

# Capítulo 2

## 2. Redes Inalámbricas de Sensores Ad Hoc

### 2.1 ¿Qué es una Red de Sensores Ad Hoc?

Una red de Sensores, es la colección de un conjunto grande de nodos sensores que se despliegan en una región en particular.

Las redes de Sensores Ad Hoc consideradas altamente distribuidas, están constituidas por nodos pequeños (inalámbricos) y de peso ligero que se despliegan en un área específica. Su función es proveer una infraestructura de comunicación inalámbrica para poder monitorear algo en específico (temperatura, presión, movimiento de objetos, etc.).

La construcción de estos nodos sensores ha sido posible debido a los avances en el área de sistemas micro electromecánicos (MEMS) [AKY02]. Los **MEMS** son dispositivos miniatura fabricados con capacidad de sensado, comunicación y procesamiento.

Los MEMS se elaboran sobre un substrato de silicón de la misma manera que los circuitos integrados que combinan circuitería electrónica (sensores) con actuadores mecánicos, por ejemplo.

Cada uno de estos nodos, se divide en tres subsistemas:

- ❖ El subsistema del sensor: sensa (mide un parámetro) el medio ambiente.
- ❖ El subsistema de procesado: lleva acabo el cómputo de la información recabada por el sensado.
- ❖ El subsistema de comunicación: es el responsable del intercambio de mensajes con los nodos sensores vecinos.

Por otro parte, mientras que un nodo individual tiene una región de sensado, una potencia de procesamiento y una cantidad de energía limitada, teniendo un gran número sensores se da un aumento en la robustez, confiabilidad y precisión en el área de cobertura de dicha red. Esto se da, ya que al tener más nodos sensores que cooperan y colaboran entre sí en una región determinada, la adquisición de la información es estrecha. Brindándonos así, más seguridad en el sensado y reafirma el buen desempeño de la red.

Dentro de una red, se tiene diferentes tipos de sensores tales como los sísmicos, térmicos, visuales e infrarrojos, y éstos monitorean una amplia variedad de condiciones ambientales y hasta ciertas características de objetos que se encuentren en movimiento por ejemplo.

Los nodos sensores pueden ser empleados en el ámbito militar, de la salud, en procesamiento químico y en diversos escenarios de rescates [AKY02].

Los retos que involucra una Red Inalámbrica de Sensores son el tipo de arquitectura, la diseminación y recolección de la información, las técnicas

adoptadas por los nodos sensores para localización y aumentar la eficiencia en el consumo de energía. Este último es factor primario que limita la vida útil de la red.

La actividad de medir parámetros o sensar, se da de manera periódica o esporádica. Un ejemplo de tipo periódico es el sensar factores ambientales para medir la temperatura, humedad o la radiación nuclear. El detectar la entrada de un intruso, el medir el estrés crítico de estructuras o maquinaria, son claros ejemplos de actividades esporádicas de sensado.

Áreas que hacen de las redes de sensores una categoría distinta dentro de las redes inalámbricas Ad Hoc son [AKY02]:

φ Movilidad de los nodos:

La movilidad no es mandato que se deba cumplir. El despliegue de nodos para monitorear las propiedades del suelo no lo requiere.

φ Tamaño de la red:

El número de sensores en la red puede ser mucho más grande que una típica red inalámbrica Ad Hoc.

φ Densidad de la red:

Esto varía de acuerdo a tipo de aplicación. En el caso de la milicia, se requiere que la red siempre este disponible y con alto grado de seguridad y redundancia de información.

φ Limitación de Energía:

En el caso de las redes de sensores, se espera funcionen en ambientes agresivos en cuanto condiciones ambientales, con el mínimo o nula supervisión humana posible. Emplear este tipo de redes, donde la única fuente de alimentación para el nodo sensor es la batería, nos limita la vida útil de la red, exigiendo de esta manera un conjunto de protocolos de red muy eficientes a nivel capa de red, capa de enlace de datos y hasta física para brindar un control óptimo de energía [JAY03].

Las fuentes de alimentación en redes de sensores se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Recargables
- No recargables
- Regenerativas (capacidad de regenerar energía a partir del parámetro físico de estudio).

