

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERÍA

**“ESTUDIO DE LAS REDES SENSORIALES COMO UNA
NUEVA ALTERNATIVA DE COMUNICACIÓN
INALÁMBRICA”**

EDGAR JAVIER COBOS HERNÁNDEZ

SANGOLQUÍ – ECUADOR

2007

CERTIFICACIÓN

Quienes al pie del presente firmamos, damos fe y testimonio que el proyecto de grado, previo a la obtención del título en Ingeniería Electrónica, titulado “**ESTUDIO DE LAS REDES SENSORIALES COMO UNA NUEVA ALTERNATIVA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA**” fue desarrollado en su totalidad por la Señor. **Edgar Javier Cobos Hernández** con C.I. 171448868-9, bajo nuestra dirección y tutela.

Certificamos lo antepuesto para su uso de la manera que se creyere conveniente, nos suscribimos.

Ing. Román Lara
DIRECTOR

Ing. Gonzalo Olmedo
CODIRECTOR

RESUMEN

El bajo costo de despliegue de redes de sensores, junto con los recientes avances en tecnología inalámbrica y electrónica ha generado un incremento en el número, la escala y complejidad de las redes WSN (Wireless Sensor Networks) existentes.

Primeramente se presenta una introducción, que exhibe los principales antecedentes de la investigación, seguido de una breve descripción de lo más reciente en redes de sensores inalámbricas WSN. Posteriormente se detalla el problema o necesidad detectada en dicha área, se mencionan las principales oportunidades y desafíos que tienen este tipo de redes y como debe ser su administración para una óptima implementación.

Se describe las topologías disponibles para las redes de sensores inalámbricas destacando la topología multi-salto basada en clusters; se ilustran varios enfoques técnicos con respecto al diseño de hardware, arquitecturas de sistema, protocolos y algoritmos, y desarrollo de software, también se muestra un minucioso estudio de los protocolos de enrutamiento que son los encargados de prolongar el tiempo de vida de la red, obteniendo redes escalables y robustas.

Posteriormente se describe diversas aplicaciones de las WSN en diferentes dominios con ejemplos y se discute la clasificación de las WSN de acuerdo a diversos criterios. La siguiente sección presenta las características de las WSN, resalta como difieren de las tradicionales redes inalámbricas, y resume los retos de las técnicas y direcciones de diseño correspondientes.

Finalmente con el propósito de validar la investigación propuesta se implementa un modelo de simulación del monitoreo remoto de un entorno, usando el simulador MoteView del fabricante Crossbow, en la cual, observaremos los enlaces físicos de comunicación inalámbrica por donde viajará la información entre los nodos sensores.

DEDICATORIA

Es grato y satisfactorio poder dedicar la presente tesis a mis padres que con su amor y dedicación supieron inculcarme los mejores valores, el sentido de la responsabilidad y de lucha constante para sacar adelante las metas propuestas, ellos han sabido guiarme y apoyarme con sus consejos a lo largo de la carrera, en especial a mi mamita que con su cariño fue mi sustento, empuje, y apoyo en todo sentido.

A mis hermanas que siempre estuvieron pendientes de mi labor como estudiante y persona y que nunca dejaron de estar a mi lado, a mis sobrinos fuentes de alegría y a todo mi familia que en el transcurso de la carrera depositaron su confianza en mí.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de vivir y luchar por lo que deseo, porque ha sido él quien me ha dado la salud, valor y fortaleza para finalizar mi carrera profesional.

A mi padre quien supo conducirme por los mejores senderos de la vida a mi madre por su apoyo constante e incansable y a toda mi familia con la cual he compartido a lo largo de la carrera buenos y malos momentos pero siempre estuvieron junto a mí.

A la Escuela Politécnica del Ejército, Facultad de Ingeniería Electrónica, por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de formarme en sus aulas; a todos los profesores que a lo largo de la carrera supieron compartir sus conocimientos y por la formación académica y profesional recibida.

A todos los grandes y sinceros amigos que pude obtener en la universidad con los cuales hemos compartido momentos de lucha para seguir adelante y momentos de satisfacción al concluir una tarea.

Finalmente a mi Director de tesis Ing. Román Lara y Codirector Ing. Gonzalo Olmedo, por sus sugerencias y apoyo brindado durante el desarrollo y elaboración del presente proyecto.

PRÓLOGO

El proyecto responde al interés de desarrollar una investigación de calidad de una nueva tecnología en comunicaciones inalámbricas basada en redes de sensores, haciendo énfasis en las nuevas aplicaciones y posibilidades de comunicación que se ofertan con esta tecnología. La actual demanda de establecer entornos donde los dispositivos con capacidad de procesamiento de datos puedan comunicarse de forma inteligente, siendo conscientes respecto a fenómenos que acontecen en el entorno, y de forma transparente para el usuario, permite el desarrollo de las redes de sensores inalámbricas logrando una total integración de los sistemas de control de dispositivos, con los sistemas de transmisión de radio.

Las tecnologías de redes de sensores inalámbricas WSN (*Wireless Sensor Networks*) son nodos de bajo costo y consumo de energía, en los que se integran funciones de detección y sensado, capaces del procesamiento y comunicaciones de datos sin cables. El desarrollo acelerado de la tecnología de redes inalámbricas de sensores y la actual demanda de implementar este tipo de redes en aplicaciones civiles hace previsible la implantación futura de las técnicas que pretendemos investigar.

Al finalizar la investigación se pretende, ofrecer una idea clara de las redes de sensores inalámbricas estudiando desde las oportunidades y desafíos que tienen este tipo de redes frente a otras tecnologías de comunicación inalámbrica, pasando por un análisis profundo de las características de topología y arquitectura de red, hasta llegar a conocer las áreas potenciales de impacto que se pretende atacar con este tipo de redes.

Para una mejor concepción de esta nueva tecnología se presenta el desarrollo de una simulación del monitoreo de un entorno remoto, en la cual, se observará como actúa una red de sensores frente a los distintos acontecimientos que se presentan en el medio. Todos estos aspectos son materia de actual investigación y sería deseable que nuestra universidad también formara expertos en la materia, ya que el desarrollo de esta tecnología puede traer grandes beneficios para la industrialización regional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1

TECNOLOGIAS DE COMUNICACIÓN PARA REDES DE SENSORES

INALÁMBRICAS.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OPORTUNIDADES.....	2
1.3 DESAFIOS.....	3
1.3.1 Fuente de Alimentación.....	3
1.3.2 Rendimiento y Capacidad.....	4
1.3.3 Enrutamiento.....	5
1.3.4 Acceso al Canal y Programación.....	5
1.3.5 Calidad de servicio.....	6
1.3.6 Seguridad.....	7
1.3.7 Implementación.....	7
1.3.8 Desafíos de Administración.....	7
1.3.9 Otros aspectos.....	8
1.4 TECNOLOGÍAS DE NUEVA GENERACIÓN PARA HABILITAR LAS REDES DE SENSORES.....	9
1.4.1 Red Distribuida en Tiempo Real.....	9
1.4.2 Middleware.....	10
1.5 DIRECCIONAMIENTO Y ADMINISTRACIÓN DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.....	11
1.5.1 Niveles de Administración.....	13
1.5.2 Funcionalidades en WSN.....	15
1.5.3 Administración de Áreas Funcionales.....	20

CAPITULO 2

ARQUITECTURAS PARA REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.....	24
2.1 INTRODUCCIÓN.....	24
2.2 REQUISITOS GLOBALES PARA UNA RED DE SENSORES.....	25
2.3 COMPONENTES Y ARQUITECTURA DE UN NODO SENSOR.....	27
2.3.1 Procesador.....	28
2.3.2 Almacenamiento – Memoria.....	29
2.3.3 Suministro de Energía.....	30
2.3.4 Sensores.....	30
2.3.5 Radio.....	31
2.3.6 Nodo Mote de Berkeley.....	32
2.4 ARQUITECTURAS DISPONIBLES PARA REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.....	33

CAPITULO 3

PROCOLOS.....	39
3.1 INTRODUCCIÓN.....	39
3.2 CAPAS DEL PROCOLO DE COMUNICACIÓN.....	40
3.3 PROCOLOS DE COMUNICACIÓN PARA REDES SENSORIALES INALÁMBRICAS.....	42
3.3.1 Protocolos para la Capa de Aplicación.....	42
3.3.2 Protocolos de Localización.....	44
3.3.3 Protocolos de sincronización de tiempo.....	45
3.3.4 Protocolos para la Capa de transporte.....	48
3.3.5 Protocolos para la capa de enlace de datos.....	54
3.4 PROCOLOS DE RUTEO EN WSN.....	57
3.4.1 Ruteo plano.....	58
3.4.2 Ruteo Jerárquico.....	62
3.4.3 Ruteo Adaptable o Adaptativo.....	72
3.4.4 Ruteo Multi – Trayectoria (Multipath).....	76
3.4.5 Ruteo Basado en Consultas.....	76
3.4.6 Protocolos Basados en Negociación.....	77

CAPÍTULO 4

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS REDES DE SENSORES

INALÁMBRICAS.....	79
4.1 INTRODUCCIÓN.....	79
4.2 COBERTURA DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.....	80
4.2.1 El Problema de Cobertura De Los Sensores.....	80
4.2.2 Área De Cobertura.....	81
4.2.3 Cobertura De Punto.....	84
4.2.4 Cobertura de barrera.....	86
4.3 LOCALIZACIÓN DE LAS REDES DE SENSORES	
INALÁMBRICAS.....	87
4.3.1 Sistemas De Posicionamiento Y Ubicación Para Redes De Sensores	
Inalámbricas.....	88
4.4 MODELAMIENTO TÉCNICO EN REDES DE SENSORES	
INALÁMBRICAS.....	90
4.4.1 Modelos de Tráfico.....	90
4.4.2 Modelos de Energía y Baterías.....	91
4.4.3 Modelo de Conectividad y Optimización de la Topología.....	91
4.4.4 Modelo de Implementación y de Cobertura de Detección.....	92
4.5 CARACTERÍSTICAS, DESAFÍOS TÉCNICOS Y	
DIRECCIONAMIENTO DEL DISEÑO DE WSNs.....	93
4.5.1 Características.....	93
4.5.2 Desafíos Técnicos.....	94
4.5.3 Objetivos de Diseño y de Administración.....	96
4.6 ESTADOS FUNCIONALES DEL NODO SENSOR Y CONSUMO DE	
ENERGÍA.....	99
4.7 ALGORITMOS DE PROGRAMACIÓN Y S.O.....	101
4.7.1 Nivel de Nodo Simple.....	102
4.7.2 Programa Intermedio (Middleware).....	102
4.7.3 Interfase de Programación de Aplicación (API).....	102

CAPITULO 5

CLASIFICACIÓN DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.....	103
5.1 INTRODUCCIÓN.....	103
5.2 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.....	104
5.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS WSNs.....	107
5.4 COMPARACIÓN DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS CON OTROS TIPOS DE REDES DE COMUNICACIÓN.....	109

CAPITULO 6

APLICACIONES DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.....	114
6.1 INTRODUCCIÓN.....	114
6.1.1 Aplicaciones Basadas en Consulta.....	115
6.1.2 Aplicaciones Basadas en Tareas.....	116
6.2 INGENIERÍA EN GENERAL.....	117
6.3 DETECCIÓN Y MONITOREO DEL ENTORNO.....	118
6.4 SEGURIDAD, SALUD Y GESTIÓN.....	122
6.5 APLICACIONES MILITARES Y GUERRA ELECTRÓNICA.....	127
6.6 EDIFICIOS INTELIGENTES.....	128
6.7 OTRAS APLICACIONES.....	134

CAPITULO 7

MONITOREO REMOTO CON REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.....	137
7.1 INTRODUCCIÓN.....	137
7.2 DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA PARA EL MONITOREO REMOTO.....	137

7.3 SIMULACIÓN DE UNA WSN PARA EL MONITOREO REMOTO DE UNA AMBIENTE.....	139
7.3.1 Variables a medir.....	139
7.3.2 Condiciones y dispositivos utilizados para la medida de variables.....	140
7.3.3 Interfaces de simulación de <i>MoteView</i>	144
7.3.4 Equipos simulados.....	150
7.3.5 Análisis de Resultados.....	152

CAPITULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	160
8.1 CONCLUSIONES.....	160
8.2 RECOMENDACIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA.....	164

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 3

Tabla. 3.1. Tres tipos de técnicas de tiempo.....	47
Tabla. 3.2. Ruteo de Topología Plana vs. Jerárquica.....	72
Tabla 3.3. Comparación entre SPIN, LEACH, y Difusión dirigida.....	75
Tabla. 3.4. Clasificación de los protocolos de ruteo acorde a la estructura de la red.....	77
Tabla. 3.5. Comparación de los protocolos de ruteo en WSN.....	78

CAPITULO 4

Tabla 4.1. Estados del nodo sensor y sus Componentes.....	100
---	-----

CAPITULO 5

Tabla. 5.1. Clasificación de las WSN.....	106
Tabla. 5.2. Diferencias entre WSN y redes inalámbricas convencionales ad-hoc.....	112

CAPITULO 7

Tabla. 7.1. Propiedades de los iconos de la lista de nodos.....	145
---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura. 1.1. Red de sensores con estación base (o centro de fusión).....	4
Figura. 1.2. Confiabilidad en función del retardo.....	6
Figura. 1.3. Dimensionamiento de la administración para WSNs.....	12

CAPITULO 2

Figura. 2.1. Arquitectura de un nodo sensor.....	27
Figura. 2.2. Diagrama de bloques de la Arquitectura Maia.....	28
Figura.2.3. Redes de sensores: (a) conexión directa; (b) multi-salto punto a punto y (c) modo basado en clusters.....	34
Figura. 2.4. Comparación de las arquitecturas de diseminación/fusión de la información.....	36
Figura. 2.5. Arquitectura centralizada.....	37
Figura. 2.6. Arquitectura distribuida basada en clusters.....	38

CAPITULO 3

Figura. 3.1. Tradicional pila de capas de protocolo para WSN.....	40
Figura. 3.2. Pila de protocolos de capa-cruzada para WSN.....	41
Figura. 3.3. Típica topología de una red de sensores con evento y recolector.....	49
Figura. 3.4. Agregación de Datos.....	53
Figura. 3.5. Taxonomía de los protocolos de ruteo en WSN.....	58
Figura. 3.6. Diferencia entre ruteo (a) direccionamiento-céntrico (AC) y (b) data-céntrico (DC).....	60
Figura. 3.7. Diagrama de Flujo de la elección de nodo principal del cluster en el protocolo LEACH.....	64
Figura. 3.8. Un ejemplo de zonificación en las redes de sensores.....	69
Figura. 3.9. Forma regular del mosaico plano aplicado al área de la red.....	71

CAPITULO 4

Figura. 4.1. (a) Despliegue al azar de sensores para cubrir un área cuadrada; (b) Despliegue al azar de sensores para cubrir un conjunto de puntos; (c) Problema general de la cobertura de barrera.....	82
Figura. 4.2. Diagrama de estado de transición de un nodo sensor.....	101

CAPITULO 6

Figura. 6.1. Aplicaciones Basadas en Consultas y Tareas en Redes de Sensores.....	115
Figura. 6.2. Zebranet.....	120
Figura. 6.3. Secuoyas.....	121
Figura. 6.4. Casa Levantada: Simulador de sismos.....	124
Figura. 6.5. Smart Pill.....	125
Figura. 6.6. Electrodomésticos Inteligentes.....	130
Figura. 6.7. Fire Information and Rescue Equipment (FIRE).....	132
Figura. 6.8. Cricket.....	132
Figura. 6.9. Telemática Automotriz.....	133
Figura. 6.10. Wireless Space Count System.....	133
Figura. 6.11. Park View Hotel.....	134
Figura. 6.12. Aplicaciones de redes WSN.....	135

CAPÍTULO 7

Figura. 7.1. Estructura de una WSN.....	138
Figura. 7.2. Software de trabajo para una WSN.....	144
Figura. 7.3. Interfaces de usuarios en MoteView.....	145
Figura. 7.4. Ventana de configuración de intervalos de tiempos de estados de los nodos.....	146
Figura. 7.5. Pantalla de la base de datos exhibida en la lengüeta de los datos.....	147
Figura. 7.6. Tabla gráfica.....	147
Figura. 7.7. Histograma.....	148
Figura. 7.8. Diagrama de dispersión.....	149

Figura. 7.9. Gráfica de la Topología de Red.....	149
Figura. 7.10. Sensor MTS310.....	150
Figura. 7.11. Mota MICA2.....	150
Figura. 7.12. Gateway MIB510.....	150
Figura. 7.13. Gráfica de la Topología de Red en el tiempo 1.....	153
Figura. 7.14. Escala.....	153
Figura. 7.15. Tabla de datos para el tiempo 1.....	153
Figura. 7.16. Topología para el tiempo 2.....	156
Figura. 7.17. Tabla de datos para el tiempo 2.....	157
Figura. 7.18. Gráficas de las variables temperatura, voltaje y luz de los nodos 1 y 5.....	158
Figura. 7.19. Histograma de los nodo 1 y 5.....	159
Figura. 7.20. Diagrama de Dispersión de los nodo 1 y 5.....	159

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **APIs:** *Application Programming Interface*, Interfaz de Programación de Aplicaciones. Una API es un conjunto de especificaciones de comunicación entre componentes software. Se trata del conjunto de llamadas al sistema que ofrecen acceso a los servicios del sistema desde los procesos y representa un método para conseguir abstracción en la programación, generalmente entre los niveles o capas inferiores y los superiores del software.
- **APTEEN:** Red de Sensores de Eficiencia de Energía con Umbrales Detectables y Adaptación Periódica.
- **ASIC:** Circuito Integrado para Aplicaciones Específicas, es un circuito integrado hecho a la medida para un uso en particular, en vez de ser concebido para propósitos de uso general.
- **Broadcast:** Difusión, es un modo de transmisión de información donde un nodo emisor envía información a una multitud de nodos receptores de manera simultánea, sin necesidad de reproducir la misma transmisión nodo por nodo.
- **DARPA:** La Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa; es una agencia del Departamento de Defensa de los Estados Unidos responsable del desarrollo de nuevas tecnologías para uso militar.
- **EWSN:** Taller Europeo sobre Redes de Sensores Inalámbricas.
- **FDA:** *Food and Drug Administration*; Administración de Drogas y Alimentos, es la agencia del gobierno de los Estados Unidos responsable de la regulación de alimentos, suplementos alimenticios, medicamento, cosméticos, aparatos médicos (humanos y animales), productos biológicos y productos hemáticos.
- **FIRE:** *Fire Information and Rescue Equipment*; Información de Fuego y Equipo de Rescate.
- **FPGA:** *Field Programmable Gate Array*; es un dispositivo semiconductor que contiene componentes lógicos programables e interconexiones programables entre ellos.
- **Geocast:** Se refiere a la entrega de la información a un grupo de destinaciones en una red identificada por sus localizaciones geográficas.
- **GLOBECOM:** *Global Telecommunications Conference, by IEEE*; Conferencia Global de Telecomunicaciones por la IEEE.

- GPS: Sistema de Posicionamiento Global.
- INFOCOM: *Conference on Computer Communications by IEEE*, Conferencia de Comunicación de Computadoras dictado por la IEEE.
- IPSN: *Information Processing in Sensor Networks*, Procesamiento de la Información en Redes Sensoriales.
- ISIT: *International Symposium on Information Theory by IEEE*; Simposio Internacional de la Teoría de la Información dado por la IEEE.
- ISP: Detección Integrada de Proceso.
- Latencia: En redes informáticas de datos se denomina latencia a la suma de retardos temporales dentro de una red.
- LEACH: Jerarquía Adaptable de Clusters de Baja Energía.
- MAC: *Control de Acceso al Medio*; Medium Access Control.
- MCFA: Algoritmo Para Costo Mínimo De Reenvío.
- MCU: Unidad de micro-control o microprocesador.
- MEMS: *Microelectromechanical Systems*, Sistemas microelectromecánicos: se refieren a la tecnología electromecánica micrométrica y sus productos; a escalas relativamente más pequeñas.
- Middleware: Es un software de conectividad que ofrece un conjunto de servicios que hacen posible el funcionamiento de aplicaciones distribuidas sobre plataformas heterogéneas.
- MobiCom: *International Conference on Mobile Computing and Networking*; Conferencia Internacional de Redes Móviles.
- MobiHoc: *International Symposium on Mobile Ad-Hoc Networking & Computing*; Simposio Internacional de Redes Ad-Hoc Móviles.
- Multicast: Multidifusión, es el envío de la información en una red a múltiples destinos simultáneamente, usando la estrategia más eficiente para el envío de los mensajes sobre cada enlace de la red sólo una vez y creando copias cuando los enlaces en los destinos se dividen.
- Multihop: De múltiple saltos, un nodo transmite a otro nodo, el cual a su vez retransmite el paquete. Este procedimiento es repetido hasta que el paquete arriba a su destino final.
- NEST: Tecnología de Software Embebido para Redes
- NETEX: Establecimiento de una Red en Ambientes Extremos.

- NSF: *National Science Foundation*; Fundación de Ciencia Nacional.
- NTP: Protocolo de tiempo de red.
- OEM: *Original Equipment Manufacturer*; Fabricante Original de Equipo.
- OGDC: Control de Densidad Geográfica Óptima.
- PDA: *Personal Digital Assistant*, Asistente Personal Digital.
- PEGASIS: Protocolo de Recopilación Eficiente de Energía en Sistemas de Información de Sensores.
- PSFQ: *Pump Slowly Fetch Quickly*; Bombeo suave, recolección rápidamente.
- RBS: Protocolo de sincronización de referencia de transmisión.
- SAR: Ruteo De Asignación Secuencial.
- SensIT: Tecnología de Información para Redes de Sensores.
- SenSys: *Embedded Networked Sensor Systems*, Sistemas Embebidos para Redes de Sensores.
- SMP: Protocolo de Administración del Sensor
- SMECN Red Pequeña de Comunicación con Energía Mínima.
- SNEM: Sistemas nanoelectromecánicos, mejor conocidos por su denominación en inglés "Nanoelectromechanical Systems" o NEMS y con la nanotecnología.
- SNPA: Protocolos de Redes de Sensores y sus Aplicaciones.
- SPIN: Protocolos de Sensores para Información Vía Negociación.
- SQDDP: Protocolo de búsqueda de Sensores y Diseminación de Datos.
- SCTL: Lenguaje de búsqueda de sensores y tareas.
- TADAP: Protocolo de Asignación de Tareas y de Aviso de Datos.
- TDP: Protocolo de sincronización de difusión de tiempo.
- TEEN: Red de sensores de Eficiencia de Energía con Umbrales Detectables.
- TinyOS: Es un sistema operativo *open source* basado en componentes para redes de sensores inalámbricas.
- UGS: Sensores de Tierra Desatendidos.
- VLSI: *Very Large Scale Integration*, Circuitos Integrados de Integración Muy Alta.
- VTC: *Vehicular Technology Conferenci by IEEE*; Conferencia de Tecnología Vehicular dictado por la IEEE.
- WSN: *Wireless Sensor Network*, Redes de Sensores Inalámbricas.

CAPITULO 1

TECNOLOGIAS DE COMUNICACIÓN PARA REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

1.1 INTRODUCCIÓN

Debido al gran auge de las comunicaciones inalámbricas en los últimos años, el desarrollo de las redes de bajo costo, y baja energía; los sensores de funcionamiento múltiples han recibido una atención en aumento por parte de investigadores y fabricantes de equipos de telecomunicaciones.

Estos sensores son pequeños y tienen la capacidad de detectar cambios, procesar datos, y comunicarse entre sí típicamente sobre un canal de RF (radiofrecuencia). Una red de sensores se diseña para detectar acontecimientos o fenómenos, recoge y procesa datos, y transmite la información detectada a los usuarios.

Las características básicas de las redes de sensores son la capacidad de auto-organización, comunicación *broadcast* y encaminamiento *multihop*, desarrollo denso y cooperativo de los nodos sensores, cambio frecuente de topología debido a desvanecimientos y fallas en los nodos y limitaciones en energía, poder de transmisión, memoria y capacidad de cómputo.

Estas características, particularmente las tres últimas, hacen que las redes de sensores sean diferentes de otras redes inalámbricas. Las redes de sensores inalámbricas ofrecen oportunidades y desafíos para investigar las necesidades de estos sistemas que se encuentran masivamente distribuidos, físicamente acoplados, conectados inalámbricamente y limitados energéticamente.

1.2 OPORTUNIDADES

La investigación y el interés comercial en el área de las redes de sensores inalámbricas están creciendo notoriamente en la actualidad, lo que se manifiesta de muchas maneras:

- El número de páginas Web (*Google*: 26.000 páginas que se refieren a redes con sensores y 8.000 páginas de redes de sensores inalámbricas en agosto del 2003 ahora se tiene 9.270.000 páginas que tratan el tema de las redes de sensores inalámbricas, agosto 2007).
- Incremento en el número de:
 - Talleres dictados anualmente, tales como, *IPSN* (Procesamiento de la información en redes con sensores); *SenSys* (Sistemas embebidos para redes con sensores); *EWSN* (Taller europeo sobre redes de sensores inalámbricas); *SNPA* (Protocolos de redes de sensores y sus aplicaciones); y *WSNA* (Aplicaciones de redes de sensores inalámbricas).
 - Conferencias sobre redes de sensores en la industria de las comunicaciones y comunidades móviles de computación (*ISIT*, *ICC*, *Globecom*, *INFOCOM*, *VTC*, *MobiCom*, *MobiHoc*).
 - Proyectos de investigación financiados por *NSF* (aparte de los programas en curso, un nuevo esfuerzo específico ahora se centra en los sensores y las redes de sensores) y *DARPA* con su *SensIT* (Tecnología de información para redes de sensores), *NEST* (Tecnología de software embebido para redes), *MSET* (Explotación del multisensor), *UGS* (Sensores de tierra desatendidos), *NETEX* (Establecimiento de una red en ambientes extremos), la *ISP* (Detección integrada de proceso), y programas de comunicaciones inalámbricas.

Publicaciones especiales y secciones en diarios son comunes, ejemplo en las publicaciones de la *IEEE* sobre redes de sensores inalámbricas y revistas de redes. El interés comercial es reflejado en inversiones que establecen las compañías para ofertar soluciones generales y específicas de hardware y software para redes con sensores.

Comparado con el uso de algunos costosos pero altamente acertados sensores, la estrategia de desplegar una gran cantidad de sensores baratos tiene ventajas significativas, propone un sistema total más pequeño o de costo comparable, una resolución mucho más alta; robustez más alta para contrarrestar fallas con la operación distribuida; cobertura uniforme; poca obstrucción, facilidad del despliegue; consumo de energía reducida; y, por lo tanto, el incremento de vida del sistema o red.

Un sensor que detecta finalmente, puede revolucionar la manera de la cual se entienden los sistemas físicos complejos. La adición de actuadores, sin embargo, abre totalmente una nueva dimensión permitiendo el manejo y la manipulación del ambiente en una escala que ofrezca las oportunidades enormes para casi cada disciplina científica.

De hecho, *Business 2.0* (<http://www.business2.com>) presenta en sus listas a las redes inalámbricas de sensores como una de seis tecnologías que cambiarán al mundo, y la revisión tecnológica MIT y *Globalfuture* identifican a WSNs como una de las 10 tecnologías emergentes que cambiarán al mundo. La combinación de las tecnologías de redes de sensores inalámbricas con *MEMS* y la nanotecnología reducirá gradualmente el tamaño de los nodos y realzará las capacidades de la red.

1.3 DESAFÍOS

Poblar el mundo con sensores de redes requiere un entendimiento fundamental de las técnicas para conectar y manejar los nodos sensores con una red de comunicaciones escalable y de recurso eficiente. Claramente, las redes de sensores inalámbricas pertenecen a la clase de las redes ad-hoc. Las redes ad-hoc y de sensores comparten un número de desafíos tales como restricción de energía y encaminamiento.

1.3.1 Fuente de Alimentación

Debido a que el punto más desafiante de las redes de sensores es la limitada e irrecargable provisión de energía, muchos esfuerzos de investigación tienen como objetivo el mejorar el rendimiento energético en todos los aspectos de la red. En WSNs, la energía es consumida principalmente para tres propósitos: transmisión de datos, procesamiento de la señal, y la

operación de hardware. Es deseable desarrollar técnicas de proceso de ahorro de energía que reducen al mínimo los requerimientos de energía a través de todos los niveles de la pila de protocolo (protocolo stack) y, al mismo tiempo, reducir al mínimo los procesos usados para el control y la coordinación de la red.

1.3.2 Rendimiento y Capacidad

Dos parámetros describen el desempeño de la red para transportar el tráfico: el rendimiento y la capacidad de transmisión de datos. Lo anterior es una capacidad de distancia-carga que permite evaluar el desempeño de la red. El rendimiento es una medida tradicional de la cantidad de tráfico que puede enviar la red. En una red de paquetes, el rendimiento puede definirse como el número esperado de paquetes transmitidos satisfactoriamente de un nodo dado por *timeslot*. La capacidad de las redes inalámbricas en general es un área activa de investigación en la comunidad de la teoría de la información.

Debido a que la mayoría de los datos de los sensores deben ser enviados a una sola estación base o centro de fusión, existe un área crítica en la red de sensores (el área gris en la figura. 1.1.), estos nodos sensores deben retransmitir los datos que poseen virtualmente por todos los nodos de la red.

Así, la carga del tráfico en esos nodos críticos es pesada, aun cuando la tasa media de tráfico es baja. Al parecer, esta área tiene una influencia en la vida útil del sistema, en el retardo de paquetes punto a punto, y en la escalabilidad.

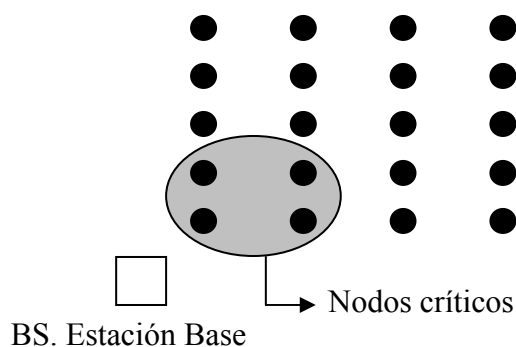


Figura. 1.1. Red de sensores con estación base (o centro de fusión). El sombreado gris indica el área crítica, estos nodos deben retransmitir todos los paquetes

1.3.3 Enrutamiento

En las redes de sensores inalámbricas, los protocolos de ruteo pretenden poner tres funciones principales en ejecución: detectar y determinar cambios de la topología de la red (ejm., interrupción de nodos y fallas de acoplamiento), conectividad y mantenimiento de la red; y por último la ubicación y cálculo de rutas apropiados.

El problema principal en WSNs es que los datos de los sensores se deben enviar por un enrutamiento multihop hacia la estación base. Por lo tanto, el patrón de tráfico es altamente no uniforme, poniendo una alta carga de tráfico a los nodos que se encuentran cerca de la estación base (nodos críticos en la figura.1.1.).

Los algoritmos de programación y ruteo de protocolos, deben tener como objetivo el balance del consumo energético y el retardo, asegurándose de que los paquetes que se originan en los nodos que se encuentran lejos de la estación base tengan un comparable retardo, y que los nodos críticos no mueran prematuramente debido al tráfico pesado del retardo.

1.3.4 Acceso al Canal y Programación

En WSNs, la programación se debe estudiar en dos niveles: a nivel del sistema y al nivel del nodo. En el nivel del nodo, el programador o planificador determina que el flujo entre todos los flujos de la multiplexación sea legible para la siguiente transmisión (el mismo concepto que en redes cableadas); en el nivel de sistema, un esquema determina qué nodos transmitirán.

La programación a nivel de sistema tiene como problema esencial el control del acceso al medio (MAC), con un mínimo de colisiones y máximo rechazo espacial, esto es un asunto de gran atención por la comunidad de investigación porque está fuertemente ligado con la eficiencia energética y el rendimiento de la red.

La mayoría de los algoritmos de la programación inalámbrica actual apunta a mejorar la imparcialidad, el retardo, la robustez (con respecto a los cambios de la topología

de la red) y la eficacia de energía. Es una propuesta de implementación distribuida, en contraste con la implementación centralizada de las redes cableadas o celulares.

1.3.5 Calidad de servicio

La calidad de servicio se refiere a la capacidad de la red para entregar datos confiables y oportunos. Una alta calidad de servicio, por ejemplo, capacidad de transporte o rendimiento, es generalmente no suficiente para satisfacer una aplicación con requerimientos de retardo. Por lo tanto, la velocidad de propagación de la información puede ser tan crucial como el rendimiento de procesos.

Por consiguiente, además de la capacidad de la red, un punto importante en muchas WSNs es el garantizar una calidad de servicio (QoS). QoS, en un sentido más amplio, consiste en cumplir estas tres cualidades (R , P_e , D). Donde R denota rendimiento del proceso; P_e , denota confiabilidad según lo medido, por ejemplo, probabilidad de error de bit o probabilidad de pérdida del paquete; y D denota el retardo. Para R , la confiabilidad de una conexión en función del retardo seguirá la muestra general de la curva en el Figura.1.2.

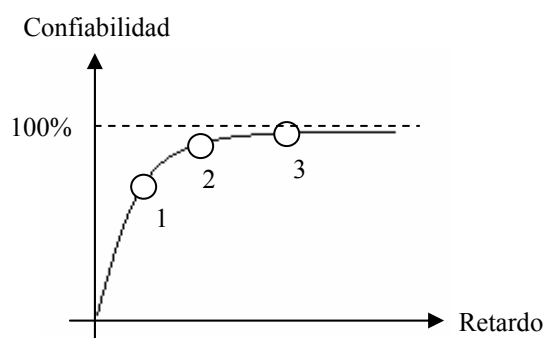


Figura. 1.2. Confiabilidad en función del retardo. Los círculos indican los requerimientos de QoS de diferentes clases posibles de tráfico.

Se observa que la capacidad es un solo punto en la curva de capacidad vs. retardo y por lo tanto no siempre es una medida relevante del funcionamiento. Por ejemplo, en ciertas aplicaciones de detección, sensado y control, el valor de la información se degrada rápidamente mientras que el estado latente aumenta.

1.3.6 Seguridad

Dependiendo de la aplicación, la seguridad puede ser crítica. La red debería habilitar la tolerancia y detección de intrusos así como una operación robusta en caso de fallas porque a menudo, los nodos sensores no se protegen contra ataques físicos.

1.3.7 Implementación

Las compañías tales como *Crossbow*, *Ember*, *Sensoria*, y *Millennial* están construyendo nodos sensores pequeños con capacidades de comunicación inalámbrica.

Los progresos actuales en las tecnologías VLSI y MEMS, han permitido el desarrollo de nuevos nodos sensores inalámbricos en chips sumamente pequeños. La miniaturización hará el progreso constante, excepto para dos componentes cruciales: la antena y la batería, donde se puede encontrar soluciones innovadoras. Además, el impacto del hardware en el diseño de óptimos protocolos es un abierto.

1.3.8 Desafíos de Administración:

Una de las metas principales de la dirección y administración de la red es promover la productividad de los recursos de red y mantener la calidad del servicio proporcionado.

La administración de una WSN es la responsable de configurar y reconfigurar de nuevo la red bajo condiciones que varían. La configuración del sistema (instalación del nodo y arranque de la red) debe ocurrir automáticamente; los ajustes dinámicos necesitan ser hechos para la configuración actual y para los cambios de la misma o del ambiente. Los nodos manejados en una WSN siempre deben optimizar su funcionamiento; supervisar sus componentes y templar el flujo de trabajo para alcanzar las metas predeterminadas del sistema. Se debe realizar algo acertado, debe poder recuperarse de los acontecimientos rutinarios y extraordinarios que pudieron hacer que algunas de sus piezas funcionen incorrectamente.

La red debe poder descubrir problemas potenciales, tales como un área destapada, y después encontrar una manera alterna de usar recursos o de reconfigurar el sistema para

corregir el problema y garantizar su funcionamiento. Además, debe detectar, identificar, y protegerse contra varios tipos de ataques para mantener la seguridad e integridad del sistema total. La administración de una WSN debe conocer el ambiente y el contexto que rodea su actividad y actuar acordeamente. Las entidades de administración deben encontrar las reglas para generar un mejor manejo del estado actual de la red [2].

Una WSN administrada tiene varias características que se puede llamar como sistemas autónomos, que es un acercamiento a los sistemas informáticos “*auto administrados*” con un mínimo de intervención humana. Este término se deriva del sistema nervioso autónomo del cuerpo humano, donde el control funciona sin conocimiento o implicación consciente. Los procesadores en tales sistemas utilizan algoritmos para determinar al más eficiente y rentable, distribuyen tareas y almacenan datos. Junto con pruebas de software y controles de configuraciones, los sistemas informáticos podrán supervisar y repararse automáticamente sin requerir del personal técnico, por lo menos esa es la meta. Sin embargo, el coste de cómputo de estos procesos autónomos puede ser caro para las arquitecturas de las WSNs.

Probablemente, el tópico fundamental sobre el manejo de un WSN se refiere a cómo éste manejo puede promover la productividad de la planta y de los recursos, y a cómo integrar funciones de manera organizada como; configuración, operación, administración, y mantenimiento de todos los elementos y servicios.

La tarea de construir y desplegar un sistema de administración autónomo en ambientes en los cuales hay cientos o miles de elementos de red con características particulares es muy compleja. Esta tarea se hace aún más complicada debido a las restricciones físicas de los nodos sensores, particularmente la energía y las restricciones del ancho de banda. La administración de aplicaciones debe ser también construida de acuerdo al tipo y clase de uso que se le de a la red.

1.3.9 Otros aspectos

- Tratamiento de la señal distribuida: la mayoría de las tareas requieren el esfuerzo combinado de los múltiples nodos de la red, que requiere protocolos

que provean coordinación, intercambio eficiente de información local y posibilite operación jerárquica.

- Sincronización y localización: La detección, el sensado y la actuación coordinada en el mundo físico requieren un sentido del tiempo global que se deba aparear con el relativo o absoluto conocimiento de la localización de los nodos.
- Reprogramación Inalámbrica: Una WSN desplegada puede necesitar ser reprogramada o actualizada. Hasta ahora, no hay protocolos de establecimiento de una red disponible para realizar tal tarea en una red multihop. La dificultad principal es el reconocimiento de paquetes al unir la comunicación multihop con la multicast.
- Tiempo de recuperación de datos, estado de latencia: Muchas aplicaciones con sensores requieren un servicio de retardo garantizado.
- Exactitud, precisión, veracidad: La obtención de información certera es el objetivo primario; la exactitud de la obtención de datos se puede mejorar con la detección, estimación y valoración. La teoría de distorsión de la taza es una posible herramienta para lograr una precisión en la obtención de datos.
- Fallas de tolerancia. La robustez del sensor y las fallas de acoplamiento se deben alcanzar con redundancia y la colaboración del proceso de comunicación.
- Escalabilidad: Debido a que una red de sensores puede contener cientos de sensores, la escalabilidad es un factor crítico que garantiza que el funcionamiento de la red no se degrade con el aumento del tamaño de la red.

1.4 TECNOLOGÍAS DE NUEVA GENERACIÓN PARA HABILITAR LAS REDES DE SENSORES.

1.4.1 Red Distribuida en Tiempo Real

Varias ventajas pueden ser ganadas utilizando la red distribuida en tiempo real que computa para permitir un mejor método de adquisición de datos de los sensores. La red distribuida, potencialmente reduce el coste de los sistemas de procesamiento de señales y la plataforma del sensor. Así mismo, la tolerancia por defecto de los sistemas de proceso se

incrementa porque el procesamiento y los sistemas de red se comparten entre los sensores, de tal modo aumentando la capacidad de procesamiento de señales para todos los sensores.

Además, la administración de los recursos de red es más pequeña; los procesos individuales y los recursos de la red se administran como entidades independientes antes que una entidad paralela. Esto produce una configuración y un manejo más flexible de los recursos. Para permitir la colaboración de la red en el procesamiento de señales del sensor, tres áreas tecnológicas se requieren para desarrollar y alcanzar madurez.

- Comunicación garantizada, almacenamiento de buffer, y los recursos de cómputo deben continuar con capacidades de alto rendimiento de procesamiento de los datos que vienen de los sensores. Si cualquier etapa en el procesamiento tiene alguna caída debido a un problema de la red o a una interrupción en el procesador, proteger los datos se convertirá en un problema rápidamente ya que el incremento de los volúmenes de los datos se deben almacenar para adecuar el retardo del los procesadores.
- *Middleware*, los procesadores se deben desarrollar para acomodar una mezcla heterogénea de los recursos de cómputo y de red. Este middleware consiste en una interfaz del control de tareas; que facilita la comunicación entre los agentes y entidades que administran los recursos de red, y una aplicación de interfaz de programación ejecutada en el procesador de red de colaboración.
- Manejo o administración de los recursos de red (NRM), es necesario para la ejecución de los componentes de la aplicación en los recursos de cómputo y de comunicación disponible en la red.

1.4.2 Middleware

El Middleware es un software de conectividad que ofrece un conjunto de servicios que hacen posible el funcionamiento de aplicaciones distribuidas sobre plataformas heterogéneas. Funciona como una capa de abstracción de software distribuido, que se sitúa entre las capas de aplicaciones y las capas inferiores (sistema operativo y red).

El Middleware nos abstrae de la complejidad y heterogeneidad de las redes de comunicaciones subyacentes, así como de los sistemas operativos y lenguajes de

programación, proporcionando una API para la fácil programación y manejo de aplicaciones distribuidas. Dependiendo del problema a resolver y de las funciones necesarias, serán útiles diferentes tipo de servicios de middleware. El Middleware no solo provee de un estándar para la comunicación entre los recursos de red y sensores de funcionamiento *plug-and-play*, sino también habilita la rápida implementación con un alto rendimiento incrustado en el procesamiento de señales.

1.5 DIRECCIONAMIENTO Y ADMINISTRACIÓN DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

La administración de las WSNs debe ser autónoma, es decir, debe haber un auto manejo (auto-organización, auto-reparación, auto-optimización, auto-protección, debe ser independiente económicamente, debe haber un autodiagnóstico) con un mínimo de interferencia humana, y resistente a los cambios de estados de la red manteniendo una calidad de servicios. Hasta este momento, las WSNs y sus aplicaciones se han desarrollado sin la consideración de una solución de administración integrada.

Claramente, es posible para un equipo de desarrollo llevar a cabo la construcción de una WSN, pero esto no es inherentemente escalable y muy difícil de mantener. Por consiguiente una meta adicional es automatizar totalmente el proceso de configuración de la comunicación de la red, almacenamiento, y recursos informáticos para procesar los datos de los sensores en tiempo real, proporcionando robustez de tolerancia de fallas ante los fracasos de los recursos de red, e imparta este servicio en una alta red dinámica.

Los requisitos para satisfacer las actividades de administración se pueden categorizar en áreas funcionales, tales como: administración de fallas; administración de configuración; administración del funcionamiento; administración de cuentas; y administración de seguridad.

Esto ha demostrado ser una manera provechosa de repartir el problema de la dirección o administración de la red desde un punto de vista de aplicación. Para distribuir la complejidad de la administración, las funciones de administración se pueden descomponer en un número de niveles lógicos que son: la administración de negocios;

administración del servicio; administración de la red; y administración de los elementos de red.

La administración de recursos es una buena estrategia para compartir con situaciones de administración compleja ya que permite descomponer a un problema en sub-problemas más pequeños. Esto hará posible la integración organizacional, administrativa, y brindará las actividades para el mantenimiento de una red dada. Usar las áreas funcionales de administración y los niveles de administración no es suficiente para una administración de recursos eficiente porque las WSNs dependen de la aplicación específica que se de a la red. Las WSNs son aplicadas en usos de monitoreo ambiental y para actuar sobre ellos. Así, la administración de los recursos debe ser compatible con la aplicación implementada.

Entonces, mirando las características de las varias aplicaciones de las WSNs, se identifican cinco funcionalidades principales de WSN que permitirán una mejor administración de recursos: configuración; detección o sensado; procesamiento; comunicación; y mantenimiento. Estas funcionalidades definen una dimensión nueva para la administración, como se presenta en la figura. 1.3.

