zonas de alta densidad y también contribuyen a que la red soporte las fallas de algunos sensores,

ya que el nodo líder puede entonces habilitar nodos de respaldo cercanos a los nodos fallados.

Achir, M. y Ouvry L. en [1] presentan un algoritmo de encaminamiento múltiple, el cual aprovecha diferentes rutas para transmitir datos, con el fin de garantizar una repartición del consumo de energía en todos aquellos nodos que pueden "rutear" datos al nodo destino. El problema que los autores identifican es los protocolos de encaminamiento actuales es que tratan de encontrar la ruta más barata o más corta, y entonces la utilizan para cada transmisión. Consideran que esta no es la mejor estrategia para extender el período de vida de la red. El protocolo consta de tres pasos para establecer una ruta desde un nodo fuente a un nodo destino que procesa los datos, y que generalmente es la base central. En el primer paso, la fuente transmite por difusión un paquete de solicitud llamado RREQ (Route REQuest) y que se propaga por todos los nodos hasta llegar al destino, el cuál recibe varios paquetes procedentes de la misma fuente, y han viajado por diferentes rutas. En el segundo paso, el destino calcula el costo de las rutas que siguió cada paquete. En el tercer paso, el destino responde a la fuente enviando un paquete RREP (Route Reply) a través de una ruta específica. De esta forma, el nodo fuente tiene varias rutas que puede elegir de forma aleatoria en cada transmisión futura.

JUSTIFICACIÓN

- Las redes inalámbricas permiten la reducción de costos de instalación y mantenimiento.
- La rápida implementación de la RIS permite utilizarlas en situaciones de emergencia.
- Las RIS son fácilmente escalables
- La aplicación de redes de sensores inalámbricas para la monitorización de estructuras no ha sido estudiada.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Diseñar una red inalámbrica robusta de sensores, que efectúe la tarea de recolección de datos dinámicos (aceleraciones) de una estructura civil, optimizando los recursos de energía.

Objetivos Particulares:

- Construir algoritmos robustos y flexibles que optimicen las tareas de:
 - inicialización
 - encaminamiento
 - agregación de datos
- Modelar los algoritmos propuestos en un simulador para su evaluación

METODOLOGÍA

1.- Investigación del estado del arte del diseño de redes inalámbricas de sensores.

2.- Identificación de los requerimientos de la red. Se han identificado algunos de ellos, por ejemplo:

- La colocación de los sensores no será aleatoria, como se hace en la mayoría de las aplicaciones. La distribución de los sensores estará de acuerdo a la instrumentación que determine el Grupo 1.
- Se requiere que los nodos puedan inferir su posición.
- Los nodos serán fijos.

3.- Utilizar el modelo de capas para definir la arquitectura de red. Es un modelo basado en las técnicas de divide y vencerás. Cada capa es un nivel más básico al superior y proporciona servicios que le permiten resolver un problema más grande. La arquitectura OSI (Open Systems Interconnection) es un modelo teórico creado por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) para redes alambreadas, que define 7 capas. Con base a este modelo, se identifican 4 capas para el diseño de la RIS:

- Capa física (implementada por el propio sensor)
- Capa de enlace (inicialización)
- Capa de red (encaminamiento)
- Capa de aplicación (agregación de datos)

En las RIS, los protocolos que se establecen en cada una de las capas deben de ser de baja complejidad para cuidar el consumo de energía.

4.- Los algoritmos estudiados se adaptarán a los requerimientos que establezca el Grupo 1.

5.- Aplicación de técnicas de optimización para encontrar las mejores soluciones:
Las mejores rutas al costo mínimo, árboles generadores mínimos, etc.

Y en general, se buscará optimizar la siguiente función:

Minimizar

$$C(G) = \sum_{e \in E} w(e) f(e)$$

$G=(V,E)$

$f(e)$: número de bits transmitidos a través de la arista e

$V \subset \mathbb{R}^2$

$w(e)$: costo de transmitir un bit de un nodo v_i a un nodo v_j

$E \subset V^2$

6.- Aplicación de las técnicas de programación orientada a objetos para incorporar los algoritmos al simulador de algoritmos distribuidos.