φ Fusión de los datos e información:

Las limitantes del ancho de banda y la energía demandan el aumento de bits y de información en los nodos intermedios. Para la fusión de los datos, se necesita el aumento de múltiples paquetes dentro de uno solo antes de su transmisión. Lo que se busca es reducir el ancho de banda a

utilizar mediante encabezados redundantes en los paquetes y minimizando el retardo al acceder al medio para transmitir los múltiples paquetes. La fusión de la información busca retransmitir la salida del procesamiento del sensado a un nodo de monitoreo.

φ Distribución del Tráfico:

El patrón de tráfico varía en base al tipo de aplicación de la red.

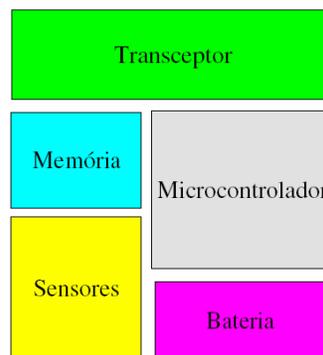
El sensado de un factor ambiental, genera de manera periódica pequeños paquetes con datos que indica el estado del parámetro de estudio a una estación central de monitoreo. Esto demanda un bajo ancho de banda.

Sin embargo, cuando se trata de detectar a un intruso en el ámbito militar, se genera un tráfico de detección en eventos con limitantes en la transmisión en tiempo real. A diferencia, las Redes Ad hoc, generalmente en cuanto al tráfico, utilizan digitalización y empaquetado de comunicación de voz o de datos [LIU01].

## **2.2 Descripción del Hardware de un Nodo Sensor**

Un **nodo sensor** es un elemento computacional con capacidad de procesamiento, memoria, interfase de comunicación y puede formar conjuntos de

sensores, como se muestra en la figura 2.1. Hardware básico de un nodo sensor se compone de un transceptor (transmisor/receptor), procesador, uno o más sensores, memoria y batería. Los componentes brindan la opción de comunicación (enviar/recibir información), ejecutar tareas que requieren procesamiento más allá de efectuar funciones de sensado.



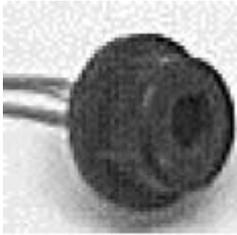
*Figura. 2.1 Componentes de Hardware de un nodo Sensor [HIL02]*

La capacidad de procesamiento depende del tipo de microprocesador que se emplee. Así mismo, posee una memoria interna en el microcontrolador. La comunicación se realiza mediante un transceptor (transmisor/receptor). Además, se tiene la fuente de alimentación que varía dependiendo el tipo de tecnología con la cual la batería esté fabricada. En cuanto al sensor, éste es el responsable de monitorear el parámetro de interés e informar del mismo. En seguida, la figura 2.2 presenta ejemplos de hardware de sensores, tomando como referencia algunas características de la familia MOTES y su evolución [HIL02]. Estos **notes** o partículas, son pequeños dispositivos inalámbricos basados en tecnología MEMS, que detectan factores físicos [AKY02].

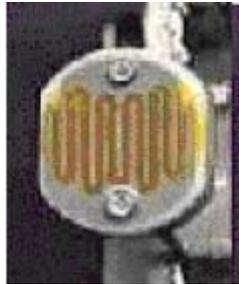
Mote Type Year	<i>WeC</i> 1998	<i>René</i> 1999	<i>René 2</i> 2000	<i>Dot</i> 2000	<i>Mica</i> 2001	<i>Mica2Dot</i> 2002	<i>Mica 2</i> 2002	<i>Telos</i> 2004	
									
<b>Microcontroller</b>									
Type	AT90LS8535		ATmega163		ATmega128			TI MSP430	
Program memory (KB)	8		16		128			48	
RAM (KB)	0.5		1		4			10	
Active Power (mW)	15		15		15	60		0.5	
Sleep Power ( W)	45		45		75	75		2	
Wakeup Time ( s)	1000		36		180	180		6	
<b>Nonvolatile storage</b>									
Chip	24LC256			AT45DB041B			ST M24M01S		
Connection type	I <sup>2</sup> C			SPI			I <sup>2</sup> C		
Size (KB)	32			512			128		
<b>Communication</b>									
Radio	TR1000			TR1000	CC1000		CC2420		
Data rate (kbps)	10			40	38.4		250		
Modulation type	OOK			ASK	FSK		O-QPSK		
Receive Power (mW)	9			12	29		38		
Transmit Power at 0dBm (mW)	36			36	42		35		
<b>Power Consumption</b>									
Minimum Operation (V)	2.7		2.7		2.7		1.8		
Total Active Power (mW)	24			27	44	89	38.5		
<b>Programming and Sensor Interface</b>									
Expansion	none	51-pin	51-pin	none	51-pin	19-pin	51-pin	10-pin	
Communication	IEEE 1284 (programming) and RS232 (requires additional hardware)							USB	
Integrated Sensors	no	no	no	yes	no	no	no	yes	