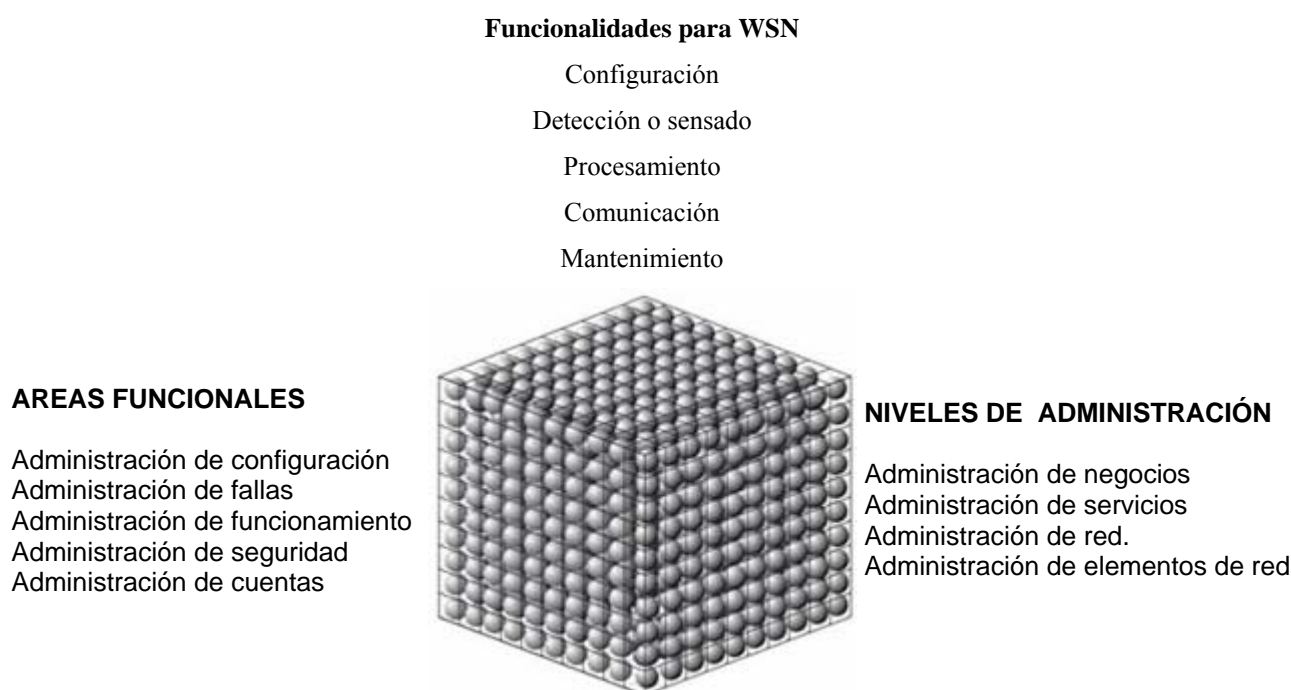


Figura. 1.3. Dimensionamiento de la administración para WSNs.

1.5.1 Niveles de Administración

Muchos sistemas de administración tradicionales utilizan este modelo; sin embargo, en la administración de WSN, este modelo depende del tipo de aplicación o uso de la red sensorial. Es decir solo después de definir el uso o el tipo de aplicación de la WSN, incluyendo requisitos correspondientes en la capa del servicio, que una puede planear los niveles de administración de la red.

- **Administración de Negocios:**

Porque WSNs depende de la aplicación, la administración de negocios se ocupa del desarrollo de servicios y determinación de costos de funcionamiento. Representa una red de sensores como función del costo asociado con la instalación de la red, la detección o sensado, el procesamiento, la comunicación, y el mantenimiento de la red.

- **Administración de Servicios**

La administración de servicios en una WSN introduce nuevos desafíos debido a los escasos recursos de red, topología dinámica, tráfico aleatorio, restricción de energía, y a una cantidad grande de elementos de la red. Los servicios de WSN se refieren a las funcionalidades asociadas a su aplicación o uso. Los servicios básicos de una WSN son, el sensado o detección, procesamiento y diseminación de datos. Dos puntos principales se asocian a la administración de servicio en WSN: calidad del servicio (QoS) y negación del servicio (DOS).

Calidad del servicio. Las arquitecturas de QoS pueden ser eficaces y proporcionan servicios de garantía si los elementos de QoS pueden ser configurados y supervisados adecuadamente. Los componentes implicados en la obtención de una QoS en una WSNs incluyen modelos de QoS como; QoS en el sensado o detección, QoS en el procesamiento, y QoS en la diseminación o difusión de datos [2]. Cuanto más grande es el número de parámetros que monitorean la QoS es más grande el consumo de energía y más baja es la vida útil de la red.

QoS en el sensado; considera la calibración del dispositivo sensor, monitoreo de interferencia del ambiente, y exposición (tiempo, distancia, y el ángulo entre el dispositivo sensor y el fenómeno). También el área de cobertura es una medida de la QoS para un WSN.

QoS en la disseminación o difusión de datos: La entrega confiable de los datos sigue siendo un punto abierto en el contexto de WSNs. La QoS en la difusión en WSNs es una tarea desafiante debido ha apremios como principalmente de energía y topología dinámica de las WSNs. Los dos componentes para la QoS en la difusión son la QoS en el enrutamiento y la QoS en el control del acceso al medio (MAC). La QoS en el enrutamiento encuentra una trayectoria que satisface un requisito de QoS dado, y QoS MAC soluciona el problema de la contención del medio que soporta una comunicación *unicast* confiable.

QoS en el proceso: La calidad del proceso depende de la robustes y de la complejidad de los algoritmos usados, así como el procesador y las capacidades de memoria. En la mayoría del WSNs, el consumo de energía es una métrica principal. Sin embargo, en algunas situaciones, durante ciertos acontecimientos la red debe aplicar el máximo de energía posible en la entrega de información por ejemplo, en WSNs desplegada sobre el estrago de un derrumbamiento donde tanta información como sea posible se necesita en el período más corto. En esta clase de aplicaciones, prolongar el curso de vida de la red no es importante.

- **Administración de la Red**

Esta capa apunta a manejar una red, que se distribuye típicamente sobre un área geográfica extensa, en su totalidad. En el nivel de la dirección de la red, las relaciones entre nodos sensores deben ser consideradas. Es que los nodos individuales están diseñados para detectar, procesar datos, y para comunicarse, así contribuyen a un objetivo común.

De esta manera, los nodos se pueden implicar en la colaboración, la conectividad, y las relaciones de la administración de la red de sensores. Un WSN se compone de los objetos interconectados (físicos o lógicos) capaces de intercambiar información. Adentro, la WSN se compone básicamente de dos porciones: recursos y servicios físicos.

Los recursos físicos incluyen los nodos sensores o actuadores; la fuente de alimentación; el procesador; la memoria; el dispositivo de sensado; y el transmisor-receptor. Los recursos lógicos incluyen protocolos de comunicación; programas de aplicación; procedimientos de correlación; y servicios de red.

- **Administración de los elementos de red**

Los elementos administrados de la red representan los nodos sensores y actuadores u otras entidades de WSN, que ejecutan funciones administrativas y proporcionan la detección o sensado, procesamiento, y difusión de servicios. Las funciones básicas para la administración de elementos de un WSN son:

- Administración de la energía: como un nodo sensor utiliza su energía.
- Administración de la movilidad: como el movimiento de los nodos sensores es planificado, su funcionamiento, y su registro.
- Administración de tareas: como un nodo sensor balancea y programa la detección, el procesamiento y la distribución de tareas dado en un estado específico de la red.

Cada sensor debe ser autónomo y capaz de organizarse en la comunidad total de los nodos sensores para realizar actividades coordinadas con objetivos globales.

1.5.2 Funcionalidades en WSN

Esta sección trata del novedoso propósito de dimensionar la administración de las WSNs, compuesto por la configuración, la detección, el procesamiento, la comunicación, y las funcionalidades de mantenimiento.

La funcionalidad de estos WSN se puede observar en la parte superior de la figura.1.3. Una solución a la administración depende de las características de la red, esta solución se debe proponer considerando el tipo de red.

- **Configuración**

Esta funcionalidad implica los procedimientos relacionados con el planeamiento, la colocación, y la auto-organización de una WSN. La funcionalidad de la configuración se relaciona con:

- Definición de requisitos de aplicación de la WSN.
- Determinación del área de monitoreo (la forma y la dimensión).
- Características del ambiente.
- Elección de nodos.
- Definición de tipo de WSN.
- Servicio que proporciona.

Los nodos son autónomos cuando pueden ejecutar tareas de descubrimiento y de auto-configuración de locación sin la intervención humana. Para retransmitir la información de la red, los nodos sensores se equipan de un dispositivo inalámbrico de comunicación (transmisor-receptor). Un nodo sensor inalámbrico, abarca uno o más elementos sensores, baterías, memoria, y procesador. El tamaño de un nodo es de una consideración importante. Los nodos deben ser pequeños para logra discreción en el ambiente a monitorear. La restricción de tamaño se relaciona de cerca con la cantidad de energía disponible. Se requiere de una construcción rugosa y robusta si los nodos se dispersan en un terreno inhospitalario tal como un bosque.

Debido a la naturaleza ambiental, a la logística, y a los costes de distribución, el despliegue de sensores puede ser una operación de una sola vez; por lo tanto, después de que los nodos se hayan distribuido en el campo, la intervención humana no es una opción.

- **Sensado**

El nivel más bajo para el uso del sensado es proporcionado por los nodos sensores autónomos. Una operación importante en una red de sensores es la reunión de los datos. La funcionalidad de sensado depende del tipo del fenómeno.

Así, las WSNs pueden clasificarse en términos de concurrencia de datos requeridos por las aplicaciones tal como continuas (cuando los nodos sensores recogen datos continuamente a lo largo del tiempo), reactivas (cuando responde a los observadores, pregunta o recopila datos que se refieren a los acontecimientos específicos que ocurren en el ambiente), y periódicas (cuando los nodos recogen datos según las condiciones definidas por la aplicación).

Un ejemplo de un fenómeno continuo es la temperatura y un ejemplo en el cual el fenómeno se está moviendo es un sensor desplegado para la detección de animales. Otros ejemplos de fenómenos son video; audio; presión; tensión mecánica; humedad; composición del suelo; luminosidad; sísmico; y producto químico.

- **Procesamiento**

La memoria y el procesador de un nodo sensor forman el módulo computacional, que es una unidad programable que proporciona el cómputo y el almacenaje para otros nodos del sistema. Dependiendo de los apremios de la comunicación del sistema, los algoritmos deben ser desarrollados de modo que permita a los nodos individuales o racimos de nodos compartir y procesar los datos eficientemente. El módulo de cómputo realiza el procesamiento de la señal básica y los envíos de los datos según la aplicación.

El procesamiento también involucra los procedimientos de correlación tales como fusión de los datos, que combina unos o más paquetes de datos recibidos de diversos sensores para producir un solo paquete (fusión de los datos).

La ayuda de la fusión de datos permite reducir la cantidad de datos transmitidos entre los nodos sensores y el observador y permite el diseño de una red que entregue datos requeridos mientras se reúnen requerimientos energéticos. Otras tareas posibles son el proceso de la seguridad y la compresión de datos.

- **Comunicación**

Los nodos individuales se comunican y coordinan entre sí mismos. Dos tipos de comunicación se proponen: de infraestructura y aplicación. La comunicación de

infraestructura se refiere a la comunicación necesaria para configurar, para mantener, y para optimizar la operación. La configuración y la topología de la red de sensores pueden cambiar rápidamente en presencia de un ambiente hostil, de una gran capacidad de trabajo asignado, y de los nodos que fallan rutinariamente; los protocolos convencionales pueden ser inadecuados para manejar tales situaciones; así, los nuevos protocolos se requieren para promover la productividad en las WSNs.

En una red de sensores estática, en una fase inicial de la comunicación de infraestructura es necesario tener instalada la red y también tener una comunicación adicional para realizar la reconfiguración de la misma. Si los sensores son móviles, la comunicación adicional es necesaria para el descubrimiento y reconfiguración de la trayectoria.

La comunicación de aplicación (difusión) se relaciona con la transferencia de los datos detectados o sensados (o de la información obtenida de ella). La cantidad de energía consumida en transmitir un paquete depende del hardware y de la distancia de la transmisión. La recepción del paquete de los datos tiene un coste energético fijo. Por lo tanto, para conservar energía, se prefiera las transmisiones de distancias cortas. Porque el punto de acceso puede ser localizado lejos, el coste para transmitir datos de un nodo dado al punto de acceso puede ser alto.

En una WSN homogénea y plana, los nodos sensores pueden formar una red multihop para enviar cada mensaje, que pueden proporcionar diversas opciones de conectividad. En un WSN heterogénea y jerárquica, los encabezamientos de los paquetes pueden formar una red de un solo salto para divulgar datos agregados a la estación base (BS). Dentro de un grupo, los datos medidos son enviados a la cabeza del grupo por los nodos sensores bajo su control. Todos los nodos en un grupo son idénticos excepto en la WSNs heterogéneas, donde la cabeza de grupo tiene una capacidad más grande de transmisión.

El coste de enviar datos puede conducir continuamente a un consumo más rápido de los recursos de red y, así, acortar el tiempo de vida útil. Las capacidades de multihop inalámbrico permitirán comunicación y coordinación entre nodos autónomos en ambientes y configuraciones imprevistas.

Para cualquier modelo precedente de comunicación se puede clasificar como:

- *Flooding*: sensores que difunden su información a sus vecinos (sensores *broadcasting*), que alternadamente difunden estos datos hasta que alcanzan al observador.
 - *Gossiping*: enviar datos a un vecino aleatoriamente seleccionado.
 - *Bargaining*: enviando datos a los nodos sensores solamente si estos están interesados.
 - *Unicast*: sensor que se comunica a con un solo nodo, a con la cabeza del grupo, o la estación base directamente.
 - *Multicast*: sensores que forman grupos de aplicación dirigidos y usan multicast para la comunicación entre miembros del grupo.
-
- **Mantenimiento**

El mantenimiento se utiliza en las WSN que pueden configurar, proteger, optimizar y repararse sin mucho acceso de los operadores humanos. El mantenimiento detecta fallas o degradaciones del funcionamiento, inicia procedimientos de diagnóstico, y realiza acciones correctivas en la red. Su habilidad para descubrir cambios en el estado de la red permite el auto-manejo, también adaptar y optimizar el comportamiento de la red.

Más allá de un mantenimiento correctivo, existen otros tipos de mantenimiento como son: adaptativo (el sistema se adapta a los cambios); preventivo (el sistema aprende a anticipar los cambios); y proactivo (el sistema aprende a intervenir para contrarrestar eventos negativos). Un ejemplo del mantenimiento se refiere a la densidad de nodos en el WSN; en caso de tener una alta densidad de nodos, el mantenimiento pueda apagar algunos nodos temporalmente.

Así, la función del mantenimiento es necesaria para mantener la red operacional y funcional y asegurar una robusta operación en ambientes dinámicos, así como optimizar el funcionamiento total. El mantenimiento proporciona la dependencia de los atributos principales las cuales son, confiabilidad, disponibilidad, seguridad, pruebas, y ejecución.

1.5.3 Administración de Áreas Funcionales

En WSNs, las características operacionales, administrativas, y de mantenimiento de los elementos de red; la red, los servicios; los negocios; y la adecuación de las actividades de configuración, la detección, el procesamiento, la comunicación, y el mantenimiento (según se indica en la figura.1.3.) son dependientes de la configuración de la WSN. Un error en la configuración o el olvido de un requisito durante la planificación puede comprometer el funcionamiento de todas las áreas.

- **Administración de la configuración**

La administración de la configuración es un área funcional de alta importancia en la administración de las WSNs; porque el objetivo de una WSN es el monitoreo (adquisición, procesamiento, y la entrega de datos) algún problema o situación no anticipada en la fase de configuración puede afectar el servicio ofrecido. El manejo de la configuración debe proporcionar perfiles básicos tales como auto-organización, auto-configuración, auto-descubrimiento, y auto-optimización. Algunas funciones de administración definidas para el manejo de configuración de la red son:

- Especificación de requisitos de operación de la red.
- Variaciones ambientales y de monitoreo.
- Definición del tamaño y forma de la región a ser monitoreada.
- Despliegue de nodos; randómicos o determinísticos.
- Determinación de parámetros de operación de la red.
- Descubrimiento del estado de la red.
- Descubrimiento de la conectividad de la red.
- Control de la densidad de los nodos.
- Sincronización.
- Evaluación del mapa de energía de la red.
- Determinación del área de cobertura.
- Integración con el observador o investigador
- Programación del nodo
- Localización del nodo
- Estado operacional del nodo

- Estado administrativo del nodo
- Estado de uso del nodo
- Nivel de energía del nodo

- **Administración de fallas**

Las averías o falla en las WSNs no son una excepción y tienden a ocurrir frecuentemente. Éste es una de las razones por las que la administración de las WSNs es diferente a la administración de las redes tradicionales. Las averías suceden a cada momento debido a la escasez de energía, la interrupción de la conectividad, las variaciones ambientales, y así sucesivamente.

Generalmente las redes de sensores deben ser de averías tolerantes y robustas y deben sobrevivir a pesar de la ocurrencia de fallas en nodos individuales, en la red, o aún en los servicios proporcionados. Además de los acontecimientos causados por los problemas de energía, otros acontecimientos pueden suceder en una red inalámbrica de sensores relacionada con la comunicación; el servicio de calidad; el procesamiento de datos; la avería física del equipo; el ambiente; la violación de la integridad; la violación operacional; la seguridad; y la violación del dominio de tiempo. La administración de fallas debe proporcionar características básicas tales como auto-mantenimiento, auto-reparación, y auto-protección. Las faltas serán frecuentes en una WSN, y el manejo de averías es una función crítica. Varias características de las redes sensoriales hacen que las averías o fallas sean más frecuentes que en redes tradicionales.

- Alta escalabilidad, despliegue de nodos individuales baratos significa que fallas de nodos por defectos de fábrica no sea raro.
- Los ataques de los adversarios serán probables porque estas redes son desarrolladas en situaciones críticas. Peor, los ataques serán más fáciles y frecuentes porque estas redes serán desplegadas a menudo en espacios abiertos en territorios enemigos donde los adversarios pueden manipular el ambiente (para interrumpir la comunicación) y también tiene accesos físicos a los nodos.
- La comunicación inalámbrica por radiofrecuencias permite que los adversarios pueden fácilmente ingresar a la red e interrumpir las funciones de la infraestructura (tales como el enrutamiento) de los nodos individuales.

La administración de fallas o averías, es un componente esencial de cualquier sistema de direccionamiento de red, es decir cumple un papel crucial en WSNs. En la mayoría de los usos, la detección de fallas no es solo vital para la tolerancia de avería, también lo es para la seguridad.

- **Administración del desempeño o funcionamiento**

El desafío es realizar esta tarea sin desfavorecer el consumo de recursos de red. En la administración del funcionamiento, se debe considerar: el alto número de parámetros a controlar o administrar, el alto consumo de energía y bajo nivel de vida de la red.

La configuración (en términos de capacidades del sensor, número de sensores, densidad, distribución del nodo, la auto-organización, y la difusión de datos) desempeña un papel significativo en la determinación del funcionamiento de la red. La administración del funcionamiento debe considerar la característica del autoservicio.

Sin importar la aplicación, ciertas características críticas pueden determinar la eficacia y la eficiencia de una red de sensores. Estas particularidades se pueden categorizar en características cuantitativas y características cualitativas. Las características cuantitativas incluyen tiempo en establecer la red; tiempo de armado de la red; tiempo de egresar la red; tiempo de recuperación de la red; frecuencia de actualización (gastos indirectos); requisito de memoria; y escalabilidad de la red. Las características cualitativas incluyen conocimiento de la localización nodal, efectos de cambio de topología, adaptación de la radio comunicación en el ambiente, poder de conciencia, canal único o múltiple y preservación de la seguridad de la red.

- **Administración de la seguridad**

Las funcionalidades de seguridad para WSNs son difíciles de proporcionar por la organización ad-hoc, intermitencia de la conectividad, comunicación inalámbrica y recursos limitados. Una WSN está sujeta a distintas amenazas de seguridad: interna, externa, accidental y maliciosa. La información puede ser destruida, modificada, robada, removida, perdida o proporcionar un servicio interrumpido. Incluso si una WSN es segura, el ambiente puede volverla insegura o vulnerable. La administración de la seguridad debe

proporcionar la auto-protección, la confiabilidad, la disponibilidad, la privacidad, la autenticidad y la integridad.

La determinación de una avería o grupo de averías es el resultado de un ataque intencional de DoS (negación de servicio); presenta una preocupación propia, un punto que llegan a ser aún más difíciles en los despliegues a grandes escalas, que pueden tener altos índices de fracaso nominales de nodos individuales de la red. La robustez contra desafíos físicos puede prevenir algunas clases de los ataques de DoS. Cada capa de la pila de protocolo es vulnerable a diversos ataques de DoS y tiene diversas opciones disponibles para su defensa.

- **Administración de cuentas**

La administración de cuentas incluye funciones relacionadas con el uso de recursos y de sus respectivos informes. Estas funciones pueden seguir el rastro del comportamiento de la red e incluso hacer inferencias sobre el comportamiento de un nodo dado. La administración de cuentas debe ser considerada auto sustentable.

Una WSN contiene un emisor de energía (batería) y a algunos consumidores de la energía (transmisor, receptor, módulo de cómputo, y dispositivos sensores). Las operaciones de la aplicación o administración se pueden medir o contar en términos de consumo de energía. Dar las características del nodo, el curso de vida promedio del sensor determina el costo de funcionamiento de una red sensorial.

Una forma para reducir el consumo total de energía es reducir el número de operaciones de consumo de gran energía y aumentar el número de operaciones que consumen poca energía. Algunas funciones que se relacionan con la administración de cuentas incluye: descubrimiento, cuentas, almacenamiento, y reporte de datos; inventario de la red; determinación de los costes de comunicación; consumo de energía; y comprobación de tráfico.

CAPITULO 2

ARQUITECTURAS PARA REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

2.1 INTRODUCCIÓN

El número total de nodos sensores y la dinámica de sus ambientes operativos (por ejemplo, energía limitada de la batería y ambiente físico hostil) plantea retos únicos en el diseño de las redes de sensores y sus aplicaciones. Temas concernientes sobre como la información recolectada y guardada en una red de sensores puede ser solicitada y revisada, son de vital importancia.

El surgimiento del concepto de redes inalámbricas, con electrónica de baja potencia, energía baja, radios de comunicación de corto alcance, y sensores inteligentes es considerado el mayor precursor de despliegue de sensores inalámbricos.

El objetivo de la investigación de este capítulo es identificar cuestiones de diseño y arquitecturas claves relacionadas con las redes de sensores, evaluar críticamente las soluciones propuestas, y delinear las direcciones de investigación más desafiantes.

Como resultado, las redes de sensores inalámbricas son sistemas complejos en los que el comportamiento del sistema involucra un gran número de nodos sensores cooperativos.

La mayor conclusión del análisis es que el énfasis en la arquitectura y síntesis será cambiado en la computación y, hasta cierto punto en la comunicación, componentes de sensores, actuadores, y diferentes tipos de sensores y aplicaciones que requieren claramente diferentes arquitecturas.

2.2 REQUISITOS GLOBALES PARA UNA RED DE SENSORES

Es bien sabido que las características de los sistemas de cómputo y comunicación son consecuencias directas de aplicaciones objetivas. Un número de características de las redes de sensores que tienen impacto directo en las decisiones arquitectónicas y de diseño han sido identificadas. Estas características crecen naturalmente por confluencias típicas de requerimientos de aplicación y limitaciones de tecnología. Las aplicaciones de redes sensoriales típicas incluyen monitoreo de transporte contaminante; análisis de microorganismos marinos; detección de hábitat; y monitoreo sísmico y del hogar.

Estas aplicaciones muestran un gran manejo de diversidad. Sin embargo, un sin número de características generales se comparten entre la mayoría de las aplicaciones de redes de sensores, sin dejar de lado los tipos de sensores específicos y los objetivos de aplicación. Estas características incluyen bajo costo; tamaño pequeño; consumo bajo de energía; fortaleza; flexibilidad; resistencia de errores y fallas; modo de operación autónoma, privacidad y seguridad.

Un sin número de tendencias de tecnología relevante necesita ser considerada. Por ejemplo, una gran variedad de poderosa tecnología de baja energía, procesadores de bajo costo, memorias baratas que son ampliamente accesibles. También, tecnologías de memoria y procesador están creciendo más y más poderosamente de acuerdo a la ley de Moore, y el ancho de banda ha crecido por un factor de mas de 100 en los últimos 7 años; la capacidad de baterías esta creciendo en un índice del 3% por año. Los sensores y actuadores son campos industriales relativamente jóvenes y las predicciones son aun inciertas.

Debido a estos obligados requerimientos de aplicación y tecnología, los siguientes objetivos de diseño y arquitectura son los más relevantes:

- **Tamaño físico pequeño:** Reducir el tamaño físico ha sido siempre uno de los temas clave del diseño. Es por eso que, la meta es proveer procesadores, memorias, radios y otros componentes poderosos mientras se mantiene un tamaño razonable, determinado por una aplicación específica.

- Consumo Bajo de energía. La capacidad, tiempo de vida, y desempeño de los sensores están todos dirigidos por la energía. Los sensores deben ser capaces de estar activos durante un tiempo largo razonable sin tener que recargar la batería ya que el mantenimiento es costoso.
- Concurrencia operación intensiva: Para lograr un desempeño total, la información del sensor debe ser capturada desde el sensor, procesada, comprimida, y luego enviada a la red simultáneamente en la forma proyectada, en lugar de acción secuencial. Dos enfoques conceptuales registran este requerimiento: (1) particionar el procesador en unidades múltiples en las que a cada una se le asigne responsabilidad por tareas específicas; y (2) reducción de cambio de tiempo del contexto.
- Diversidad en el diseño y uso. Debido a que cada nodo debe ser pequeño en tamaño, bajo en consumo de energía, y tener paralelismo físico limitado, los nodos sensores intentan ser de aplicación específica. Sin embargo, diferentes sensores tienen diferentes requerimientos. Por ejemplo, las cámaras y termómetros simples son dos extremos en términos de funcionalidad y complejidad. Es por eso que, el diseño debe facilitar intercambios entre re-uso, costo y eficiencia.
- Operaciones de robustecimiento. Debido a que los sensores serán desplegados en áreas grandes y algunas veces en ambiente hostil (bosques, usos militares, cuerpo humano), deben ser tolerantes a fallas y errores. Es por eso que, los nodos sensores necesitan habilidades para auto-probarse, auto-calibrarse, y auto-repararse.
- Seguridad y privacidad. Cada nodo sensor debe tener suficientes mecanismos de seguridad para prevenir acceso no autorizado, ataques, y daño no intencional de la información dentro del nodo. Además, mecanismos de privacidad adicionales deben ser incluidos.
- Compatibilidad. El costo para desarrollar programas domina el costo total del sistema. En particular, es importante ser capaz de re-usar un código de legalidad a través de compatibilidad binaria o traducción binaria.
- Flexibilidad. Es necesario acomodar cambios funcionales y de tiempo. La flexibilidad puede ser lograda por dos medios: (1) programabilidad (empleando procesadores programables como micro-procesadores, procesadores DSP, y micro-controladores); y (2) re-configuración (usando plataformas basadas en FPGA). La

flexibilidad será principalmente alcanzada logrando programabilidad y uso de ASIC especializados y co-procesadores debido al bajo consumo de energía.

2.3 COMPONENTES Y ARQUITECTURA DE UN NODO SENSOR

Los nodos de las redes de sensores generalmente están compuestos por los siguientes componentes: suministro de energía; sensor; convertidor análogo/digital; procesador; unidad de almacenamiento; y finalmente, subsistemas de comunicación (radio). La arquitectura de un nodo es completamente dependiente del propósito del despliegue. Pero se puede generalizar la arquitectura como se muestra en la Figura. 2.1. Un nodo de una WSN integra detección, procesamiento de la señal, recolección y almacenamiento de la información, computación, y comunicaciones inalámbricas, con el abastecimiento de energía adjunto en un solo chip.

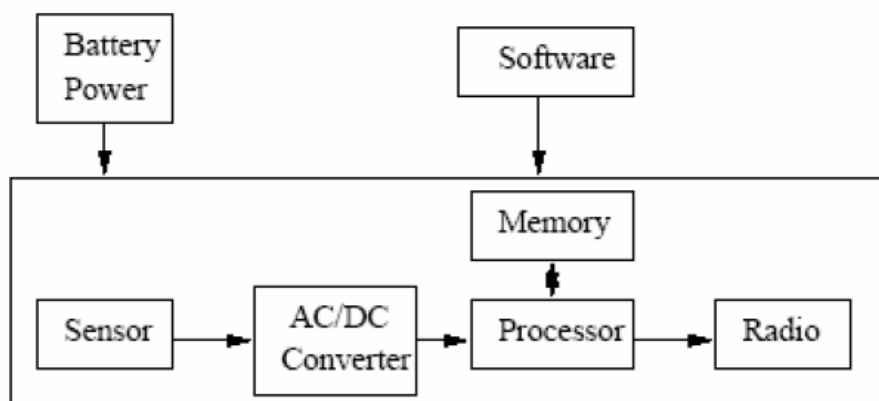


Figura. 2.1. Arquitectura de un nodo sensor

La unidad de abastecimiento de energía que usualmente es una batería adjunta con un deseable voltaje de salida para alimentar al resto de componentes en el sistema; la unidad de detección que consiste de sensores incrustados y actores así como un conversor análogo-digital que enlaza el nodo sensor con el mundo físico; la una unidad de computo y procesamiento la cual es una unidad de micro-control (MCU) o microprocesador con memoria y provee inteligencia al nodo sensor (en su gran variedad el MCU usado incluye el microprocesador “*INTEL Strong Arm*” y el microcontrolador “*Atmel AVR*”); y la unidad de comunicación la cual consiste de un circuito RF de corto alcance y ejecuta transmisión y recepción de la información.

Además, un sistema micro-operativo en tiempo real que controla y opera la detección, cómputo, y unidades de comunicación a través de micro-dispositivos instalados y deciden que partes se deben apagar o encender.

2.3.1 Procesador

El grupo de investigación BWRC de Berkeley ha diseñado e implementado un prototipo de procesador; sus principales áreas de objetivo incluyen procesamiento de voz y aplicaciones relacionadas para dispositivos inalámbricos. Por ejemplo, el procesador puede ser usado en museos para proveer mejor interacción entre los objetos visitantes y los artículos expuestos. El procesador Maia [3] esta construido alrededor de un núcleo ARM8 con 21 co-procesadores. Estos 21 procesadores incluyen: 2 MACs; 2 ALUs; 8 generadores de dirección; 8 memorias integradas; y un FPGA de baja energía integrado, tal como se observa en la figura. 2.2. [4].

El objetivo es proveer suficiente paralelismo en niveles de energía bajos. El núcleo ARM8 configura los satélites de memoria mapeada usando un bus configurable de 32b y también comunica información a los co-procesadores del satélite usando dos pares de puertos de interfase I/O aplicando lectura/escritura directa de memoria. Las interacciones entre el ARM8 y los satélites coprocesadores se llevan a cabo por medio de una unidad de control de interfase.

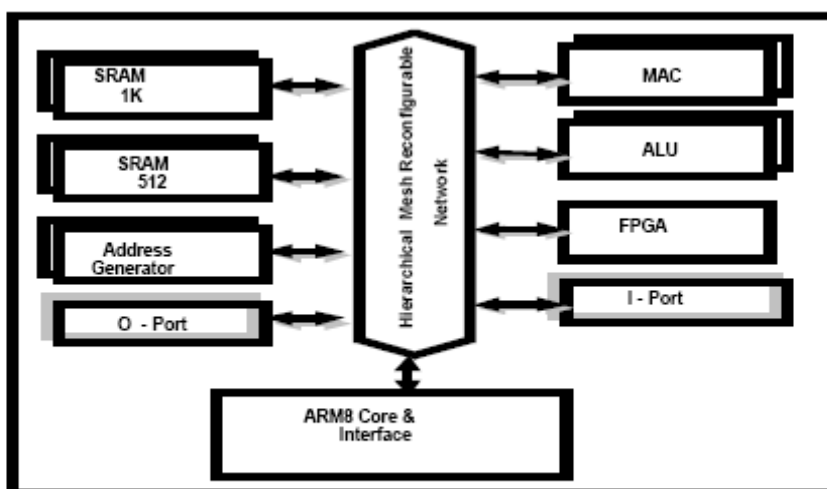


Figura. 2.2. Diagrama de bloques de la Arquitectura Maia

Este chip de 210 pines contiene 1.2M transistores y mide 5.2x6.7mm² en 0.25μm, y seis metales CMOS. Para poder minimizar el consumo total de energía, el núcleo ARM8 integrado es adicionalmente optimizado y puede operar bajo voltajes de energía variables. Adicionalmente, el control de acceso al medio (MAC) de doble etapa en proyecto y el ALU son configurables. Los generadores de dirección y memorias integradas proveen salidas de información concurrente múltiple para los componentes computacionales. EL FPGA integrado tiene 4x8 arreglos de 5 entradas, tres salidas CLBs. Puede ser optimizado para tareas tales como operaciones aritméticas y funciones de control de flujo de información. La unidad de control de interfase interactúa y coordina la sincronización y comunicación entre los núcleos ARM8 síncronos y las rutas de información reconfigurables asíncronas. También permite al núcleo ARM8 configurar los satélites. El modelo de computación objetiva total es globalmente asíncrona, localmente operan índices múltiples de computación sincronía y soportes.

2.3.2 Almacenamiento – Memoria

Dependiendo de la estructura total de la red de sensores, los requerimientos de almacenamiento en términos de rapidez y memoria no volátil en cada nodo puede ser diferente en gran manera. Por ejemplo, si se sigue el modelo de arquitectura en el que toda la información es instantáneamente enviada al nodo central, hay poca necesidad de que haya almacenamiento local en los nodos individuales. Sin embargo, en un escenario mas real en el que la meta es minimizar la cantidad de comunicación y conducir una significativa parte de la computación en cada nodo individual, habría un significativo requerimiento de almacenamiento local. Por lo menos existen dos alternativas para almacenar información en el nodo local. Adicionalmente, en el caso de que el nodo sea físicamente mayor, se puede almacenar la información en micro discos.

La primera opción es usar una memoria flash, lo cual es muy atractivo en términos de costo y capacidad de almacenamiento. Sin embargo, tiene relativas limitaciones severas en términos de cuantas veces puede ser usado para almacenar diferentes tipos de información en las mismas ubicaciones físicas. Por lo menos 2 desafíos mayores para el uso de memorias no volátiles en los nodos sensores son: (1) particionamiento para reducción de energía y (2) desarrollar estructuras de memoria que ubicaran la información corta, de longitud de palabra producida por sensores. Note que un significativo porcentaje

de control de red e información de sensores tendrán baja entropía. Es por eso que, es aconsejable que sean usadas técnicas de compresión agresivas para reducir la cantidad de información que debe ser almacenada o transferida.

2.3.3 Suministro de Energía

Un amplio consenso es que la energía será una de las principales restricciones tecnológicas de los nodos sensores. Por ejemplo, la actual generación de pequeñas insignias y motas permite operaciones continuas por unas cuantas horas. El suministro de energía puede ser direccionado por lo menos en 2 diferentes maneras.

La primera es equipar cada nodo sensor con una fuente de energía (recargable). Dos opciones principales existen sobre este enfoque. Actualmente, la opción dominante es usar células de batería de alta densidad; la otra alternativa es usar células completas. Las células completas proveen alta densidad excepcional y fuentes de energía claras. Si embargo, no están disponibles actualmente en un formato físico apropiado para los nodos de redes con sensores.

El segundo concepto alternativo es capturar energía disponible en el ambiente. Además, de las celdas solares, las cuales ya se usan ampliamente para aplicaciones móviles como calculadoras, se ha realizado un sin número de propuestas concernientes a la conversión de vibraciones a energía eléctrica. Un sistema inalámbrico sin batería que captura el calor del ambiente es usado en lugar de adoptar las baterías convencionales como fuente de energía.

2.3.4 Sensores

La importancia de los sensores no puede ser sobrestimada. El componente de captación de los nodos es la actual tecnología de obstáculos; estas tecnologías no progresan tan rápidamente como los semi-conductores en la actualidad. Existen limitaciones conceptuales que son significativamente más estrictas para los sensores que para los procesadores o el almacenamiento. Por ejemplo, los sensores interactúan con el mundo físico real, mientras unidades de cómputo y comunicación están interactuando con el entorno altamente controlado de un simple chip. Los transductores son componentes

principales en los nodos sensores que se usan para transformar una forma de energía en otra. El diseño de transductores es considerado fuera del alcance de una arquitectura de sistemas. Adicionalmente, los sensores pueden tener otros 4 componentes: análogos, A/D, digitales, y micro-controladores. La opción de diseño más simple incluye solo el transductor; sin embargo, debido a que la tendencia actual es poner mas “inteligencia” en los nodos sensores de red, se están adicionando significantes habilidades de procesamiento y computo en los nodos sensores.

Uno de los principales desafíos de las redes con sensores es seleccionar el tipo y cantidad de sensores y determinar su ubicación. Esta tarea es difícil debido a la enorme cantidad de tipos de sensores con diferentes propiedades tales como resolución, costo, exactitud, tamaño, y consumo de energía. Adicionalmente, muchas veces más de un tipo de sensor es necesario para asegurar la veracidad de la información y operación desde diferentes sensores que pueden ser combinados. Otro desafío es seleccionar el correcto tipo de sensores y la forma de operarlos. La fuente de dificultad esta en las interacciones entre sensores. Algunas otras tareas de diseño están asociadas con sensores, incluyendo tolerancia a fallas, control de errores, calibración, y sincronización de tiempo.

2.3.5 Radio

Los radios de corto alcance como componentes de comunicación son excepcionalmente importantes ya que la parte de la energía presupuestada dedicada a enviar y recibir mensajes usualmente domina el estimado total de la energía.

El diseño de radios con eficiencia de energía y ancho de banda es una de las tareas principales para investigación y desarrollo. Es importante tener en cuenta que la arquitectura de radio es una función de la estructura de red y protocolos empleados. El intercambio principal es entre el costo relativo de energía de transmisión y recepción. Es por eso que, es necesario desarrollar esquemas que permitan periodos largos de modo de descanso para los receptores. Por ejemplo, una opción es usar políticas coordinadas para decidir que nodo ira a modo de descanso mientras la conectividad en el nodo se mantiene. La otra opción es usar dos radios; uno de ellos es responsable de la recepción de la información y tiene necesidad de energía. Es usado solo cuando el otro radio de extrema energía baja lo llame. El radio de extrema energía baja es solo usado para detectar si uno

quiere transmitir información a este nodo. En el resto de esta sección, describe el diseño de un nodo sensor: el Berkeley mote.

2.3.6 Nodo Mote de Berkeley

El punto inicial para diseño remoto de nodos de redes de sensores inalámbricas fue el grupo de observaciones cualitativas sobre los requerimientos de las redes inalámbricas. Se hizo un especial énfasis en el bajo consumo de energía y de tamaños pequeños. Adicionalmente, se hicieron intentos para facilitar la concurrencia intensiva de operaciones para proveer jerarquías de control y tomar ventaja del paralelismo físico limitado.

El procesador principal es el microcontrolador Atmel 90LS8535 que tiene arquitectura Harvard 8b con 16b de direcciones, Alcanza una velocidad de 4MHz a 3W. El sistema tiene una mínima cantidad de memoria que consiste de 8 kbytes de memoria flash programable y 512 bytes de SRAM para memoria de datos. Es por eso que, el sistema puede ser integrado solo con sensores de baja frecuencia. El procesador integra un sistema de contadores y temporizadores y puede ser ubicado en cuatro modos de energía: activo, en espera, sin energía y ahorro de energía.

En el modo de espera, el procesador está completamente apagado. En el modo sin energía, solo están habilitados el organismo de control y la lógica de interrupción asíncrona. Finalmente, en el modo de ahorro de energía, además del organismo de control e interrupción lógica, el temporizador asíncrono también está activo. El sistema tiene un coprocesador microcontrolador Atmel 90LS2343 que tiene una memoria flash de instrucciones de 2 kbytes y 128 bytes de SRAM y memoria EEPROM. El coprocesador puede ser usado para reprogramar el microcontrolador principal. Los autores consideran el transductor (receptor-transmisor) RF Monolítico 916.50 como la parte central del diseño. El radio está equipado con una antena y un sistema de componentes discretos que pueden ser usados para alterar características de la capa física como fortalecimiento de la señal. El radio opera a una velocidad de 19.2 kbytes/seg.

El transductor puede operar en tres modos: transmisión, recepción, apagado. El sistema puede tener hasta ocho sensores; los dos sensores más usados son el fotoeléctrico y el de temperatura. Cada sensor ubicado en el bus es controlado usando software.

Es instructivo considerar las características de energía para el diseño. El MCU núcleo consume entre 2.5 y 6.5 mA; el radio consume entre 5 y 12 mA. Los sensores ópticos y de temperatura consumen 0.3 y 1 mA, respectivamente, y el coprocesador consume de 1 a 2.4 mA. Finalmente, el EEPROM consume de 1 a 3mA. En particular, es instructivo comparar el gasto de energía por bit de transmisión y bit de procesamiento. El sistema gasta alrededor de 1 mJ para enviar, y 0.5mJ para recibir 1bit. Al mismo tiempo, el sistema puede ejecutar aproximadamente 120 instrucciones por cada mJ gastado. El sistema provee reducción de energía usando voltaje variable; es por eso que, la energía es ahorrada principalmente al apagar el sistema. El núcleo para el software del sistema para el diseño es el excepcionalmente compacto sistema operativo de microhilos (TinyOS).

El diseño del grupo Berkeley concluyo que el nuevo dominio de aplicación requiere un nuevo OS; es por eso que, decidieron no adoptar una gran variedad de los controladores RTOS 8bits. Aunque esta decisión ciertamente dio como resultado mayor eficiencia de la energía y arquitecturas de sistemas de software más interesantes, también creó demandas adicionales y direcciones en la programación la cual ya estaba altamente restringida en hardware. Sin embargo, el sistema se ha vuelto muy popular en la comunidad de la investigación. Muchas copias de las motas en diferentes versiones han sido usadas por más de 200 equipos de investigación. La mayor fortaleza del sistema es su pequeño tamaño y baja energía. Probablemente una de las más serias desventajas está relacionada al desarrollo de aplicaciones reales. Aunque las motas han sido tremendamente populares en las comunidades investigativas, todavía no esta claro que tan bien equipadas están las aplicaciones en las cuales se necesitan sistemas de sensores más complejos [5].

2.4 ARQUITECTURAS DISPONIBLES PARA REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

Existen tres arquitecturas básicas de redes de sensores inalámbricas: conexión directa, multi-salto punto a punto, y multi-salto basado en clusters, como se muestra en la figura.2.3. Debido a que el número de nodos sensores es usualmente mayor y el rango de transmisión de los nodos sensores puede ser limitado por la capacidad limitada de la batería, de manera general hay ineficiencia de costos y, en muchos casos, es imposible, para cada pequeño sensor comunicarse directamente con el nodo recolector. Así, el modo de conexión directa no es aconsejable para despliegue de redes de sensores de gran escala.

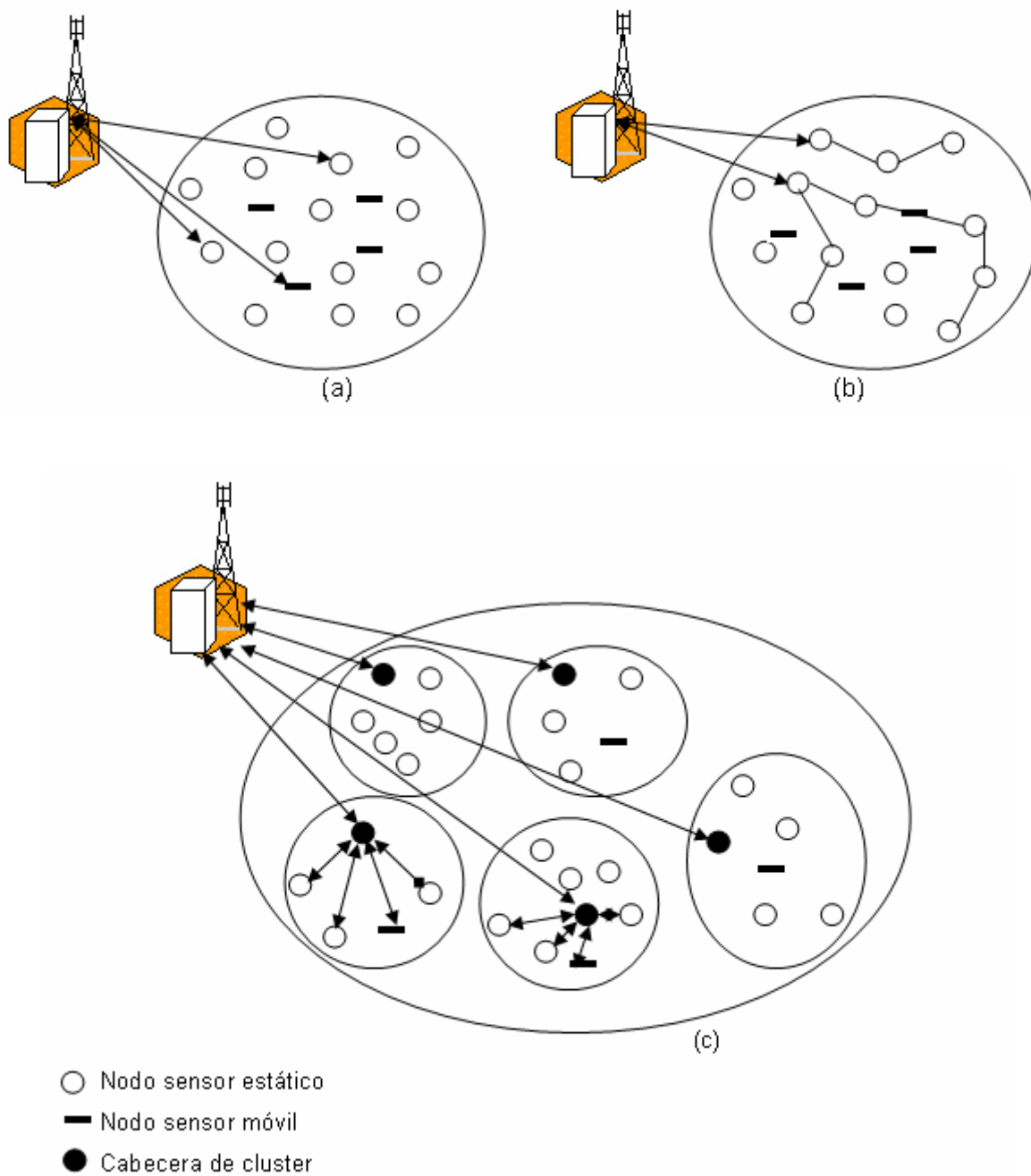


Figura.2.3. Redes de sensores: (a) conexión directa; (b) multi-salto punto a punto y (c) modo basado en clusters

El modo multi-salto es una alternativa apta principalmente por sus consideraciones de eficiencia de energía. Adicionalmente a resolver problemas asociados con el limitado rango de transmisión directa de los nodos, la transmisión de corto alcance multi-salto usualmente consume menos energía que la requerida para una transmisión de largo alcance para un par de recursos y destinos dados porque, en general, la señal de energía recibida

promedio es inversamente proporcional a la n -ésima energía de la distancia, (usualmente $2 < n < 4$). En una red plana ad hoc multi-salto, como se muestra en la figura. 2.3. (b), algunos nodos sensores tienen capacidad de ruteo, para realizar la tarea de comunicación de los paquetes adicionalmente a la detección y envío de su información. Aunque este modo es flexible y tiene eficiencia de energía, la escalabilidad es todavía un problema. Los nodos más cercanos a la estación base serán usados para enrutar los paquetes de información de otros nodos hacia el centro de procesamiento; si el tamaño de la red es grande, estos nodos transmiten una gran cantidad de información y su energía se agotará rápidamente, resultando finalmente en desconexión de la red.