Actividades:

- Determinar las variables a medir, tiempos de muestreo, análisis de la información. **Grupo 1.**
- Investigar y proponer algoritmos para tratar los problemas de inicialización, encaminamiento, agregación de datos y mantenimiento de la red (red robusta tolerante a fallas), que conducen a problemas clásicos del cómputo distribuido: sincronización, construcción de un árbol generador, recorrido, difusión, elección del líder. **(Grupo 1 y 2)**
- Proponer diferentes gráficas para la modelación. **(Grupo 1)**
- Programar el modelo en un ambiente simulado. **(Grupo 2)**
- Evaluar y seleccionar los algoritmos de acuerdo a criterios como: **(Grupo 1)**
 - a) costo en mensajes: Cuántos mensajes deben intercambiarse para establecer la red, o para que se recupere de una falla. El tiempo de inicialización de la red es el que generalmente consume más recursos de energía.
 - b) Costo en tiempo.
 - c) Número crítico de fallas: Cuántas fallas es capaz de soportar antes de quedar fuera de operación.

CALENDARIZACIÓN

	Trimestre I											Trimestre II										
Actividades / semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Revisión Estado del Arte	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■				■	■	■	■	■		
Inicialización: Implementación de algoritmos		■	■	■	■	■		■														
Evaluación de algoritmos							■															
Enrutamiento: Implementación de algoritmos									■	■	■	■										
Modificaciones y/o cambios sugeridos														■								
Agregación de datos: Implementación de algoritmos															■	■	■					
Modificaciones y/o cambios sugeridos																			■			
Integración de algoritmos																					■	■
Escribir reporte de tesis	■	■					■	■					■	■				■	■	■	■	■

RECURSOS

- PC disco duro 12G, 1GHz, 256 RAM, Sistema Operativo LINUX
- Compilador GNU C++
- Simulador de algoritmos distribuidos [6]

Se dispone de todos los recursos citados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Achir, M., Ouvry, L.: A routing Protocol for Wireless Ad Hoc Sensor Networks: Multi-Path Source Routing Protocol. 4th International Conference on Networking, Reunion Island, France, April 17-21, 2005, LNCS 3421, pp. 442-453, 2005. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- [2] Kohonen, T.: The self-organizing map. Proc. of the IEEE (1990) 1464-1480
- [3] Krishnamachari, B., Iyengar, S.: Efficient and Fault-Tolerant Feature Extraction in Wireless Sensor Networks. Information Processing in Sensor Networks 2003, LNCS 2634, pp. 488-501, 2003. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003
- [4] Kuhn, F., Moscibroda, T., Wattenhofer, R: Initializing Newly Deployed Ad Hoc and Sensor Networks. 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking MobiCom'04, Sep. 26-Oct. 1, 2004, Philadelphia, Pennsylvania, USA
- [5] Lee, S., Chung, T.: Data Aggregation for Wireless Sensor Networks Using Self-organizing Map. T.G. Kim (Ed.). 13th International Conference on AI, Simulation, and Planning in High Autonomy Systems AIS 2004, LNAI 3397, pp. 508-517, 2005. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- [6] Marcelin, R., Esquivel, R., Rajsbaum, S.: A flexible simulator for distributed algorithms. Fourth Mexican International Conference on Computer Science. IEEE Computer Society, enc, vol. 00, p. 176, Fourth 2003.
- [7] Rickenbach, P., Wattenhofer, R.: Gathering Correlated Data in Sensor Networks. ACM Joint Workshop on Foundations of Mobile Computing DIALM-POMC'04, Oct. 1, 2004, Philadelphia, Pennsylvania, USA

- [8] Silva, F., Ruiz, L., Regina, T., Nogueira, J., Loureiro, A.: Designing a Self-organizing Wireless Sensor Network. MATA 2004, LNCS 3284, pp. 186-195, 2004. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004
- [9] Zhao, F., Guibas, L.: Wireless Sensor Networks. Morgan Kaufmann Publishers, 2004.