*Figura 2.2 Familia Motes [AKY02]*

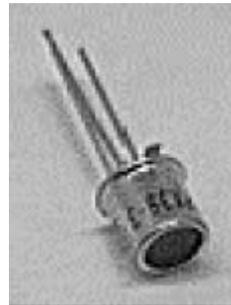
En suma, cada nodo sensor puede ser equipado con dispositivos sensores [AKY02] tanto como acústicos, sísmicos, infrarrojos, video cámaras, mecánicos, de calor, temperatura, radiación, entre otros. La figura 2.3 muestra algunos tipos de sensores que pueden presentarse en un nodo sensor tales como un micrófono (figura 2.3 (a)) que puede ser usado para captar señales del medio ambiente, un fotómetro (figura 2.3 (b)) que es capaz de medir la cantidad de fotones recibidos, un diodo detector de luz (figura 2.3 (c)) , acelerómetro (figura 2.3 (d)) que es un sensor capaz de medir la aceleración de un objeto, un sensor de humedad (figura 2.3 (e)), un sensor de radiación (figura 2.3 (f)), un sensor de luz ultravioleta (figura 2.3 (g)), un sensor de fuerza motriz (figura 2.3(i)) .



(a) Micrófono



(b) Fotómetro



(c) Detector de Luz



(d) Acelerómetro



(e) Sensor de  
Fuerza

Humedad



(f) Sensor de

Radiación



(g) Sensor de Luz

Ultravioleta

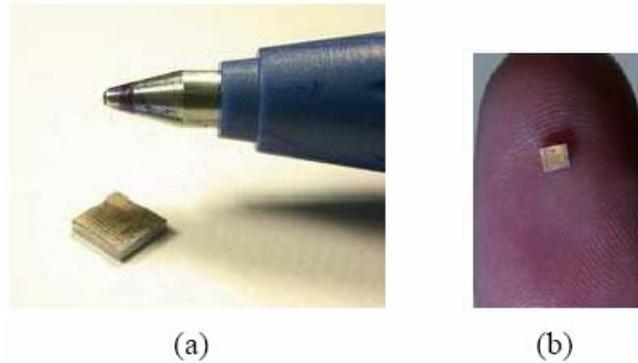


(i) Sensor de

Motriz

*Figura 2.3 Algunos sensores que pueden ser empleados [LOU02]*

Como se denota [LOU02], la tendencia es producir sensores a gran escala, a precios bajos, con mejor capacidad de cómputo y de tamaño reducido como se observa en la figura. 2.4 (dimensiones).



*Figura 2.4 Tamaño de los Sensores [HIL02]*

Es elemental resaltar que estos nodos sensores tienen fuertes restricciones en cuanto a la capacidad de memoria, de procesamiento y principalmente de energía, siendo deseable poseer dispositivos de bajo consumo de energía, en cuanto al hardware, empleando un microprocesador de consumo mínimo. Estas funciones deben estar presentes en un sistema operacional, para que la aplicación permita el control de la energía.

## **2.3 Diseño de una Red de Sensores**

Una parte muy importante en las redes, es tener en cuenta que en base al tipo de aplicación, el diseño de la red puede variar. Las áreas a considerar para un diseño son [AKY02]:

- ❖ **TOPOLOGÍA:** La topología es generalmente cambiante para las redes de Sensores Ad hoc. Es decir, los nodos se despliegan de manera aleatoria. Una vez desplegados no se requiere de la intervención humana, haciendo la configuración y el mantenimiento completamente autónomos. En la organización de la topología, cada nodo busca información completa de la red o parte de ella, con el fin de mantener las estructuras de información de la red actualizadas [KAW03].
  
- ❖ **RUTEO:** La responsabilidad de un protocolo de ruteo es el intercambio de información, encontrando el camino más confiable para alcanzar el destino deseado teniendo en consideración la distancia, el requerimiento mínimo de energía y el tiempo de vida del enlace inalámbrico; búsqueda de la información en el caso de que la conexión falle; reparación de los enlaces caídos gastando el mínimo de potencia de procesamiento y ancho de banda[AGA00].
  