Las redes de sensores multi-salto basadas en clusters tratan de lograr temas de escalabilidad asociados con las redes multi-salto planas. En un sistema basado en clusters, los nodos sensores forman clusters. Un nodo cluster principal para cada cluster es seleccionado de acuerdo a ciertas reglas de negociación [6]. Los nodos sensores solo transmiten su información a su inmediato nodo principal de cluster. En la figura. 2.3.(c), solo se diagrama un tipo de clustering de un nivel; sin embargo, en general un esquema de cluster jerárquico puede ser usado, es decir, los nodos principales de cluster de niveles más bajos se comunican con los de nivel superior. La fusión y clasificación de la información local en los nodos principales de cluster puede ser usada para reducir la cantidad de información que debe ser transmitida al centro de recolección, para así reducir la energía total consumida para la transmisión. La mayor desventaja de este modo de operación es que la comunicación permanece bastante tiempo en el nodo principal de cluster, lo que resulta en problemas en los niveles más altos de nodos principales. Estos temas pueden ser registrados a través de rotación de roles de varios nodos.

En algunos escenarios el nodo recolector puede ser móvil, por ejemplo, en un campo de batalla. Otro escenario es usar un grupo de vehículos aéreos cooperativos *Unmanned* (sin tripulación) como hubs de comunicación para los sensores en una región de interés para recolectar información.

Una red de Sensores es más orientada a la información que lo que lo son las redes inalámbricas tradicionales. La estrategia de fusión de la información juega un papel importante en el diseño de red. Generalmente, las arquitecturas de diseminación/fusión de la información de las redes sensores puede ser clasificadas en las siguientes tres amplias

categorías: centralizada, localizada o híbrida. La figura. 2.4. Diagrama las características de estas arquitecturas.

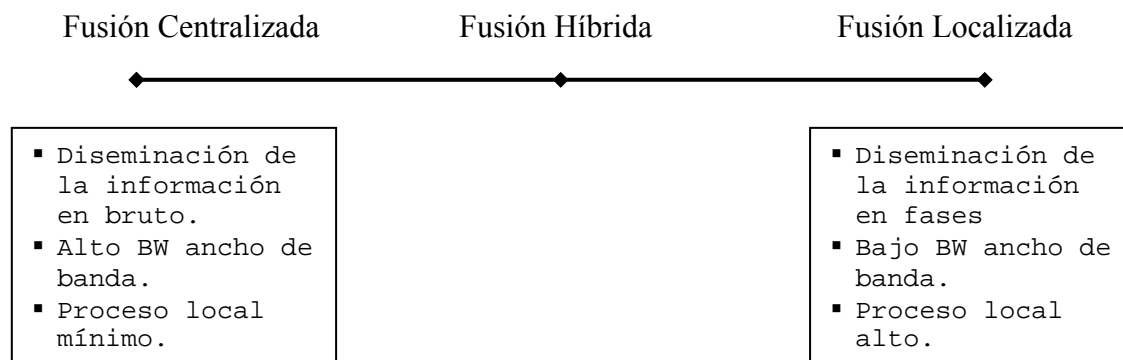


Figura. 2.4. Comparación de las arquitecturas de diseminación/fusión de la información

Si todos los reportes de los sensores son transmitidos a una recolección y centro de procesamiento sin un retardo significativo, se llama fusión centralizada de la información. Para la fusión centralizada, todos los resultados de observación son recibidos y serán procesados por el centro de procesamiento a espacios de tiempo prudentes; así puede tomar en cuenta toda la información relevante para proveer la salida óptima. Sin embargo, la realización de arquitectura de fusión centralizada puede enfrentar dificultades para razones tales como la capacidad limitada de enlaces de información y problemas de sincronización. Es por eso, que la arquitectura de fusión localizada ha sido propuesta.

A diferencia de las redes celulares inalámbricas tradicionales en las que la comunicación es de persona a persona y el contenido de las conversaciones son irrelevantes unos con otros, en las redes de sensores, la información en los nodos vecinos se consideran altamente correlacionados porque los objetos observados en el mundo físico están altamente correlacionados. Así, el procesamiento de información localizada y agregación puede dramáticamente disminuir la cantidad de información transmitida. Determinar la arquitectura apropiada, envuelve, intercambiar costos de transporte de información vs. procesamiento localizado. La información que debe ser transmitida tiene un costo por byte y energía de procesamiento usada para reducir la información no procesada a un grupo de características y/o un resultado de fusión tiene un costo por millones de instrucciones por segundo. La energía de procesamiento necesaria para generar características de vectores usualmente consume menos energía que cuando transmite los

grupos de información no procesada. Es por eso que, para maximizar el tiempo de vida del sensor, la arquitectura de redes de sensores tendrá un enfoque mayormente localizado. Al mismo tiempo, se puede hacer una demanda para la detección de objetivos óptimos y el rastreo ocurre de la fusión centralizada. Como resultado de las soluciones híbridas son requeridas para considerar y balancear los correspondientes intercambios, dependiendo de la totalidad de objetivos de la estrategia desarrollada.

En los siguientes gráficos se observa un ejemplo claro de la arquitectura centralizada y la arquitectura localizada

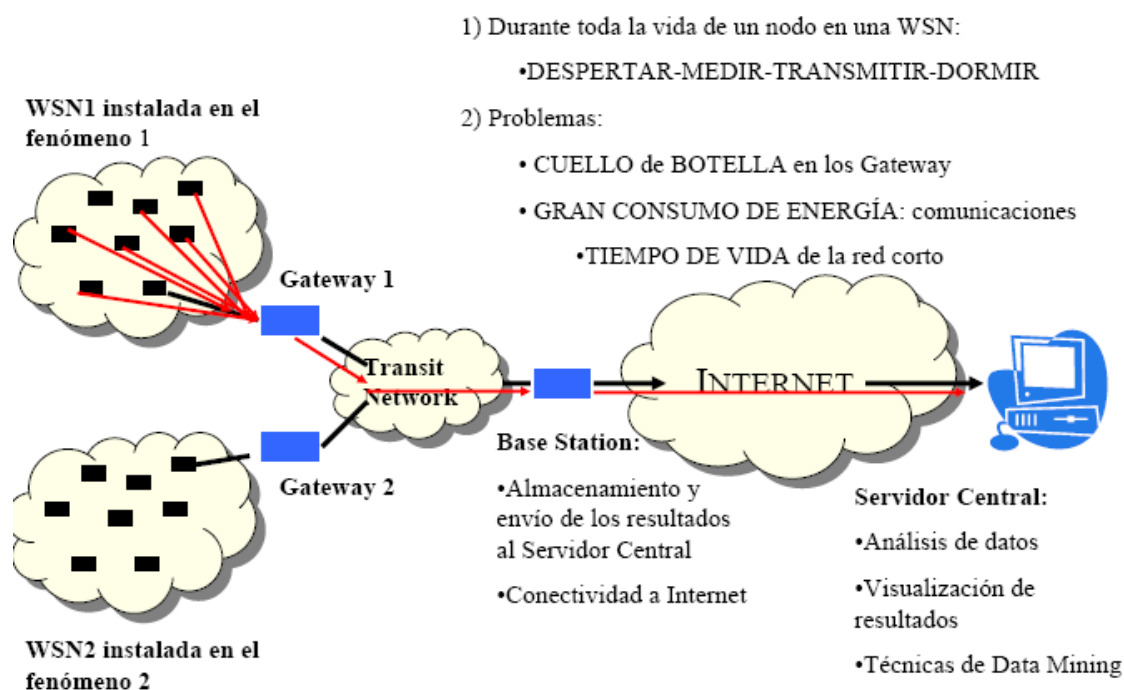


Figura. 2.5. Arquitectura centralizada

Dada la naturaleza intrínseca de las WSNs se tiende a una computación distribuida: Aquella en la que los nodos sensores se comunican sólo con otros sensores dentro de un vecindario

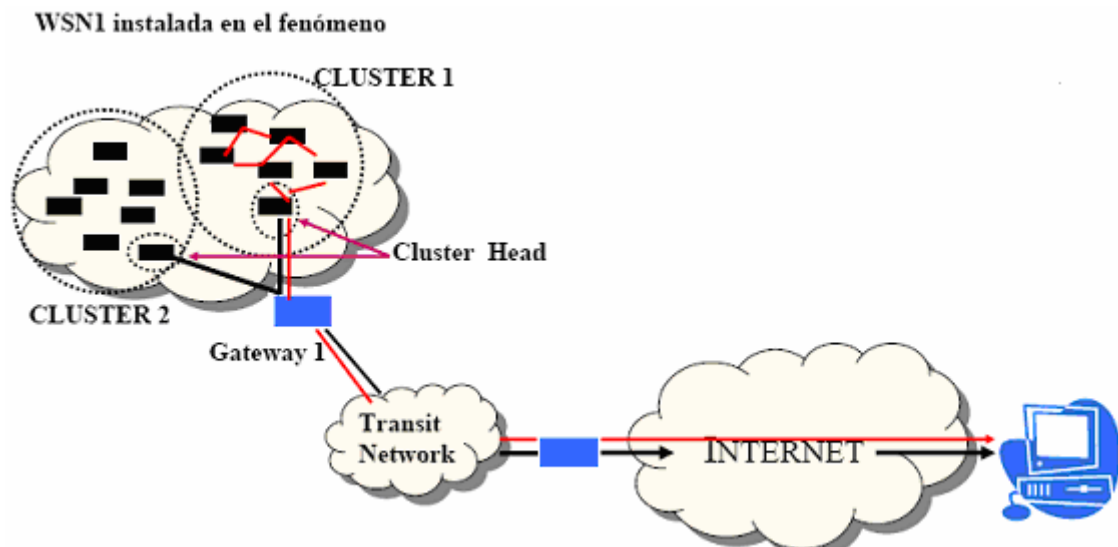


Figura. 2.6. Arquitectura distribuida basada en clusters

Computación distribuida: en el cluster o grupo, los nodos cooperan y ejecutan algoritmos distribuidos para obtener una única respuesta global que la cabecera de cluster se encargará de comunicar a la estación base [7].

CAPITULO 3

PROTOCOLOS PARA REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Una de las principales metas de diseño para las WSN es prolongar el tiempo de vida de la red y prevenir la degradación en la conectividad, usando técnicas agresivas de administración de la energía. Esto es motivado por el hecho de que los recursos de energía de las WSN son irremplazables y su tiempo de vida limitado.

Sin embargo, las posiciones de los nodos sensores usualmente, no están dispuestas a manera de ingeniería o predeterminada, por lo que el despliegue es aleatorio en terreno no accesible o en lugares donde las operaciones de sustitución resultan desastrosas.

Esto implica que los nodos ejecuten detecciones y comunicaciones sin mantenimiento continuo o atención humana y reemplazo de las baterías, lo que limita la cantidad de energía disponible para los nodos sensores. Es por eso, que se requiere una extensa colaboración entre los nodos sensores para poder llevar a cabo detecciones de alta calidad y para que se comporten como sistemas con tolerancia de fallas.

Los protocolos de comunicación para las redes de sensores pueden impulsar la capacidad de esfuerzos colectivos para proveer a los usuarios aplicaciones especializadas. Estos protocolos pueden fundir, extraer, o agregar datos del campo del sensor. Además, pueden auto-organizar los nodos sensores en grupos para completar una tarea o superar ciertos obstáculos, por ejemplo, las colinas.

En esencia, las redes de sensores pueden proveer a usuarios finales de inteligencia y detalles que los sensores tradicionalmente estacionarios no pueden hacer.

3.2 CAPAS DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN.

El diseño tradicional de las redes inalámbricas se basa principalmente en capas apiladas como se muestra en la figura. 3.1. Este modelo de capas hace una significativa contribución para simplificar el diseño de la red. Consecuentemente, la estructura de capas conduce a tener protocolos robustos y escalables. Sin embargo, el diseño y operación de las capas en la pila están aislados, y la interferencia entre capas es estática e independiente de las obligaciones y aplicaciones individuales de la red.

Es por eso que, el heredar tal tipo de pila llevará a un pobre desempeño de la WSN en la que los recursos, especialmente la energía, ancho de banda, tamaño de la memoria, y velocidad del CPU, se encuentran altamente limitados. Muchas WSN se dedican a la recolección de información en tiempo real por lo que pueden ocurrir retrasos estrictos en los límites y altas demandas de ancho de banda.

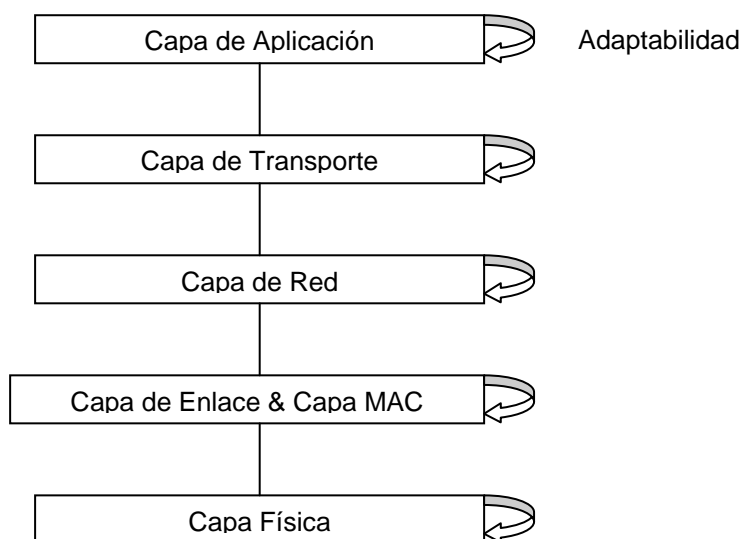


Figura. 3.1. Tradicional pila de capas de protocolo para WSN

El protocolo para redes inalámbricas con fines específicos convencional se basa principalmente en una pila de capas en las cuales cada capa es diseñada y operada de manera aislada figura. 3.1. Las interfases entre las capas son estáticas e independientes de las limitaciones y aplicaciones individuales de la red. Usando este paradigma, el diseño de la red puede ser simplificado en gran manera. Sin embargo, la falta de flexibilidad u optimización de este enfoque puede dar como resultado un desempeño pobre de las WSN

de gran escala en las que la limitación de recursos es severa, pero se requiere la entrega a tiempo. Es por eso, que un tema activo el diseño de capa-cruzada ha sido propuesto recientemente; esto soporta optimización y adaptabilidad a través de capas múltiples. Una posible arquitectura multi-capa se diagrama en la figura. 3.2.

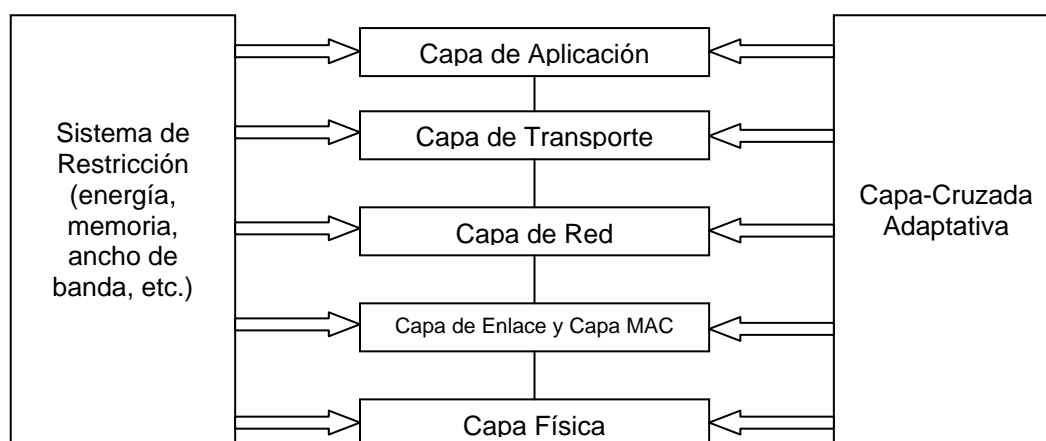


Figura. 3.2. Pila de protocolos de capa-cruzada para WSN

En el concepto de diseño de capa-cruzada, cada capa no es desarrollada de forma aislada, sino de manera integrada y en un marco jerárquico. Por consiguiente, el límite estricto entre las diferentes capas se pierde. Algunos mensajes de control así como información concerniente a los estados de las capas se intercambiarán entre las diferentes capas para que el sistema pueda tomar ventaja de las interdependencias entre ellas.

Por ejemplo, la capa de enlace puede ajustar el índice, la energía, y el código para satisfacer los requerimientos de aplicación basándose en el canal actual y condiciones de la red; la capa MAC puede ser adaptable para delinear condiciones del enlace e interferencias, limitaciones de retraso, y prioridades de bit; los protocolos de ruteo pueden ser desarrollados de acuerdo al enlace actual, red, y condiciones de tráfico; la capa de aplicación puede adoptar el concepto de QoS suave, el cual es adaptable a las condiciones delineadas de la red para entregar la mayor calidad posible de aplicación.

En la práctica, el diseño de multi-capa o capa-cruzada puede ser ejercido en algunas, más que en todas, las capas de la pila de protocolos. La discusión se enfocará en los protocolos con diseño multi-capa en las capas de red y MAC. Sin embargo, muchos problemas abiertos existen concernientes a como entender e implementar este concepto,

que clase de información debe ser intercambiada entre las capas, y que clase de limitantes externas e internas deben ser consideradas.

3.3 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN PARA REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.

3.3.1 Protocolos para la Capa de Aplicación

Aunque muchas áreas aplicativas para redes de sensores están definidas y han sido propuestas, los protocolos para la capa de aplicación permanecen mayormente inexplorados. Tres protocolos aplicativos posibles de la capa son introducidos en esta sección: El protocolo de administración del sensor; el protocolo de asignación de tareas y aviso de datos; y el protocolo de búsqueda de sensores y disseminación de datos. Estos protocolos pueden requerir protocolos en otros niveles de la pila (explicados en las demás secciones de este capítulo).

- **El protocolo de Administración del Sensor (SMP)**

El diseñar un protocolo para manejo de la capa de aplicación tiene varias ventajas, hace que el hardware y software de los estratos inferiores sean transparentes para las aplicaciones de manejo de las redes de sensores.

Los administradores del sistema interactúan con redes de sensores usando el protocolo de manejo del sensor (SMP). A diferencia de muchas otras redes, las redes de sensores constan de nodos que no tienen ID global, y usualmente carecen de infraestructura. Por consiguiente, el SMP necesita acceder a los nodos utilizando el nombramiento basado en atributos y el direccionamiento basado en posiciones. El SMP es un protocolo administrativo que provee operaciones de software necesarias para realizar las siguientes tareas administrativas:

- Introducción de reglas relacionadas con la agregación de datos, nombramiento basado en atributos y agrupamiento en clusters de los nodos sensores

- Intercambio de datos relacionados con algoritmos de detección de posición
- Sincronización de los nodos sensores
- Movimiento de nodos sensores
- Encendido y apagado de los nodos sensores
- Buscar la configuración de la red de sensores y el estatus de los nodos, y reconfigurar la red de sensores
- Autenticación, distribución clave, y seguridad en comunicación de datos

- **Protocolo de Asignación de Tareas y de Aviso de Datos (TADAP)**

Otra operación importante en las redes de sensores es la diseminación de intereses. Los usuarios envían su interés a un nodo sensor, a un subconjunto de nodos, o a la red entera. Este interés puede tratarse de un cierto atributo del fenómeno o un acontecimiento provocante. Otro enfoque es el aviso de información disponible en la cual los nodos sensores anuncian los datos disponibles para los usuarios y los usuarios buscan los datos en los cuales están interesados.

- **Protocolo de búsqueda de Sensores y Diseminación de Datos (SQDDP)**

El protocolo de búsqueda de sensores y el de diseminación de datos (SQDDP) provee a las aplicaciones de usuario de interfaces para búsqueda de cuestiones diversas, respuestas a búsquedas, y recolección de respuestas entrantes. Estas averiguaciones generalmente no son expedidas a nodos particulares; en lugar de eso, es preferido el nombramiento basado en atributos o basado en posiciones. Por ejemplo, “las posiciones de los nodos que detectan temperaturas mayores que 70° F” es una búsqueda basada en atributos. De modo semejante, “las temperaturas leídas por los nodos en la Región A es un ejemplo de nombramiento basado en posiciones.

De manera similar, El lenguaje de asignación de tareas y búsqueda de sensor (SCTL) [8] está propuesto como una aplicación que provee un mayor grupo de servicios. El SCTL soporta tres tipos de acontecimientos, los cuáles están definidos por las palabras claves: *recibir*, *todo*, y *expirar*. La palabra clave *recibir* define acontecimientos generados por un nodo sensor cuando recibe un mensaje; Cada palabra clave define acontecimientos que

ocurren periódicamente debido a una interrupción del cronómetro; la palabra clave *expirar* define acontecimientos que ocurren cuando un cronómetro expira. Si un nodo sensor recibe un mensaje pretendido para el cual contiene una escritura, luego ejecuta la escritura. Aunque el SCTL es propuesto, diferentes tipos de SQDDP pueden ser desarrollados para aplicaciones diversas. El uso de SQDDP puede ser único para cada aplicación.

El SQDDP provee interfaces para publicar búsquedas, responder a las búsquedas, y recolectar respuestas entrantes. Otros tipos de protocolos son también esenciales para las aplicaciones de redes de sensores: los protocolos de localización y sincronización de tiempo. El protocolo de localización permite a los nodos sensores determinar sus posiciones; el protocolo de sincronización de tiempo provee a los nodos sensores de una vista común de tiempo a lo largo de toda la red. Debido a que muchos protocolos de comunicación requieren conocimiento de posición y tiempo, es importante describir detalladamente las técnicas de localización y sincronización de tiempo en las siguientes secciones.

3.3.2 Protocolos de Localización

Debido a que los nodos sensores pueden ser ubicados al azar en cualquier área, deben darse cuenta de sus posiciones para poder proveer información significativa a los usuarios. Además, la información de la posición puede ser requerida por los protocolos de la capa de red y de enlace de datos. Para cumplir con los desafíos de diseño, un protocolo de localización debe ser:

- Robusto para las fallas del nodo
- Menos sensible para medir ruido
- Bajo en errores de estimación de ubicación
- Flexible en cualquier terreno

Actualmente, dos tipos de técnicas de localización se ocupan de estos retos: (1) posición basada en faros y (2) posición basada en ubicaciones relativas [9]. Aunque los protocolos basados en faros de localización son suficientes para ciertas aplicaciones de la red de sensores, algunas redes de sensores pueden ser implementadas en áreas inalcanzables por los faros o GPS; pueden ser frecuentemente atascadas por el ruido ambiental o el inducido

manualmente. Además, los nodos sensores inferiores pueden exhibir comportamiento no lineal del dispositivo y ruido de medida no-Gaussian. Para superar estos retos, la información de la posición es pasada salto-a-salto desde la fuente hacia el recolector. Para obtener información precisa de la posición relativa, los nodos sensores deben trabajar conjuntamente para ayudarse unos a otros. Además, la energía puede ser adicionalmente conservada permitiéndole a los nodos sensores rastrear las posiciones de sus nodos vecinos.

En este marco, un nodo puede detectar y rastrear la posición del nodo vecino usando una técnica colaboradora de estimación y un filtro de partícula aplicado a un arreglo de sensores. Para aumentar la exactitud de la estimación de la posición, el recolector puede pedir que todos los nodos a lo largo del camino para las fuentes aumenten el número de pruebas (las partículas) para el filtrado de la partícula.

3.3.3 Protocolos de sincronización de tiempo.

En lugar de una sincronización de tiempo entre la transmisión y recepción durante una aplicación, tal como en el Internet, los nodos sensores en el campo sensor deben mantener un tiempo similar con cierta tolerancia a lo largo del tiempo de vida de la red.

Combinándolo con el criterio de que los nodos sensores deben ser eficientes en el consumo de energía, bajo costo y pequeños en tamaño en un ambiente multi-salto como se describió en la sección; este requerimiento ofrece un problema desafiante. Además, los nodos sensores pueden permanecer sin atención durante periodos de tiempo largos, por ejemplo, en el espacio o en las profundidades de los océanos.

Para transmisión multi-salto de distancias cortas, el tiempo de procesamiento de datos y la variación en el tiempo de procesamiento de los mismos, puede contribuir a la mayoría de fluctuaciones en tiempo y diferencias de retrasos de ruta. También, la diferencia de tiempo entre dos nodos sensores es significativa a lo largo del tiempo. Algunos factores que influyen en la sincronización de tiempo en los sistemas grandes también se aplican a las redes de sensores:

- **Temperatura:** Debido a que los nodos sensores se implementan en varios lugares, la variación de la temperatura a través del día puede causar que el reloj se acelere o

- retrase. Para una PC típica, el reloj “DRIFTS” algunas partes por millón durante el día. Para los nodos sensores de terminaciones bajas, el DRIFTING puede ser mayor.
- Fase de ruido: Algunas causas de la fase de ruido se deben al flujo de acceso en la interfase de hardware, variación de respuesta en el sistema operativo, y retardo de la red. Este puede ser debido a retrasos en el acceso al medio.
 - Ruido de Frecuencia: El ruido de frecuencia es debido a la inestabilidad del cristal del reloj. Un cristal puede experimentar fluctuaciones grandes de la frecuencia porque el espectro de la frecuencia del cristal tiene bandas laterales grandes en frecuencias adyacentes.
 - Retraso asimétrico: Debido a que los nodos sensores se comunican entre ellos a través del medio inalámbrico, el retraso en la ruta de un nodo a otro puede ser diferente del de la ruta de retorno. Como resultado, un retraso asimétrico puede causar un OFFSET al reloj, que no puede ser detectado por un método de tipo de variación. Si el retraso asimétrico es estático, el OFFSET entre dos nodos cualesquiera es también estático. EL retraso asimétrico esta limitado por la media del tiempo de recorrido total entre dos nodos.
 - Fallos en el sistema de reloj: Los fallos en el sistema de reloj esporádicos en el tiempo que pueden ser causados por anomalías del hardware o software como frecuencia y pasos de tiempo.

La tabla. 3.1. muestra tres tipos de técnicas de tiempo; cada una de ellas debe abarcar los desafíos mencionados anteriormente. Adicionalmente, las técnicas de tiempo deben tener alertas de energía ya que las baterías de los nodos sensores son limitadas.

Además, deben abarcar mapeo entre el tiempo del nodo sensor y el del Internet, por ejemplo, coordinación de tiempo universal. Posteriormente, se describen ejemplos de estos tipos de técnicas de tiempo, específicamente, el protocolo de tiempo de red (NTP). El protocolo de sincronización de referencia de transmisión (RBS); y el protocolo de sincronización de difusión de tiempo (TDP).

Tabla. 3.1. Tres tipos de técnicas de tiempo.

TIPO	Descripción
(1) Retransmisión en servidores de tiempos fijos para sincronizar la red	Los nodos son sincronizados con servidores de tiempo fijos que están realmente disponibles. Estos servidores deben ser robustos y altamente precisos.
(2) Traspasan el tiempo a través de la red	El tiempo es traspasado salto a salto desde la fuente al recolector. En esencia es un servicio de traspaso de tiempo.
(3) Se auto-organizan para sincronizar la red	El protocolo no depende de servidores de tiempo especializados. Automáticamente organiza y determina los modos maestros como servidores de tiempo temporales.

En el Internet, el NTP es usado para disciplinar la frecuencia del oscilador del nodo. Puede ser útil usar NTP para disciplinar los osciladores de los nodos sensores. Adicionalmente, disciplinar todos los nodos sensores en el campo de sensores puede ser un problema debido a la indiferencia del ambiente y variación de retraso largo entre diferentes partes del campo sensor. La interferencia puede temporalmente separar el campo sensor en campos pequeños múltiples, causando relojes indisciplinados entre estos campos pequeños. El protocolo NTP puede ser considerado del tipo 1 de las técnicas de tiempo; adicionalmente, debe ser refinado para abarcar desafíos de tiempo en la redes de sensores.

El RBS, el segundo tipo de las técnicas de tiempo, provee sincronización de tiempo instantánea entre un grupo de receptores y la referencia de transmisión de un transmisor. El transmisor transmite m paquetes de referencia. Cada uno de los receptores dentro del rango de transmisión registra el tiempo de llegada de los paquetes de referencia. Luego, los receptores se comunican entre sí para determinar las compensaciones. Para proveer sincronización multi-salto, se propone usar nodos que reciban dos o más transmisiones de referencia desde diferentes transmisores como nodos de traspaso. Estos nodos de traspaso se usan para pasar el tiempo entre diferentes dominios de transmisión. Otra técnica de tiempo emergente es la TPD, la cual es usada para mantener el tiempo a través de la red con cierta tolerancia. El nivel de tolerancia puede ajustarse basándose en el propósito de la red de sensores. EL TDP autoconfigura eligiendo los nodos master para sincronizar la red

de sensores. Adicionalmente, el proceso es sensible a los requerimientos de energía así como la calidad de relojes. La red de sensores puede ser implementada en áreas no atendidas y el TDP sincronizará la red a un tiempo común.

En resumen, estas técnicas de tiempo pueden ser usadas por diferentes tipos de aplicaciones, cada una tiene sus ventajas. Una aplicación sensible al tiempo debe elegir no solo el tipo de técnica de tiempo sino además el tipo de diseño de la capa de transporte, red y enlace de datos descritos en las siguientes secciones.

3.3.4 Protocolos para la Capa de transporte.

La naturaleza colaboradora del paradigma de las redes de sensores trae distintas ventajas sobre la detección tradicional, incluyendo mayor precisión, mayor cobertura y extracción de características localizadas. La realización de estas ganancias potenciales, sin embargo dependen directamente de una comunicación confiable y eficiente entre las entidades de redes sensores, por ejemplo, los nodos sensores y los recolectores. Para cumplir con esto, es necesario un mecanismo de transporte confiable.

En general los objetivos principales de la capa de transporte son: (1) unir las capas de aplicación y de red por medio de la multiplexación y demultiplexación; (2) proveer servicio de entrega de datos entre la fuente y el recolector con un mecanismo de control de errores construido de acuerdo al requerimiento de confiabilidad específico de la capa de aplicación; (3) regular la cantidad de tráfico inyectando a la red vía mecanismos de control de flujo y congestión. Sin embargo, las funciones requeridas por la capa de transporte para lograr estos objetivos en las redes de sensores están sujetas a modificaciones significantes para lograr acomodar características únicas del paradigma de las redes de sensores. Las limitaciones de energía, procesamiento y hardware de los nodos sensores traen limitaciones posteriores en el diseño del protocolo de la capa de transporte. Por ejemplo, los mecanismos convencionales punto-a-punto, los mecanismos de control de errores basados en retransmisión y los mecanismos de control de transmisión basados en ventanas, incremento aditivo y disminución multiplicativa adoptados por el ampliamente usado protocolo de control de transporte (TCP) puede ser no acorde para el dominio de redes de sensores y así llevar al desperdicio de escasos recursos.

Consecuentemente, el desarrollo de protocolos para la capa de transporte es un desafío debido a las limitaciones de los nodos sensores y los requerimientos específicos de aplicación primordiales que determinan los principios de diseño de los protocolos de la capa de transporte. Debido a la naturaleza colaboradora y orientada a aplicaciones de las redes de sensores, el principal flujo de datos toma lugar en la ruta de reenvío, donde los nodos fuente transmiten sus datos al recolector. La ruta de retorno, por otro lado, lleva la información generada desde el recolector, como programación, reasignación de tareas binarias, búsquedas; y comandos a los nodos fuente. Es por eso que, diferentes funciones son requeridas para manejar las necesidades de transporte en las rutas de envío y retorno.

- **Transporte desde el evento al recolector**

Bajo la premisa de que los flujos de datos de una fuente al recolector son generalmente tolerantes a pérdidas. Un evento en el campo sensor necesita ser rastreado con una cierta cantidad de exactitud en el recolector. Por consiguiente, a diferencia de redes de comunicación tradicionales, el paradigma de las redes de sensores necesita una noción confiable del evento al recolector en la capa de transporte [10]. Esto implica una comunicación fidedigna de las características del evento al recolector más que de la entrega confiable convencional basada en paquetes de la detección de reportes; paquetes individuales generados por cada nodo sensor en el campo. La figura 3.3 ilustra un acontecimiento confiable de transporte desde el evento al recolector basado en identificación colectiva de los flujos de datos desde el evento al recolector.

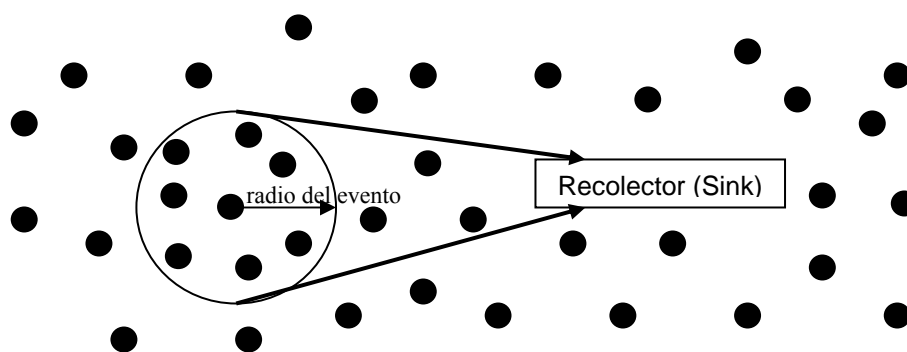


Figura. 3.3. Típica topología de una red de sensores con evento y recolector. (El recolector está únicamente interesado en recoger información de los nodos sensores que están dentro del radio del evento)

Para proveer detección fidedigna desde el evento al recolector, la posible congestión en la ruta de envío también debería ser considerada en la capa de transporte. Una vez que el evento es detectado por un número de nodos sensores dentro de la cobertura del fenómeno, por ejemplo, el radio del evento, una cantidad significativa de tráfico se desencadena por estos nodos sensores; esto fácilmente puede conducir a la congestión en la ruta de envío. Además, aunque la confiabilidad del evento al recolector puede ser lograda aun en presencia de pérdida de paquetes debido a la congestión de la red (gracias a los flujos correlacionados de datos), un mecanismo de control de congestión adecuado también puede ayudar a conservar energía mientras se mantienen niveles de exactitud deseados en el recolector.

Por otra parte, aunque las soluciones de la capa de transporte en redes inalámbricas convencionales tienen importancia, son simplemente inaplicables para el transporte confiable del evento al recolector en las redes de sensores. Estas soluciones principalmente enfocan su atención en transporte de datos confiable siguiendo la semántica TCP punto a punto y están propuestas para ocuparse de retos planteados por los errores y movilidad de enlaces inalámbricos. La razón primaria para su inaplicación es su noción de confiabilidad punto a punto, la cual se basa en aceptaciones y retransmisiones punto a punto. Por la inherente correlación en los flujos de datos generados por los nodos sensores, sin embargo, estos mecanismos para la estricta confiabilidad punto a punto están de más y reducen drásticamente las cantidades de energía.

En contraste a los protocolos de la capa de transporte para confiabilidad convencional de extremo a extremo, el protocolo de transporte confiable del evento al recolector (ESRT) [10] se basa en la noción de confiabilidad del evento al recolector y provee detección fidedigna de un evento sin ningún requisito intermedio de cacheo. EL ESRT es una nueva solución de transporte desarrollada para lograr detección confiable de eventos en las redes de sensores con un gasto mínimo de energía. Incluye un componente de control de congestión que tiene un doble propósito: lograr confiabilidad y conservar energía. EL ESRT además no requiere identificación individual del sensor, es decir, una ID de evento es suficiente. Es importante que los algoritmos del ESRT principalmente se ejecuten en el recolector, con una funcionalidad mínima requerida en nodos sensores de recursos limitados.

- **Transporte desde el Recolector a los Sensores**

Aunque los flujos de datos en la ruta de envío conllevan características correlacionadas de eventos captados/detectados, los flujos en la ruta de retorno principalmente contienen datos transmitidos por el recolector para un propósito operacional o aplicativo y específico. Esto puede incluir operar sistemas binarios; programar o reasignar tareas de archivos de configuración; búsquedas y comandos de aplicaciones específicas. La diseminación de este tipo de datos requiere de entrega 100% confiable en su mayor parte. Por consiguiente, el enfoque de confiabilidad del evento al recolector introducido antes no sería suficiente para ocuparse de los requisitos más apremiantes de la confiabilidad de los nodos en las rutas de retorno. Este requisito estricto de confiabilidad para el transporte desde el recolector a los sensores de binarios operacionales y averiguaciones específicas en la aplicación y órdenes involucra un cierto nivel de mecanismos de retransmisión así como también de reconocimiento. Sin embargo, estos mecanismos deberían ser incorporados en los protocolos del estrato de transporte cautelosamente en orden para no comprometer recursos escasos de la red de sensores completamente. A este respecto, las retransmisiones locales y los acercamientos negativos de reconocimiento serían preferibles sobre aceptaciones y retransmisiones unidas por los extremos para mantener gasto de energía mínimos.

Por otro lado, el recolector es requerido más en el transporte de datos del recolector al sensor en la ruta de retorno, por lo que un recolector con recursos de energía y de comunicación abundantes puede difundir datos con su poderosa antena. Esto ayuda a reducir la cantidad de tráfico reenviada en la infraestructura de la red de sensores de multi-salto y así ayudar a los nodos sensores a conservar energía. Por consiguiente, los flujos de datos en la ruta de retorno pueden experimentar menor congestión comparada a la ruta de envío, lo cual se basa completamente en comunicación de multi-salto. Esto llama a menos mecanismos agresivos para control de congestión en la ruta de retorno comparada con la ruta de envío en la red de sensores.

Wan y sus colegas [11] proponen el mecanismo de bombeo suave, recolección rápidamente (PSFQ “Pump Slowly Fetch Quickly”) para reasignación de tareas/reprogramación confiable en las redes de sensores. EL PSFQ se basa en la inyección de paquetes lenta en la red pero ejecutando recuperación salto a salto agresiva en caso de pérdidas de paquetes. La operación de bomba en el PSFQ simplemente realiza

flujo controlado y requiere que cada nodo intermedio cree y mantenga un caché de datos para servir para ser usados en recuperación local de pérdida y entrega de datos en secuencia. Aunque ésta es una solución importante de la capa de transporte para las redes de sensores, el PSFQ no abarca la pérdida de paquetes debido a la congestión.

En resumen, los mecanismos de la capa de transporte que pueden ocuparse de los retos únicos propuestos por el paradigma de la red de sensores son esenciales para darse cuenta de las ganancias potenciales del esfuerzo colectivo de los nodos sensores. Como se discutió en las dos subdivisiones anteriores, existen soluciones alentadoras para el transporte confiable del evento al recolector y del recolector a los sensores.

- **Protocolos para la Capa de Red**

Las técnicas de ruteo con fines específicos usualmente no cumplen con los requisitos de las redes de sensores. Como consecuencia, la capa de red de las redes de sensores es usualmente diseñada según los siguientes principios:

- La eficiencia de energía es siempre una consideración importante.
- Las redes de sensores son en su mayor parte de datos céntricos.
- Una red ideal de sensores tiene direccionamiento basado en atributos y alerta de posición.
- La agregación de datos es útil sólo cuando no entraba el esfuerzo colaborador de los nodos sensores.
- El protocolo de ruteo es fácilmente integrado con otras redes, por ejemplo, la Internet.

Estos principios de diseño sirven de guía al diseñar un protocolo de ruteo para redes de sensores. Como se describió en la sección anterior, un protocolo para la capa de transporte debe ser eficiente en energía. Este requisito también se aplica en los protocolos de ruteo porque el tiempo de vida de la red depende del consumo de energía de los nodos al transmitir los mensajes. Como consecuencia, la eficiencia de energía juega un papel importante en varios protocolos de capas apiladas además de la capa de red.

En las redes de sensores, la información o los datos pueden describirse usando atributos. Para integrarse apretadamente con la información o los datos, un protocolo de ruteo puede ser diseñado según técnicas de datos céntricos. Un protocolo de ruteo data-céntrico requiere nombramiento basado en atributos, el cual es usado para llevar a cabo búsquedas usando los atributos del fenómeno. En esencia, los usuarios están más interesados en la información recolectada por la red de sensores que en la recolectada por un nodo individual. Ellos buscan las redes de sensores usando atributos del fenómeno que quieren observar. Por ejemplo, los usuarios pueden enviar una averiguación como “encontrar las posiciones de áreas donde la temperatura es mayor a 70 ° F”.

Además, un protocolo de ruteo data-céntrico también debería utilizar el principio de diseño de agregación de datos, una técnica usada para solucionar la implosión y sobrepasar los problemas de ruteo data-céntrico [12]. Como se muestra en figura 3.4, el recolector busca la red de sensores para observar la condición ambiental del fenómeno. La red de sensores usada para recoger la información puede ser percibida como un árbol de transmisión de retorno múltiple, donde los nodos dentro del área del fenómeno envían los datos recolectados hacia el recolector. Los datos que vienen de nodos sensores múltiples son agregados como si fueran el mismo atributo del fenómeno cuando alcanzan el mismo nodo de ruta en el camino de vuelta al recolector. Por ejemplo, el nodo sensor E agrega los datos de los nodos sensores A y B mientras el nodo sensor F agrega los datos de los nodos sensores C y D en la figura. 3.4.

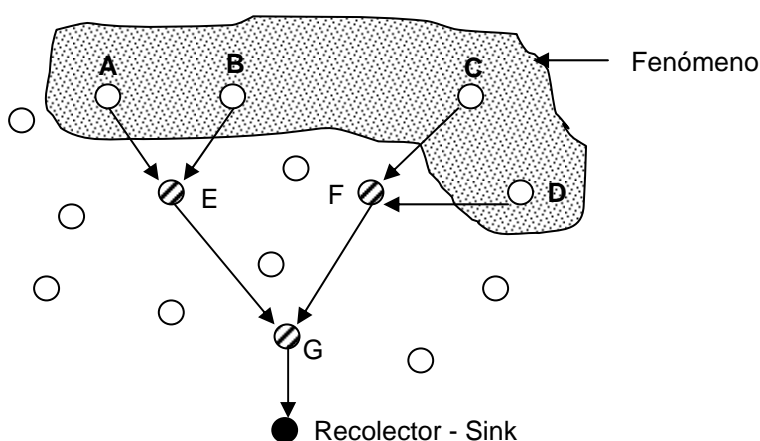


Figura. 3.4. Agregación de Datos

La agregación de datos puede ser percibida como un grupo de métodos automatizados de combinación de datos de muchos nodos sensores en un grupo de información valiosa. Con respecto a esto, la agregación de datos es conocida como fusión de datos. También, se debe tomar precauciones al agregar datos debido a las especificaciones de los datos, por ejemplo, las posiciones de nodos sensores resultantes, no deberían quedar fuera. Tales especificaciones pueden ser necesarias en ciertas aplicaciones.

Uno de los principios de diseño para la capa de red es permitir integración fácil con otras redes como la red de satélites y la Internet. Debido a que las diferentes aplicaciones pueden requerir diferentes tipos de protocolos para la capa de red, se necesitan protocolos data-céntricos más avanzados. En esencia, los requisitos específicos en la aplicación son parte de las fuerzas motrices que urgen para los nuevos protocolos de la capa de transporte, como se ha descrito en la sección previa. Además, impulsan a los nuevos esquemas de enlaces de datos descritos en la siguiente sección.

3.3.5 Protocolos para la capa de enlace de datos

En general, la capa de enlace de datos es primordialmente responsable de la multiplexación de las corrientes de datos, detección del marco de datos, acceso al medio, y control de errores; asegura conexiones punto a punto y punto-multipunto confiables en una red de comunicación. No obstante, la naturaleza colaboradora y orientada a aplicaciones de los nodos sensores y las restricciones físicas de los mismos como la energía descritas en las anteriores dos sub-secciones, temas de la capa de enlace de datos son explorados dentro del debate de acceso al medio y estrategias de control de errores en las redes de sensores.

- **Control de Acceso al Medio**

Los protocolos para la capa del control de acceso al medio (MAC) en una red de sensores multi-salto auto-organizada debe lograr dos objetivos:

- Establecer enlaces de comunicación de datos para crear una infraestructura básica de red necesaria para la comunicación inalámbrica multi-salto en un campo de sensores densamente desplegado.

- Regular el acceso a los medios de comunicación compartidos a fin de que los recursos de comunicación sean correctos y eficazmente compartidos entre los nodos sensores.

Es evidente que el protocolo MAC para redes de sensores debe tener conservación de energía incorporada, manejo de movilidad, y estrategias de recuperación de fallas. Los esquemas MAC basados en demandas pueden ser inadecuados para las redes de sensores debido a su gran envío de mensajes y retraso del esquema del enlace. Además, el acceso al canal basado en argumentos es estimado inadecuado por el requisito para monitorear el canal todas las veces, una tarea agotadora de energía. La aplicabilidad de los esquemas fundamentales MAC en las redes de sensores se discute junto con algunas soluciones:

- Acceso al medio basado en TDMA. El acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) que accesa a los esquemas intrínsecamente conserva más energía comparado a los esquemas basados en argumentos porque el ciclo de tareas del radio es reducido y no existen contenciones aéreas ni colisiones. Un esquema MAC para redes de sensores con limitaciones de energía debería incluir una variante del TDMA porque los radios deben estar apagados durante la espera para ahorros de energía significantes.
- Acceso al medio híbrido basado en TDMA/FDMA. Un esquema de acceso basado en TDMA puro dedica el canal entero a un nodo sensor simple; sin embargo, un esquema puro de acceso múltiple por división de frecuencias (FDMA) ubica mínimo del ancho de banda de la señal por nodo. Tal contraste trae el intercambio entre la capacidad de acceso y el consumo de energía. El número óptimo de canales depende de la proporción de consumo de energía del transmisor al del receptor. Si el transmisor consume más energía, un esquema TDMA es favorecido, mientras el esquema se inclina por el FDMA cuando el aparato receptor consume mayor energía [13].
- Acceso al medio basado en CSMA. Basado en el mecanismo de detección de transportador y retorno, los esquemas tradicionales de acceso múltiple de detección de transporte (CSMA) son inapropiados porque hacen suposiciones fundamentales del tráfico estocástico distribuido y tienden a soportar flujos punto-a-punto independientes. Por otra parte, el protocolo MAC para redes de sensores deben

permitir soportar tráfico periódico, variable pero altamente correlacionado y predominantemente. Cualquier esquema de acceso al medio basado en CSMA tiene dos componentes importantes: El mecanismo auditivo y el esquema de retorno.

- **Control de Errores**

Además del control del acceso al medio, el control de errores de los datos transmitidos en las redes de sensores es otra función sumamente importante de la capa de enlace de datos. El control de error es crítico, especialmente en algunas aplicaciones de la red de sensores como rastreo móvil y monitoreo de máquinas. En general, los mecanismos de control de errores en las redes de comunicación pueden ser clasificados en dos categorías principales: corrección de errores en envío (FEC) y solicitud repetitiva automática (ARQ).

El control de error basado en ARQ principalmente depende de la retransmisión para la recuperación de paquetes perdidos. Aunque los esquemas de control de error basados en ARQ son utilizados en la capa de enlace de datos para las otras redes inalámbricas, la utilidad del ARQ en aplicaciones de redes de sensores está limitada debido a la escasez de energía y recursos de procesamiento de los nodos sensores. Por otra parte, los esquemas FEC tienen complejidad de desciframiento inherente que requiere relativamente recursos considerables de procesamiento en los nodos sensores. Respecto a esto, los códigos de control de errores simples con codificación y decodificación de baja complejidad podrían presentar las mejores soluciones para el control de error en las redes de sensores.

Por otra parte, para el diseño de esquemas eficientes FEC, es importante tener un buen conocimiento de las características del canal y las técnicas de implementación. La tasa de error de bit del canal (BER) es un buen indicador de la confiabilidad del enlace. De hecho, una buena opción del código de corrección de errores puede dar como resultado varias órdenes de reducción de magnitud del BER y en la ganancia global. La ganancia de codificación está generalmente expresada en términos del poder de transmisión adicional necesitado para obtener el mismo BER sin codificación.

Por consiguiente, la confiabilidad del enlace puede ser lograda aumentando el poder de transmisión de salida o el uso de esquemas FEC adecuados. Debido a las limitaciones de energía de los nodos sensores, el aumento poder de transmisión no es una opción

factible. Por consiguiente, usar el FEC es aun la solución más eficiente, dadas las limitaciones de los nodos sensores.

Aunque el FEC puede lograr una reducción significativa en el BER para cualquier valor dado del poder, de transmisión, el poder de procesamiento adicional consumido durante la codificación y la decodificación debe ser considerado al diseñar un esquema FEC. Si este poder adicional es mayor que la ganancia de codificación, el proceso entero no es eficiente en energía y así el sistema está mejor sin codificación. Por otra parte, el FEC es un activo valioso para las redes de sensores si el poder adicional de procesamiento son menores que los ahorros de poder de transmisión.

Así, el intercambio entre este procesamiento de poder adicional y la ganancia de codificación asociada deberían ser optimizados para tener esquemas FEC poderosos, eficientes en energía, y de baja complejidad para el control de errores en las redes de sensores.

3.4 PROTOCOLOS DE RUTEO EN WSN.

En las redes de sensores, la conservación de energía, la cual está relacionada con el tiempo de vida de la red, es considerada relativamente más importante que el desempeño de la red en términos de calidad de información enviada. Mientras la energía se agota, la red puede requerir la calidad de los resultados para minimizar la disipación de la energía en los nodos y así incrementar el tiempo de vida total de la red.

Recientemente los protocolos de ruteo han sido estudiados extensivamente. En general, las rutas para las WSN pueden ser divididas en rutas de base plana, de base jerárquica y base adaptable. En los protocolos de ruta de base plana todos los nodos están asignados en funciones iguales. En las rutas de base jerárquicas, los nodos ejecutarán diferentes funciones en la red.

En las rutas de base adaptable algunos parámetros del sistema son controlados para adaptarse a las actuales condiciones de la red y niveles de energía disponible. Adicionalmente, estos protocolos pueden ser clasificados en ruteo basados en ruta múltiple, búsqueda, o negociación; dependiendo en la operación del protocolo. Para poder llevar

acabo esta investigación, se usa una clasificación de acuerdo a la estructura de la red y criterios de ruta. La clasificación se muestra en la figura. 3.5.

Otra clase de protocolos de ruta son los protocolos de ruta cooperativa, en el que los nodos envían la información al nodo central en el cual la información puede ser agregada y puede estar sujeta a procesamiento posterior. Es por eso, que el reducir el costo en términos de uso de energía es de gran importancia.

Muchos protocolos de ruta de alerta de energía, han sido propuestos para cumplir este requerimiento. El resto de esta sección presenta un detallado resumen de los principales paradigmas de ruteo para las WSN.

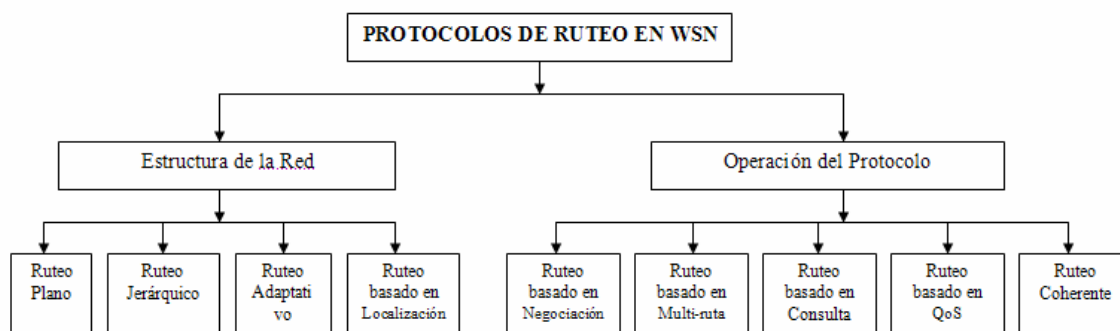


Figura. 3.5. Taxonomía de los protocolos de ruteo en WSN

3.4.1 Ruteo plano

- **Ruteo De Asignación Secuencial - SAR**

La decisión de ruteo en el SAR [14] depende de 3 factores: Recursos de energía, QoS en cada ruta, y nivel de prioridad de cada paquete. Para evitar fallas en las rutas simples, se usan esquemas de patrones múltiples y restauración de rutas localizadas.

Para crear rutas múltiples desde un nodo de origen, es construido un árbol de rutas en el nodo de origen. Los patrones del árbol son construidos mientras se evaden los nodos con garantías de energía baja o QoS. Al final de este proceso, cada nodo sensor formara parte del árbol multi-ruta. Para cada nodo, dos medidas son asociadas con cada ruta: una medida aditiva para la QoS, es decir, retraso, y una medida del uso de energía para el ruteo en esa

trayectoria. La energía es medida en función de cuantos paquetes pasarán a través de esa ruta. El SAR calculará una medida de QoS como el producto de la medida de adicción de QoS, y un coeficiente asociado con la prioridad del nivel del paquete.

El propósito del algoritmo SAR es minimizar el promedio de desperdicio métrico de QoS a través del tiempo de vida de la red. Si la topología cambia debido a fallas en los nodos, es necesario un re-cómputo de la ruta. Como medida preventiva, una re-computación periódica de la ruta es provocada por la estación base para llevar un conteo de cualquier cambio en la topología. Un procedimiento de apoyo, basado en un esquema de restauración de la ruta local entre los nodos aledaños, es usado para recuperarse de una falla.

- **Difusión Dirigida**

El investigador Intanagonwiwat de la IEEE [15], y otros más, han presentado un paradigma data-céntrico y de aplicación-alerta, llamado difusión dirigida. Es de datos céntricos (DC siglas en inglés) en el sentido que todos los datos generaron por nodos sensores son nombrados por pares de valores atribuidos.

El data-céntrico DC funciona en forma de agregadores de información dentro de la red, a fin de que la energía usada para la entrega de la información rinda de manera eficiente. La idea principal del paradigma de DC es combinar la información que proviene de distintas fuentes en la ruta eliminando redundancias, minimizando el número de transmisiones, y así generar un ahorro de energía en la red y prolongar su tiempo de vida.

Este paradigma difiere del paradigma tradicional, denominado dirección-céntrica (AC – siglas en ingles). En el ruteo AC, el problema es encontrar rutas cortas entre pares de nodos; los DC encuentran rutas desde fuentes múltiples hacia un destino único que permite la consolidación de información redundante dentro de la red.

La figura. 3.6. muestra un ejemplo de la diferencia entre el ruteo de datos-céntricos y el de dirección-céntrica. En la figura. 3.6. (a) hay un ejemplo de ruteo AC en el que tres nodos fuente detectan un destino y cada uno usa una ruta punto-a-punto independientemente de los otros para reportar la información al nodo recolector (sink

node). Usando el ruteo DC, figura. 3.6. (b), una forma agregada de los datos recibida por el nodo B es enviada al nodo recolector, teniendo como resultado un gasto de energía menor.

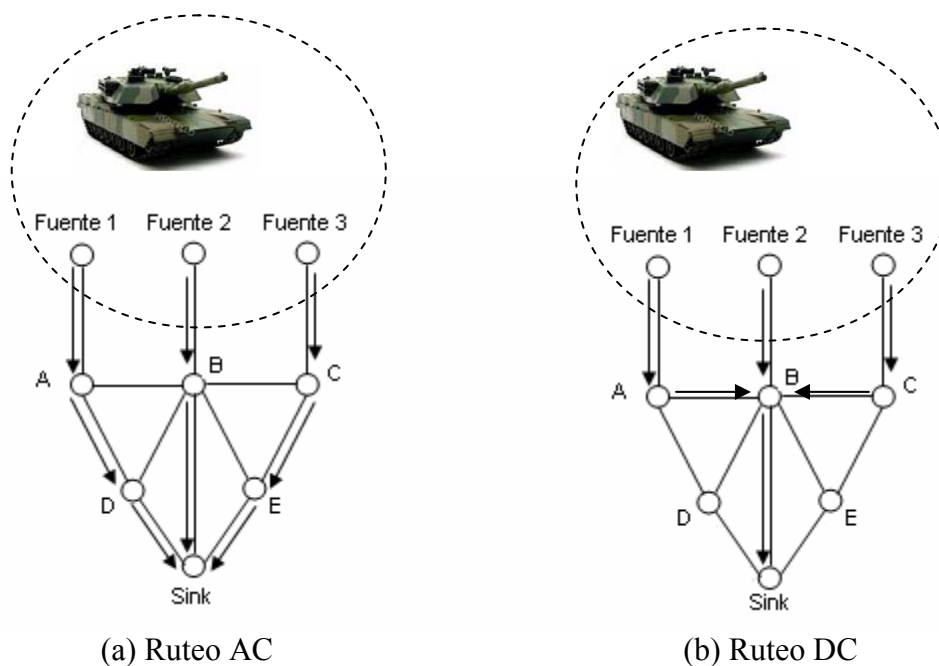


Figura. 3.6. Diferencia entre ruteo (a) direccionamiento-céntrico (AC) y (b) data-céntrico (DC)

La consulta se difunde o esparce a través de la red y se establecen gradientes que arrojarán respuestas acordes a la solicitud hecha y las mismas que son enviadas al nodo solicitante; esto quiere decir, que un disipador puede hacer una consulta de información difundiendo intereses sobre algo en especial y los nodos se encargan de propagar esos intereses.

De forma más general, una gradiente especifica un valor de atributo y una dirección. Los eventos (es decir, la información), fluyen hacia el nodo que hace la petición desde múltiples rutas. Una pequeña cantidad de rutas puede ser reforzada para prevenir un posterior esparcimiento de acuerdo a una regla local.

Otro uso para la difusión dirigida es propagar un evento espontáneamente hacia algunas secciones de la red de sensores. Este tipo de recuperación de la información es ideal para consultas continuas en las que los nodos solicitantes no esperan que la información satisfaga las consultas todo el tiempo. Esto lo hace inapropiado para consultas

que se hacen una sola vez ya que no serviría de nada el establecer las gradientes, para consultas que usaran la ruta solo una vez.

El Interés, describe una tarea que debe ser realizada por una red de sensores. El interés es ingresado en algún punto, normalmente en la estación base (BS – siglas en inglés); la fuente en este punto es desconocida. Los intereses se difunden a través de la red punto a punto y son emitidos por cada nodo a su vecino. El objetivo principal de este protocolo es computar una ruta robusta desde la fuente hasta el disipador, por medio del uso de la identificación basada en los atributos y las gradientes de rutas.

- **Algoritmo Para Costo Mínimo De Reenvío**

El algoritmo para costo mínimo de reenvío (MCFA) saca provecho del hecho de que la dirección de la ruta es siempre conocida (es decir, hacia la estación base fija externa). Así, un nodo sensor no necesita tener un número de ID único, o mantener una ruta presentada. En lugar de eso, cada nodo mantiene el menor costo estimado desde sí mismo hasta la estación base. Cada mensaje que debe ser reenviado por el nodo sensor es transmitido a sus vecinos. Cuando un nodo recibe el mensaje, este revisa si está en la ruta de menor costo entre el nodo sensor fuente y la estación base. Si este es el caso, el nodo retransmite el mensaje a sus vecinos. Este proceso se repite hasta que la estación base es alcanzada.

En el MCFA, cada nodo debe conocer la ruta de menor costo estimado desde su ubicación hasta la estación base. Esto se obtiene de la siguiente manera. La estación base emite un mensaje con el costo configurado a cero, mientras que cada nodo inicialmente configura su costo más bajo hacia la estación base al infinito (∞). Cada nodo, una vez que ha recibido el mensaje que fue emitido por la estación base, chequea si el estimado en el mensaje más el enlace en el que es recibido son menores que el estimado actual. Si es así, el estimado actual y el estimado en el mensaje emitido son actualizados. Si el mensaje emitido que se recibió es actualizado, se lo reenvía; de lo contrario, es desechado y no se hace nada más con él. Sin embargo, el procedimiento anterior puede dar como resultado que en algunos nodos haya actualizaciones múltiples y que los nodos más alejados de la estación base sean actualizados con mayor frecuencia que los que se encuentran más cerca de la misma.

Para evitar esto, el MCFA fue modificado para correr un algoritmo de interrupción en la fase de instalación. El algoritmo de interrupción establece que un nodo no enviará el mensaje de actualización hasta que hayan transcurrido $a \cdot l_c$ veces, desde el momento en que el mensaje fue actualizado, en donde a es una constante y l_c es el costo del enlace desde el cual fue recibido el mensaje.

- **Procesamiento Coherente y no coherente**

El procesamiento de información es un componente de gran importancia en la operación de las redes de sensores inalámbricas. Así, las técnicas de ruteo emplean diferentes técnicas de procesamiento de información. En forma general, los nodos sensores cooperaran unos con otros para procesar diferente información difundida en el área de la red. Dos ejemplos de técnicas de procesamiento de información propuestas en las WSN son el ruteo basado en procesamiento de información coherente y no coherente [16]. En el ruteo con procesamiento de información no coherente, los nodos tomarán la información no procesada y es enviada a otros nodos para procesamiento posterior. Los nodos que ejecutan este procesamiento posterior son llamados agregadores. En el ruteo con procesamiento de información coherente, la información es reenviada a los agregadores luego de un procesamiento mínimo. El procesamiento mínimo casi siempre incluye tareas como registro de tiempo, supresión de duplicados, etc.

3.4.2 Ruteo Jerárquico

El ruteo jerárquico o basado en clusters, originalmente propuesto para las redes alámbricas, comprende técnicas muy conocidas con ventajas especiales relacionadas a la escalabilidad y comunicación eficiente. Es por eso que, el concepto de ruteo jerárquico es usado también para llevar a cabo ruteo eficiente de energía en las WSN. En una arquitectura jerárquica, nodos de mayor energía pueden ser usados para procesar y enviar información, mientras que los nodos de menor energía pueden ser usados para ejecutar captaciones en los alrededores del objetivo. Esto significa que la creación de clusters y la asignación de tareas especiales a los nodos principales de cluster, puede contribuir grandemente a la escalabilidad de todo el sistema en general, tiempo de vida, y eficiencia de energía.

- **Protocolo LEACH**

El autor Heinzelman y otros [6] introdujeron un algoritmo jerárquico de clusters para redes de sensores llamado jerarquía adaptable de clusters de baja energía (LEACH). El LEACH es un protocolo basado en clusters que incluye formación distribuida de clusters. Los autores permitieron una rotación aleatoria del papel del nodo principal del cluster en el objetivo de reducción de consumo de energía (es decir, extender el tiempo de vida de la red) y distribución uniforme de la carga de energía entre los sensores de la red. El LEACH usa coordinación localizada para permitir escalabilidad y robustecimiento para redes dinámicas e incorpora fusión de información en el protocolo de ruteo para poder reducir la cantidad de información que debe ser transmitida a la estación base. Los autores también hicieron uso del MAC TDMA/CDMA para reducir las colisiones entre los clusters y dentro de los mismos.

Debido a que la recolección de la información es centralizada y se hace periódicamente, este protocolo es el más apropiado cuando se necesita hacer un monitoreo constante por medio de la red de sensores. Puede que un usuario no necesite toda la información inmediatamente. Por lo que, las transmisiones periódicas de información, que pueden agotar la energía limitada de los nodos sensores, son innecesarias. Los autores del LEACH, basados en su modelo de simulación, determinan que solo el 5% de los nodos necesitaban actuar como nodos principales de cluster.

La operación del LEACH esta dividida en 2 fases: la fase de instalación y la fase en estado estacionario. En la fase de instalación, se organizan los clusters y se eligen a los que servirán de nodos principales de cada cluster (es decir, como cabezas). En la fase de estado estacionario, la transferencia de la información actual a la estación base, toma lugar. La duración de la fase de estado estacionario dura más tiempo que la fase de instalación para así reducir cualquier saturación. Durante la fase de instalación, una fracción predeterminada de nodos, se eligen a si mismos como nodos principales de cluster. Luego que los nodos principales de cluster han sido seleccionados, emiten un mensaje de anuncio al resto de nodos en la red indicando que ellos son los nuevos nodos principales para clusters. Una vez que reciben el anuncio, todos los nodos cluster no principales deciden de qué cluster desean formar parte, basándose en la fuerza de la señal del anuncio. Los nodos del cluster no-principales informan al nodo principal del cluster adecuado que ellos

formaran parte del mismo. La figura 3.7 muestra un flujo del procedimiento de selección del nodo principal del cluster.

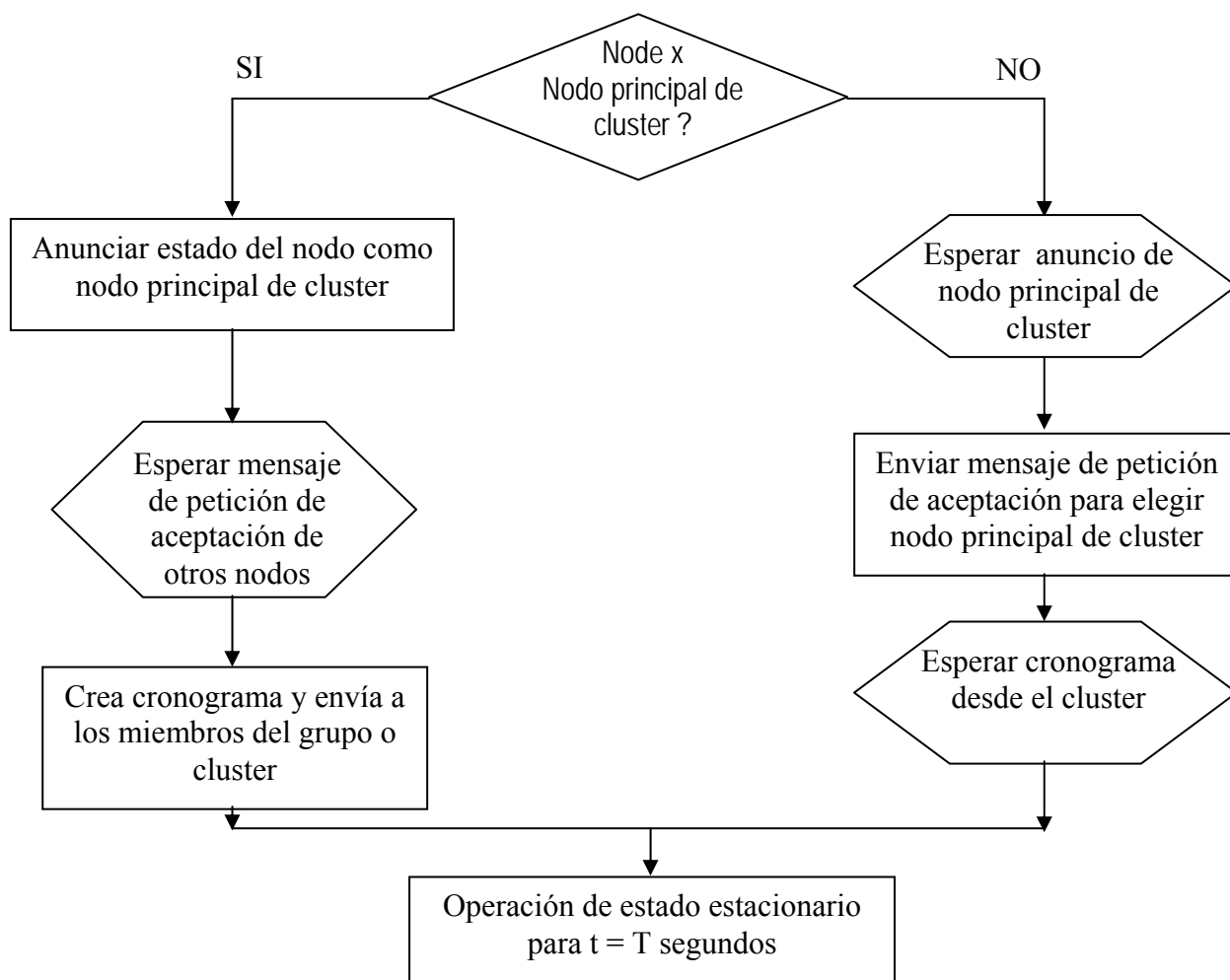


Figura. 3.7. Diagrama de Flujo de la elección de nodo principal del cluster en el protocolo LEACH.

Luego de recibir todos los mensajes de todos los nodos que quisieran ser incluidos en el cluster y basados en el número de nodos en el cluster, el nodo principal del cluster crea un cronograma TDMA y asigna a cada nodo un turno de tiempo en el que puede transmitir. Este cronograma es transmitido a todos los nodos en el cluster. Durante la fase de estado estacionario, los nodos sensores pueden empezar a captar información y a transmitirla a los clusters principales. El nodo principal de cluster, una vez que ha recibido toda la información, la agrega antes de enviarla a la estación base. Luego de cierto tiempo, el cual es determinado a priori, la red entra de nuevo en la fase de instalación y empieza en un nuevo ciclo a seleccionar los nodos principales de cluster. Cada cluster se comunica

usando diferentes códigos CDMA para reducir la interferencia recibida de otros nodos pertenecientes a otros clusters.

El LEACH asume que todos los nodos pueden transmitir con suficiente energía para alcanzar la estación base si fuere necesario y que cada nodo tiene poder suficiente para soportar diferentes protocolos MAC. También asume que los nodos siempre tendrán información para enviar, y que los nodos que están localizados unos cerca de otros tienen información correlacionada. La forma en que el número de clusters principales predeterminados será uniformemente distribuida no es tan obvia. Debido a que es probable que los clusters principales elegidos sean concentrados en una parte de la red, algunos nodos no tendrán ningún nodo principal del cluster en sus alrededores.

- **Protocolo de Recopilación Eficiente de Energía en Sistemas de Información de Sensores (PEGASIS)**

En el trabajo de Lindsey y Raghavendra [17], una mejora para el protocolo LEACH fue propuesta. Este protocolo, llamado Recopilación Eficiente de Energía en Sistemas de Información de Sensores (PEGASIS), es un protocolo óptimo basado en cadenas cercanas y es una mejora para el protocolo LEACH. La idea principal de este protocolo es que, para poder alargar el tiempo de vida de la red, los nodos necesitan comunicarse solamente con sus vecinos más cercanos y tomar turnos para comunicarse con la estación base. Cuando termina el ciclo de comunicación de todos los nodos con la estación base, un nuevo ciclo empezará y así sucesivamente. Esto reduce la energía necesaria en cada ciclo para transmitir la información ya que la energía es distribuida uniformemente hacia todos los nodos. Así, el PEGASIS tiene dos objetivos principales: (1) incrementar el tiempo de vida de cada nodo usando técnicas de apoyo para así incrementar el tiempo de vida de la red; (2) permitir coordinación local solamente entre los nodos que se encuentran cerca unos de otros para que sea reducido el ancho de banda consumido en la comunicación. Para localizar el nodo aledaño más cercano, cada nodo usa una intensidad de señal para medir la distancia de todos los nodos vecinos y luego ajusta la intensidad para que solamente un nodo pueda ser escuchado. La cadena en PEGASIS consistirá de los nodos mas cercanos entre si los cuales formarán una trayectoria hasta la estación base. La forma agregada de la información será enviada a la estación base por cualquier nodo de la cadena y los nodos en la misma tomarán turnos para envíos a la estación base. El PEGASIS puede incrementar el

tiempo de vida de la red al doble del tiempo que tiene bajo el protocolo LEACH. Sin embargo, el PEGASIS usa suposiciones que pueden no ser siempre realistas. En primer lugar, el PEGASIS asume que cada nodo sensor puede comunicarse con la estación base directamente.

En los casos prácticos, los nodos sensores usan una comunicación multi-salto para poder llegar a la estación base. En segundo lugar, el protocolo asume que todos los nodos mantienen una base de datos completa de la ubicación de todos los otros nodos de la red, pero la forma en que se obtiene la ubicación de los nodos no está delineada. Tercero, el protocolo asume que todos los nodos sensores tienen el mismo nivel de energía y que dejarán de funcionar más o menos al mismo tiempo. Cuarto, aunque en la mayoría de escenarios los nodos serán fijos o inmóviles como se asume en el PEGASIS, puede que a algunos sensores se les permita moverse y así afectar las funciones del protocolo.

- **Protocolos de Eficiencia de Energía con Límites Detectables (TEEN y APTEEN)**

Han sido propuestos por Manjeshwar y Agarwal [18] [19], dos protocolos de ruteo jerárquico llamados TEEN (Red de sensores de Eficiencia de Energía con Umbrales Detectables) y APTEEN (Red de Sensores de Eficiencia de Energía con Umbrales Detectables y Adaptación Periódica) para aplicaciones de tiempo crítico. En el TEEN, los nodos sensores captan el entorno continuamente, pero la transmisión de la información es realizada de manera menos frecuente. Un nodo sensor principal de cluster envía a sus miembros un límite máximo, el cual es el valor límite del atributo captado, y un límite mínimo, el cual es un valor levemente cambiado del atributo captado el cual enciende el transmisor del nodo y transmite. Así, el límite máximo trata de reducir el número de transmisiones haciendo que todos los nodos transmitan solo cuando el atributo captado está dentro de los rangos de interés. El límite mínimo adicionalmente reduce el número de transmisiones que pudieron haber ocurrido si no se hubiera hecho un pequeño cambio o cambio alguno en el atributo captado. Un valor más pequeño del límite mínimo permite tener un panorama de la red más preciso, a expensas del incremento de consumo de energía. Así el usuario puede controlar la compensación entre la eficiencia de la energía y la precisión de la información. Los nodos captan su entorno continuamente.

La primera vez que un parámetro del atributo configurado alcanza su valor límite máximo, el nodo enciende su transmisor y envía la información captada. El valor captado es guardado en una variable interna, llamada Valor Captado (SV). Los nodos transmitirán la información en el actual periodo de cluster, siempre y cuando las siguientes condiciones sean verdaderas: (1) El valor actual del atributo captado es mayor que el límite máximo; y (2) el valor actual del atributo captado difiere del SV por una cantidad igual o mayor que el límite mínimo.

Características importantes del TEEN incluyen su idoneidad para aplicaciones de captación de tiempo-crítico. También, debido a que la transmisión del mensaje consume más energía que la captación de la información. El límite mínimo puede ser variable. En cada tiempo de cambio de cluster, los parámetros son transmitidos de manera actualizada, así el usuario los puede cambiar de acuerdo a lo requerido. La mayor desventaja es que si los límites no son alcanzados, los nodos no se comunicarán nunca.

El APTEEN, por otro lado, es un protocolo híbrido que cambia la periodicidad o los valores límites usados en el protocolo TEEN de acuerdo a las necesidades del usuario y tipo de aplicación. En el APTEEN, los nodos principales de cluster transmiten los siguientes parámetros:

- Atributos (A) los cuales son una serie de parámetros de los que el usuario esta interesado en obtener información.
- Límites los cuales están conformados por un umbral o límite máximo (HT) y un umbral mínimo (ST).
- Cronograma el cual es un cronograma TDMA que asigna un lugar (slot) a cada nodo.
- Conteo de Tiempo (CT) es un período máximo de tiempo entre 2 reportes sucesivos enviados por un nodo.

El nodo capta el entorno continuamente y solo los nodos que captan un valor de información igual o por encima del límite máximo, son lo que transmiten. Una vez que un nodo capta un valor por encima del HT, transmite la información solo cuando el valor del atributo cambia por una cantidad igual o mayor que el ST. Si un nodo no envía

información por un período de tiempo igual al valor que este guardado en el Conteo de Tiempo, es forzado a captar y retransmitir la información. Un cronograma TDMA es usado y a cada nodo en el cluster se le asigna un lugar.

Así, el APTEEN usa un cronograma TDMA modificado para implementar la red híbrida. Las principales características del esquema APTEEN incluyen: (1) combinar directrices proactivas y reactivas; (2) ofrecer gran flexibilidad al permitir al usuario el configurar el intervalo CT; y (3) controlando valores de los límites para el consumo de energía cambiando el CT así como los valores de los límites. El mayor inconveniente del esquema es la complejidad adicional requerida para implementar las funciones de los límites y del CT. Sin embargo, los autores de estos protocolos han demostrado en base a simulaciones, que ambos se desempeñan mejor que el protocolo LEACH.

- **Red Pequeña de Comunicación con Energía Mínima (SMECN)**

Los autores Rodoplu y Meng [20] han propuesto un protocolo que computa una subred de eficiencia de energía, específicamente, una red de comunicación con energía mínima (MECN), para una red de sensores en particular. Un nuevo algoritmo llamado pequeño MECN (SMECN) para proveer tal subred ha sido propuesto por Li y Halpern [21]. La subred (es decir, el subdiagrama G') construida por el SMECN es más pequeña que la construida por el MECN si la región de transmisión es un círculo alrededor del nodo transmisor por algún ajuste de encendido.

El subdiagrama G' del diagrama G , el cual representa la red de sensores, minimiza el uso de energía satisfaciendo las siguientes condiciones: (1) el número de márgenes de G' es menor que en G y aun así contiene a todos los nodos que hay en G ; y (2) la energía requerida para transmitir la información de un nodo a todos sus vecinos en el subdiagrama G' es menor que la energía requerida para transmitir a todos los nodos vecinos en el diagrama G . La subred computada por SMECN ayuda a enviar mensajes en rutas de energía mínima. Sin embargo, el algoritmo propuesto es local en el sentido de que no es actualmente encontrado en la ruta de energía mínima; solo construye una subred en la que se garantiza que la ruta exista. Adicionalmente, la subred construida por el SMECN hace más probable que la ruta usada sea la que requiera menor consumo de energía.

- **Ruteo de Cluster de Tamaño Ajustado**

El autor Xu y sus colegas [22] han propuesto un protocolo de ruteo geográfico conocido para redes ad-hoc. El área de red es primero dividida en zonas fijas; dentro de cada zona, los nodos colaboran unos con otros para funcionar de diferentes formas. Por ejemplo, los nodos elegirán un nodo sensor que deberá permanecer en estado alerta por un período de tiempo y luego pasará a estado de suspensión. Cada nodo sensor es posicionado aleatoriamente en un plano bidimensional. Cuando un sensor transmite un paquete con cierta energía para una distancia r , la señal será lo suficientemente fuerte como para que otros nodos la escuchen junto con la distancia euclidiana r desde el sensor que origina el paquete. En otras palabras para cubrir un rango r , el sensor que origina la señal debe transmitir con suficiente energía para poder cubrir ese rango.

La figura. 3.9. muestra un ejemplo de zonificación fija que puede ser usada en redes de sensores similares a la propuesta por Xu y otros, pero con una añadidura. Esa añadidura es usar dos zonas para recibir señales en lugar de una sola. Luego de pasar el rango r , la potencia de la señal comienza a atenuarse (es decir, debilitarse), entonces un sensor en la segunda zona, llamada zona límite, puede o puede que no escuche la señal dependiendo de la fuerza de la misma. Es por eso que, un sensor dentro de la zona garantizada, es decir, dentro de la distancia r , esta garantizado de recibir la señal, mientras que un sensor en la zona límite puede o no recibir el paquete. La figura. 3.8. muestra esta situación.

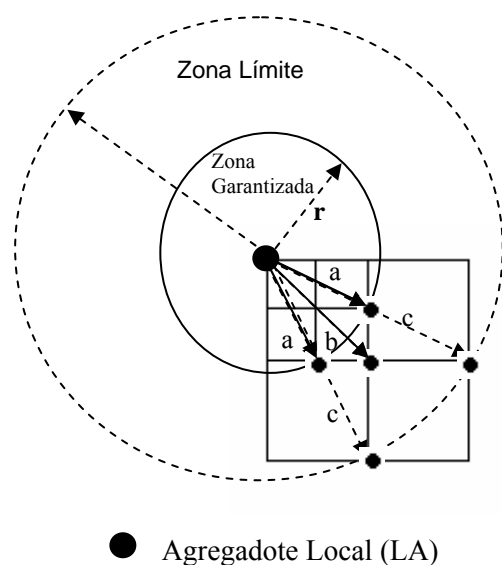


Figura. 3.8. Un ejemplo de zonificación en las redes de sensores.

Los cluster fijos de Xu y sus colegas, son seleccionados de forma igual y dispuestas a manera de cuadrado. La selección del tamaño del cuadrado depende de la energía de transmisión requerida y la dirección de la comunicación. Un nodo en cada cluster, llamado nodo principal de cluster, es elegido periódicamente. La comunicación horizontal y vertical esta garantizada si la señal viaja por una distancia de $a = r/\sqrt{5}$, elegida de tal forma que cualquiera de los 2 nodos sensores en clusters adyacentes verticales u horizontales puedan comunicarse directamente en la zona garantizada. Para que un nodo en la zona límite reciba el paquete transmitido, la señal debe viajar una distancia $c = r/(2\sqrt{5})$. Nótese también que para que pueda haber una comunicación diagonal, la señal debe abarcar una distancia de $b = r/(2\sqrt{2})$. El nodo principal de cluster es responsable de recibir información no procesada desde los otros nodos en el cluster. La función del nodo principal de cluster es rotada para repartir la función de distribución de energía equitativamente entre toda la red.

- **Arquitectura de Ruteo de Cuadrícula Virtual**

Un paradigma de ruteo de eficiencia de energía propuesto por Al-Karaki [23] se basa en el concepto de agregación de información y procesamiento dentro de la red. La agregación de la información se lleva a cabo en dos niveles: primero de manera local y luego global. Un enfoque razonable para las WSN es ubicar los nodos en una topología fija debido a que los nodos deben ser estacionarios o tener muy poca movilidad. Los clusters fijos, iguales, adyacentes y no superpuestos, con formas regulares son seleccionados para obtener una red virtual fija y rectilínea. Dentro de cada zona, un nodo es óptimamente seleccionado para actuar como nodo principal del cluster. El grupo de nodos principales del cluster, también llamados agregadores locales (LAs), ejecutan la agregación local. Diversas heurísticas fueron formuladas para destinar un subgrupo de nodos principales de cluster, llamados agregadores master (MAs), para poder ejecutar una optima agregación de información cercana global para que el costo total del ruteo desde los nodos fuente a la estación base sea minimizado. La figura. 3.9 ilustra un ejemplo de la zonificación fija y de la arquitectura de la red de cuadrícula virtual resultante (VGA) usada para ejecutar agregación de información en dos niveles. Nótese que la ubicación de la estación base no es necesariamente en la esquina de la red, sino mas bien puede ser ubicada en un lugar arbitrario.

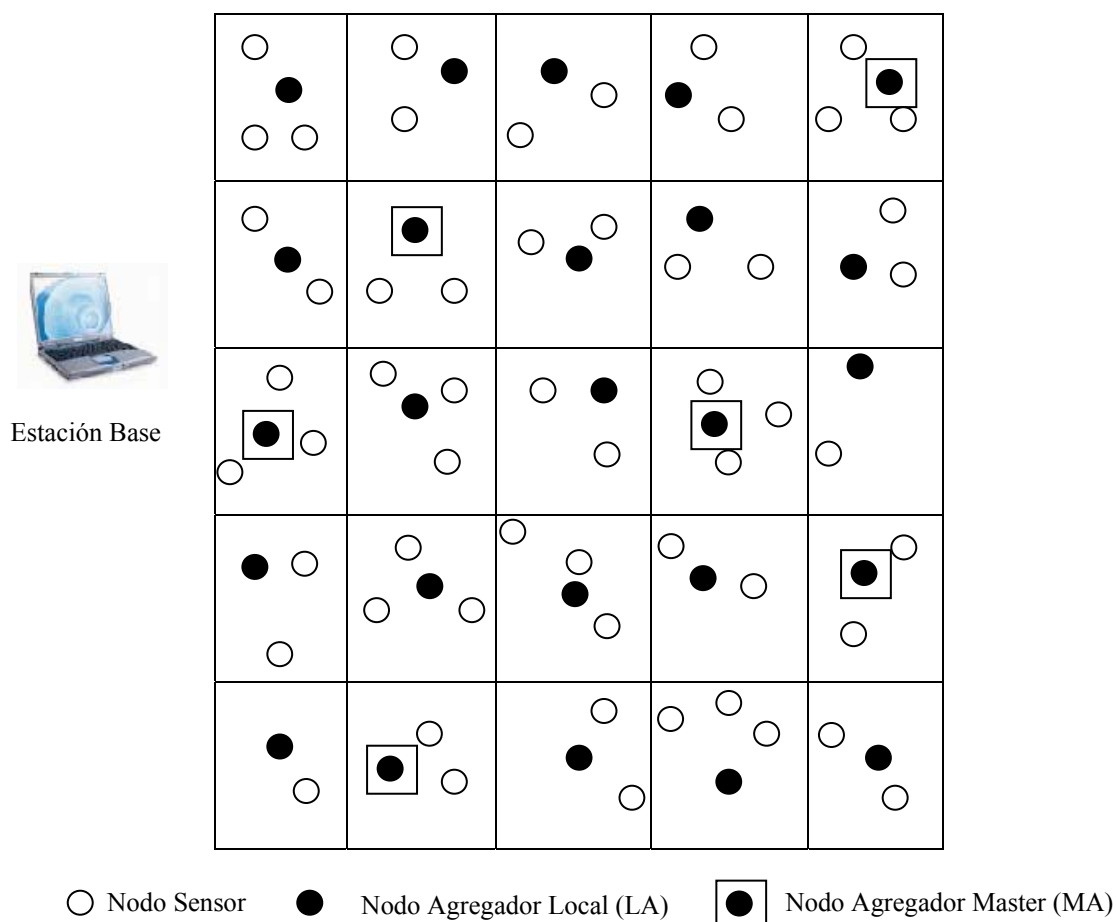


Figura. 3.9. Forma regular del mosaico plano aplicado al área de la red. En cada zona, un nodo principal del cluster es seleccionado para la agregación local. Un subgrupo de esos nodos principales del cluster, llamados nodos master, son seleccionados óptimamente para ejecutar la agregación global.

• Ruteo Jerárquico de Alerta de Energía

Li y sus colaboradores [24] han propuesto un protocolo de ruteo jerárquico de alerta de energía el cual divide la red en grupos de sensores. Cada grupo de sensores que estén en una proximidad geográfica es dispuesto en un cluster a manera de zona y cada zona es tratada como una entidad. Para llevar a cabo el ruteo, a cada zona se le permite decidir como enrutará el mensaje jerárquicamente a través de las otras zonas. Los mensajes son enrutados en la trayectoria con el máximo y mínimo de la energía restante, llamada la ruta max-min. La motivación es que el usar los nodos con alto poder residual puede ser costoso comparado con el uso de la ruta de consumo de energía mínimo. Un algoritmo de aproximación, llamado el algoritmo max-min zPmin, combina los beneficios de seleccionar la ruta con el consumo mínimo de energía y la ruta que maximiza el mínimo de poder residual en los nodos de la red. El algoritmo encuentra la ruta con el menor consumo

de energía, P_{min} , usando el algoritmo Dijkstra. Los protocolos planos y jerárquicos son diferentes en muchos aspectos. La tabla 3.2 muestra las mayores diferencias entre los dos enfoques de ruteo.

Tabla. 3.2. Ruteo de Topología Plana vs. Jerárquica

Ruteo Jerárquico	Ruteo Plano
Programación basada en reservación	Programación basada en comportamiento
Colisiones evitadas	Colisión superpuesta presente
Ciclo de funciones reducido debido a estados de suspensión periódicos	Ciclo de funciones variable controlando el estado de suspensión de los nodos
Agregación de la información por los nodos principales de cluster	Los nodos en la ruta multisalto agrega información entrante de sus vecinos
Ruteo simple pero no optimo	Ruteo complejo pero optimo
Requiere sincronización global y local	Los enlaces son formados en el acto sin sincronización
Superposición de la formación del cluster por medio de la red	Las rutas se forman únicamente en regiones que tienen información a ser transmitida
Latencia baja debido a red de saltos múltiples formada por nodos principales de cluster siempre disponibles	Latencia en nodos intermedios en estado alerta e instalación de ruta múltiple
La disipación de la energía es uniforme	La disipación de la energía depende de los patrones de trafico
La disipación de la energía no puede ser controlada	La disipación de la energía se adapta al patrón del trafico
Buena asignación de canal	Asignación no garantizada

3.4.3 Ruteo Adaptable o Adaptativo

Heinzelman [12] y Kulik [25] propusieron una familia de protocolos adaptables, llamados protocolos de sensores para información vía negociación (SPIN). Estos protocolos distribuyen la información de cada nodo a todos los nodos en la red, asumiendo que todos los nodos en la red son estaciones base potenciales. Esto permite al usuario consultar a cualquier nodo y así obtener la información requerida inmediatamente. Estos protocolos hacen uso de la propiedad de que los nodos aledaños contienen información similar y así distribuyen solamente información que los otros nodos no tienen.

La familia de protocolos SPIN usa negociación de información y algoritmos de recursos adaptables. Los nodos que corren el SPIN asignan un nombre de alto nivel para describir la información recolectada (llamada meta-información) completamente y ejecutar negociaciones de meta-información antes de que esta sea transmitida. Esto asegura que no se envíe información redundante a través de la red. El formato de la meta-información es de aplicación específica y no está especificada en el SPIN. Por ejemplo, los sensores pueden hacer uso de su único ID para reportar la meta-información si ellos cubren cierta región conocida. Además, el SPIN tiene acceso al nivel actual de energía del nodo y adapta el protocolo que está corriendo basándose en cuánta energía queda. Estos protocolos trabajan de forma dirigida por tiempo y distribuyen la información a través de la red, aun cuando el usuario no ha solicitado ninguna información.

La familia SPIN es diseñada para ubicar las deficiencias de la saturación clásica por negociación y adaptación de recursos. Esta familia de protocolos está diseñada basándose en la idea de que los nodos sensores operan más eficientemente y conservan más energía enviando información que describe la información dentro de los sensores en lugar de enviar toda la información; por ejemplo, los nodos de sensores y de imagen deben monitorear los cambios en sus recursos de energía.