- ❖ **ENERGÍA:** Un cuello de botella que se tiene en la operación de los nodos sensores es la capacidad de energía. Los sensores tienen una vida intrínsecamente dependiente del tipo de batería que se utiliza.

(Ni-Cd, Ni-Mh, Li-Ion) [DUR01]. Así mismo, el hardware diseñado para los nodos deberá tener un consumo óptimo de energía como requerimiento primordial. El microcontrolador, el sistema operativo y el software de aplicación deberán optimizar la conservación de energía, inclusive desde el punto de escoger las instrucciones y su codificación, para que las instrucciones más ocupadas utilicen la menor potencia posible. Otros diseños optimizan el consumo de energía con la minimización de sistemas síncronos y /o el concepto de sistemas asíncronos globales y síncronos solamente en pequeñas porciones locales que lo necesiten [CHI01].

❖ **SINCRONÍA:** Los nodos sensores deberán ser capaces de sincronizarse uno con otro de manera completamente distribuida, para que la calendarización del multiplexado en tiempo pueda ser impuesta y ordenada de forma temporal la detección de eventos sin ninguna ambigüedad [MIL94]. Dado que los nodos en una red inalámbrica de sensores operan de forma independiente, sus relojes podrán o no, estar sincronizados. Esto podría causar dificultades cuando se trate de integrar e interpretar información sensada en diversos nodos.

❖ **ESCALABILIDAD:** A medida que el número de sensores aumenta, el potencial de que existan fallas en la comunicación entre los nodos se incrementa de manera exponencial. Como consecuencia se

requiere de un mejor control que mantenga a la red conectada a pesar del decremento en el ancho de banda utilizable. Aquí la escalabilidad y la certeza en la red son rubros que se contraponen, ya que al tener una red más densa, es más probable tener fallas en base a la comunicación de los nodos [ZHU03].

- ❖ **CALIDAD DE SERVICIO:** La calidad del servicio puede interpretarse en las redes de Sensores por enlace, por flujo de información o por funcionamiento de nodo. En estas redes, tanto la red y como el *host* pueden tener situaciones que requieren de una buena coordinación. La falta de coordinación central y de un límite de recursos puede desencadenar un problema. El nivel de servicio y sus parámetros están asociados al tipo de aplicación [MAN03]. La comunicación en tiempo real sobre una red de Sensores deberá de ser garantizada a pesar de tener un máximo de retraso, un ancho de banda mínimo y otros parámetros involucrados en la calidad del servicio.
  
- ❖ **TOLERANCIA A FALLAS:** La red debe ser capaz de modificar algún aspecto de ella donde se presente una falla. La falla deberá de ser identificada y resulta en un tiempo promedio. Esté rubro es muy importante primordialmente para aplicaciones militares y para aplicaciones civiles donde existe un riesgo de pérdida de vida por falla de un equipo electrónico. La falta de una comunicación central y un medio compartido hace que la red sea vulnerable a ataques más

que en redes alámbricas, pues existen muchos puntos de acceso a la red, que cuando no existen mecanismos de detección de intrusos, facilitan los ataques [DEN03].

❖ **AUTO-ORGANIZACIÓN:** Es una de las propiedades más importantes que se deben exhibir en una red Ad hoc. Entre las principales actividades que se efectúan mediante la auto-organización es la de búsqueda de nodos adyacentes, organización de la topología y la re-organización de la topología [RAM00]. Durante la fase de búsqueda, cada nodo de la red recolecta información acerca de los vecinos y mantiene la información en estructuras. Por ende, se demanda que periódicamente se transmitan pequeños paquetes llamados *beacons*, (ver sección 6.2), que vigilan en el canal para detectar cualquier actividad del vecino. En la fase de re-organización requieren información confiable de la topología, ya sea en base a la movilidad de los nodos, la cantidad de energía de los nodos o la eficiencia en los enlaces, en caso de que se haya suscitado un cambio de último momento.

## 2.4 Aplicaciones

Las aplicaciones de las redes de Sensores son diversas [EST99]:

- Monitoreo de la Temperatura y Humedad

- Estudio de los Movimientos de Objetos o Estructuras
- Condiciones de Iluminación
- Medición de la Presión
- Sensado del Nivel de Ruido
- Operaciones de Rescate
- Características comunes de velocidad, dirección, tamaño y posición del objeto.
- Mejoramiento visual de un paciente con deficiencia óptica

Los sensores pueden ser aplicados para monitoreo continuo, detección de eventos, localización y control de actuadores. Las áreas de aplicación son: Militar, Medio Ambiente, Salud, Residencias, Comercio, etc.