Los protocolos SPIN fueron motivados por la observación que los protocolos convencionales como el de la saturación en el gasto de energía y ancho de banda al enviar copias de información adicional e innecesaria por medio de sensores que cubren áreas superpuestas. Los nodos sensores usan tres tipos de mensajes – ADV, REQ, y DATA – para comunicarse. El ADV anuncia nueva información, el REQ solicita la información, y la DATA es el mensaje actual. El protocolo comienza cuando el nodo SPIN obtiene nueva información que quiere compartir. Lo hace transmitiendo un mensaje ADV que contiene la meta-información. Si un nodo vecino está interesado en la información, envía un mensaje REQ por la DATA y la DATA es enviada a su nodo vecino. El nodo sensor vecino luego repite el proceso con sus nodos vecinos. Como resultado, el área entera de sensores recibirá una copia.

La familia de protocolos SPIN incluye dos protocolos, específicamente SPIN-1 y SPIN-2, que incorporan negociación antes de transmitir la información para así eliminar cualquier implosión y superposición, asegurando que solo información útil sea transferida. Además, cada nodo tiene su propio administrador de recursos, el cual lleva el registro del

consumo de los recursos, y es sondeada por los nodos antes de transmitir la información. El protocolo SPIN-1 es un protocolo de 3 etapas, como se describió anteriormente. Una extensión al protocolo SPIN-1 es el SPIN-2, el cual incorpora un recurso de mecanismo alerta basado en límites adicionalmente a la negociación. Cuando la energía en los nodos es abundante, el SPIN-2 se comunica usando el protocolo de tres etapas SPIN-1.

Sin embargo, cuando la energía en un nodo empieza a aprovechar un límite bajo de energía, reduce su participación en el protocolo, es decir, participa solo cuando cree que puede completar todas las otras etapas del protocolo sin llegar al límite más bajo de energía. Este enfoque no previene a un nodo de recibir, y por ende de gastar, energía en el ADV, o en los mensajes REQ por debajo del límite inferior de energía. Lo que si hace, sin embargo, es prevenir el nodo de manejar el mensaje DATA si esta por debajo del limite.

En conclusión, los protocolos SPIN-1 y SPIN-2 son protocolos simples que eficientemente diseminan la información mientras mantienen un estado no-vecino. Estos protocolos están bien equipados para un ambiente en el que los sensores son móviles ya que ellos basan sus decisiones de reenvío basándose en información local vecina. Otros protocolos de la familia SPIN son:

- SPIN-BC. Este protocolo esta diseñado para canales de transmisión. Todos los nodos dentro del rango de captación de un nodo sensor escucharan el mensaje. Sin embargo, los nodos deben esperar para transmitir si el canal esta ocupado. Además, los nodos no envían el mensaje REQ inmediatamente cuando escuchan el mensaje ADV. En lugar de eso, cada nodo asigna un contador de tiempo aleatorio y cuando este tiempo expira, el nodo envía un mensaje REQ. Si, mientras esperan que sus contadores terminen, otros nodos escuchan el mensaje, entonces sus contadores se detendrán. Esto evita que sean enviadas copias repetidas de la misma solicitud.
- SPIN-PP. Si dos nodos pueden comunicarse uno con el otro sin incurrir en interferencia con otros nodos vecinos, este protocolo será usado. Está diseñado para una comunicación punto-a-punto, es decir, ruteo punto a punto, y asume que la energía no es una limitación mayor y que los paquetes no se pierden nunca. Un nodo enviara un mensaje ADV para anunciar que tiene un mensaje para enviar. Todos los nodos en el vecindario que escuchan el mensaje, si están interesados, expresaran ese interés enviando mensajes REQ. Una vez que recibe el mensaje REQ, el nodo anunciante enviara la información a los nodos interesados. Una vez

que esos nodos tengan la información, se convertirán en anunciadores de información y enviarán un mensaje ADV a sus vecinos. Si los vecinos se interesan, envían un mensaje REQ y proceso se repite.

- SPIN-EC. Este protocolo trabaja de manera similar que el SPIN-PP, pero con una heurística de energía adicionada al mismo. Un nodo participa en el protocolo si es capaz de completar todas las etapas del protocolo sin dejar que su energía pase cierto límite. El límite de la energía es un parámetro del sistema.
- SPIN-RL. En el SPIN-PP, se asume que los paquetes no se pierden. Cuando un canal es inestable (pierde información), este protocolo no puede ser usado. En lugar de él, se usa otro protocolo llamado SPIN-RL, al que se añaden dos ajustes al protocolo SPIN-PP para informar que canales son inestables. Primero, cada nodo mantiene un registro de todos los mensajes ADV que recibe. Puede también solicitar que la información sea reenviada, si no la recibió en un periodo de tiempo específico. Segundo, para afinar el índice de reenvío de información, los nodos limitarán la frecuencia de esta actividad teniendo a los nodos en espera por un periodo de tiempo determinado, antes de responder al mismo mensaje REQ otra vez. Este procedimiento garantiza que la información sea reenviada solamente cuando se asegure en el envío del mensaje REQ anterior no falló.

La tabla. 3.3 compara las técnicas de ruteo SPIN, LEACH y difusión dirigida de acuerdo a diferentes parámetros. La tabla indica que la difusión dirigida muestra un enfoque prometedor para el ruteo con eficiencia de energía en las WSN gracias al uso de procesamiento interno en la red.

Tabla 3.3. Comparación entre SPIN, LEACH, y Difusión dirigida

	SPIN	LEACH	Difusión Dirigida
Ruteo Óptimo	NO	NO	SI
Tiempo de Vida de Red	Buena	Muy Buena	Buena
Alerta de recursos	SI	SI	SI
Uso de información	SI	NO	SI

3.4.4 Ruteo Multi – Trayectoria (Multipath)

La resistencia de un protocolo se mide por la probabilidad de que exista una ruta alterna entre la fuente y el destino cuando una ruta principal falla. Esto puede ser aumentado manteniendo rutas múltiples entre la fuente y el destino, tomado en cuenta el gasto incrementado de consumo de energía, y manteniendo estas rutas alternas vigentes enviando mensajes periódicos. Así, la resistencia de la red debe ser incrementada mientras se mantiene bajo la superposición de estas rutas.

Ganesan y sus colaboradores [26] han propuesto un protocolo de ruteo multi-ruta con eficiencia de energía que usa rutas múltiples trenzadas en lugar de rutas disjuntas para mantener el costo de mantenimiento bajo. Los costos de tales rutas alternas son también comparables a la ruta primaria porque tratan de ser lo más parecidas a la ruta principal. Existen algoritmos para enrutar la información en una trayectoria cuyos nodos tengan la mayor energía residual. La ruta cambia cuando se encuentra una ruta mejor. La ruta principal será usada hasta que su energía sea menor que la energía de la ruta de apoyo, y es ahí cuando la ruta de apoyo es usada. De esta manera, los nodos en la ruta principal no disminuirán sus recursos de energía por el uso continuo de la misma ruta, por lo que se obtiene mayor tiempo de vida. El costo de cambio de ruta no fue cuantificado en papel.

3.4.5 Ruteo Basado en Consultas

En este tipo de ruteo, los nodos de destino propagan una consulta de información (etapa de captación) desde un nodo a través de la red y el nodo que tenga la información que concuerde con la solicitada en la consulta envía la respuesta al nodo que la solicito. Usualmente estas consultas se describen en lenguaje natural, o en niveles de consulta de alto nivel. Por ejemplo, el cliente C1 puede emitir una consulta al nodo N1 y preguntar, “Los vehículos en movimiento se encuentran en terreno de batalla en la región 1?”. Todos los nodos tienen tablas que están conformadas por las consultas realizadas en la etapa de captación, y por lo tanto enviar información que concuerde con estas consultas cuando las reciban.

La difusión dirigida es un ejemplo de este tipo de ruteo. En la difusión dirigida, el nodo solicitante envía mensajes de interés a los sensores. Mientras el interés es propagado

a través de los sensores de la red, se configuran las gradientes desde la fuente hasta el nodo disipador. Cuando la fuente tiene información para el interés, la fuente envía la información a través de la ruta gradiente del interés. Para disminuir el consumo de energía, en la ruta se realiza agregación de información (es decir, supresión de duplicados).

3.4.6 Protocolos Basados en Negociación

Estos protocolos utilizan descriptores de datos de alto nivel para así eliminar transmisiones de información redundante por medio de la negociación. Las decisiones de comunicación son también tomadas basándose en los recursos disponibles para ellas.

La familia de protocolos SPIN son un ejemplo de protocolos de ruteo basado en negociación. La motivación es que el uso de la saturación para diseminar información producirán implosión y superposición entre la información enviada y así, los nodos recibirán duplicados de la misma información. Esta operación consume mas energía y más procesamiento enviando la misma información por medio de diferentes sensores. Los protocolos SPIN están diseñados para diseminar la información de un sensor a todos los otros sensores, asumiendo que estos sensores son estaciones base potenciales. Es por eso que, la idea principal del ruteo basado en negociaciones para las WSN es suprimir el duplicado de la información y prevenir el envío de información redundante al siguiente sensor o a la estación base, conduciendo diferentes mensajes de negociación antes de que empiece la transmisión real de la información. Después de analizar la taxonomía de los protocolos de ruteo para WSN en la figura. 3.5., se resumen los protocolos de cada categoría.

Tabla. 3.4. Clasificación de los protocolos de ruteo acorde a la estructura de la red

Protocolos Planos	Protocolos Jerárquicos	Protocolos Adaptivos	Protocolos basados en localización
SAR	LEACH	SPIN	GAF
Difusión Directa	PEGASIS		GEAR
Rumor	TEEN y APTEEN		MFR
MCFA	MECN y SMECN		DIR
Ruteo basado en gradiente	SOP		GEDIR
CADR	Sensor Aggregates Routing		GOAFR
COUGAR	Cluster de tamaño fijo		SPAN
ACQUIRE	Arquitectura de malla virtual		
Ruteo de uso eficiente de energía	HPAR		
Protocolo de ruteo con random walks	TTDD		

Tabla. 3.5. Comparación de los protocolos de ruteo en WSN

	Clasificación	Movilidad	Consumo de Energía	Basado en Negociación	Agregación de Datos	Localización	QoS	Complejidad	Escalabilidad	Multicamino	Basado en Requerimiento
SPIN	Plano	Posible	Limitado	Si	Si	No	No	Baja	Limitada	Si	Si
Difusión Directa	Plano	Limitada	Limitado	Si	Si	Si	No	Baja	Limitada	Si	Si
Rumor Routing	Plano	Muy Limitada	N/A	No	Si	No	No	Baja	Buena	No	Si
GBR	Plano	Limitada	N/A	No	Si	No	No	Baja	Limitada	No	Si
MCFA	Plano	No	N/A	No	No	No	No	Baja	Buena	No	No
CADR	Plano	No	Limitado	No	Si	No	No	Baja	Limitada	No	No
COUGAR	Plano	No	Limitado	No	Si	No	No	Baja	Limitada	No	Si
AOQUIRE	Plano	Limitada	N/A	No	Si	No	No	Baja	Limitada	No	Si
EAR	Plano	Limitada	N/A	No	No	No	No	Baja	Limitada	No	Si
LEACH	Jerárquico	Fija - BS	Máximo	No	Si	Si	No	Alta	Buena	No	No
TEEN & APTEEN	Jerárquico	Fija - BS	Máximo	No	Si	Si	No	Alta	Buena	No	No
PEGASIS	Jerárquico	Fija - BS	Máximo	No	No	Si	No	Baja	Buena	No	No
MECN & SMECN	Jerárquico	No	Máximo	No	No	No	No	Baja	Baja	No	No
SOP	Jerárquico	No	N/A	No	No	No	No	Baja	Baja	No	No
HPAR	Jerárquico	No	N/A	No	No	No	No	Baja	Buena	No	No
VGA	Jerárquico	No	N/A	Si	Si	Si	No	Alta	Buena	Si	No
Sensor Aggregation	Jerárquico	Limitada	N/A	No	Si	No	No	Baja	Buena	No	Posiblemente
TTDD	Jerárquico	Si	Limitado	No	No	No	No	Moderada	Baja	Posiblemente	Posiblemente
GAF	Localización	Limitada	Limitado	No	No	No	No	Baja	Buena	No	No
GEAR	Localización	Limitada	Limitado	No	No	No	No	Baja	Limitada	No	No
SPIN	Localización	Limitada	N/A	Si	No	No	No	Baja	Limitada	No	No
MFR GEDIR	Localización	No	N/A	No	No	No	No	Baja	Limitada	No	No
GOAFR	Localización	No	N/A	No	No	No	No	Baja	Buena	No	No
SAR	QoS	No	N/A	Si	Si	No	Si	Moderada	Limitada	No	Si
SPEED	QoS	No	N/A	No	No	No	Si	Moderada	Limitada	No	Si

CAPITULO 4

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

4.1 INTRODUCCIÓN

Las Redes de Sensores Inalámbricas han atraído una gran cantidad de atención de los investigadores debido a su amplia variedad de aplicaciones potenciales. Una WSN provee una nueva clase de sistemas de computación y expande la habilidad de las personas de interactuar remotamente con el mundo físico.

Este capítulo investiga las recientes contribuciones realizadas sobre problemas de cobertura en el contexto de las WSN. Los sensores tienen una antena omni-direccional y pueden monitorear un disco cuyo radio es llamado rango de detección. Varias formulaciones de cobertura y sus suposiciones son presentadas, así como un resumen de las soluciones propuestas. Los problemas más discutidos de la literatura se pueden clasificar dentro de los siguientes tipos: cobertura de área, cobertura de punto, y cobertura de barreras. Este capítulo continúa con una discusión de estos problemas de cobertura, seguidos de las conclusiones.

En inteligencia ambiental uno de los parámetros más importantes a conocer para modelar el entorno es la localización física de los diferentes actores, sean estas personas u objetos. Este trabajo presenta una revisión de diferentes técnicas de localización basadas en redes de sensores. Son muchas las soluciones desarrolladas hasta la fecha (ultrasónicas, radio: GSM, UWB, Bluetooth, WLAN, RFID; ópticas, etc.) pero todavía no existe una tecnología ideal de localización para espacios inteligentes en interiores y la investigación continúa.

4.2 COBERTURA DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

El despliegue de sensores es un tema fundamental para las WSN. El objetivo de un plan de despliegue de sensores es alcanzar cobertura deseable con un mínimo número de nodos sensores mientras se logra superar temas como QoS, confiabilidad, y escalabilidad de ciertas aplicaciones.

En las WSN, la cobertura tiene un doble significado: el rango y la localización espacial. El rango se refiere al área geométrica de una misión de detección designada, mientras que la localización espacial enfatiza las posiciones espaciales relativas de los nodos sensores y objetivos para obtener los requerimientos exactos.

4.2.1 El Problema De Cobertura De Los Sensores

Un problema importante presentado en la literatura es el problema de cobertura de los sensores. Este problema se centra en la pregunta fundamental: ¿Que tan bien observan los sensores el espacio físico?. Como menciona Meguerdichian y sus compañeros, el concepto de cobertura es una medida de Calidad del Servicio (QoS) de la función de detección y esta sujeto a una amplia variedad de interpretaciones debido a la gran diversidad de sensores y aplicaciones [27]. La meta es tener cada ubicación en el espacio físico objetivo dentro del rango de detección de por lo menos un sensor.

Considerando el concepto de cobertura, se pueden formular diferentes problemas, basándose en el tema que debe ser cubierto (Área vs. Puntos discretos) y sobre las siguientes opciones de diseño:

- Método de ubicación de los sensores: Determinista vs. Aleatorio. La ubicación de un sensor de forma determinista puede ser conveniente en entornos amigables y accesibles. La distribución de sensores en forma aleatoria es generalmente considerada en aplicaciones militares y para áreas remotas o no hospitalarias.
- Rangos de detección y comunicación: Los escenarios WSN consideran a los nodos sensores con el mismo o diferente rango de detección. Otro factor que

se relaciona a la conectividad es el rango de comunicación, el cual puede ser igual o no al rango de detección.

- Requerimientos esenciales adicionales: eficiencia de energía y conectividad, a la que se refieren como cobertura con eficiencia de energía y cobertura de conexión.
- Características de Algoritmos: centralizados vs. distribuidos o localizados. Los algoritmos de cobertura propuestos son centralizados, o distribuidos y localizados. En los algoritmos distribuidos, el proceso de decisión es descentralizado. Los algoritmos distribuidos y localizados se refieren a procesos de decisión distribuidos en cada nodo que hacen uso solo de información del vecindario (con una cantidad de saltos constante). Debido a que las WSN tienen una topología dinámica y necesita acomodar un gran número de sensores, los algoritmos y protocolos diseñados deben ser distribuidos y localizados para acomodar una arquitectura escalable de mejor forma.
- Objetivo del problema: maximizar el tiempo de vida de red o mínimo número de sensores.

4.2.2 Área De Cobertura

El problema de cobertura más estudiado es el problema de área de cobertura en el cual el objetivo principal de la red de sensores es cubrir (monitorear) un área (también llamada algunas veces región). La figura 4.1 (a) muestra un ejemplo de implementación de sensores aleatoria para cubrir un área cuadrada dada. Los nodos negros conectados forman un grupo de sensores activos como resultado de mecanismo programado.

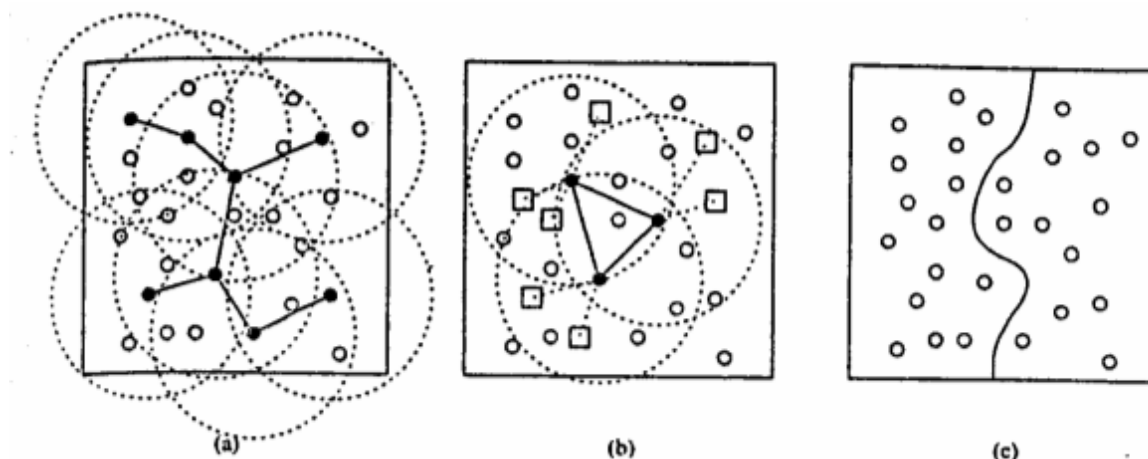


Figura 4.1. (a) Despliegue al azar de sensores para cubrir un área cuadrada; (b) Despliegue al azar de sensores para cubrir un conjunto de puntos; (c) Problema general de la cobertura de barrera.

- **Cobertura Aleatoria Conectada**

Un tema importante en las WSN es la conectividad. Una red está conectada si cualquier nodo activo puede comunicarse con cualquier otro nodo activo, posiblemente usando nodos intermedios como las retransmisiones. Una vez que los sensores se han implementado, se organizan en una red que debe estar conectada para que la información recolectada por los nodos sensores puedan ser retransmitida de vuelta a los recolectores de información o a los controladores. Un objetivo importante y frecuentemente analizado es determinar un número mínimo de sensores funcionando requeridos para mantener la cobertura de área inicial así como la conectividad. Seleccionar un mínimo grupo de nodos funcionales reduce el consumo de energía y prolonga el tiempo de vida de la red.

Zhang y Hou [28] propusieron un algoritmo localizado y distribuido llamado control de densidad geográfica óptima (OGDC). En cualquier momento, un nodo puede estar en cualquiera de los tres estados: NO DECIDIDO, ENCENDIDO, y APAGADO. El algoritmo corre en ciclos, y al comienzo de cada ciclo un grupo de uno o más nodos iniciales son seleccionados como nodos funcionales. Luego de un tiempo de retroceso, un nodo inicial transmite un mensaje de encendido y cambia su estado a ENCENDIDO. El mensaje de encendido contiene: (1) la posición del emisor, y (2) la dirección en la que un nodo funcional debe ubicarse. La dirección indicada por el mensaje de encendido de un nodo inicial es distribuida aleatoriamente. El seleccionar los nodos iniciales aleatoriamente

al comienzo de cada ciclo asegura el consumo de energía uniforme a través de la red. También, el mecanismo de retroceso evita colisiones de paquetes.

Al comienzo de cada ciclo, todos los nodos están en modo NO DECIDIDO y cambian a estado ENCENDIDO o APAGADO al inicio del siguiente ciclo. Esta decisión se basa en los mensajes de encendido recibidos. Cada nodo tiene una lista con información de los vecinos. Cuando un nodo recibe un mensaje de encendido, chequea si sus vecinos cubren sus áreas de detección; si es así, cambiará a estado APAGADO. Un nodo decide cambiar a estado ENCENDIDO si es el nodo más cercano a la ubicación óptima de un nodo funcional ideal seleccionado para cubrir los puntos de cruce de las áreas de cobertura de dos vecinos funcionales.

- **Cobertura Determinista**

La cobertura determinista quiere decir que la colocación está bien controlada a fin de que cada nodo pueda ser colocado en una posición específica. Los patrones predefinidos de implementación podrían ser uniformes en áreas diferentes del campo del sensor o pueden ser oprimidos para compensar las áreas más críticamente monitoreadas. Kar y Barnejee [29] consideraron el problema de ubicar determinísticamente un número mínimo de nodos sensores para cubrir una región dada. El área de detección es un disco con radio r llamado r -disco, y el radio de detección y comunicación son iguales. Este patrón básico es una franja- r , una cadena de r -discos ubicados a lo largo de una línea por lo que la distancia entre dos discos adyacentes es r . Esto forma un componente conectado. Para cubrir una área dada, primero se la llena de r -franjas con distancia $r\left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ entre ellas. Luego otra franja es adicionada para intersecar todas las otras franjas- r paralelas. Esto da como resultado una red de sensores conectada que cubre el área dada. Para cubrir el plano bi-dimensional, el índice de desempeño es 1.026, mientras que para una región convexa limitada con un perímetro L y un área A el índice de desempeño es $2.693 (1+2.2433Lr/A)$.

- **Cobertura Del Nodo Con Aproximación**

Cuando una red de sensores grande y densa es implementada aleatoriamente para monitoreo de área, la cobertura de área puede ser aproximada por la cobertura de ubicación

de los sensores. Un método para asegurar la cobertura y la conectividad es diseñar un grupo de sensores activos como un grupo conectado dominante (CDS – Connected Dominating Set). Un nodo es un nodo de cobertura si dos vecinos no están conectados (es decir, que no están dentro del rango de transmisión uno del otro). Los nodos de cobertura (también llamados nodos de enlace) forman un CDS. Un proceso de reducción puede ser usado para reducir el tamaño de grupo de nodos de cobertura mientras mantienen la propiedad CDS.

Una regla de reducción generalizada llamada *Regla de reducción k*, trata básicamente, de que un nodo de cobertura puede ser retirado si el grupo de vecinos puede estar cubierto colectivamente por aquellos nodos k de cobertura. Adicionalmente, estos nodos de cobertura k , tienen mayor prioridad y están conectados. La regla de reducción k asegura un índice de aproximación constante. El CDS derivado del proceso de marcación con la regla k puede ser mantenido localmente cuando los sensores se encienden o apagan.

El problema de cobertura de nodos puede relacionarse al problema de transmisión, en el cual un pequeño grupo de nodos emisores es seleccionado. La selección del grupo emisor en la transmisión es similar al punto del problema de cobertura, donde ambos tratan de encontrar un grupo de cobertura pequeño. Note que la difusión directa también utiliza esta plataforma para recolectar información por medio de la transmisión. Mientras el interés es propagado por la red, los nodos sensores configuran gradientes de retorno al recolector de forma descentralizada. La diferencia es que en la difusión directa todos los sensores envían información. Una diferencia entre la cobertura de nodos y la cobertura de área es que la información programada del vecino es suficiente para la cobertura de nodos, pero en la cobertura de área se necesita información geométrica/direccional.

4.2.3 Cobertura De Punto

En el problema de cobertura de puntos, el objetivo es cubrir un grupo de puntos. La figura 4.1 (b) muestra un ejemplo de un grupo de sensores implementados aleatoriamente para cubrir un grupo de puntos (pequeños nodos cuadrados). Los nodos negros conectados forman un grupo de sensores activos, el resultado de un mecanismo programado. Luego, un enfoque de cobertura es presentado para cada método de despliegue de sensores: aleatorio y determinista.

- **Cobertura Aleatoria De Punto**

El escenario de cobertura tiene aplicabilidad militar. Se considera un limitado número de puntos (objetivos) con una ubicación conocida que necesita ser monitoreada. Un mayor número de sensores son dispersos aleatoriamente en las proximidades de los objetivos; los sensores envían la información monitoreada a un nodo de procesamiento central. El requisito es que cada objetivo debe ser monitoreado todo el tiempo por un sensor por lo menos, asumiendo que cada sensor es capaz de monitorear todos los objetivos dentro de su rango de detección.

Un método para extender el tiempo de vida de la red por medio de la preservación de recursos es dividir el grupo de sensores en grupos disjuntos para que cada grupo cubra completamente todos los objetivos. Estos grupos disjuntos son activados sucesivamente, para que en cualquier momento de tiempo solo este activo un grupo. Ya que todos los objetivos son monitoreados por cada grupo de sensores, el objetivo de este enfoque es determinar un número máximo de grupos disjuntos para que el intervalo de tiempo entre dos activaciones para cualquier sensor dado sea mayor. Disminuyendo la fracción de tiempo en que un sensor esta activo, el tiempo total para que la energía total se termine para todos los sensores es aumentado y el tiempo de vida de la red es extendido proporcionalmente por un factor igual al número de grupos disjuntos.

- **Cobertura Determinista De Punto**

Esto es factible en entornos amigables y accesibles. Dado un grupo de n puntos, el objetivo es determinar un número mínimo de nodos sensores y su ubicación para que los puntos dados sean cubiertos y los sensores implementados estén conectados. Para el caso en el que todos los sensores tienen el mismo rango de detección y este es igual al rango de comunicación [29]. El algoritmo empieza construyendo un árbol de expansión mínimo sobre los puntos del objetivo, y luego sucesivamente selecciona las ubicaciones de los nodos sensores en el árbol (en los vértices o en los límites) para que la cobertura y la conectividad se mantengan en cada paso.

4.2.4 Cobertura de barrera

La cobertura de barrera puede ser considerada como la cobertura con el fin de minimizar la probabilidad de penetración no detectada a través de la barrera (red de sensores). La figura 4.1 (c) muestra un problema general de cobertura de barrera donde los puntos de inicio y final de la ruta son seleccionados desde las líneas límite inferior y superior del área. La selección de la ruta depende del objetivo.

- **Modelo 1 De Cobertura De Barrera**

Dos tipos de modelo de cobertura de barreras son propuestos. El primer modelo ha sido propuesto por Meguerdichian [30], quien registra el siguiente problema: dado un campo equipado con sensores y con las ubicaciones iniciales y finales de un agente que necesita moverse a través del campo, determinar la ruta de ruptura máxima (MBP) y la ruta de soporte máxima (MSP) del agente. El MBP (MSP) corresponde al peor caso de cobertura y tiene la propiedad de que, para cualquier punto de la ruta, la distancia al sensor más cercano es maximizado (minimizándola). El modelo asume ubicaciones conocidas de nodos sensores homogéneos (por ejemplo, a través del GPS), con una disminución de efectividad mientras la distancia aumenta. Los autores propusieron una solución centralizada, basándose en la observación de que el MBP en líneas del diagrama Voroni y el MSP se ubica en las líneas de triangulación Delaunay. El algoritmo propuesto empieza generando un diagrama Voroni (o diagrama de triangulación Delaunay), asigna a cada segmento un valor igual a la distancia al sensor más cercano (o igual al tamaño del segmento), y luego utiliza una búsqueda binaria y amplía la primera búsqueda para cómputo de rutas.

- **Modelo 2 De Cobertura De Barrera**

El segundo modelo de cobertura de barrera es el modelo basado en exposición, introducido por Meguerdichian [31], en el cual las habilidades de detección disminuyen mientras la distancia crece. Sin embargo, otro factor importante es el tiempo de detección (exposición). A mayor tiempo de exposición, mayor es la habilidad de detección. Dado un campo instrumentado con un sensores y los puntos iniciales y finales del objeto. Los autores

consideraron el problema de determinar la ruta de exposición mínima, la cual corresponde al caso del peor escenario.

4.3 LOCALIZACIÓN DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

Las técnicas de localización para las WSN deben ser distribuidas y locales. La requerida abstracción de localización debe definirse desde el punto de vista de la aplicación de la WSN y la intención de uso de la información de ubicación por tal servicio. Parece lógico tratar de integrar servicios de red tales como posicionarse con el tráfico de datos en la red para así reducir el número de conexiones saturadas y cantidad de tráfico.

El problema de la localización en las WSN puede ser visto como un problema distribuido general de los sensores, con los sensores que pueden descubrir otros nodos, estimar rangos entre nodos, etc., que sirven como referencias de posición. Además, los mapas y grupos de datos a ser usados en conjunto con la información de posición pueden verse también como una forma de información de sensores, solo en este caso, la red y los recursos de almacenamiento son los elementos usados para proveer esta información para servicios con alerta de contextos. En las WSN densamente pobladas, las interacciones entre nodos son abundantes. Por eso es necesario extraer y combinar la apropiada información de una forma correcta para hacer el mejor uso del mismo. En cierto grado una noción de vida con errores debe ser adoptada ya que el problema formal de una localización distribuida es un poco difícil y los recursos disponibles por nodo en una WSN son limitados. Un requerimiento importante para la localización en las WSN es un enfoque distribuido que minimiza la saturación computacional, y especialmente la de la comunicación, y es lo suficientemente robusta para superar una desconexión. Un enfoque híbrido que integra la red y el posicionamiento es por ende altamente aplicable.

En las WSN, el nombramiento de la información, no los nodos, y la organización alrededor de sistemas coordinados espaciales y temporales requieren abstracciones apropiadas y modelos de programación para que el contexto de localización sea desarrollado. Los primeros enfoques en esta dirección muestran que tales sistemas pueden ser vistos como un modelo de espacio doble, bases de datos distribuidas, o incluso estructuras de cómputo vagamente pareadas y paralelas.

Existen tres componentes clave para el posicionamiento: identificación e intercambio de datos, medición y adquisición de datos, y cómputo para derivar la localización que necesitan ser ejecutados concurrentemente en los nodos usando un esquema de rangos cooperativos.

El esquema de rangos cooperativos permite combinar las diferentes tareas necesarias para el posicionamiento basado en redes para operar concurrentemente en muchos nodos. Una vez que la información del vecindario esta disponible en un nodo específico, actualizaciones de rango, actualización de datos y posicionamiento, las cuales dependen unas de otras hasta cierto punto, pueden ser ejecutadas secuencialmente y fuera de orden. Cada nodo en la red es requerido a mantener una base de datos de la información de su vecindario conteniendo las posiciones estimadas de sus vecinos y el rango de estos vecinos. El tamaño de esta base de datos depende de los requerimientos del servicio de posicionamiento solicitado así como del estado de la red, es decir, cantidad y geometría de los nodos vecinos.

4.3.1 Sistemas De Posicionamiento Y Ubicación Para Redes De Sensores Inalámbricas

Las ubicaciones de los dispositivos u objetos son información importante en muchas aplicaciones. Esto es particularmente verdadero para las redes de sensores inalámbricas, las cuales usualmente necesitan determinar el contexto de sus dispositivos. Para los ambientes exteriores, el más conocido sistema de posicionamiento es el sistema de posicionamiento global (GPS) [32]. Este sistema de posicionamiento utiliza 24 satélites dispuestos por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para permitir servicios de posicionamiento global tridimensional; tiene dos niveles de precisión: servicio de posicionamiento estático (SPS) y servicio de posicionamiento preciso (PPS). La precisión provista por el GPS esta alrededor de los 20 a 50 m.

Adicionalmente a los sistemas GPS, el posicionamiento puede realizarse también usando algunas infraestructuras de redes inalámbricas. Tomando como ejemplo algunas redes celulares PCS, el servicio de emergencia 911 requiere la determinación de la ubicación de una llamada telefónica por medio de las estaciones base de un sistema celular. Algunos modelos de estimación de ubicación, como el Angulo de Arribo (AoA); Tiempo

de Arribo (ToA); Fuerza de Señal recibida (RSS); Fase de Arribo (PoA); y sistema de posicionamiento global asistido (A-GPS), son ampliamente usados en las redes celulares y redes de sensores inalámbricas. Muchos trabajos se han dedicado recientemente al posicionamiento rastreo de ubicación en el área de las redes de sensores inalámbricas y de redes ad hoc.

El GPS no es aconsejable para las redes de sensores inalámbricas por varias razones:

- No esta disponible en un ambiente interior debido a que las señales de satélite no pueden penetran edificios.
- Para las aplicaciones mas detalladas, usualmente se requiere una mayor precisión en el resultado de posicionamiento.
- Las redes de sensores tienen su propia limitación de batería, la cual requiere un especial diseño.

La información de ubicación puede ser usada para mejorar el desempeño de las redes inalámbricas y proveer nuevos tipos de servicios. Por ejemplo, puede facilitar el ruteo en una red inalámbrica ad hoc para reducir la saturación en el ruteo. Esto es conocido como ruteo geográfico. Por medio de los protocolos de red con alerta de ubicación, el número de paquetes de control puede ser reducido. Los proveedores de servicio también pueden usar la información de ubicación para proveer algunos servicios nuevos de alerta de ubicación o seguimiento.

El sistema de navegación basado en GPS es un ejemplo. Un usuario puede decirle al sistema su destino y el sistema lo guiara hasta ahí. Los sistemas telefónicos en una empresa pueden explotar las ubicaciones de personas para proveer servicios de seguimiento. Otros tipos de servicios basados en ubicaciones incluyen geocast [33], por el cual un usuario puede solicitar enviar un mensaje a un área específica, en un tiempo específico. En contraste a la transmisión múltiple tradicional, tales mensajes no son dirigidos a un grupo de miembros fijos, sino más bien a miembros localizados en un área física específica.

4.4 MODELAMIENTO TÉCNICO EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

Las siguientes sub-secciones describen los modelos de tráfico así como los modelos de energía y batería para nodos sensores, y luego discuten los enfoques de modelación de las redes de sensores desde varios puntos de vista como conectividad, detección y cobertura, consideraciones de consumo de energía, etc.

4.4.1 Modelos de Tráfico

Las características de tráfico de las redes de sensores varían y pueden ser muy diferentes de aquellas redes inalámbricas tradicionales. Dependen principalmente de modos operacionales que indican las características y patrones de medición e información a ser transmitida. En general, los modos operacionales pueden dividirse en tres categorías: modo en espera, modo solicitar/responder con fines específicos, y modo basado en límites con fines específicos.

El primero, el modo en espera, asume un flujo de información en espera desde los sensores al nodo recolector. En este caso, el objetivo es una estimación precisa y actual del campo medido en el sitio del recolector. Por ejemplo, el patrón de comunicación de las redes bio-sensores, pertenece al modo en espera; cada nodo debe transmitir su información cada 250ms. y el tráfico es determinista y periódico. Un campo con resolución temporal alta requiere mediciones y transmisiones más frecuentes, mientras que un campo con resoluciones bajas puede requerir transmisiones menos frecuentes para obtener el mismo grado de exactitud.

El segundo modo, el modo de solicitud/respuesta con fines específicos, corresponde a los casos en los que los sensores responden a solicitudes generadas por el nodo recolector, las cuales pueden ser dirigidas a grupos de sensores específicos y/o para intervalos específicos de tiempo.

La tercera categoría, modo basado en límites con fines específicos, corresponde a los casos en los cuales la transmisión de información es desencadenada por un evento durante el cual un campo monitoreado excede algún límite. En algunas aplicaciones de detección de objetos o monitoreo de ambiente o sistema (como monitoreo de incendios forestales),

usualmente se usa este modo. En este caso las medidas y frecuencias de transmisión pueden ser diferentes. En general, en algunas aplicaciones, la operación puede involucrar uno o más modos. Estos diferentes modelos generan diferente tráfico en la red y diferentes condiciones de carga que afectan el desempeño de estrategias de ruteo. Por ejemplo, el modo de solicitud/respuesta con fines específicos, crea un flujo de comunicación de doble-vía entre los sensores y el nodo colector, mientras que los otros dos modos generan principalmente un flujo de comunicación de una vía. Los últimos dos modos pueden generar tráfico más acelerado.

4.4.2 Modelos de Energía y Baterías

Para predecir el tiempo de vida de una red de sensores y comparar la calidad de diferentes algoritmos y protocolos, deben especificarse los modelos de energía para la computación y disipación de la energía de comunicación en los nodos, así como modelos de baterías usados para diagramar la capacidad y comportamiento de la batería. Como se discutió previamente, los principales componentes de un nodo sensor incluyen detección, procesamiento y unidades de comunicación, por lo que la disipación de la energía comprime la energía consumida para detección, procesamiento y transmisión de información desde la fuente al nodo disipador. En general, se asume que la energía necesaria para detectar y procesar un bit es constante.

La disipación de energía para una unidad de radio incluye la energía necesaria para recibir y transmitir un bit. Las cantidades formales para la disipación de energía del equipo receptor y el siguiente puede ser dividida en dos partes: equipo transmisor para la disipación de la energía y energía de transmisión para radio frecuencia (RF). El poder de transmisión está relacionado a la distancia de transmisión y funciones exponenciales de pérdida de ruta. Los modelos de batería varían con el material constituyente.

4.4.3 Modelo de Conectividad y Optimización de la Topología

La conectividad es una propiedad fundamental para las redes inalámbricas. En las redes de sensores inalámbricas, la conectividad se basa en las condiciones físicas actuales, tales como rango de transmisión de energía, densidad de la red y posiciones de los nodos; provee una buena indicación del estado de la red. En la modelación y estudios profundos

de la distribución de conectividad facilita el desarrollo de guías necesarias para diversos procesos involucrados en el diseño de operación de redes de sensores; como el patrón de despliegue y densidad de los sensores; las estrategias de comunicación entre sensores individuales; algoritmos distribuidos de procesamiento de información; y finalmente estrategias de diseminación y/o ruteo de la información. Esto provee un enfoque analítico que describe la dinámica de la red y facilita el entendimiento de efecto de varios eventos en topologías de gran escala de redes de sensores inalámbricos auto-organizables. La motivación del modelo viene de la similitud encontrada en las redes inalámbricas móviles, su naturaleza auto-organizable y aleatoria, y algunos conceptos por la teoría de continuidad.

4.4.4 Modelos de Implementación y de Cobertura de Detección

El patrón de implementación de los sensores, la densidad del sensor, y la cobertura alcanzable de detección son factores críticos que influyen la efectividad y diseño global de una red de sensores. La densidad depende de muchos factores, como la precisión deseada; la resolución temporal y espacial; la evolución de la información a ser recogida y diseminada; la movilidad de los sensores; la eficiencia; y la tolerancia a fallas. Además, el patrón de implementación y cobertura alcanzable de detección dependen no sólo de los factores previos, sino que también de otros factores, como restricciones (las limitaciones) en las posiciones donde los sensores deberían ser colocados. Por consiguiente, diferentes patrones de implementación y modelos de cobertura necesitan ser considerados, a merced de la aplicación de interés.

Por ejemplo, para una red de sensores diseñada para realizar rastreo de vehículos, al usuario le gustaría maximizar la probabilidad de detección si un vehículo está en el campo del sensor y obtener una estimación relativamente precisa de la posición del vehículo y su velocidad. En este caso, el patrón de implementación de los sensores para lograr ese objetivo, es de interés. Para una red de sensores ya implementada, a menudo se requiere caracterizar las áreas bien cubiertas, regiones débilmente cubiertas, o los puntos ciegos para ajustar la configuración o desplegar nodos adicionales. La cobertura recae en la detección o modelos que detectan y la colocación de nodos.

Para optimizar la implementación de nodos sensores y asegurar que el requisito promulgado cobertura de detección sea alcanzado, los modelos de detección de sensores deben ser determinados. Los modelos de detección difieren con los dispositivos de detección, los cuales generalmente tienen características teóricas y físicas ampliamente diferentes.

Los sensores tradicionales son caracterizados por especificaciones como la resolución de rango, exactitud de rango, resolución de compostura, y la precisión. Estas especificaciones proveen una buena medida de la habilidad de un sensor. Las especificaciones similares para redes de sensores no existen actualmente. Como se menciono anteriormente, los nodos de sensores pueden ser fijos o móviles. El proveer movilidad a los sensores les permite dar razón de mal posicionamiento inicial y rutas de propagación potencialmente pobres. Sin embargo, actualmente la mayor parte de los sensores son estáticos y por eso la colocación de sensores tiene el impacto significativo en muchos factores, como la exactitud deseada, la resolución temporal y espacial, la evolución de la información a ser recogida y diseminada, ruteo eficiente, tolerancia a fallas, etc.

4.5 CARACTERÍSTICAS, DESAFÍOS TÉCNICOS Y DIRECCIONAMIENTO DEL DISEÑO DE WSNs.

Las WSN pretenden unir la brecha entre el mundo físico y el computacional. Las salientes características de las WSN y sus diferencias de otras redes de sensores han sido discutidas por un gran número de investigadores. Algunas de estas características se discuten a continuación.

4.5.1 Características

La mayoría de las WSNs usan la arquitectura de redes inalámbricas ad-hoc, las cuales son colecciones de nodos inalámbricos, posiblemente móviles, que son auto-configurables para formar una red sin la ayuda de ninguna infraestructura establecida. Los nodos móviles manejan el control necesario y tareas de conexión de red en una forma distribuida. La arquitectura ad-hoc es altamente recomendable para las redes de sensores por muchas razones:

- Las arquitecturas ad-hoc supera las dificultades que surgen por las configuraciones de infraestructura predeterminada de otras familias de redes de sensores. Las WSN pueden ser dispuestas rápida y aleatoriamente y reconfiguradas; los nodos nuevos pueden ser adicionados de acuerdo a la demanda para reemplazar nodos que hayan fallado o se hayan apagado permanentemente y los nodos existentes pueden retirarse o apartarse de los sistemas sin afectar la funcionalidad de otros nodos.
- Las redes ad-hoc se pueden adaptar fácilmente a las distintas aplicaciones.
- Esta arquitectura es altamente robusta para fallas simples de los nodos y proporciona un alto nivel de tolerancia de avería debido a la redundancia del nodo y a su naturaleza distribuida.
- El rendimiento energético se puede alcanzar con la comunicación multihop. No es difícil demostrar que el consumo de energía debido a la transmisión de la señal se puede ahorrar usando el enrutamiento multihop con distancias cortas de cada salto en vez del enrutamiento de salto-simple con una gama larga distancia para la misma destinación.
- Las redes ad-hoc tienen la ventaja de la reutilización del ancho de banda, que también beneficia al dividir el salto de largo alcance a multi-saltos más pequeños; cada salto tiene una distancia corta considerable. En este caso, la comunicación es local y dentro de una gama pequeña.

4.5.2 Desafíos Técnicos

El diseño de las WSN ha sido motivado e influenciado por uno o más de los siguientes desafíos técnicos:

- Despliegue aleatorio y masivo: la mayoría de las WSN contienen un gran número de nodos sensores (de cientos a miles o hasta mas), los cuales pueden ser esparcidos aleatoriamente sobre las áreas deseadas o son lanzados densamente en terrenos no accesibles o regiones peligrosas. El sistema debe ejecutar auto-configuración antes de que la rutina de detección pueda ser llevada a cabo.
- Redundancia de Información: El denso despliegue de los nodos sensores lleva a una alta correlación de la información captada por los nodos en los alrededores.

- Recursos Limitados: El diseño e implementación de las WSN están dirigidos por cuatro tipos de recursos: energía, computación, memoria y ancho de banda. Al ser dirigido por el tamaño físico limitado, los micro-sensores pueden ser adjuntos solamente por los límites de suministro de energía de la batería. Además, las WSN usualmente operan de manera inalámbrica, por lo que sus baterías no son recargables y/o reemplazables. Al mismo tiempo, sus memorias son limitadas y pueden ejecutar solo funciones computacionales restringidas. El ancho de banda en el medio inalámbrico es además significativamente bajo.
- Arquitectura a la medida y operación desatendida: Los atributos de una infraestructura no fija y operación no atendida por humanos de tales redes requieren un sistema para establecer conexiones y mantener la conectividad autónomamente.
- Entorno y topologías dinámicas: Por un lado, la topología y conectividad de las WSN puede variar frecuentemente debido a la poca confiabilidad de los sensores inalámbricos individuales. Por ejemplo, un nodo puede fallar al funcionar por agotamiento de la energía en cualquier momento sin una notificación previa a los otros sensores. Así como, nuevos nodos pueden ser agregados aleatoriamente en un área sin notificación previa de los nodos existentes. Por otro lado, el entorno que las WSN están monitoreando puede también cambiar dramáticamente, lo que puede causar que una porción de los nodos sensores funcione mal o emita la información que recogen de manera obsoleta.
- Posible-Error de Medio Inalámbrico: Los nodos sensores están ligados por el medio inalámbrico, lo que incurre en más errores que su contraparte conectada. En algunas aplicaciones, el ambiente de comunicación es actualmente ruidoso y puede causar atenuación de señal severamente.
- Aplicaciones Diversas: Las WSN pueden ser usadas para ejecutar varias tareas, como detección de objetivos y rastreo, monitoreo del ambiente, detección remota, supervivencia militar, etc. Los requerimientos de diferentes aplicaciones pueden variar significativamente.
- Seguridad y Privacidad: La seguridad y privacidad debe ser una consideración esencial en el diseño de las WSN ya que muchas de ellas son usadas para propósitos militares o de supervivencia. Negar ataques de servicios en contra de las redes puede causar daños severos a la función de las WSN. Sin embargo, la seguridad parece ser un problema significativo difícil de resolver en las WSN por el

inevitable dilema: Las WSN tienen recursos limitados y las soluciones de seguridad necesitan bastantes recursos. Es por eso que, la mayoría de los protocolos de comunicación existentes para las WSN no controlan la seguridad y son susceptibles a los adversarios. La mejor forma de asegurar un despliegue exitoso de la red es tomar en consideración temas de seguridad en la etapa de diseño de las WSN.

- Preocupaciones de QoS: La calidad provista por las WSN se refiere a la precisión con la que la información reportada concuerda con lo que está ocurriendo actualmente en el entorno. A diferencia de otros, la precisión en las WSN enfatiza la característica de la información agregada de todos los recursos en lugar de flujos individuales. Una forma de medir la precisión es la cantidad de información. Otro aspecto de la QoS es la latencia. La información recolectada por las WSN es típicamente sensible al tiempo, por ejemplo, avisos tempranos de fuego. Por eso es importante recibir la información en el centro de destino o control en el momento adecuado. La información con alta latencia debido al procesamiento o comunicación puede estar fuera de tiempo y llevar a reacciones equivocadas.

4.5.3 Objetivos de Diseño y de Administración

Los siguientes objetivos y direcciones son identificados en el diseño de las WSN para poder hacer frente a los desafíos y satisfacer varios requerimientos de las aplicaciones:

- Dispositivos pequeños de micro-sensores: las unidades de sensores compactos y solventes son factores esenciales para el despliegue masivo y aleatorio de las WSN. Para una aplicación de gran escala de las WSN, el costo de dispositivos sensores contribuiría a la mayor parte del gasto total. Además, mientras más pequeño es el sensor, menor interferencia tendrá con los objetos observados y será más fácil el despliegue.
- Arquitecturas y Protocolos Escalables y Flexibles: Adicionalmente al requerimiento de dispositivos individuales sensores, el sistema debe ser escalable y flexible para la expansión de la escala de la red. Los enfoques de escalabilidad y flexibilidad incluyen clustering, entrega multi-salto, y localización de cómputos y protocolos.
- Procesamiento localizado y fusión de la información: Para eliminar la redundancia de la información, se deben realizar esfuerzos colaborados entre los nodos

sensores que están realizando una variedad de procesamiento localizado. En lugar de enviar información no procesada directamente al destino, los nodos sensores pueden filtrar localmente la información de acuerdo a los requerimientos, ejecutar cálculos simples, procesar la información, y transmitir solamente información procesada. Algunos nodos intermediarios pueden también llevar a cabo fusión de información para así alcanzar un alta eficiencia.

- **Diseño de eficiencia de recursos:** En las WSN, la eficiencia de los recursos es extremadamente crítica y deseable sin importar su complejidad. Sobre todo, los protocolos de eficiencia de energía tienen una alta demanda para extender el tiempo de vida del sistema. Es por eso que, se debe alcanzar ahorros de energía en cada componente de la red integrando los mecanismos correspondientes, tales como modo de ahorro de energía de la capa MAC ruteo de alerta de energía en la capa de red, etc. Adicionalmente, se deben realizar esfuerzos para incrementar la eficiencia para la utilización de otros recursos. Por ejemplo, usando algoritmos con baja complejidad reducirá el tiempo de cómputo y por ende energía; también disminuye la latencia en la entrega de información. Las arquitecturas de ancho de banda y protocolos pueden acelerar también la entrega de información. Debe notarse que es difícil nombrar una única definición de tiempo de vida del sistema para todas las aplicaciones o casos. El sistema puede ser declarado muerto cuando el primer nodo agota toda su energía, cuando cierta fracción de nodos muere, o cuando todos los nodos mueren. Usando una u otra definición dependerá de la aplicación en particular. Por otro lado, el tiempo de vida del sistema puede ser medido también usando parámetros específicos de aplicación, como el tiempo en que el sistema no podrá dar mas resultados aceptables.
- **Auto-Configuración:** Naturalmente, los nodos sensores desplegados masiva y aleatoriamente deben ejecutar auto-configuración para poder configurar la conexión de la red y comenzar la rutina de operación. Las WSN son altamente dinámicas durante el tiempo de vida de la red. Los nodos sensores realizan transiciones entre los estados de apagado, dormido, inicio, en espera, transmitiendo, recibiendo y fallas para el propósito de conservación de la energía. De esta manera, los protocolos para WSN deberían tener la capacidad de formar conexiones autónomas sin importar la condición de los nodos sensores. Los nuevos enlaces deberían ser acomodados en caso de que un nodo falle o de que haya congestión de los enlaces, y la energía de transmisión o rango de señalización puede ser ajustado activamente

para reducir el consumo de energía basado en la información al día de la topología. Además, los paquetes pueden ser ruteados a través de algunos subgrupos de la red en los que los nodos tienen mayor energía residual para realizar una igual disipación de la energía entre los nodos de toda la red.

- **Adaptabilidad:** Para alcanzar las condiciones dinámicas y variables, las WSN se deben adaptar a la conectividad cambiante y estimulación de sistemas de vez en cuando. Para detectar fenómenos no deterministas con disturbios causados por ruido en la comunicación y diversidad de sensores, el procesamiento de fidelidad de señal adaptable en nodos sensores individuales es también deseado para realizar intercambios entre los recursos, precisión, y requerimientos de latencia.
- **Confiabilidad y tolerancia de fallas:** Para muchas aplicaciones WSN, la información debe ser entregada confiablemente en canales inalámbricos ruidosos, con posible error, y variación de tiempo. En tales casos, la verificación y corrección de la información en cada capa de la red es crítica para proveer resultados exactos. Adicionalmente, se espera que los nodos sensores ejecuten procedimientos de auto-detección, auto-calibración, auto-reparación y auto-recuperación durante su tiempo de vida.
- **Diseño específico de aplicación:** ya que un protocolo único no satisface todas las aplicaciones de las WSN, el diseño de las mismas es en muchos casos específico para cada aplicación.
- **Diseño de QoS con recursos dirigidos:** Como se estableció previamente, las dos medidas de QoS en las WSN son precisión y entrega de la información cronometrada. La precisión refleja el valor básico de la información. En general, la cantidad de información determina el nivel de precisión. La información debe ser entregada de forma cronometrada. Es esencial realizar un intercambio entre dos aspectos ya que las grandes cantidades de información consumen una gran porción de ancho de banda y causan mayor contención durante la transmisión. Como resultado, la latencia se incrementará con un mayor requerimiento de precisión. Además, es imprescindible realizar un intercambio entre QoS y consumo de recursos. Una alta precisión requiere grandes cantidades de entrega de información, además de llevar a un mayor consumo de energía y ancho de banda. El computo local ayuda a eliminar la cantidad de información transmitida, pero la computación

compleja y altamente costosa causara latencia prolongada. Al mismo tiempo, la computación más compleja reduce la eficiencia de energía.

- Otros atributos: Adicionalmente a los objetivos y direcciones precedentes, el diseño de las WSN debe acomodar los siguientes objetivos:
 - Localidad de la información: La información reportada de un nodo sensor es valida cuando es asociada con el conocimiento exacto de ubicación del sensor. Esto puede simplificar significativamente el descubrimiento de la red y esfuerzos de manutención. La búsqueda de información céntrica debe ser reemitida directa y eficientemente a áreas de interés objetivas.
 - Nombramiento basado en atributos y ruteo de información céntrica: Cuando se despliega una WSN, los usuarios están mas interesados en hacer consultas sobre la propiedad del fenómeno de interés, mas que de un nodo específico. Por ejemplo, “la temperatura en el cuarto 717” o “las áreas donde la temperatura es mayor a 50° C” son mas comunes que la consulta de “la temperatura leída por cierto nodo sensor”.

Es impractico alcanzar todos los objetivos en una red en particular. La mayoría de diseños de las WSN son de aplicación específica y tienen diferentes concentraciones en algunos de los objetivos descritos previamente. Así, los protocolos deben ser diseñados para satisfacer la única demanda de calidad de cada red individual y los intercambios deben ser hechos entre diferentes parámetros cuando se diseñan los protocolos y algoritmos para las WSN.

4.6 ESTADOS FUNCIONALES DEL NODO SENSOR Y CONSUMO DE ENERGÍA

Desde una perspectiva de funcionalidad, la energía es consumida para detección, cómputo, y comunicaciones. La conservación de la energía puede ser alcanzada en cualquiera de estas funciones.

Primero, se debe notar que el trabajo de carga en las WSN tiene la típica característica de arranque. Es por eso que, algunos nodos o ciertos componentes deben cambiar a estados de ahorro de energía entre arranques consecutivos mientras que la funcionalidad y QoS se mantienen. La administración de Energía Dinámica (DPM) es un ejemplo de este enfoque. Como se lista en la tabla 4.1, una particular combinación de

estados de componentes determinará el estado específico de un nodo [13]. Para un nodo sensor, los estados en orden decreciente de consumo de energía son: transmitiendo, recibiendo, listo, observando, en espera, durmiendo, y apagado. El diagrama de estado de transición de un nodo sensor se muestra en la figura. 4.2.

Sin embargo, las transiciones entre los estados tienen costos de consumo de energía y latencia. Específicamente, algunas transiciones, por ejemplo, de estado “apagado” a “dormido”, puede costar mucha más energía que otros, tales como de estado “dormido” a “activo”. Como resultado, son necesarios algoritmos de control bien diseñados para lograr el intercambio entre ahorro de energía y latencia, consumo de energía, y estados de transición.

Tabla 4.1. Estados del nodo sensor y sus Componentes

<i>No.</i>	<i>Estado del nodo</i>	<i>MCU</i>	<i>Memoria</i>	<i>Sensor y A/D</i>	<i>Radio</i>
S0	Transmitiendo	Activo	Activa	Encendido	Tx
S1	Recibiendo	Activo	Activa	Encendido	Rx
S2	Listo	En espera	Dormido	Encendido	Rx
S3	Observando	Dormido	Dormido	Encendido	Rx
S4	En espera	Dormido	Dormido	Encendido	Apagado
S5	Dormido	Dormido	Dormido	Apagado	Apagado
S6	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado

Segundo, ajustando el voltaje de operación y frecuencia adaptablemente para alcanzar cambios dinámicos en el trabajo de carga sin degradar el rendimiento es un método de ahorro de energía en la computación. La racionalidad detrás de esta técnica es que la carga de trabajo computacional del MCU (microprocesador) en las WSN es usualmente variable en tiempo y el desempeño de sistema de picos no es demandado siempre. Sin embargo, este esquema necesita predecir la carga de trabajo de los microprocesadores tanto para ajustar el abastecimiento de energía como la frecuencia de operación.

El estado natural del nodo es “dormido”; en este estado el sensor gasta una cantidad de energía mínima no relevante; su solo actividad en este estado es la espera de un evento (interno o externo). En presencia de un evento, su estado se convierte en “observando”

(estado activo) con gasto energético relevante. Al acabarse del evento, el nodo vuelve en estado “dormido”.

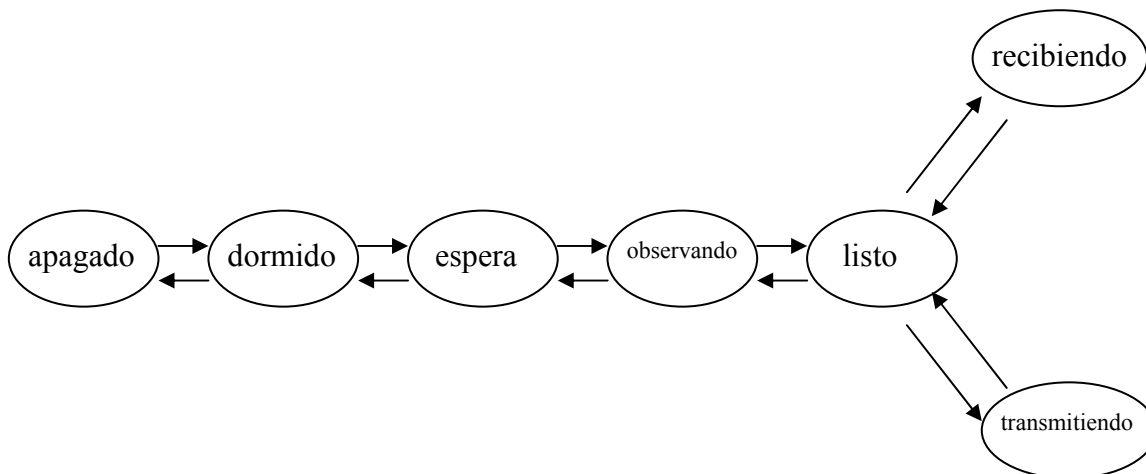


Figura. 4.2. Diagrama de estado de transición de un nodo sensor

Otro enfoque es optimizar la transmisión de energía de los nodos sensores. El cambio en la energía de transmisión tiene un gran impacto en varios aspectos de la comunicación WSN, incluyendo radio comunicación; topología y jerarquía de red; rango de retransmisión; selección de trayectoria de ruta; etc. Otras investigaciones asumen la capacidad de control de energía en nodos individuales. En tal caso, una gran cantidad de energía para comunicación puede ser ahorrada a través del ajuste dinámico de la energía de transmisión basado en la estimación de la distancia de transmisión de dichas transmisiones.

4.7 ALGORITMOS DE PROGRAMACIÓN Y S.O.

Debido a las severas restricciones de los recursos, el ambiente de software de las WSNs es muy diferente de los sistemas de cómputo tradicionales. Temas como la eficiencia de la energía, escalabilidad, confiabilidad son factores fundamentales en el desarrollo para las WSNs.

4.7.1 Nivel de Nodo Simple

El soporte del sistema en el nivel mas bajo empieza en cada nodo simple. Con los sistemas operativos apropiados, se puede desplegar DPM y DVS para reducir el consumo de energía en nivel de nodo. El “TinyOS” es uno de los sistemas operativos mas recientes dedicados para los nodos sensores diminutos; este sistema se conduce por eventos y usa solamente 178 bytes de memoria, pero soporta comunicación, multitareas, y modulación de código.

4.7.2 Programa Intermedio (Middleware)

El middleware en las WSNs resume el sistema como una colección de objetos masivos distribuidos y permite que las aplicaciones de sensores realicen búsquedas y tareas, reúnan respuestas y resultados, y monitoreen los cambios en la red. La arquitectura de Información de Sensores para la Red (SINA), propuesta por Shen [8], provee una implementación de middleware de la teoría general; estos autores también describen el lenguaje de búsqueda de sensores y tareas (SQTL), el cual es el lenguaje de programación de sensores usado para implementar dicha arquitectura de programa intermedio.

4.7.3 Interfase de Programación de Aplicación (API)

En la WSN existe la complejidad de operación. Sin embargo, con una apropiada implementación de API, la complejidad delineada del sistema puede ser transparente para los usuarios finales quienes son expertos en su dominio de aplicación específica, pero pueden no ser expertos en WSN. Las funcionalidades detalladas de las API en las WSN han sido discutidas por Shen y sus colegas [8].

CAPITULO 5

CLASIFICACIÓN DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

5.1 INTRODUCCIÓN

La tendencia general en el proceso de implementación, incluyendo sensores y accionarios relacionados directamente con procesos industriales, se caracterizan principalmente por el atributo de “inteligentes o listos”. En la década pasada, particularmente, los sensores han tenido el mejor progreso para convertirse en inteligentes. En el presente, los microcontroladores incrustados en los sensores inteligentes permiten condicionamiento de señal, filtro, características de aleación, y otras funciones requeridas para proveer validez, confiabilidad, y eficiencia de los procesos de medición. La siguiente propiedad importante de los sensores inteligentes es su capacidad de ser dispuestos en una red.

Este reciente desarrollo en la comunicación refleja los requerimientos para sistemas inalámbricos. Las interfases inalámbricas para redes de sensores inteligentes permiten mediciones sencillas de transmisión de la información desde robots y plataformas móviles, así como partes de procesos y máquinas no accesibles fácilmente.

La industria automotriz representa otro gran acelerador de los desarrollos de redes de sensores inalámbricos, y en un futuro cercano puede ser el más importante mercado para las redes de sensores. En este capítulo se introducen mayores conceptos que caracterizan a las redes de sensores inalámbricas, así como su clasificación, ventajas y desventajas que estas presentan y las diferencias que exhiben frente a otras redes.

5.2 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

Las WSNs representan una variedad de aplicaciones en las que el ambiente y requerimientos técnicos pueden diferir en gran manera. Es por eso que, el diseño de una WSN es usualmente orientado a una aplicación. Como resultado, las arquitecturas, protocolos, y algoritmos de las WSN varían de caso a caso. Sin embargo, diferentes WSN tienen algunas propiedades en común en un amplio punto de vista. Generalmente, pueden ser clasificados en categorías basadas en diferentes criterios importantes.

De acuerdo a la distancia hay entre los nodos sensores y la estación base, las WSN puede ser sistemas de single-hop o salto-simple (también conocidos como no-propagadores) o multi-salto (propagadores). En una WSN de salto-simple, todos los nodos sensores transmiten la información directamente a la estación base, mientras que en una WSN multi-salto, algunos nodos pueden solo entregar su información a la estación base vía nodos intermedios. En estos casos, los nodos intermediarios ejecutan la función de ruteo para esos nodos intermediarios y entregan información a lo largo de la trayectoria de ruta. Además, la agregación de información (fusión) es una función opcional para esos nodos intermediarios. Las redes de salto-simple tienen estructuras mucho mas simples y controlan y se acoplan a las aplicaciones de áreas de detección pequeñas; las redes multi-salto prometen aplicaciones mas amplias al costo de mayor complejidad.

Basado en la densidad de los nodos sensores y dependencia de información, las WSN pueden ser clasificadas en redes de agregación o de no agregación. En los sistemas de no agregación, toda la información de cada nodo individual será enviada al destino “tal y cual”. La carga de la información en los nodos intermediarios es relativamente pequeña y el sistema puede alcanzar gran exactitud. Sin embargo, la carga de tráfico total en el sistema completo puede incrementar rápidamente con el agrandamiento del tamaño de la red, más energía será consumida para las comunicaciones, y más colisiones ocurrirán, llevándolos a una alta latencia. Es por eso que, el esquema de no agregación es aconsejable para sistemas que tienen menor densidad de nodos, capacidad suficiente, y/o en el que una extrema y alta exactitud es demandada por los usuarios finales.

Mientras que en las redes densamente distribuidas, un nodo sensor es usualmente localizado cerca de sus nodos vecinos. Así, la información de múltiples recursos puede ser

altamente correlacionada y al agregar funciones pueden ser ejecutadas en los nodos intermedios para eliminar la redundancia de información. En esta forma, la carga de tráfico en el sistema puede ser reducido considerablemente, y se puede obtener significantes ahorros de energía debido a las comunicaciones. Sin embargo, los nodos intermedios ejecutarán funciones computacionales, que pueden requerir el mayor tamaño de memoria. Es por eso que, el esquema de agregación es una opción apropiada en sistemas de gran escala con nodos sensores distribuidos masivamente y densamente. Debe ser notorio que los usuarios finales solo están interesados en la información colectiva con exactitud moderada.

Las WSNs pueden ser deterministas o dinámicas de acuerdo a la distribución de los nodos sensores. En los sistemas deterministas, las posiciones de los nodos sensores son fijas o preplaneadas. El control de este sistema es mas sencillo y la implementación mucho mas fácil. Sin embargo, el esquema puede ser usado en limitados tipos de sistemas donde la información de ubicación del nodo sensor puede ser obtenida y planeada por adelantado. A pesar de esto, en muchos casos, las ubicaciones de los nodos sensores no están disponibles a priori, como en el caso de aquellos dispuestos aleatoriamente en áreas remotas. Entonces, los nodos sensores deben trabajar en una forma de distribución dinámica. El esquema dinámico, es más escalable y flexible, pero requiere algoritmos de control más complejos.

Mayormente, basadas en el esquema de control, las WSN pueden ser no auto-configurables o auto-configurables. En un mecanismo formal, los nodos sensores no se pueden organizar ellos mismos, pero dependen de un control central que emite instrucciones y recoge información de ellos. Este esquema puede ser usado solamente en redes de pequeña escala. Sin embargo, en la mayoría de las WSN, los nodos sensores pueden establecer y mantener conectividad autónoma por ellos mismos y colaborativamente cumplir tareas de detección y control. Este esquema auto-configurable, encaja mejor en sistemas de gran escala para ejecutar tareas de monitoreo complejas y recolección y diseminación de la información. Aunque los sistemas auto-configurables son mas complicados que los no-configurables son mas prácticos para el despliegue en el mundo real, especialmente cuando el tamaño de la red se vuelve muy grande. Si embargo, elevan numerosos retos y temas abiertos para ser explorados posteriormente.

Las categorías descritas aquí pueden superponerse, es decir una WSN específica puede tener características de diferentes dominios. Por ejemplo, las WSN en un lote de parqueo son auto-configurables, deterministas, no-agregadoras, y de multi-salto. Una clasificación de las WSN se muestra en la tabla. 5.1.

Dependiendo del número de nodos por unidad de área, una WSN puede ser escasa o densa. En términos de componentes de los nodos, la red de sensores puede ser clasificada de forma general en dos categorías: redes de sensores homogéneas y redes de sensores heterogéneas. En una red de sensores homogénea, los nodos sensores tienen capacidad y funcionalidad idéntica con respecto a varios aspectos de detección, comunicación y limitación de recursos. En una red de sensores heterogénea, cada nodo puede tener diferente capacidad y ejecutar diferentes funciones. Por ejemplo, algunos nodos pueden tener capacidad de batería mayor y de procesamiento más poderoso y algunos pueden agregar y entregar información; otros nodos pueden solo ejecutar la función de detección y no entregar la información a otros nodos. Una red de sensores homogénea es más fácil y simple de desplegar, mientras una red heterogénea es más compleja y su despliegue más complicado porque los diferentes tipos de nodos deben ser dispersos en áreas específicas.

Las redes de sensores pueden ser clasificadas como manejadas por tiempo o por evento. Las primeras son aquellas que requieren monitoreo periódico de datos. El segundo tipo, los nodos sensores reaccionan inmediatamente a cambios drásticos en el valor de un atributo enviado, debido a la ocurrencia de cierto evento [5].

Tabla. 5.1. Clasificación de las WSN

Factores	Tipo de Red
Comunicación con la estación base	Salto simple vs. Multi-salto
Dependencia de la información	No-Agregación vs. Agregación
Distribución de Sensores	Determinista y Dinámica
Esquema de control	No Auto-configurable vs. Auto-configurable
Por el manejo	Por tiempo o por evento
Componentes de los nodos	Homogéneas vs. Heterogéneas
Número de nodos	Escasa vs. Densa

5.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS WSNs

El progreso de la tecnología de hardware en temas de bajo-coste, bajo consumo de energía, procesadores de tamaño pequeño, transductores y sensores, ha facilitado el desarrollo de las redes de sensores inalámbricos. Entre las principales ventajas de las redes de sensores inalámbricos se tiene:

- Una red de sensores distribuida es un sistema auto-organizable compuesto por un gran número de nodos sensores de bajo costo. La auto-organización significa que el sistema puede alcanzar las estructuras organizacionales necesarias sin la necesidad de intervención humana. Es decir, la red de sensores debe ser capaz de llevar a cabo operaciones funcionales a través de la cooperación entre nodos individuales más que por la configuración y operación dada por seres humanos.
- Cobertura extendida y despliegue más fácil: La red de sensores es de gran escala y, en muchos casos, el número de sensores pueden tener muchas órdenes de magnitud mayor que los nodos en redes tradicionales a la medida. Es por eso que, la cobertura provista puede ser comparada de mayor forma que al ser provista por un sistema de sensores de ubicación simple. La cobertura total de una red de sensores es la unión de muchas áreas de cobertura pequeñas formadas por sensores de bajo-coste, por lo que la cobertura es más flexible y puede ser ajustada convenientemente añadiendo nuevos nodos o moviendo los antiguos. Además, las redes de sensores inalámbricos también pueden cubrir terrenos no amistosos (como campos de batalla, trampas, etc.) donde las infraestructuras no están disponibles y/o la forma de despliegue tradicional no es fiable.
- Confiabilidad y flexibilidad: Aunque la capacidad y confiabilidad de un nodo sensor simple es restringida, múltiples sensores proveen tolerancia a fallas, y así todo el sistema se vuelve más robusto. Cuando un sensor muere, sus nodos vecinos pueden proveer la misma o similar información. Las alternativas de ruteo múltiple también están disponibles para proteger el sistema contra fallas en los enlaces de comunicación. La característica de auto-organización de las redes sensores provee la agilidad para adaptarse a situaciones imprevistas, entornos diversos, y cambios dinámicos. La flexibilidad se refiere a diferentes aspectos: la cobertura de detección puede ser ajustada moviendo o reemplazando los nodos; el intercambio entre retardo y precisión de la información puede ser hecho vía colaboración entre los

sensores; el balance de consumo de energía entre los nodos puede ser también alcanzado por medio de cooperación.

- Capacidades de monitoreo mejoradas y calidad de la información: Las redes de sensores pueden proveer mejor capacidad de monitoreo sobre parámetros que presentan variaciones espaciales y temporales por medio de agregación de la información desde cantidades de sensores, y pueden proveer inferencias más valiables sobre el mundo físico al usuario final. Se ha discutido que la ganancia ofrecida por tener más sensores excede los beneficios de obtener información detallada desde cada sensor. Así, una red de sensores de bajo costo, cada uno con menor capacidad, puede sustituir a un sensor de alta precisión pero de alto costo y de sitio único y proveer información más precisa sobre condiciones de interés o rastrear objetos de baja observación, mientras provee robustecimiento mejorado [17].
- Movilidad: Los nodos sensores pueden ser fijos o móviles. Aunque actualmente la mayoría de los sensores son estáticos y la mayoría del trabajo existente se enfoca en redes de nodos estáticos, se espera que en un futuro cercano la movilidad se introduzca en las redes de sensores, y que la movilidad de los sensores puede ayudar a mejorar las capacidades de monitoreo y rastreo, lograr comunicación efectiva, y acomodar nuevas aplicaciones. En muchos ambientes, los sensores pueden ser desplegados aleatoriamente más que dispuestos en ubicaciones precisas. En este caso, si el área de objeto u objetivo deseado no puede ser observado correctamente basándose en la ubicación actual del sensor, el nodo sensor puede ajustar su posición para mejorar su capacidad de monitoreo. Además, para mejorar su calidad de comunicación, el nodo sensor puede mover o arreglar su conectividad con otros nodos y también la energía de transmisión requerida para la comunicación. Las funciones de administración y mantenimiento adicionales (tales como recarga y mantenimiento) pueden también ser beneficiadas del movimiento de los sensores.

La principal desventaja que presentan las WSN es que debido al tamaño pequeño de los nodos sensores presentan algunas limitaciones, tales como recursos de energía y memoria limitados, antena pequeña, y capacidad de procesamiento limitada. Aunque los nodos sensores y los enlaces de comunicación pueden fallar debido a estas limitantes y ambientes operacionales hostiles, el disponer en una red con grandes cantidades de sensores para

formar una red de sensores distribuida puede superar la debilidad y proveer grandes beneficios y aplicabilidad.

Otras desventajas de las WSN son los limitados rangos de transmisión y operación de ciclos de tareas bajos, de los radio. Los nodos pueden ser reactivos y capaces de reaccionar de acuerdo a la demanda; sin embargo, en general, para poder ahorrar energía en un ciclo de tareas bajo, los enlaces de comunicación estarán fuera de línea la mayor parte del tiempo.

Las interfases inalámbricas principales usadas en las WSNs están diseñadas con complejidad de sistema reducida y ciclos de tareas optimizados con energía ultra baja. Tales interfases no tendrán equipos de alto desempeño muy elegantes que pueden ser operados constantemente, sino mas bien un grupo de bloques funcionales disponibles de acuerdo a la demanda solamente

5.4 COMPARACIÓN DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS CON OTROS TIPOS DE REDES DE COMUNICACIÓN

Esta sección discute las características importantes de WSNs que hacen su manejo diferente de otras redes.

Aunque las redes de sensores son redes de dispositivos informáticos, son considerablemente diferentes de las redes de datos tradicionales; la principal diferencia se da en que las redes de sensores tienen restricción de energía, cómputo, almacenaje, y apremios de ancho de banda.

El problema principal del recurso en tales redes es la energía porque éstas son redes desatendidas y los nodos no pueden tener fuentes de energía recargables. La energía es tan importante como los algoritmos usados para el funcionamiento de la red ya que deben ser cortos, exactos y permitan el ahorro de energía prolongando el curso de vida operacional de la red.

Los nodos sensores tienen restricciones fuertes de hardware y software en términos de energía de procesamiento, capacidad de memoria, curso de vida de la batería, y

rendimiento del proceso de comunicación. Éstas son características típicas de dispositivos móviles e inalámbricos y no de elementos de redes cableadas.

Otra gran diferencia de las redes de sensores comparadas con las redes de datos tradicionales es su escenario de aplicación y las implicaciones que ésta trae al tráfico y a la interacción con los usuarios.

Típicamente, en redes tradicionales, los usuarios están conectados con un nodo (o grupo de nodos) y requieren un servicio de otro nodo. Este tipo de comunicación describe la abrumadora mayoría de tráfico que se presenta en las redes tradicionales. La red actúa como medio que trae datos.

El modelo de la interacción es también directo; el usuario obra recíprocamente directamente con el usuario o servicio en el otro extremo. Ciertas acciones del usuario producirán ciertas transferencias de datos a y desde el otro extremo. Las redes de sensores, por otra parte, son menos como redes (es decir, en el sentido que conectan libremente entidades independientes) y más bien sistemas distribuidos; los nodos colaboran firmemente para producir información enriquecedora.

El usuario estará raramente interesado en las lecturas de uno o dos nodos específicos, pero estará interesado en algunos parámetros de un proceso físico dinámico. Para alcanzar esto eficientemente, los nodos deben formar un sistema distribuido específico para proveer al usuario las respuestas o información necesaria. Esto genera la falta de fuentes claras de información. El nodo implicado en proveer al usuario la información, está cambiando constantemente mientras que el fenómeno físico está cambiando también.

Una WSN es una herramienta para la detección o sensado distribuido de uno o más fenómenos divulgando los datos detectados a uno o más observadores. Una WSN proporciona los servicios para los observadores así como para sí misma, produce y transporta datos, así pues, en este sentido, la red proporciona auto servicio. El objetivo de una WSN es supervisar y, controlar eventualmente un ambiente. Los nodos sensores ejecutan una aplicación común en un medio cooperativo, no es el caso en una red tradicional.

Las redes de ordenadores tradicionales se diseñan para acomodar una diversidad de aplicaciones. Los elementos de red son instalados, configurados por los técnicos, y conectados en una red de manera que proporcionen diversas clases de servicios. El mantenimiento técnico de los componentes o de los recursos es un hecho normal. La red tiende a seguir un planeamiento establecido de los recursos disponibles y la localización de cada elemento de la red es bien conocida.

En una WSN este no es a menudo porque la red se planea para tener funcionamiento sin atención. De hecho, al configurar una WSN en el supuesto caso de lanzar los nodos en un océano, bosque, u otras regiones alejadas. En situaciones imprevisibles, un error de configuración tal como un error del planeamiento puede causar la pérdida de la red entera incluso antes de que comience a operar.

La topología es dinámica porque los nodos sensores pueden llegar a estar fuera de servicio temporalmente o permanentemente (los nodos se pueden desechar, perder, destruir, o aún funcionar sin energía). En este panorama, las averías son un hecho común, lo que no se espera en una red tradicional.

Dependiendo de la aplicación que se de a la WSN, puede ser interesante identificar cada nodo en la red. Además, uno puede estar interesado en un valor asociado a una región dada y no a un nodo en particular por ejemplo, la temperatura en la cima de una montaña. Una WSN es típicamente de datos céntricos, que no es común en redes tradicionales.

Se ve que la mayoría de la literatura existente para WSN esta basada en arquitecturas ad-hoc multi-hop. Sin embargo, debido a requisitos únicos de aplicación, las WSNs difieren grandemente de redes ad-hoc inalámbricas convencionales.

Consecuentemente, la arquitectura de red y los protocolos ad-hoc existentes no son directamente convenientes para WSNs. Por lo tanto, nuevos acercamientos deben ser desarrollados para satisfacer los requisitos específicos de WSNs. La tabla. 5.2. resume las diferencias principales entre estos dos tipos de redes. Estas diferencias levantan muchos desafíos técnicos en el diseño e implementación del sistema.

Tabla. 5.2. Diferencias entre WSNs y redes inalámbricas convencionales ad-hoc.

	WSNs	Ad-hoc
Número de nodos	Sin limitaciones, cientos o miles de nodos	Pequeña o de tamaño prudencial
Densidad del nodo	Alta	Relativamente baja
Redundancia de datos	Alta	Baja
Fuente de poder	No recargable; baterías irremplazables	Recargables y/o baterías reemplazables
Tasa de datos	Baja; 1 – 100kb/s	Alta
Movilidad de los nodos	Baja	Puede tener alta movilidad
Dirección de flujos	Unidireccionalidad predominante	Bidireccional; flujo punto a punto
Envío de paquetes	Muchos a uno; Data céntrico	Punto a punto, direccionamiento céntrico
Naturaleza de la consulta	Basada en atributos	Basada en nodo
Diseminación de la consulta	Broadcast	Salto por salto o broadcast
Localización	No Identificación global única	Identificación global única
Ciclo de servicio activo	Muy baja	Alta

Aunque los nodos sensores se comunican a través del medio inalámbrico, los protocolos y los algoritmos propuestos para las redes inalámbricas tradicionales con fines específicos no satisfacen las necesidades de comunicación de una WSN. Las redes de sensores son de aplicación específica, y los nodos sensores trabajan conjuntamente. Además, los nodos sensores tienen muchas restricciones de energía comparados a los dispositivos inalámbricos con fines específicos tradicionales. Las diferencias entre redes de sensores y redes con fines específicos son [21]:

- El número de nodos en una red de sensores puede tener varias órdenes de magnitud superior a los nodos en una red con fines específicos.
- Los nodos sensores son densamente destacados.

- Los nodos sensores son propensos a fallas.
- La topología de una red de sensores cambia con mucha frecuencia.
- Los sensores principalmente usan un paradigma emitido de radio de comunicación donde las redes con fines específicos se basan en comunicaciones punto a punto.
- Los nodos sensores tienen limitaciones de energía, aptitudes computacionales, y memoria.
- Los nodos sensores pueden no tener identificación global (ID) por la gran cantidad de nodos sensores.
- Las redes de sensores son implementadas con una aplicación específica de detección en mente; las redes con fines específicos se forjan en su mayor parte para los propósitos de comunicación.
- Las redes de sensores son redes de información-céntrica. En las redes tradicionales, la información es solicitada desde un nodo específico. En las redes sensores la información es solicitada en base a ciertos atributos.

Aunque el Bluetooth y la red móvil ad-hoc muestran similitudes a las redes de sensores en términos de infraestructura de comunicación, ambos constan de nodos con dispositivos de batería portátiles que pueden ser reemplazados por el usuario. Por consiguiente, a diferencia de las redes de sensores, el consumo de poder es de secundaria importancia en estos sistemas. Es por eso que, ninguno de los existentes protocolos Bluetooth o MANET MAC puede ser usado directamente en las redes de sensores por las preocupaciones de duración del tiempo de vida de la red.

CAPITULO 6

APLICACIONES DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

6.1 INTRODUCCIÓN

Combinando sensores pequeños, computadoras de bajo consumo de energía, y radios se construye una nueva plataforma tecnológica que tiene numerosas e importantes aplicaciones.

Existe un amplio abanico de aplicaciones de las WSN que se encuentran actualmente en estado de investigación, pero todavía es mayor las posibilidades que este tipo de redes ofrecen. Contamos no solo con todas las aplicaciones que hasta el momento se pensaban para una red de sensores tradicionales, sino un conjunto más amplio que no tenían cabida dentro de este tipo de redes por problemas de cableado y de consumo.

La disponibilidad de micro-sensores de bajo consumo, actuadores, procesadores embebidos y transmisores permite el uso del sensado inalámbrico distribuido a una gran variedad de aplicaciones incluyendo monitoreo ambiental (aire, agua, suelo, química), mantenimiento basado en condición, vigilancia militar, instrumentación de planta, seguimiento de inventario, aplicaciones medicas y agricultura de precisión.

La nueva tecnología de la WSN está facilitando que cada vez hayan más sensores a nuestro alrededor, capaces de procesar enormes cantidad de datos para ayudarnos a mejora el funcionamiento de las fabricas, el control de los procesos productivos, el mantenimiento de las cosechas, o incluso para detectar terremotos.

Los sensores podrían generar redes que vigilaran la mayoría del planeta, desde los modelos de compra de la gente hasta los movimientos de personas sospechosas. Si a esto

unimos los avances realizados en Inteligencia Artificial, en los próximos cinco años podrían incluso crearse sensores con inteligencia compleja.

Debido a la fiabilidad de las WSN, auto-organización, flexibilidad, y facilidad de despliegue, sus existentes y potenciales aplicaciones varían ampliamente.

Basándose en las características de sus operaciones, las aplicaciones de las redes de sensores pueden ser divididas en dos clases: consultas y tareas. Las siguientes subsecciones presentan un ejemplo de las aplicaciones para cada caso.

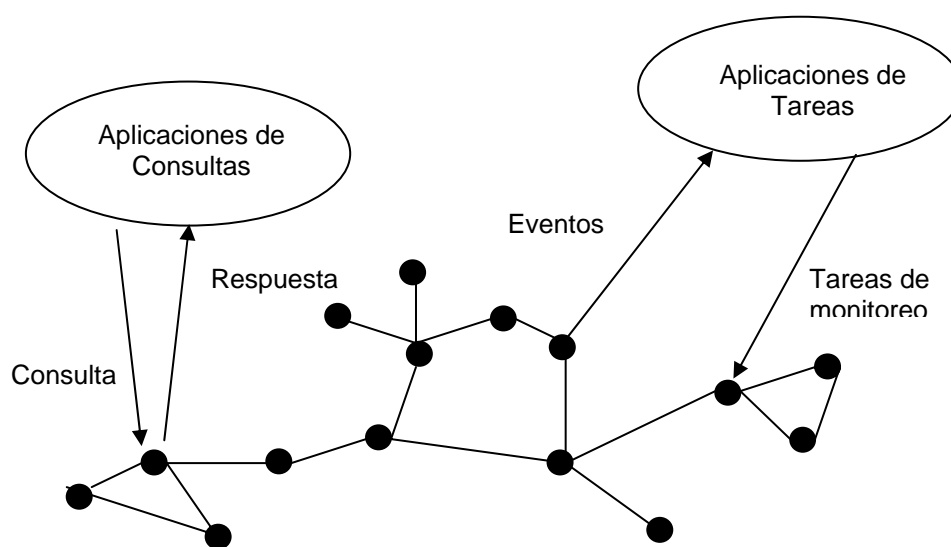


Figura. 6.1. Aplicaciones Basadas en Consultas y Tareas en Redes de Sensores.

6.1.1 Aplicaciones Basadas en Consulta

Las Aplicaciones de Consulta son aquellas que se ocupan de cómo la información recolectada por una red de sensores puede ser recuperada basándose en criterios específicos. Por ejemplo, captación del ambiente para obtener información de ambientes físicos, es una de las mayores aplicaciones de las redes de sensores. Dependiendo de su capacidad de Hardware, un nodo sensores puede ser programado para recolectar información sobre temperatura, humedad, luz, presión, sustancias químicas o vibraciones, y reportarla a la aplicación. Las aplicaciones pueden emplear consultas simples para obtener información no procesada, reportada directamente desde cada nodo sensor.

Sin embargo, en algunas situaciones, es necesario realizar consultas complicadas que involucren recolección de información distribuida o agregación. Por ejemplo, para saber que región del área captada tiene la temperatura más alta, se puede llevar a cabo en la red recolección inteligente de la información, filtración, y agregación, para que el observador no obtenga toda la información sin procesar, y así conservar recursos del sistema escasos, tales como energía de la batería y ancho de banda de la red. La información recolectada puede ser también usada para diagnosticar el buen funcionamiento de los sensores.

6.1.2 Aplicaciones Basadas en Tareas

Las aplicaciones basadas en tareas involucran programar los nodos sensores para ejecutar acciones específicas para ciertos eventos. Los eventos pueden ser cambios físicos en el ambiente, mensajes de nodos sensores cercanos, o indicadores de módulos de hardware/software dentro del nodo sensor. Una tarea puede ser tan simple como solicitar a un nodo sensor que reporte información independientemente cuando detecte algo inusual sobre su entorno.

Tareas más complejas podrían requerir coordinación distribuida, o aún colaboración, entre nodos sensores para lograr mayor exactitud y/o eficiencia. Por ejemplo, rastrear un objeto en movimiento en el área haciendo que cada nodo sensor de manera periódica y sin motivo visible monitoree sus alrededores, sería muy ineficiente. Si los nodos que rodean al objeto rastreado colaboran unos con otros, se puede recolectar con mayor eficiencia información más completa y exacta.

Una idea similar de coordinación puede ser también aplicada para reducir el número de nodos que participan en el reenvío de información. Los equipos modernos pueden tener módulos sensores operando en conjunto con módulos accionarios para que el comportamiento de los nodos sensores pueda ser controlado. En este caso, las aplicaciones de Tareas utilizan información obtenida de los nodos sensores para adaptar el comportamiento de los nodos o los patrones de movimiento para lograr mejor captación y desempeño de la red. Para aplicaciones de control del entorno, los accionarios pueden ser controlados para poder afectar ambientes físicos. Un edificio de oficinas, por ejemplo, puede tener un nodo sensor instalado en cada habitación. Estos nodos, luego, coordinan y

envían señales de control a la unidad de acondicionamiento de aire, la cual, en respuesta, se ajusta de acuerdo a la necesidad para así obtener confort óptimo en todas las habitaciones.

6.2 INGENIERÍA EN GENERAL

- Acelerador de los teclados virtuales: Estos dispositivos pueden sustituir los dispositivos de entrada convencionales para las PC y los instrumentos musicales.
- Mantenimiento en las plantas industriales: Los robots industriales complejos están equipados hasta con 200 sensores conectados generalmente por cables con una computadora principal. Debido a que los cables son costosos y están sujetos al desgaste debido al movimiento del robot, las compañías los están reemplazando por conexiones inalámbricas. Montando pequeños resortes en el nodo sensor, el principal objetivo es solucionar el problema de energía.
- Reducción del peligro aéreo: Los ingenieros pueden lograr esto combinando los sensores de flujo y los aspersores e inyectores, sobrepuestos en las alas de un avión.
- Espacios inteligentes de oficina: Son áreas equipadas con luz, temperatura, sensores de movimiento, micrófonos con activación de voz y sensores de presión en las sillas. La corriente de aire y la temperatura puede ser regulada localmente en cada habitación, en lugar de tener una central.
- Inventario de bienes en tiendas de departamentos: Las etiquetas facilitan el manejo de tiendas y ferreterías.
- Inventario de cajas y contenedores: Las compañías de envíos necesitan asesoría para conservar sus bienes, por lo menos para los traslados.
- Estudios sociales: Equipar a los seres humanos con nodos sensores, que permitan hacer estudios interesantes en la interacción humana y el comportamiento social.
- Ingeniería civil: Monitoreo de estructuras: Los sensores serán localizados en puentes para detectar y prevenir la debilidad de la estructura. En San Francisco, Estados Unidos, se instaló una red de nodos sensores que miden la vibración y las cargas estructurales del puente Golden Gate, como forma de mantenimiento proactivo.
- Sensores industriales: Dentro de fábricas existen complejos sistemas de control de calidad, el tamaño de estos sensores les permite estar allí donde se requiera y permiten:

- Telemetría en plantas
- Medidas de calidad
- Diagnóstico de maquinaria
- Monitorizado de gasto y tanques de agua

Para resolver estos problemas, los sensores deben de ser capaces de operar en ambientes difíciles sobreviviendo varios años sin necesidad de mantenimiento (cambio de baterías); deben de ser capaces de operar con otros dispositivos, sensores y con toda la red de la planta industrial. Los beneficios:

- Poder adelantarse a problemas antes de que generen grandes pérdidas.
- Reducción de costes.
- Aumento de la seguridad industrial.
- Liberando zonas de cableado.

6.3 DETECCIÓN Y MONITOREO DEL ENTORNO

La difusión de cientos a miles de sensores inalámbricos pequeños, baratos y auto-configurables en una área geográfica determinada puede producir un amplio rango de aplicaciones en monitoreo colaborativo y control del entorno. Esto involucra monitoreo complejo del ecosistema; detección de inundaciones; monitoreo del aire y alcantarillado; control climático local en grandes edificios; detección de composición de suelos y agricultura precisa; detección de incendios forestales; y exploración de reservas minerales, estudios geofísicos, etc.