A continuación se mencionan cuatro ejemplos fehacientes donde los nodos sensores son empleados en una variedad de aplicaciones que requieren un constante monitoreo y detección de eventos específicos.

- 1) Para las aplicaciones militares se tiene por ejemplo un sistema inteligente para guiar los misiles, en detección de ataques de destrucción masiva ya sea químico, biológico o nuclear. Por ejemplo, imagine el siguiente escenario donde una compañía petroquímica ha sufrido ataques. Esto genera una explosión en la parte de almacén de productos primarios. Un gas contaminante desencadena la creación de una nube con elementos sumamente contaminantes ya sean por la adición de gases o partículas

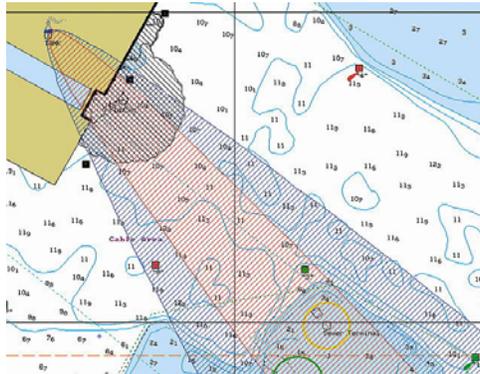
sólidas o líquidas en suspensión en proporciones distintas a las naturales [EPA00].

La generación y difusión de agentes contaminantes como el dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y azufre, entre otros, desempeñan un papel importante que se presenta en un origen puntual que puede dispersarse sobre una zona geográfica amplia. En el caso del dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), exposición a corto plazo en altos niveles (40 microgramos/ $m_3$ ) puede causar cambios irreversibles en el tejido pulmonar similares a un enfisema. En el grupo de los óxidos de nitrógeno, se tienen reacciones varias que parten de producir lluvia ácida hasta producir alucinaciones o un estado eufórico.

La función que desempeña la red es de dar a conocer la trayectoria de la combinación de gases, su velocidad y su forma. Para ello, se emplean SensorNeTSwats [ZHA04].

Estos nodos sensores son desplegados mediante vehículos aéreos manipulados que sobrevuelan el área afectada. Un experimento así se realizó en del Desierto del Mojave al Sur de California por el Profesor Kris Pister de la Universidad de California, Berkely. Cada nodo sensor fue equipado con un microprocesador, un sistema de RF (radio frecuencia). La figura 5.2 muestra un conjunto de nodos que se desplegaron aleatoriamente. En base a la información que adquieren los nodos se sabe

la dirección a la que se dirige el gas y la velocidad del mismo. Los nodos son cuadros pequeños que se denotan por el color rojo y verde.



*Figura 2.5 Imagen de la dispersión del gas en el área [ZHA04].*

Los sensores se emplean para en medio ambiente en el caso de incendios forestales, detección de inundaciones y exploración de animales en su hábitat natural.

- 2) En el caso de monitoreo del medio ambiente se tiene un experimento de la conservación de la fauna mediante el sensado de intrusos (humanos, animales u otros depredadores) automatizado en la isla de Great Duck [MAI02], en las costas del estado de Maine en el noreste de los Estados Unidos.



*Figura 2.6* Vista área de la isla [MAI02].

Un equipo de ingenieros de la Universidad de California (Berkeley), monitorean el comportamiento de las aves en sus nidos durante ciertas temporadas. Esto mediante nodos inalámbricos que reportan la información obtenida de estas aves denominadas *petrels*. La siguiente figura 2.7 muestra a las aves de interés.



*Figura 2.7* Petrels [MAI02].