Algunos ejemplos representativos incluyen:

- **Monitoreo de Ecosistemas:** Las WSN usadas en monitoreo del ecosistema representan una clase de aplicaciones con un sin número de beneficios potenciales para estudios de ciencias biológicas ya que las WSN pueden proveer información en diferentes condiciones ambientales, incluyendo química de suelos y del aire; así como, población y comportamiento de especies de animales y plantas. Esto asegura la identificación automática, registro, y análisis de interesantes eventos a largo plazo. Esta información recolectada a largo plazo puede ayudar a los científicos de

ecosistemas a identificar, localizar, seguir, y predecir especies y fenómenos en áreas de interés.

- Mainwaring y sus colegas [34] presentaron un experimento de la vida real sobre el despliegue de una WSN en un área natural – Isla Great Duck (44.09N, 68.15W), Maine – para monitorear la “Migración del Paíño Común” (tipo de ave marina), en términos de ciclo corto (24-72h) del uso del patrón de anidación en madrigueras y un ciclo largo (7 meses) para cambios en la madriguera y parámetros en la superficie ambiental. El experimento intenta guiar a un monitoreo ambiental confiable en estos campos antes no accesados.
- Precisión agrícola: El manejo de la cosecha y del ganado y el control exacto de la concentración del fertilizante, son posibles.

Australia: sensores de riego: Esta red de sensores, supone una revolución capaz de ahorrar grandes cantidades de agua, y de ayudar a mantener la agricultura. Un dispositivo denominado “nictor”, utiliza redes de sensores inalámbricos que se han desarrollado en un laboratorio de la Universidad de Melbourne [35]. El sistema usa agua de manera más eficiente que un sistema de irrigación convencional. Es el resultado de la investigación dirigida por John Langford, director de la Universidad de Melbourne Water Research Centre, y un grupo de especialistas de varias organizaciones. De momento el sistema ya se ha probado y los resultados son más que satisfactorios. La primera red de sensores se desplegó en el invernadero de la citada universidad, mientras que una segunda red se ha instalado en un viñedo de una hacienda en una zona de denominación Chianti.

Riego de campos de algodón en las zonas áridas de Israel y Texas: Pueden ser provistos de riego de agua una vez al día de forma automática en función de la temperatura de las plantaciones, registrada con sensores infrarrojos a corta distancia de las hojas.

Así, cuando la temperatura excede los 82°F durante más de 4 horas se activa el riego. Una vez descubierto que el rango de temperatura para un óptimo crecimiento del algodón se encuentra entre 73 y 90°F.

- Exploración planetaria: La exploración y la vigilancia en ambientes inhospitalarios tales como regiones geográficas remotas o localizaciones tóxicas pueden ocurrir.
- Supervisión de Geofísica: La actividad sísmica se puede detectar en una escala mucho más fina usando una red de sensores equipados de acelerómetros.
- Monitoreo de la calidad del agua dulce: El campo de la hidroquímica tiene una necesidad que obliga el uso de las redes sensoriales inalámbricas debido a la variabilidad espaciotemporal compleja en parámetros hidrológicos, químicos, y ecológicos y el muestreo intensivo, particularmente en posiciones remotas o bajo condiciones adversas. Además, las boyas a lo largo de la costa alertan a personas que practican surf, a nadadores, y a pescadores sobre los niveles peligrosos de bacterias.
- Detección de Incendios Forestales: Aunque se han tomado grandes medidas, los incendios forestales aun causan extensas pérdidas de vidas, bienes, y recursos cada año. Debido a su habilidad de ser desplegadas aleatoria y densamente, las WSN son una buena opción para la detección de incendios forestales y el reporte de los mismos. Disponiendo grandes cantidades de sensores inalámbricos en las áreas deseadas, la detección temprana y origen de incendios puede ser alertada efectivamente.
- Zebranet: El proyecto de Zebranet en los análisis de Princeton está orientado para seguir el movimiento de las cebras en África y prevenir su extinción.



Figura. 6.2. Zebranet

- **Supervisión del hábitat:** Investigadores de Intel Laboratory iniciaron el despliegue de una red de sensores inalámbrica con la colaboración de la Universidad del Atlántico en Bar Harbor y la Universidad de California en Berkeley en la isla Great Duck en Maine para medir la humedad, la presión, la temperatura, la radiación infrarroja, la radiación solar total, y la radiación activa fotosintética. En la isla Great Duck, cerca de las costas de Maine, Estados Unidos, existe una red de 150 nodos sensores inalámbricas que monitorean los microclimas en los refugios donde anidan las aves marinas, y en los alrededores. El propósito es desarrollar un equipo de monitoreo de hábitats que permita que los investigadores supervisen especies en riesgo y sus hábitats, de manera no perturbadora ni invasiva. Cada nodo, con un microcontrolador, una radio de baja potencia, memoria y baterías. Monitorizando temperatura, humedad, presión, y emisiones infrarrojas a mitad de rango. Los nodos enviaban sus datos a las estaciones base de la isla, que a su vez vía satélite las colocaba en internet, para el acceso de los investigadores.
- **Secuoyas:** En el condado de Sonoma, en California, Estados Unidos, los investigadores ataron 120 nodos a los árboles conocidos como secuoyas con el fin de monitorizar desde 70 kilómetros de distancia, el microclima en las inmediaciones de Berkeley.



Figura. 6.3. Secuoyas

- **Detección de desastres:** El fuego y las inundaciones en bosques y ciudades pueden ser detectadas temprano y las causas se pueden localizar exactamente por las redes de sensores densas desplegadas alrededor del ambiente.

Una red de pequeños sensores que monitorizan el nivel de agua, el flujo y que pueden prevenir inundaciones se está instalando en el Reino Unido. Dos despliegues de trece sensores se han instalado a lo largo de un tramo del río Ribble, in the Yorkshire Dales. El resto de la red debe de estar desplegada para finales de año. Este río, se desborda de forma regular a comienzos de año según apunta Danny Hughes, científico de Lancaster University, UK, que trabaja en el proyecto. La red final constará de tres tipos de sensores. Once medirán la presión bajo la línea de agua para determinar la profundidad. Los otros dos, medirán la velocidad del flujo de agua, usando ultrasonidos bajo la superficie y cámaras web encima de ella para realizar un seguimiento de objetos.

- **Transporte contaminante:** La asesoría de los niveles expuestos de contaminación, requieren una alta tasa de muestras espacio-temporales, las cuales las puede proveer las WSNs.
- **Planeamiento urbano.** Los planificadores urbanos seguirán patrones de agua subterránea y las ciudades podrán controlar cuánto dióxido de carbón están expidiendo, permitiendo tomar decisiones para mejoras del ambiente de la tierra.

En fin; el control ambiental de vastas áreas de bosque o de océano, sería imposible sin las redes de sensores. El control de múltiples variables, como temperatura, humedad, fuego, actividad sísmica así como otras y también la ayuda que prestan a los expertos a diagnosticar o prevenir un problema o urgencia y el minimizar el impacto ambiental de la presencia humana en los ecosistemas se hace totalmente factible gracias a la implementación de las WSN.

6.4 SEGURIDAD, SALUD Y GESTIÓN

Las WSN también pueden ser efectivamente desplegadas en áreas de situaciones de emergencia y desastre. La detección de señal exacta y de ubicación provistas por las WSN puede ser crítica en operaciones de rescate, incluyendo detección de víctimas, amenazas

potenciales, o recursos de emergencia, e identificación y localización de personas atrapadas.

Ejemplos:

- Los micro-sensores pueden ser empotrados/habilitados en edificios de gran escala durante la construcción, por medio de lanzamiento estratégico en el punto de rescate, o por encendido automático de sensores en espera, inmediatamente después de ocurrido un evento de desastre. El colapso de las paredes o techo puede ser predicho o estimado por el movimiento de edificios.
- Es adecuado desplegar las WSN para tareas de monitoreo de mucha durabilidad, tales como detección y rastreo de envejecimiento de material, para que la evidencia de reacción danina del edificio pueda ser recolectada colectivamente y acciones efectivas puedan ser tomadas antes de que ocurra un accidente.
- Otro ejemplo, arreglos de sensores a prueba de agua, pueden ser activados automáticamente para reportar constantemente la ubicación de vehículos sumergidos en el océano y proveer así información importantemente crítica para operaciones de rescate y salvamento. Adicionalmente, las redes de sensores inalámbricas pueden ser usadas para hacer seguimiento de combustible, gas, y sustancias tóxicas esparcidas en el océano cuando un vehículo sumergido emerge.
- Entornos de alta seguridad: Existen lugares que requieren altos niveles de seguridad para evitar ataques terroristas, tales como centrales nucleares, aeropuertos, edificios del gobierno de paso restringido. Aquí, gracias a una red de sensores se pueden detectar situaciones que con una simple cámara sería imposible.
- Detección de peligros potenciales: La salud estructural requiere el mayor número de medidas posibles que analicen la respuesta global y local de una estructura civil. La instrumentación tradicional tiene un coste prohibitivo. Usando sensores inalámbricos con mediciones de aceleración sísmica, tensión, temperatura, velocidad del viento e incluso datos GPS, se pueden generar alertas cuando los parámetros superen determinado valores. Existen proyectos piloto; casa levantada,

es un simulador de sismos de California, en el Richmond Field Test Center. Los datos son registrados por 50 acelerómetros inalámbricos que analizaban la respuesta de la estructura a un terremoto simulado. La imagen muestra los nodos instalados.



Figura. 6.4. Casa Levantada: Simulador de sismos

- Recuperación de desastres: A los edificios afectados por un terremoto se puede infiltrar muestras localizadas por debajo para detectar señales de vida.

Las WSN son de mucha ayuda para proveer avisos y cuidado médico efectivo y guiar a los seres humanos a un ambiente mas sano. Algunos usos de las WSN en este campo incluyen:

- Medicina: Los datos fisiológicos tales como temperatura del cuerpo, presión arterial, y pulso se detectan y automáticamente transmiten a una computadora o a un médico, donde puede ser utilizada para monitorear el estado de salud y la exploración médica. La radio que detecta los vendajes puede advertir la infección. Los sensores minúsculos en la corriente sanguínea, accionados posiblemente por un campo electromagnético externo débil, pueden analizar la sangre y prevenir continuamente la coagulación y la trombosis.
- Monitoreo remoto de virus: Muchas regiones dirigidas por enfermedades han sido empobrecidas y carecen de comunicación confiable. El establecer grandes cantidades de sensores inalámbricos en tales regiones puede ayudar a recolectar y

transmitir información crucial basada en suelos, tales como incidentes de enfermedades y características de la población infectada; identificar características del área; y monitorear características ambientales, como la cantidad de lluvias y humedad, que permiten la proliferación de insectos portadores de los virus. Las WSN pueden también ser usadas para monitorear y predecir el brote de algunas enfermedades infecciosas como la malaria. Un proyecto llamado “Mejoramiento de la Salud a través de Recursos y Tecnologías del Espacio”, propone el desarrollo de un sistema de información para la malaria global [36]. Basándose en la información recolectada del aire y suelos vía sensores inalámbricos, e integrando y analizando información epidemiológica, el sistema puede generar “mapas de riesgo” de malaria y proveer alertas tempranas sobre brotes de malaria. Los oficiales de salud también podrán ubicar prevenciones de recursos limitados para tratamiento de enfermedades en escala global.

- **Microcirugía:** Un grupo de robots basados en MEMS puede colaborar para realizar cirugía microscópica y como mínimo invasora. Las oportunidades para las redes inalámbricas de sensor son ubicuas. Sin embargo, un número de desafíos formidables se deben solucionar antes de que estos usos emocionantes se hagan realidad.
- **Sensores “Tragables” (Swallowable Sensors):** Una cápsula inalámbrica que se ingiere y puede ayudar a la diagnosis de trastornos digestivos.



Figura. 6.5. Smart Pill

Un pequeño dispositivo médico desarrollado por Buffalo, ha sido aprobado por la “*Food and Drug Administration (FDA)*” para ser comercializado en los Estados

Unidos. La píldora inteligente sería ingerida por un paciente y comenzaría a transmitir información a un receptor que lleve el mismo, sobre el sistema digestivo mientras lo recorre. Algunos de estos dispositivos incluyen una cámara microscópica. Ayudará a diagnosticar gastroenteritis y otros trastornos digestivos que afectan al 20% de los americanos. En su “viaje”, el sensor transmite información sobre niveles de acidez, y presión, tiempo de digestión, etc. La cápsula expulsada dos días después, es recuperada para su análisis y descarga de datos. Cada cápsula costará \$500, y el sistema completo incluyendo software y docking station unos \$20,000 [37].

- Seguimiento y Monitoreo Integrado de Pacientes: Usando las WSN para monitorear y hacer seguimiento de un posible o sospechoso paciente es una medida conveniente y efectiva para evitar la proliferación de algunas enfermedades infecciosas. De acuerdo a un reporte emitido en Abril del 2003 por las noticias CBC (Corporación de Transmisión Canadiense), se discutía que algunas personas que rompieron la cuarentena en Toronto durante un periodo de un severo y marcado síndrome respiratorio (SARS – siglas en ingles) en la primavera del 2003 podrían haber requerido usar un dispositivo liviano con un sensor inalámbrico en sus codos. Este dispositivo podría monitorear sus movimientos y reportarlos a las autoridades pertinentes. Adicionalmente, los ciudadanos mayores que no tuvieran suficiente cuidado podrían tener los sensores inalámbricos adjuntos a los dispositivos médicos para medir sus niveles cardiacos, presión de sangre, etc. En condiciones anormales, una alerta automática recuerda a los portadores de llamar a sus doctores o una notificación automática es enviada directamente a los centros de emergencia. Además, las WSN pueden también ser usadas para proporcionar estadísticas médicas que requieran recolección de información de un gran número de personas o hacer seguimientos a algunos pacientes durante periodos largos de tiempo.

- Schwiebert y sus colegas [38] presentan una serie de aplicaciones de las WSN en el cuidado medico, tales como retina artificial; monitoreo de niveles de glucosa para pacientes con diabetes; monitoreo de órganos para propósitos de transplante de los mismos; y detección de cáncer para personas con alto riesgo; así como, monitoreo

medico general. Las WSN también pueden ser usadas en administración y distribución de drogas.

6.5 APLICACIONES MILITARES Y GUERRA ELECTRÓNICA

Las WSN se están convirtiendo en parte integral de los comandos militares, control, comunicaciones, computación, inteligencia, supervivencia, reconocimiento y sistemas de ubicación de objetivos. En el campo de batalla, una tendencia predecible es que los objetivos se harán mas pequeños y menos reconocibles y detectables, tendrán mayor movilidad, y usualmente se moverán en terrenos extremadamente hostiles. Para explorar la posición y fuerza de los enemigos, una prometedora solución se basa en arreglos de sensores densos los cuales se ubican cerca de objetivos previstos. Debido a su capacidad de estar sin atención humana, fácil despliegue, auto organización, y tolerancia a fallas, las WSN pueden proveer información captada, altamente redundante y colaborativa, sin el apoyo de fuerzas aliadas. También, las WSN pueden ser montadas en vehículos robóticos no tripulados, tanques, aviones de guerra, submarinos, misiles, y torpedos para guiarlos a través de obstáculos, hacia una posición exacta y dirigirlos para que coordinen unos con otros para realizar ataques o defensas más efectivas. Las WSN también pueden ser desplegadas para detección remota de armas nucleares, biológicas y químicas, detección de ataques terroristas potenciales, y reconocimiento. Obviamente, las WSN tomaran mayor importancia en las tareas militares y harán de los ataques y defensa mas inteligentes, con menor involucramiento humano.

Ejemplos:

- Activo del monitoreo y manejo: Los comandantes pueden supervisar el estado y las localizaciones de tropas, de armas, y de fuentes para mejorar el mando, control, comunicaciones, e informática militar.
- Peritaje y monitoreo del espacio de batalla: La vibración y los sensores magnéticos pueden divulgar el vehículo y el movimiento del personal, permitiendo la vigilancia cercana de las fuerzas opuestas.

- Guerra urbana: Los sensores son colocados en los edificios que han sido despejados para prevenir la reocupación; los movimientos del amigo y del enemigo pueden exhibirse en un PDA, como un nuevo dispositivo llevado por los soldados.
- Protección: Los objetos sensibles como por ejemplo las plantas atómicas, los puentes, los muros de contención, el aceite y las tuberías de gas, las torres de comunicación y las jefaturas militares se pueden proteger por los campos inteligentes equipados con sensores capaces de discriminar diversas clases de intrusos. Ataques biológicos y químicos pueden ser detectados temprano o aún prevenidos ya que una red del sensor actúa como sistema amonestador.
- Auto protección de campos minados: El sistema de auto protección de campos minados se diseña para alcanzar una resistencia creciente para el montaje y desmontaje de minas. En vez de un complicado obstáculo estático, el sistema de auto protección es inteligente, el obstáculo dinámico detecta posiciones y respuestas relativas a una tentativa de los enemigos por la reorganización física.
- Sistema Portable para Detección de Intrusos (PIDS): Se trata de un sistema de control de fronteras capaz de detectar cualquier movimiento en las mismas basado en nodos de sensores que tendrá que estar finalizado para finales del 2007, y cuyo cliente es el gobierno alemán.
- Control del fuego amigo: Mediante la localización con sensores de las diferentes tropas y sus dispositivos de armamento.
- Plano Campo de batalla instantáneo: Conocimiento del posicionamiento y evolución de los elementos inmersos en el campo de batalla.

6.6 EDIFICIOS INTELIGENTES

Las WSN pueden tomar roles clave en la provisión de entornos de vida mas convenientes e inteligentes para los seres humanos. Algunos ejemplos predecibles incluyen:

- **Medidores Remotos:** Las WSN pueden ser usadas para realizar lecturas remotas de medidores de utilidad, tales como de agua, gas o electricidad, y luego transmitir las lecturas a través de conexiones inalámbricas [39].

Simples adiconamientos de sensores inalámbricos en medidores de parqueo pueden enviar señales de alerta para recordar a los usuarios que los medidores deben ser recargados remotamente antes de que expire el tiempo de parqueo.

- **Domótica:** Su tamaño, economía y velocidad de despliegue, hacen que las WSN sean una tecnología ideal para domotizar el hogar a un precio asequible. Es inimaginable que los nodos no sólo puedan observar sino también reaccionar para activar funciones de otros sistemas.
- **Control climático local en grandes edificios:** La mayoría de personas que ha trabajado en grandes edificios han experimentado que la temperatura es poco apropiada, por ejemplo, demasiado alta o demasiado baja; el nivel de humedad es muy seco o muy húmedo; mucha o muy poca luz presente; o falta de aire fresco.

Es por eso que, es extremadamente necesario el tener monitoreo local del clima o sistemas de control para asegurar lugares de trabajo saludables y confortables. En el presente, los sistemas tradicionales con sensores alámbricos son dominantes en tales áreas. Las WSN distribuidas son consideradas una mejor solución que sus contrapartes alámbricas en al menos dos aspectos. Por un lado, el despliegue de una WSN es más flexible que un sistema conectado. Sin la restricción de un cable, los sensores inalámbricos pueden ponerse donde sean necesarios; también pueden ser movidos de su posición original a lugares mas adecuados.

Además, las WSN pueden producir ganancias económicas tremendas comparadas a los sensores alámbricos. Obviamente, el costo de instalación puede ser grandemente reducido si los sensores inalámbricos son usados.

- **Espacio Inteligente:** Con el reciente desarrollo tecnológico, se vuelve posible el ubicar varios sensores inalámbricos en muebles individuales y equipos, los cuales pueden ser conectados entre si para formar una red autónoma.

Por ejemplo, una refrigeradora inteligente puede entender los requerimientos dietéticos de una familia o las ordenes del doctor y contar el inventario de la refrigeradora para enviar la información en una lista de compras de supermercado a un asistente personal digital [40]. También puede crear un menú de acuerdo al inventario y transmitir la información de cocción pertinente a la cocina inteligente o al horno microondas, el cual adecuara la temperatura deseada y el tiempo de cocción correspondiente.

Adicionalmente, los contenidos y horarios de TV, VCR, DVD, o reproductores de CD pueden ser monitoreados y operados remotamente para satisfacer los diferentes requerimientos de los miembros de la familia. La Universidad de Berkeley ha desarrollado sistemas de sensores para su uso doméstico.

Nuevos termostatos inalámbricos que ajustan el aire acondicionado en función de parámetros de ocupación y temperatura deseada. Al igual que pequeños “semáforos” conectados a frigoríficos, lavadoras etc., que permiten avisar el momento adecuado de conexión, para su óptimo funcionamiento energético.



Figura. 6.6. Electrodomésticos Inteligentes

- Incendios: Fire Information and Rescue Equipment (FIRE) Información de Fuego y Equipo de Rescate: Es un proyecto del Departamento de Ingeniería Mecánica de la

Universidad de Berkeley con el Chicago Fire Department (CFD). La extinción de incendios y catástrofes en general genera un entorno extremadamente caótico, donde la toma de decisiones rápidas es decisiva. En estas situaciones la posibilidad de disponer de información sobre diferentes aspectos de la catástrofe es de un valor inestimable. El proyecto FIRE trabaja en este tema desde el desarrollo de redes de sensores (SmokeNet) y su implementación en las herramientas de comunicación que utilizan bomberos, policía, etc.

SmokeNet es una red inalámbrica dinámica de sensores integrada por cuatro tipos principales de nodos de comunicación. Se pone en ejecución la capa de red inalámbrica usando las motas de Moteiv Telos. Cada nodo tiene sus propias funciones y grupo de sensores. El primer tipo de nodo es el detector de humo que contiene humo y diferentes sensores de temperatura, mientras que los nodos de “stoplight (luz de parada)” se componen de tres LEDs brillantes que se utilizan para transportar visualmente la información crítica sobre el estado del fuego e indica el camino de salida que un bombero u ocupante pueden tomar. Estos nodos de luz de parada se ponen sobre cada umbral en una localización donde puedan ser vistos fácilmente. Los nodos detectores de humo substituirían los sensores actuales de humo usados en el edificio. El backbone o espina dorsal de la capa de comunicación para SmokeNet se compone de estos nodos instalados previamente, es decir, del detector de humo y de la luz de parada debidamente localizados y colocados a través del edificio. Los nodos del bombero consisten en un mote mica2, una computadora móvil pequeña, y un visualizador montado en el casco del bombero llamado FireEye que se integra en el hardware normal del bombero. Cuando un nodo de bombero entra en un edificio equipado con SmokeNet, SmokeNet identificará este nodo como bombero y comunica la magnitud del desastre, la localización de este bombero y de otros bomberos, la localización del fuego, etc. Los sensores supervisarán el nivel del tanque del aire del bombero y el ritmo cardíaco, y envían la información a los otros bomberos y a la base estación. Un parte de la información la cual se enruta o es detectada por el nodo del bombero se exhibe en su FireEye. Algunos de los requisitos de diseño que SmokeNet desea satisfacer en la capa de comunicación son los algoritmos robustos y redundantes de enrutamiento, y adaptabilidad de la capa de red en caso que los nodos lleguen a ser inoperables [41].



Figura. 6.7. Fire Information and Rescue Equipment (FIRE)

- **Localización:** El explosivo crecimiento de las redes inalámbricas conduce a múltiples posibilidades de cálculos de ubicación. Crossbow ha trabajado en diversas aplicaciones de localización. MIT's Cricket es un claro ejemplo [42]. Usando nodos inalámbricos fijos y móviles, Cricket utiliza ultrasonidos para determinar la localización de usuarios que se desplazan en “interiores”. Esto conduce a numerosas aplicaciones que incluyen mapas interactivos, localización de personal y control de accesos a determinados recursos.



Figura. 6.8. Cricket

- **Telemática automotriz:** Los coches, que abarcan una red de docenas de sensores y de actuadores, están en una red de un sistema de sistemas para mejorar la seguridad y la eficacia de tráfico. Comunicaciones entre los vehículos, transmitiendo señales de emergencia desde ambulancias, policía, bomberos, etc., al resto de los vehículos del entorno inmediato. Comunicación y avisos en cruces entre semáforos y vehículos en direcciones ortogonales.

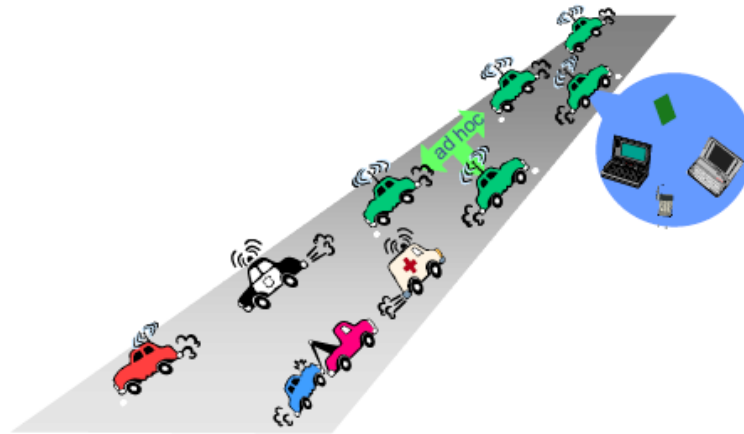


Figura. 6.9. Telemática Automotriz

- Gestión de aparcamientos: Este sistema es capaz de detectar la presencia o no de un vehículo basándose en la alteración del campo magnético. Cuando se detecta un vehículo, la información se transmite, a través de una red wireless, a un colector de datos que enviará la información transmitida por todos los sensores a un ordenador conectado a la red. Este será quien gestione la aplicación final. Este curioso producto ha sido galardonado con el premio “Intertraffic Innovation 2006”, por ser el producto más innovador en aparcamientos. Este es el caso del “*Wireless Space Count System*”, un sistema capaz de contabilizar los espacios libres de parking, gracias a una serie de sensores inalámbricos colocados en la superficie de cada uno de los aparcamientos [43].



Figura. 6.10. Wireless Space Count System

- **Arte interactivo:** Asholk Sukumaran exhibió el “Park View Hotel”, usando el Fairmont Hotel de San José. Los turista y transeúntes en general emitiendo rayos infrarrojos desde diversos puntos de la calle y apuntando a diferentes zonas del edificio pueden activar sensores dentro del edificio iluminando estancias y cambiando sus colores.

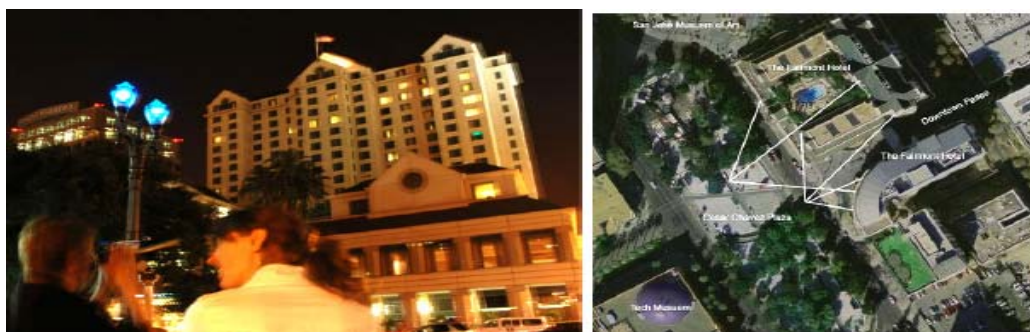


Figura. 6.11. Park View Hotel

- La supervivencia instantánea y remota inspira significantes aplicaciones de las WSN. Por ejemplo, un gran número de sensores acústicos dispuestos en una red pueden ser usados para detectar y rastrear objetos deseados en un área de seguridad determinada. Las WSN pueden ser desplegadas en edificios, áreas residenciales, aeropuertos, estaciones de tren, etc. Para identificar intrusos y reportarlos al centro de comando inmediatamente para que acciones de rastreo puedan ser iniciadas prontamente. Similarmente, el instalar nodos sensores de humo en posiciones seleccionadas estratégicamente en hogares, edificios de oficinas, o fábricas es crucial para prevenir desastres de incendio y rastrear el esparcimiento de incendios.

6.7 OTRAS APLICACIONES

Un elemento importante para hacer realidad estos escenarios que parecen de ciencia ficción, lo constituyen las redes inalámbricas de sensores (WSN). En efecto, si la red debe reaccionar a ciertas condiciones que se presenten, primeramente se deben conocer dichas condiciones, siendo ahí donde entran en juego los sensores.

En el noroeste de Estados Unidos y sur de Canadá se utilizan redes para sensar parámetros que influyen en la calidad de la uva para vino, tales como la temperatura y la

humedad. El despliegue efectivo y operación auto-regulada de las WSN están abriendo nuevas formas de exploración científica en ambientes más altos, lejanos y profundos como el espacio exterior y los océanos profundos.

El investigador Hong y sus colegas [3] presentaron un ejemplo de uso de las WSN en las superficies de Marte para recolectar diferentes mediciones como sísmicas, químicas, y de temperatura y enviar los resultados de las captaciones agregadas a un orbitador. Cada nodo sensor distribuido provee mediciones dependientes de tiempo y posición; vía energía conservada, balance de carga, comunicaciones multi-salto, puede enviarse información a la estación base distante con un mayor tiempo de vida. Similarmente, las WSN usadas para exploración bajo el agua pueden ser posibles en el futuro.

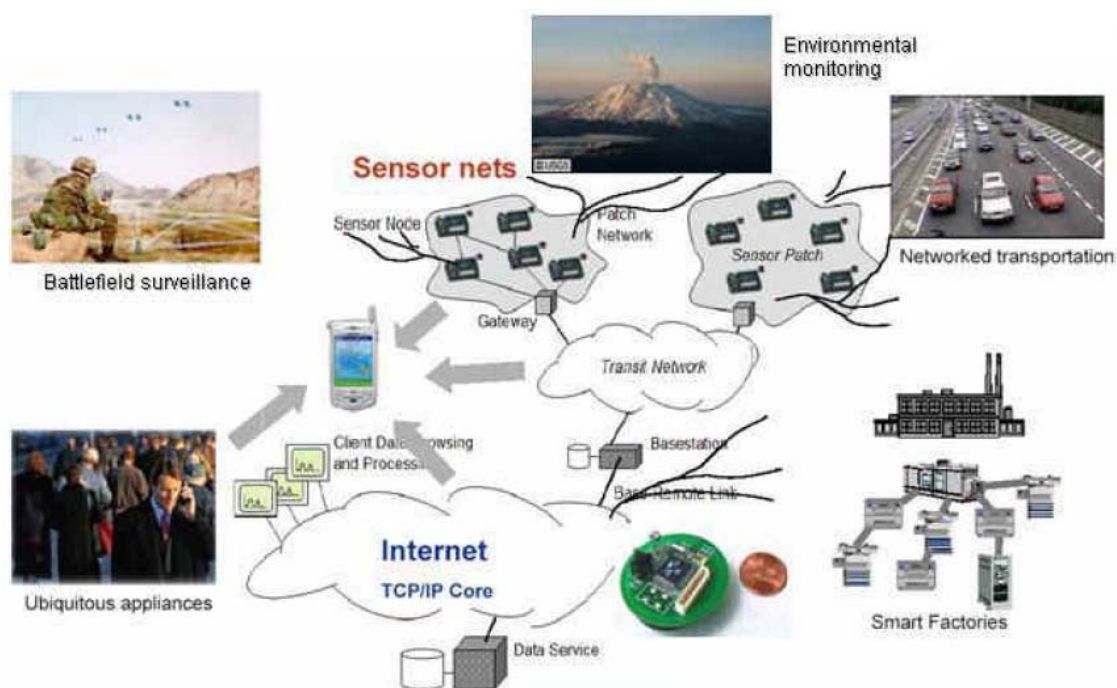


Figura. 6.12. Aplicaciones de redes WSN

Las WSN producen mecanismos prometedores para información minera que proviene del y reacciona al mundo físico. Desplegando sensores inalámbricos, monitores y actuadores pequeños y baratos en juguetes y otros objetos similares para niños, se podría crear “guarderías inteligentes” para promover educación mas temprana para la niñez [44]. Un sistema así proveería un ambiente de aprendizaje para la niñez con interacción con el “mundo físico-persona” mas que la comunicación convencional “persona-computador” o

“persona-persona”. Ya que permite configuración personalizada para cada niño; actividades coordinadas de grupos; y recolección de información constante y sin obstrucciones en acciones y procesos de aprendizaje de los niños, provee estrategias de resolución de problemas de comprensión y efectividad en la educación de niños pequeños.

Las WSN auto-configurables pueden ser usadas en muchas otras áreas, tales como control de robots e instrumentación de fábricas, rastreo automático de inventario, control de procesos químicos, monitoreo de tráfico y control de carreteras inteligentes, etc. La Figura. 6.12. muestra algunas de las aplicaciones de las redes de sensores.

CAPITULO 7

MONITOREO REMOTO CON REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

7.1 INTRODUCCIÓN

La tecnología de redes de sensores inalámbricos se encuentra en la vanguardia de la investigación de las redes de cómputo y podría ser el siguiente mercado tecnológico de miles de millones de dólares. Las redes de sensores inalámbricos, que hoy en buena medida son dominio de la investigación académica subvencionada por los militares y de un manojito de nuevas firmas surgidas de estos proyectos, podrían figurar prominentemente en los planes de las compañías multinacionales y de los mayores fabricantes de tecnología en el mundo.

Los dispositivos de sensores inalámbricos o “WSN” contienen: un tablero de circuitos y software de redes y aplicaciones, interfaces de sensores que pueden detectar cambios en la temperatura, presión, humedad, luz, sonido o magnetismo y un radio inalámbrico que puede reportar los hallazgos. Todo energizado por un par de baterías AA. Los WSN, gracias a la fusión de pequeños y baratos chips, radios de baja potencia y una extensión de redes inalámbricas, constituyen un salto gigantesco por delante de los sensores tradicionales que por décadas han medido todo, desde la temperatura en los edificios a las vibraciones de la maquinaria de las fábricas.

7.2 DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA PARA EL MONITOREO REMOTO

La difusión de cientos a miles de sensores inalámbricos pequeños, baratos y auto-configurables en una área geográfica determinada puede producir un amplio rango de aplicaciones en monitoreo colaborativo y control del entorno. El objetivo de la

monitoreo del entorno es para obtener lecturas de un entorno inaccesible y hostil en un período de tiempo para detectar cambios, tendencias, etc.

Una WSN contiene cientos o miles de nodos sensores, los cuales tienen la habilidad de comunicarse con cualquier otro nodo o directamente con una estación base externa.

Los elementos que conforman una WSN son:

- Sensores: de distinta naturaleza y tecnología toman del medio la información y la convierten en señales eléctricas.
- Nodo sensor o Mota: toman los datos del sensor a través de sus puertos de datos, y envían la información a la estación base.
- Gateway: elementos para la interconexión entre la red de sensores y una red TCP/IP.
- Estación base: recolector de datos basado en un ordenador común o sistema embebido.
- Comunicación Inalámbrica: Típicamente basada en el estándar 802.15.4 *ZigBee*.

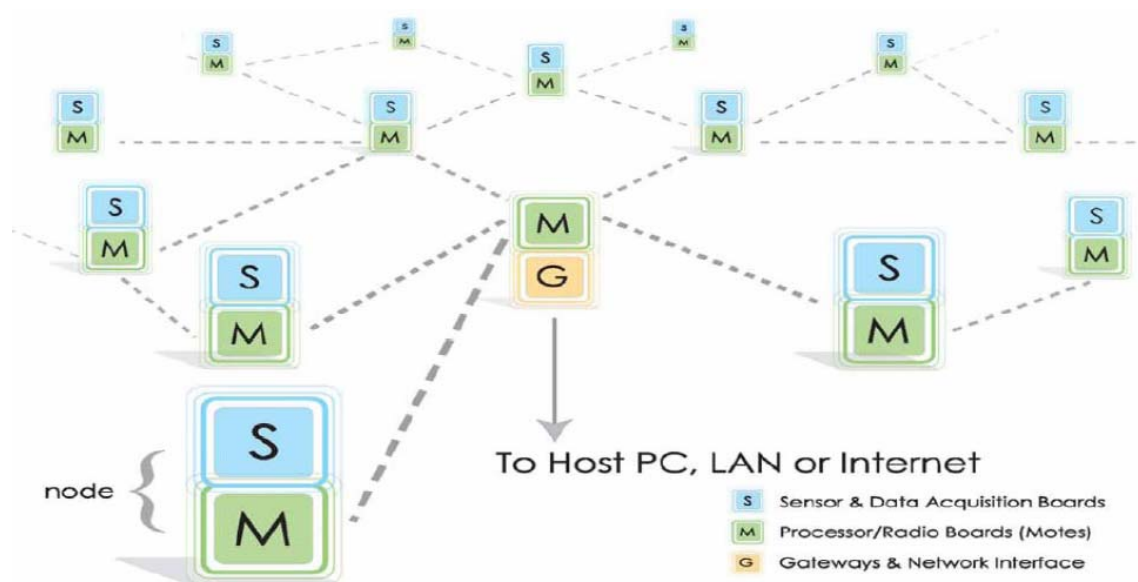


Figura. 7.1. Estructura de una WSN

7.3 SIMULACIÓN DE UNA WSN PARA EL MONITOREO REMOTO DE UN AMBIENTE.

Por la estructura de las redes de sensores los aspectos susceptible de simulación son:

- Los nodos y su hardware.
- La red, su comportamiento y los protocolos asociados.
- El software asociado:
 - A nivel de aplicación.
 - A nivel de Sistema Operativo.
- Tipos de simuladores:
 - *TOSSIM*
 - *GlomoSim*
 - *MoteView*
 - *NS – Network Simulator*
 - *SensorSim*
 - *Em**

Para el ejemplo el simulador que vamos a usar es el *MoteView* de la plataforma *MoteWorks™* del fabricante *Crossbow* con sus distintos componentes que se explican en los siguientes apartados.

7.3.1 Variables a medir

Las WSN pueden monitorear un amplio rango de condiciones físicas, tales como:

- Temperatura
- Luz
- Voltaje
- Velocidad - Objetos en Movimiento
- Magnetismo
- Humedad
- Presión
- Nivel de ruido

- Características de un objeto tales como peso, tamaño, velocidad de movimiento, dirección y su última posición.

7.3.2 Condiciones y dispositivos utilizados para la medida de variables

Una WSN integra sensores, procesador, radio, hardware y capacidades de establecimiento de una red inalámbrica llamada comúnmente como “Motes o Motas”.

MoteWorks™ es la primera industria, abierta, que integra plataformas estándares para el desarrollo de una WSN así como también dispositivos y sistemas OEM. Es el resultado de numerosos despliegues de WSN a través de una variedad de aplicaciones incluyendo monitoreo industrial, automatización constructiva, gestión, administración de recursos, localización y seguridad. *MoteWorks™* es la plataforma confiable de OEM de *Crossbow* que ofrece a los usuarios las ventajas comprensivas para probar la tecnología inalámbrica en cualquier uso dado a un sensor.

La plataforma del software proporcionada por *MoteWorks™* se optimiza para las redes con baterías de baja potencia y proporciona una solución extremo a extremo a través de todos los componentes y procesos que se usan en el establecimiento de una aplicación de una WSN, incluyendo:

- Grada de Red de la Mota: Memoria en la cual se puede almacenar información de la red y sistema operativo incluyendo la ayuda del estándar ZigBee para los dispositivos de la mota.
- Grada del servidor: Middleware para conectar la WSN con toda la infraestructura de la red y con el Internet.
- Grada del cliente: Uso de la interfaz de aplicación para el monitoreo remoto de los sensores de la red.

MoteWorks™ también soporta referencia completa de hardware y plataformas de desarrollo para la integración rápida del hardware de la red inalámbrica con todos sus componentes.

- ***XMesh: Mesh Network Snack - Pila de red de Acoplamiento***

La pila de red *XMesh* es la que permite la comunicación confiable de las motas en una WSN. Además optimiza los requerimientos totales de la aplicación en marcha aceptando las diferentes topologías de la red como topología en estrella, híbrida y su acoplamiento. *XMesh* proporciona ayuda dual para el estándar *ZigBee* y el establecimiento de una red avanzada de acoplamiento. El estándar *ZigBee* define las topologías estrella y estrella híbrida para la comunicación inalámbrica.

XMesh también proporciona la ayuda para el accionamiento completo de baterías, redes multi-hop con operación de tiempo extendido. En esta topología, cada nodo actúa como un ruteador, proporcionando extensibilidad fácil de la red sin requerir ninguna línea de consumo de energía. De acuerdo con las características del acoplamiento de RF, *XMesh* determina automáticamente la ruta óptima a través de la red hacia el gateway, reduciendo al mínimo los requisitos de energía a través de la red. Cuando en RF el acoplamiento entre los nodos degrada la calidad o llega a ser inasequible, *XMesh* reencamina automáticamente mensajes por otros nodos de la red. Combinado con la capacidad de seleccionar el canal de radio óptimo, esta capacidad dinámica de encaminamiento proporciona la comunicación *self-healing* (auto-curable), confiable incluso en ambientes con interferencia pesada, incluyendo la comunicación de WiFi en la banda de 2.4 GHz. *XMesh* apoya completamente la comunicación bidireccional del mensaje a través de la red con tiempos de respuesta rápidos.

- ***XOtap: Over-the-air-programming & Remote Update – Programación por aire y actualización remota.***

XOtap está diseñado para ser compatible con *MoteWorks*TM. Este tipo de programación permite que las motas sean programadas confiablemente, punto a punto o vía multicast sobre una tasa de datos baja de la red inalámbrica. *XOtap* facilita el desarrollo de las aplicaciones de las WSN eliminando una conexión física con el nodo de la red. Durante la instalación de la WSN, *XOtap* permite una rápida configuración de la red. El mantenimiento de la red instalada también se reduce significativamente ya que permite configurar nodos que son difíciles o imposibles de alcanzar.

- ***TinyOS: Sistema Operativo De Bajo Consumo De Energía***

*MoteWorks*TM incluye *TinyOS*, el sistema operativo de fuente abierta desarrollado originalmente por Universidad Berkeley de California. *TinyOS* ha desarrollado una amplia comunidad de usuario con millares de aplicaciones, convirtiéndolo en un sistema operativo estándar para el establecimiento de una WSN en la comunidad de la investigación. Es también el sistema operativo desplegado los más extensamente posible para los usos comerciales de las WSN. *TinyOS* es un sistema operativo orientado a objetos, diseñado para los dispositivos de baja consumo de energía con requisitos pequeños de memoria.

TinyOS soporta microprocesadores a partir de la arquitectura de 8-bits con tan solo 2 KB del RAM hasta procesadores de 32-bits con 32 MB de RAM o más. Proporciona un conjunto bien definido de *APIs* (Interfaz de Programación de Aplicaciones) para la programación de aplicaciones. Estas *APIs* proporcionan el acceso a las capacidades de cómputo del nodo sensor, permitiendo obtener inteligencia dentro de la red. Usando estas capacidades, los datos del sensor pueden ser preprocesados en el nodo, optimizando el rendimiento del procesamiento en la red y la vida de las baterías evitando el envío y recepción de mensajes innecesarios.

- ***Xserve: Gateway Server Middleware***

XServe es el componente de software que proporciona una simple *API* para la comunicación Intranet/Internet a las WSN. Debido a los requisitos de bajo consumo de energía y de memoria en las WSN la comunicación es aerodinámica entre los formatos de los mensajes y los protocolos de red. *XServe* se encuentra como el gateway o entrada entre la WSN y las aplicaciones basadas en IPs, tendiendo un eficaz puente entre estos diversos mundos. La integración con los sistemas de monitoreo, control y administración de las WSN hacen que la conexión del mundo físico con el Internet sea una realidad.

La arquitectura de *XServe* proporciona la traducción confiable de los datos de la red de sensores en mensajes de XML para la integración rápida de la aplicación. El interfaz de XML se integra con el servidor de la entrada o gateway de *MoteWorks*TM, proporcionando una interfaz de servicio web estándar.

XServe incluye las capacidades locales de la base de datos para registrar y analizar los mensajes recibidos de la red. A través de interfaces de base de datos estándares de SQL, las aplicaciones realizan el análisis espacial de la red del sensor localmente o remotamente, dando a conocer datos crudos del sensor sobre el ambiente y la red.

- ***MoteView*: Monitoreo y Administración Remota**

MoteView es el interfaz utilizado por el cliente final que permite entregar una solución punto a punto a través de todas las gradas de las redes de sensores inalámbricas. *MoteView* exhibe la información de la red a los usuarios finales, revelando la red entera o los nodos individuales; permite exhibir y analizar la información de la red gráficamente o en formato textual. *MoteView* tiene la capacidad de lectura que permite la visión histórica del estado de la red y en un cierto plazo las lecturas de los sensores, y se basa en el registro de información almacenada en el *XServe*. *MoteView* permite a usuarios finales optimizar la disposición de la red y la configuración, analiza la información del sensor recíprocamente y entonces toma la acción correctiva. *MoteView* proporciona una interfaz para configurar remotamente las motas en la red inalámbrica. Cada nodo se puede poner al día individualmente con la configuración y los parámetros proporcionados por la mota.

En fin *MoteWorks*TM es la plataforma que permite la comunicación punto a punto para la creación de las redes de sensores inalámbricas. Optimizando el procesador del radio, proporciona el software de acoplamiento para el establecimiento de la red, la supervisión del middleware del servidor de entrada o gateway y del cliente y las herramientas de gerencia apoyan la creación de las soluciones confiables, fáciles de utilizar. Liberan a los *OEM* de las complejidades detalladas de diseñar el hardware y el software para la comunicación inalámbrica permitiéndoles centrarse en la adición de diferentes aplicaciones logrando la construcción de soluciones innovadoras de WSN y colocarlas en el mercado rápidamente [45].