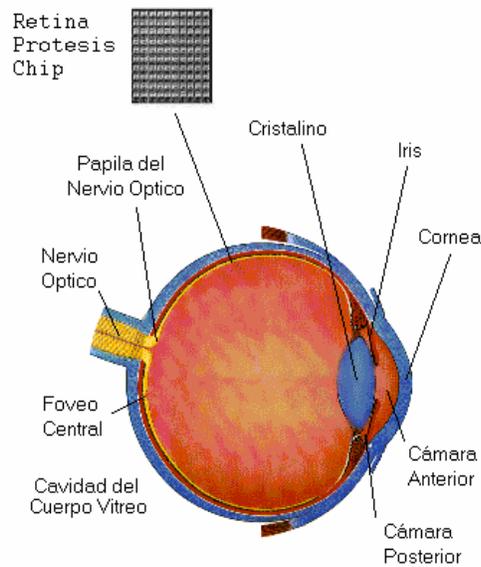
Con esto, es posible que un grupo de biólogos del Colegio Atlántico, observen la actividad de los *petrels* en dicha isla desde el confort de sus oficinas mediante el enlace satelital que permite la comunicación de los nodos con la base en California y de vuelta al estado de Maine. Los parámetros de estudio fueron la cantidad de luz que penetra en los nidos, la temperatura a la que se encuentran con o sin la presencia de las aves, y la humedad. En la figura 2.8 se observan las posiciones donde los sensores son desplegados.



*Figura 2.8 Distribución de los sensores [MAI02].*

- 3) En el ámbito de la salud, las redes de Sensores puede llevar a cabo acciones que monitorean pacientes, diagnostiquen enfermedades, administren la medicina, monitoreen el movimiento de pacientes dentro del hospital y demás funciones [EST99,KAH99,NOU00].

Lore et al [LOR01] describe una aplicación biomédica que se aplica para restaurar la visión de los pacientes con enfermedad retiniana externa, como retinitis pigmentosa (RP), o degeneración macular asociada a la edad, mediante una retina artificial. Especialmente, para pacientes que han perdido sólo el funcionamiento de la retina. El proyecto SSIM (Smart Sensors and Integrated Microsystems), se realiza por medio de un chip prótesis en la retina. Este chip está formado por 100 micro sensores, construido e implementado en un ojo humano. De esta manera, el paciente cuya visión se limita o se nubla puede adquirir un nivel de percepción un poco tosco que permite realizar sus actividades diarias sin problema alguno. Sin embargo, se sospecha que en altos valores relacionados con la severidad en la degeneración el implante (chip) epiretiniana debe estar, en principio, en coordinación con el vítreo. Abajo se muestra la figura 2.9 que denota la localización del chip dentro de ojo.



**Figura 2.9** Ojo Humano con Chip Integrado [LOR01].

4) En cuanto al monitoreo de estructuras, las redes de Sensores tiene un gran aplicación. Tanto en Estados Unidos como en Canadá, se estima que se tiene económicamente 25 trillones de dólares invertidos en estructuras civiles [KIN02]. La tecnología denominada SHM (Structure Health Monitoring [RYT93]) trabaja con la identificación y monitoreo de fallas en estructuras como puentes, edificios y otras construcciones que fueron edificadas durante los años noventas. Un proyecto que se lleva actualmente en San Francisco, California es el de evaluar las vibraciones del puente Golden Gate [SUK04]. Una placa de sensores se coloca junto con un acelerómetro a un convertidor ADC de 16 bits como se observa en la figura 2.10 La placa de sensores se conecta a una Mica Mote [HIL02] y se coloca en el puente para realizar el análisis de movimiento debido al paso de los automóviles. En la figura 2.11 y la 2.12 respectivamente, se muestra la arquitectura geográfica de la red. Un conjunto de nodos sensores posicionados manualmente en el puente se conectan entre sí y envían a un control central que almacena y procesa los datos obtenidos.



*Figura 2.10 Placa del Sensor [HIL02].*

La figura 2.10 denota la placa llamada Mica Mote donde se le coloca el Sensor. Tiene un microcontrolador tipo ATmega128. Una memoria de programa de 128KB y una memoria RAM de 4 KB. Opera a 2.7 volts y tiene una potencia activa de 60mW. La potencia de recepción es de 29mW, para una potencia de transmisión de 42mW. Además cuenta con una tasa de transferencia de 38.4 kbps.



*Figura 2.11* Arquitectura Geográfica [RYT93].

Los nodos sensores se colocan en diversas partes del puente, con la finalidad de monitorear diversas áreas de la estructura y comparar la información obtenida para analizar el movimiento que se efectúa por el flujo de vehículos.



*Figura 2.12 Monitoreo de Estructuras [RYT93].*

Se ve claramente donde es colocado el sensor. Es el barandal a lo largo del puente. Es factible que sense las vibraciones provocadas por los vehículos en movimiento y las vibraciones, aunque mínimas, de las de los transeuntes.