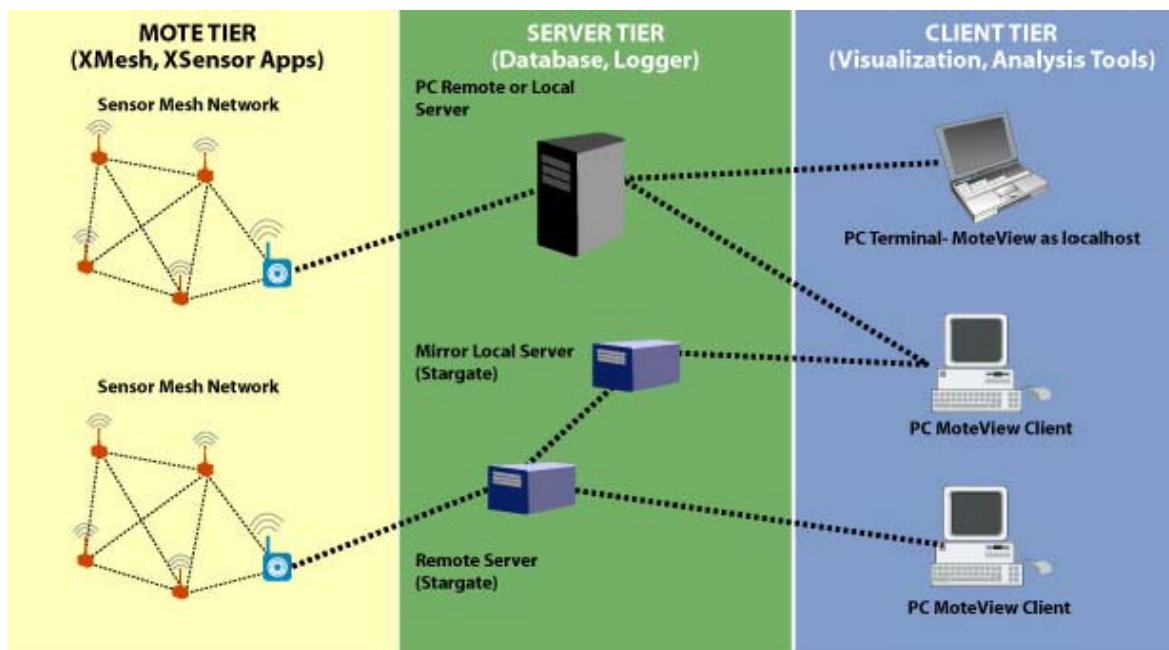


Figura. 7.2. Software de trabajo para una WSN

Todas las herramientas de visualización de *MoteView* requieren ser conectadas con una base de datos. Esta base de datos puede residir en la PC en el localhost, o en un servidor alejado. El tamaño de esta base de datos es limitado por la capacidad de almacenamiento en el sistema. Durante la instalación de *MoteView* una base de datos estática fue incluida para permitir demostrar las características de *MoteView* sin tener que ser conectado con una red de sensores activa o un servidor alejado, esta herramienta de *MoteView* es la que permite realizar nuestra simulación.

7.3.3 Interfaces de simulación de *MoteView*

MoteView tiene cuatro secciones principales de interfaz de usuario:

1. Barra de Herramienta/Menús: Permite que el usuario especifique acciones e inicia diálogos de comando.
2. Lista de nodos: Indica todos los nodos que hay en el despliegue de una red y el estado de los mismos.
3. Lengüetas de visualización: Permite al usuario ver los datos del sensor de varias maneras.
4. Servidor/Mensajes de error: Exhibe un registro de los acontecimientos del servidor y de los mensajes entrantes.

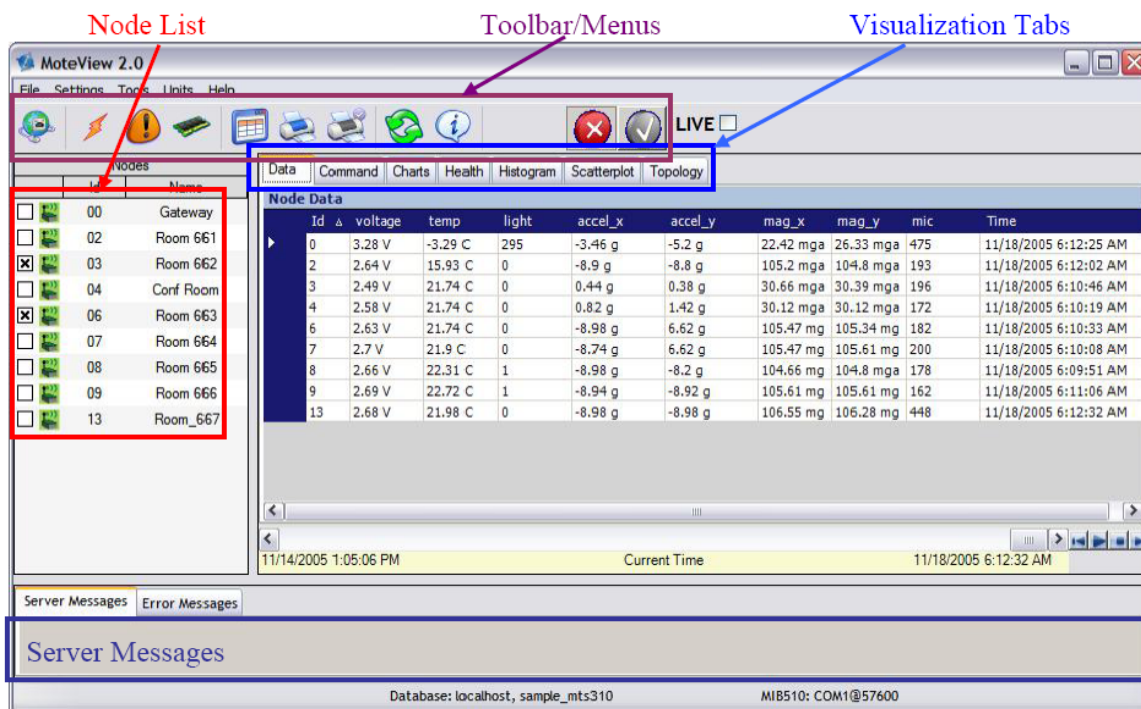


Figura. 7.3. Interfaces de usuarios en MoteView

La lista de nodos exhibe el estado de los nodos en la simulación. Esta sección permite a los usuarios configurar las opciones de visualización de los nodos. El checkbok junto a los nodos permite seleccionar los nodos para ser graficados en las opciones de *Charts/Histogram/Scatterplot*.

Tabla. 7.1. Propiedades de los iconos de la lista de nodos

Icono Lista de Nodos	Descripción
Nodo Gris	Ningún resultado recibido
Nodo Verde	Resultados frescos en el lapso de los últimos 20 minutos
Nodo Mostaza	Resultados antiguos > a 20 minutos
Nodo Amarillo	Resultados antiguos > a 40 minutos
Nodo Naranja	Resultados antiguos > a 60 minutos
Nodo Rojo	Resultados antiguos por mas de un día

El tiempo de intervalos para el cambio de color de los nodos puede ser editado desde el cuadro de dialogo que aparece al dar clic derecho sobre el nodo y se selecciona la opción Health Status Settings.

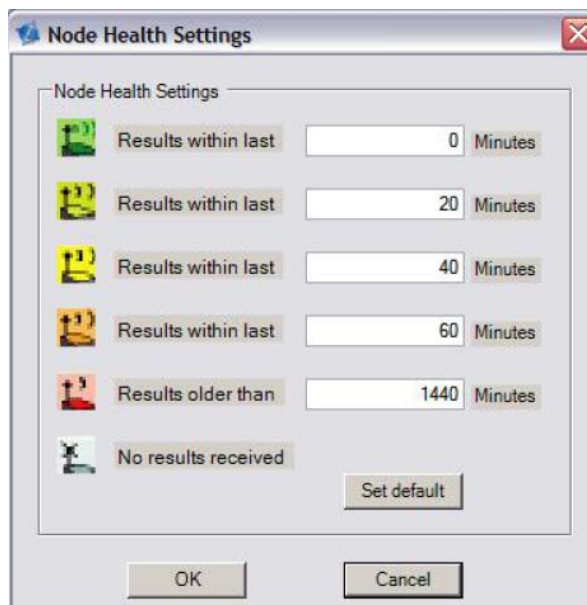


Figura. 7.4. Ventana de configuración de intervalos de tiempos de estados de los nodos

Cinco opciones de visualización presenta la simulación: datos, tablas gráficas, histograma, diagrama de dispersión y topología que proporcionan diversos métodos de ver los datos de los nodos sensores.

- **Datos:** La lengüeta de los datos exhibe las lecturas más recientes del sensor recibidas para cada nodo en la red (véase la Figura. 8.5. para un ejemplo de la base de datos). Las columnas incluyen la identificación del nodo, la fecha y hora y los valores de los paquetes que se encuentran en ese momento en los sensores. Los datos del sensor se convierten automáticamente en unidades estándares de ingeniería. Con un clic izquierdo en la cabecera de cada columna permite clasificar por identificación del nodo, acoplamiento o pareo, temperatura, voltaje, o cualquier otra lectura del sensor. Con un clic derecho sobre cada columna exhibe un menú pop-up con las conversiones de la unidad relevantes al sensor.

Data										
Node Data										
Id	voltage	temp	light	accel_x	accel_y	mag_x	mag_y	mic	Time	
0	3.29 V	-3.64 C	294	-3.52 g	-5.18 g	21.74 mga	26.33 mga	475	14/11/2005 02:00:46 p.m.	
1	2.58 V	25.02 C	543	0.82 g	1.4 g	29.71 mga	29.71 mga	191	14/11/2005 01:05:24 p.m.	
2	2.64 V	19.7 C	982	-8.92 g	-8.82 g	105.74 mg	105.34 mg	201	14/11/2005 01:58:14 p.m.	
3	2.52 V	23.46 C	521	0.42 g	0.4 g	30.25 mga	30.12 mga	215	14/11/2005 01:59:36 p.m.	
4	2.58 V	23.46 C	572	0.82 g	1.4 g	29.85 mga	29.98 mga	179	14/11/2005 02:00:57 p.m.	
5	2.52 V	23.7 C	560	0.44 g	0.4 g	30.25 mga	30.12 mga	209	14/11/2005 01:05:33 p.m.	
6	2.64 V	22.64 C	609	-8.98 g	6.64 g	105.74 mg	105.47 mg	181	14/11/2005 01:58:53 p.m.	
7	2.7 V	23.62 C	794	-8.76 g	6.66 g	105.74 mg	105.88 mg	202	14/11/2005 01:58:18 p.m.	
8	2.66 V	24.61 C	731	-8.98 g	-8.14 g	105.07 mg	105.07 mg	183	14/11/2005 02:00:39 p.m.	
9	2.69 V	24.44 C	618	-8.94 g	-8.92 g	105.74 mg	105.88 mg	169	14/11/2005 01:58:43 p.m.	
13	2.68 V	22.96 C	763	-8.98 g	-8.98 g	106.55 mg	106.28 mg	467	14/11/2005 02:00:41 p.m.	

Figura. 7.5. Pantalla de la base de datos exhibida en la lengüeta de los datos

- **Tabla gráfica:** La lengüeta de la tabla o *chart* proporciona la capacidad de generar gráficos de las lecturas de los sensores de un sistema de nodos. Las características y los apremios siguientes se aplican a los gráficos trazados en esta visión:
 - Hasta 3 tipos de datos de sensores se puede seleccionar para trazar, es decir, 3 diversos gráficos.
 - Hasta 24 diversos nodos se pueden seleccionar para trazar con un visto en las cajas de la lista de los nodos en el lado izquierdo. Un diverso color del diagrama será utilizado para cada nodo; una leyenda se exhibe en el derecho de la ventana.
 - El eje-x en el gráfico demuestra la fecha y la hora.
 - El eje-y en el gráfico demuestra datos en las unidades de las lecturas del sensor.

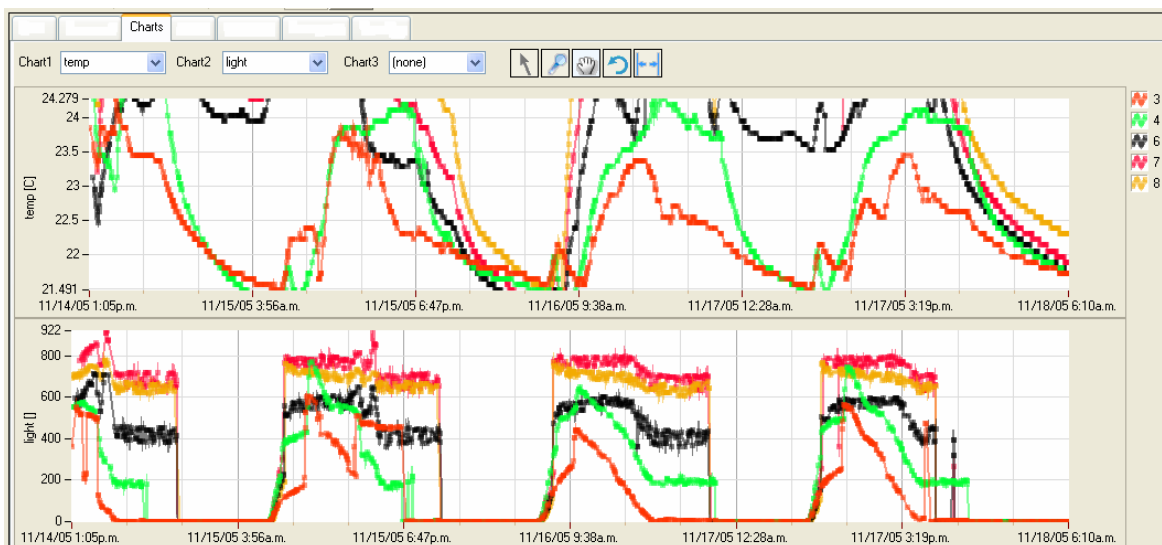


Figura. 8.6. Tabla gráfica

- **Histograma:** La lengüeta del histograma demuestra una barra que resume gráficamente la distribución estadística de los datos del sensor, permitiendo mirar su centro, extensión, oblicuidad, etc. Estas características proporcionan indicaciones fuertes del modelo distribucional apropiado para los datos.
 - Hasta 24 diversos nodos se puede seleccionar para graficar sus datos. Un diverso color del diagrama será utilizado para cada nodo; una leyenda se exhibe en el derecho de la ventana.
 - El eje-x en el gráfico representa las unidades para los valores del sensor.
 - El eje-y indica el porcentaje del valor de las lecturas de los sensores.

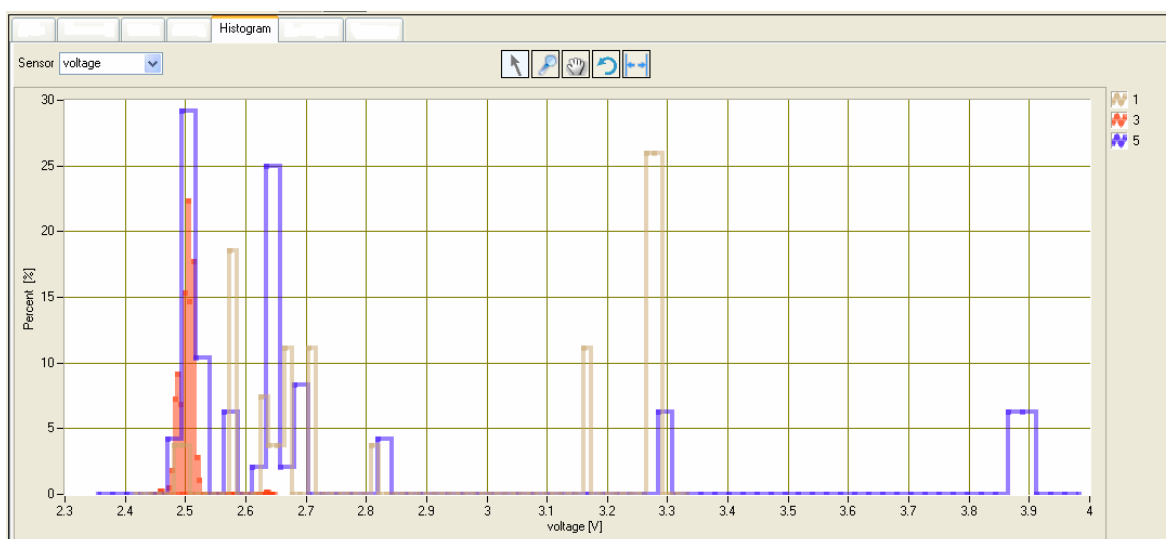


Figura. 7.7. Histograma

- **Diagrama de Dispersión:** La lengüeta del diagrama de dispersión proporciona la capacidad de graficar dos lecturas de los sensores a la vez. El diagrama de dispersión ayudaría a obtener una comparación visual de dos zonas de informaciones del sensor y a ayudar a determinarse qué clase de relación puede haber entre ellas. Los usuarios puede elegir el tipo de variable que se exhibirá en el eje-X y el eje-Y que se graficarán en esta visión.

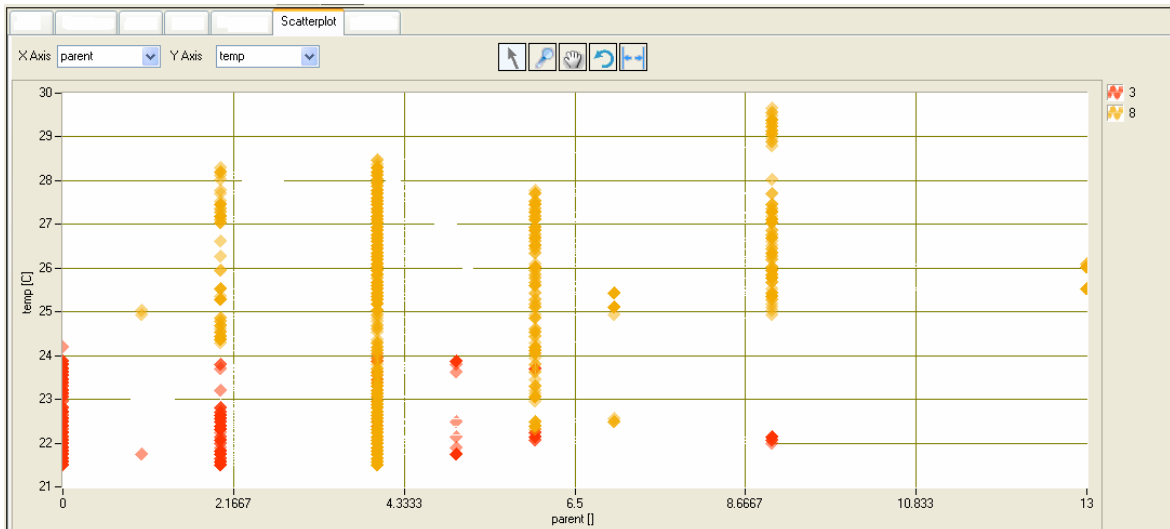


Figura. 7.8. Diagrama de dispersión.

- Topología:** La viñeta de la topología demuestra el mapa de la red de sensores con la información que lee cada sensor en un instante determinado. Esto permite que el usuario defina y vea la topología que despliega la red. El usuario puede arrastrar los nodos y ponerlos en una nueva localización en el mapa con un tecleo izquierdo del ratón. Las localizaciones del nodo se almacenan en la base de datos y son compartidas por todos los usuarios de esa base de datos.

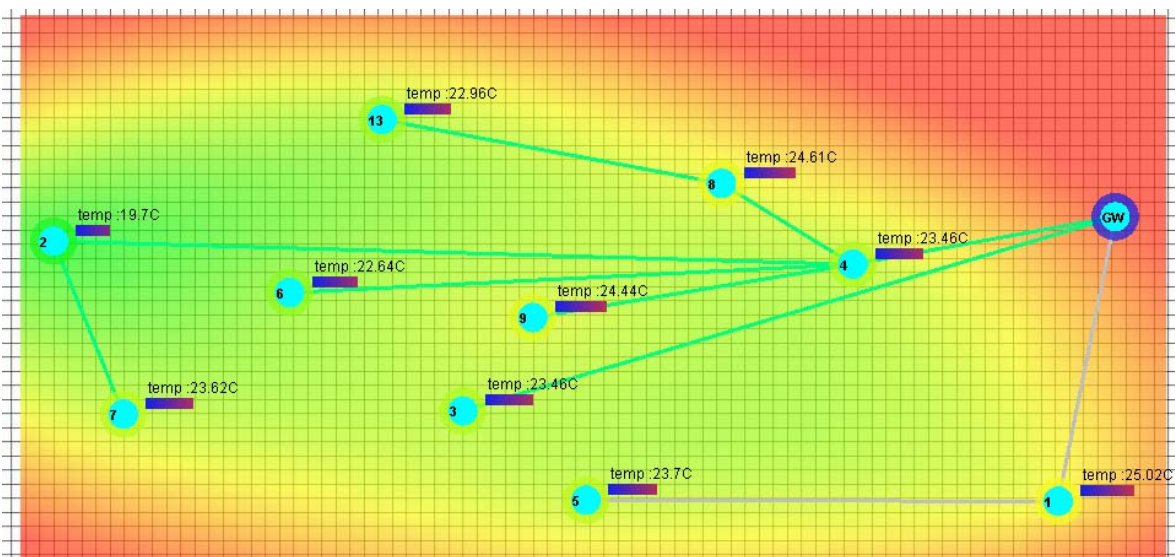


Figura. 7.9. Gráfica de la Topología de Red.

7.3.4 Equipos simulados

Sensor:



Figura. 7.10. Sensor MTS310

Para esta simulación se ha utilizado la placa sensora MTS310 la cual incorpora sensor de luz, sensor de temperatura, sensor magnético, de aceleración, altavoz y micrófono.

Mota:



Figura. 7.11. Mota MICA2

La placa sensora MTS310 soporta las plataformas de Motas siguientes: IRIS, MICAz y MICA2. Son las plataformas sobre las cuales se insertan las placas sensoras. Están dotadas de procesador, memoria flash y chipset ZigBee para comunicación de radio. Llevan incorporado un conector tanto para las placas sensoras como para el programador, así como 3 leds como dispositivos de salida controlados.

Gateway:

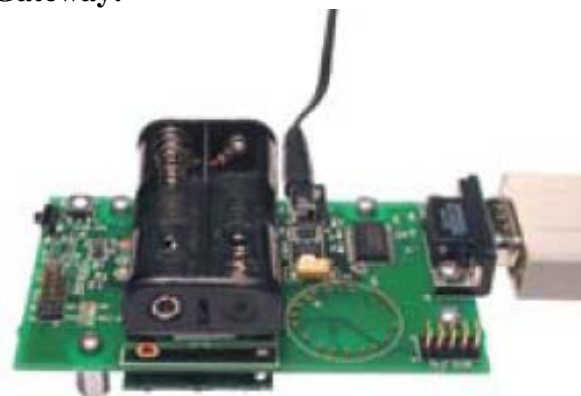


Figura. 7.12. Gateway MIB510

El Gateway se escoge dependiendo del tipo de interfaz con la cual se conecta la PC con la red de sensores, en la simulación se usa el gateway que por defecto viene con el software MoteView, pero para una aplicación práctica existe las siguientes posibilidades:

- MIB510: Para una interfaz a través del puerto serial RS-232.
- MIB520: Para una interfaz por el puerto USB.

- MIB600: Para una interfaz a través del puerto Ethernet o con una tarjeta inalámbrica 802.11 solamente si el MIB600 está en una LAN con el acceso inalámbrico.
- *Stargate* u otro servidor: Para interfaz Ethernet o tarjeta inalámbrica 802.11 únicamente si el Stargate tiene un módem inalámbrico o está en un LAN con acceso wireless, o un módem celular con acceso inalámbrico al Internet.

El gateway conecta al PC a través de la interfaz deseada. Gracias a esta conexión es posible tanto la programación de las motas como la transmisión de información hacia el PC.

ZigBee: ZigBee es un consorcio de compañías de software, hardware y servicio que han desarrollado un estándar común para poner en red, de forma inalámbrica, a sensores y controladores; sus principales características son:

- Se basa en el estándar IEEE 802.15.4 (2003), especificaciones publicadas en el 2005.
- Es un nuevo estándar para redes de telemetría inalámbrica.
- Aplicaciones residenciales e industriales.
- Destacan empresas como *Invensys, Mitdubishi, Philips y Motorota*
- Bajo consumo de potencia: largos periodos de operación de una batería (varios meses y hasta años).
- Bajas tasas de velocidad.
- Bajo costo.
- Corto alcance, 50m típicamente y llegando hasta 200m.
- Hasta 250 kbps y 16 canales.
- Tamaño pequeño de los dispositivos.
- Flexibilidad de sus redes.
- El stack de protocolos soporta redes ad hoc de dispositivos auto organizables en topologías cluster tree, estrella o mesh.

7.3.5 Análisis de Resultados

Para correr la simulación lo primero que se hace es importar una base de datos previamente hecha en SQL (File>Import>Import from SQL). SQL es un lenguaje de comandos genéricos usado para manipular bases de datos generadas en PostgreSQL.

La presente simulación llega a capa dos ya que se ocupa del direccionamiento físico y de la topología de la red, se hace un direccionamiento de los datos en la red desde un emisor a un receptor. Asegura con confiabilidad el medio de transmisión.

En esta simulación no se observa el movimiento real de los nodos lo que se asegura es el enlace físico que permite llevar las lecturas que tiene cada nodo; es decir, se presenta el camino por el que viajan los paquetes el cual varía por diferentes circunstancias como; falta de cobertura del nodo, obstrucción del camino, daño en el nodo, etc. La simulación lleva el monitoreo del terreno con la ayuda de 10 nodos y un gateway que es el que permite la comunicación con la estación base.

Para el análisis de la simulación se va a tomar dos tiempos de referencia:

- **Tiempo 1: 14-11-2005 1:33:05 p.m.**

Debido al gran número de nodos sensores usados en la simulación y a su rango de transmisión limitado por la capacidad limitada de las baterías, da como resultado que no todos los nodos sensores tengan la facilidad de comunicarse directamente con el gateway; por lo cual, el tipo de topología o arquitectura de comunicación usada en la simulación es una combinación entre la arquitectura multi-salto punto a punto y multi-salto basada en clusters. Este tipo de topología permite a la WSN ser escalable; flexible; auto-configurable, es decir, sin intervención humana; auto-curable, capaz de agregar y de quitar nodos de la red automáticamente sin tener que reajustar la red y con enrutamiento dinámico capaz de determinar la mejor ruta basándose los parámetros y condiciones de la red.

Cuando están combinadas con la administración de la energía de las baterías, estas características permiten que las redes de sensores sean duraderas, desplegado facilidad y

resistencia a la comunicación inalámbrica. Con el establecimiento de una red de acoplamiento, la visión de la detección de los nodos sensores se convierte en realidad.

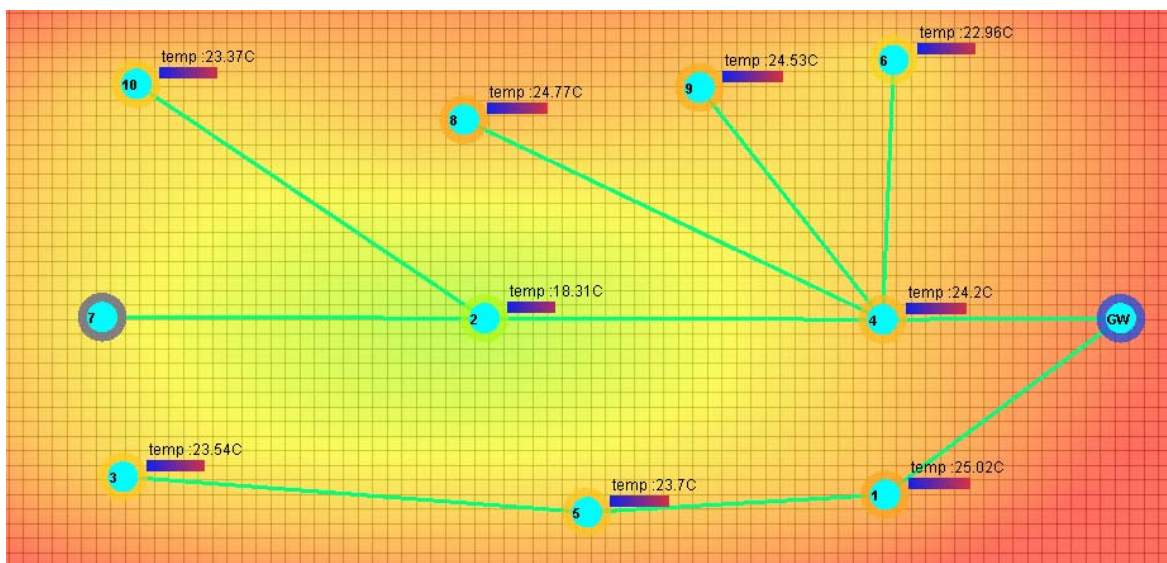
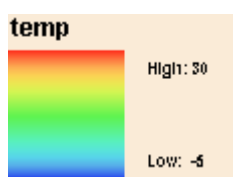


Figura. 7.13. Gráfica de la Topología de Red en el tiempo 1.



Esta escala permite observar como esta asociado un color específico para los valores máximos y mínimos leídos por los sensores; por ejemplo el color rojo representa el valor máximo de temperatura 30 °C y el azul el valor mínimo de temperatura -5 °C.

Figura. 7.14. Escala

En la tabla de datos se obtiene los siguientes resultados:

Id	voltage	temp	light	accel_x	accel_y	mag_x	mag_y	mic	Time
0	3.28 V	-3.52 C	293	-33.908 m/s ²	-49.588 m/s ²	23.36 mgauss	27.41 mgauss	473	14/11/2005 01:32:56 p.m.
1	3.28 V	25.02 C	540	8.036 m/s ²	11.76 m/s ²	43.21 mgauss	43.21 mgauss	312	14/11/2005 01:32:30 p.m.
2	2.64 V	18.31 C	922	-87.416 m/s ²	-86.436 m/s ²	105.47 mgauss	105.07 mgauss	180	14/11/2005 01:31:13 p.m.
3	2.52 V	23.54 C	544	4.312 m/s ²	3.92 m/s ²	30.25 mgauss	30.12 mgauss	212	14/11/2005 01:32:44 p.m.
4	2.58 V	24.2 C	563	8.036 m/s ²	13.72 m/s ²	29.71 mgauss	29.85 mgauss	184	14/11/2005 01:30:52 p.m.
5	2.52 V	23.7 C	560	4.312 m/s ²	3.92 m/s ²	30.25 mgauss	30.12 mgauss	209	14/11/2005 01:32:35 p.m.
6	2.64 V	22.96 C	560	-88.004 m/s ²	65.268 m/s ²	105.74 mgauss	105.61 mgauss	183	14/11/2005 01:31:41 p.m.
8	2.66 V	24.77 C	704	-88.004 m/s ²	-81.928 m/s ²	105.07 mgauss	105.07 mgauss	190	14/11/2005 01:30:20 p.m.
9	2.69 V	24.53 C	603	-87.612 m/s ²	-87.416 m/s ²	105.88 mgauss	105.88 mgauss	168	14/11/2005 01:31:19 p.m.
10	2.68 V	23.37 C	717	-88.004 m/s ²	-88.004 m/s ²	106.69 mgauss	106.42 mgauss	478	14/11/2005 01:32:51 p.m.

Figura. 7.15. Tabla de datos para el tiempo 1.

El nodo 7 no aparece en esta tabla de datos puesto que se encuentra apagado ya que no tiene lectura de ningún dato.

Estos resultados representan a las siguientes líneas de código:

COPY sample_mts310 (result_time, epoch, nodeid, parent, voltage, "temp", light, accel_x, accel_y, mag_x, mag_y, mic)

2005-11-14 13:32:56	\N	0	126	382	192	293	277	197
173	203	473						
2005-11-14 13:32:30	\N	1	0	382	512	540	491	510
320	320	312						
2005-11-14 13:31:13	\N	2	4	474	430	922	4	9
781	778	180						
2005-11-14 13:32:44	\N	3	5	497	494	544	472	470
223	212							
2005-11-14 13:30:52	\N	4	0	485	502	563	491	520
221	184							
2005-11-14 13:32:35	\N	5	1	496	496	560	472	470
223	209							
2005-11-14 13:31:41	\N	6	4	475	487	560	1	783
782	183							
2005-11-14 13:30:20	\N	8	4	471	509	704	1	32
778	190							
2005-11-14 13:31:19	\N	9	4	465	506	603	3	4
784	168							
2005-11-14 13:32:51	\N	10	2	467	492	717	1	1
788	478							

De donde:

- o Variable result_time: representa el tiempo en el cual esta presente un dato en el sensor (ejm. 2005-11-14 13:32:56).

- Variable epoch: es una función propia de Psq y es la que permite convertir la fecha y hora en una secuencia de entrada o *strings* y se representa por el símbolo \N.
- Variable nodeid: representa el nodo que realiza la lectura del sensor o el nodo emisor de datos.
- Variable parent: representa el nodo receptor o el nodo con el cual se establece el enlace de comunicación.
- Variable voltaje: indica el valor de voltaje que tiene presente en ese momento el nodo, en el código fuente aparece en unidades de ingeniería pero en *MoteView* ya permite la visualización de estos valores en voltios.
- Variable temp: indica el valor de temperatura presente en ese instante en el nodo.
- Variable light: indica el valor de luz detectado por el nodo sensor.
- Variable accel_x: indica el valor de la aceleración en el eje X.
- Variable accel_y: indica el valor de la aceleración presente en el eje Y.
- Variable mag_x: representa la cantidad de magnetismo presente en el eje X.
- Variable mag_y : indica la cantidad de magnetismo presente en el eje Y.
- Variable mic: representa un valor aleatorio y viene en unidades de ingeniería.

- **Conversión de unidades de ingeniería a unidades de medida:**

La conversión se realiza por simple inspección y sacando muestra de datos en diferentes tiempos, las ecuaciones que se obtiene son:

- Para el Voltaje:

$$[V] = \frac{x}{[\text{Unidades de ingeniería}]}$$

Donde;

$[V]$ = Unidad de medida del voltaje, el voltio, se obtiene de la tabla de datos de *MoteView*.

$[\text{Unidades de ingeniería}]$ = Lectura que hace el nodo, se obtiene del código fuente.

$$\Rightarrow x = [V] \cdot [\text{Unidades de ingeniería}] = 2.52 \cdot 496 = 1949,92$$

$$\Rightarrow x = 194,92 = \text{variable de conversión}$$

⇒ El voltaje es inversamente proporcional a la unidad de ingeniería correspondiente.

- Para la temperatura y la aceleración no se logra encontrar una ecuación que cumpla con la conversión que se tiene en la simulación ya que existen valores negativos.
- Para la luz y la mic únicamente se expresan los valores en unidades de ingeniería, tanto en el código fuente como en la base de datos del MoteView, no existe ninguna concesión.
- Para el Magnetismo:

$$[mgauss] = x \cdot [\text{Unidades de ingeniería}]$$

$$\Rightarrow x = \frac{[mgauss]}{[\text{Unidades de ingeniería}]} = \frac{29,71}{220} = 0,135$$

Donde;

$[mgauss]$ = Unidad de medida del magnetismo [mili gauss], se obtiene de la tabla de datos de MoteView .

$[\text{Unidades de ingeniería}]$ = Lectura que hace el nodo, se obtiene del código fuente.

$x = 0,135$; variable de conversión ⇒ El magnetismo es directamente proporcional a su unidad de ingeniería.

- **Tiempo 2:** 18-11-2005 05:16:25 a.m.

Topología:

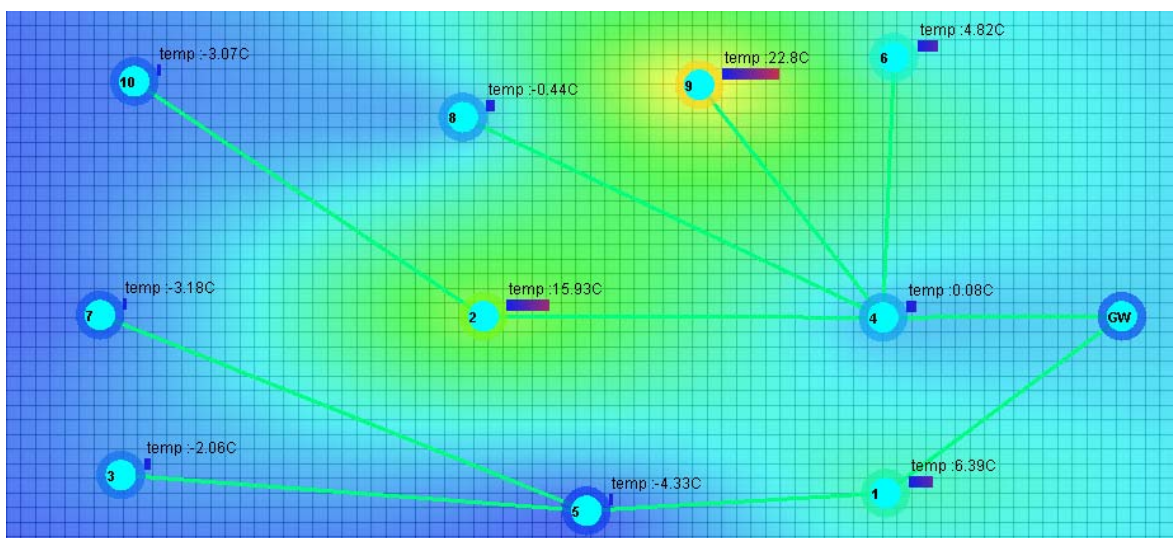


Figura. 7.16. Topología para el tiempo 2.

La topología es una combinación de una arquitectura multi-salto punto a punto y multi-salto basado en clusters, la mayoría de los nodos tienen lecturas negativas por lo cual se observa que las zonas de cobertura tienen color azul.

Tabla de datos:

Data	Command	Charts	Health	Histogram	Scatterplot	Topology					
Node Data											
	Id	voltage	temp	light	accel_x	accel_y	mag_x	mag_y	mic	Time	
▶	0	3.28 V	-3.41 C	293	-3.42 g	-5.06 g	22.15 mga	27.01 mga	476	18/11/2005 05:16:16 a.m.	
	1	3.15 V	6.39 C	292	-1.52 g	-1.14 g	21.74 mga	26.47 mga	475	18/11/2005 05:15:39 a.m.	
	2	2.64 V	15.93 C	0	-8.92 g	-8.8 g	105.2 mga	104.8 mga	192	18/11/2005 05:14:57 a.m.	
	3	2.52 V	-2.06 C	363	0.42 g	0.4 g	30.25 mga	30.12 mga	207	18/11/2005 05:16:10 a.m.	
	4	2.56 V	0.08 C	373	0.62 g	0.8 g	31.6 mgau	32.82 mga	257	18/11/2005 05:16:09 a.m.	
	5	2.52 V	-4.33 C	360	0.44 g	0.4 g	30.25 mga	30.12 mga	209	18/11/2005 05:16:04 a.m.	
	6	2.63 V	4.82 C	0	-8.98 g	6.62 g	105.47 mg	105.34 mg	182	18/11/2005 05:15:17 a.m.	
	7	3.28 V	-3.18 C	292	-3.52 g	-5.14 g	21.74 mga	26.47 mga	475	18/11/2005 05:15:47 a.m.	
	8	2.66 V	-0.44 C	1	-8.98 g	-7.56 g	104.66 mg	104.8 mga	184	18/11/2005 05:15:25 a.m.	
	9	2.69 V	22.8 C	0	-8.94 g	-8.92 g	105.61 mg	105.61 mg	165	18/11/2005 05:13:25 a.m.	
	10	2.68 V	-3.07 C	0	-8.98 g	-8.98 g	106.55 mg	106.15 mg	343	18/11/2005 05:14:59 a.m.	

Figura. 7.17. Tabla de datos para el tiempo 2.

La tabla de datos anterior se basa en el siguiente código fuente:

2005-11-18 05:16:16 \N	0	126	382	193	293	279	197	164
	200	476						
2005-11-18 05:15:39 \N	1	0	398	290	292	374	393	161
	196	475						
2005-11-18 05:14:57 \N	2	4	474	220	0	4	10	779
	776	192						
2005-11-18 05:16:10 \N	3	5	496	205	363	471	470	224
	223	207						
2005-11-18 05:16:09 \N	4	0	490	225	373	481	490	234
	243	257						
2005-11-18 05:16:04 \N	5	1	496	185	360	472	470	224
	223	209						
2005-11-18 05:15:17 \N	6	4	476	273	0	1	781	781
	780	182						

2005-11-18 05:15:47 \N	7	5	382	195	292	274	193	161
	196	475						
2005-11-18 05:15:25 \N	8	4	471	220	1	1	72	775
	776	184						
2005-11-18 05:13:25 \N	9	4	465	485	0	3	4	782
	782	165						
2005-11-18 05:14:59 \N	10	2	468	196	0	1	1	789
	786	343						

Tabla gráfica:

A continuación se presenta la gráfica de las lecturas de temperatura, voltaje y luz de los nodos 1 y 5 en todo el lapso de tiempo del monitoreo.

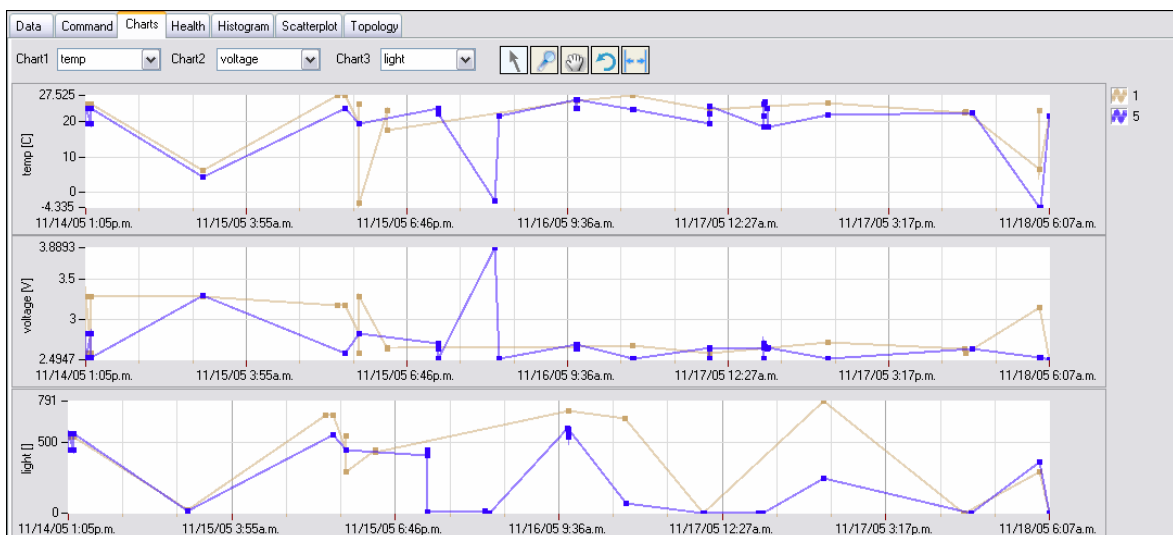


Figura. 7.18. Gráficas de las variables temperatura, voltaje y luz de los nodos 1 y 5.

Histograma:

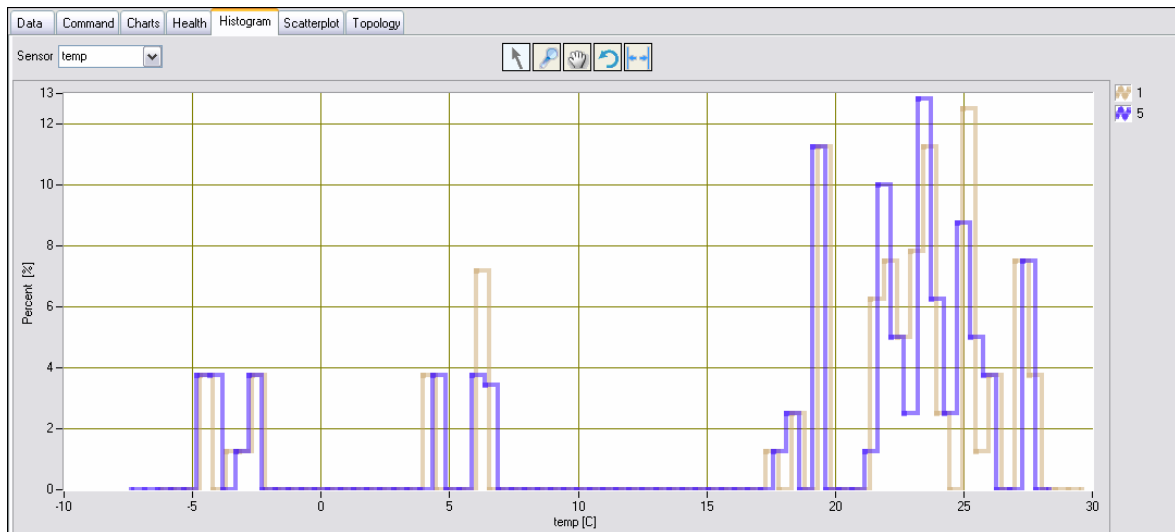


Figura. 7.19. Histograma de los nodo 1 y 5.

La anterior figura indica el histograma de las lecturas de temperaturas leídas por los sensores 1 y 5 en porcentaje.

Diagrama de dispersión:

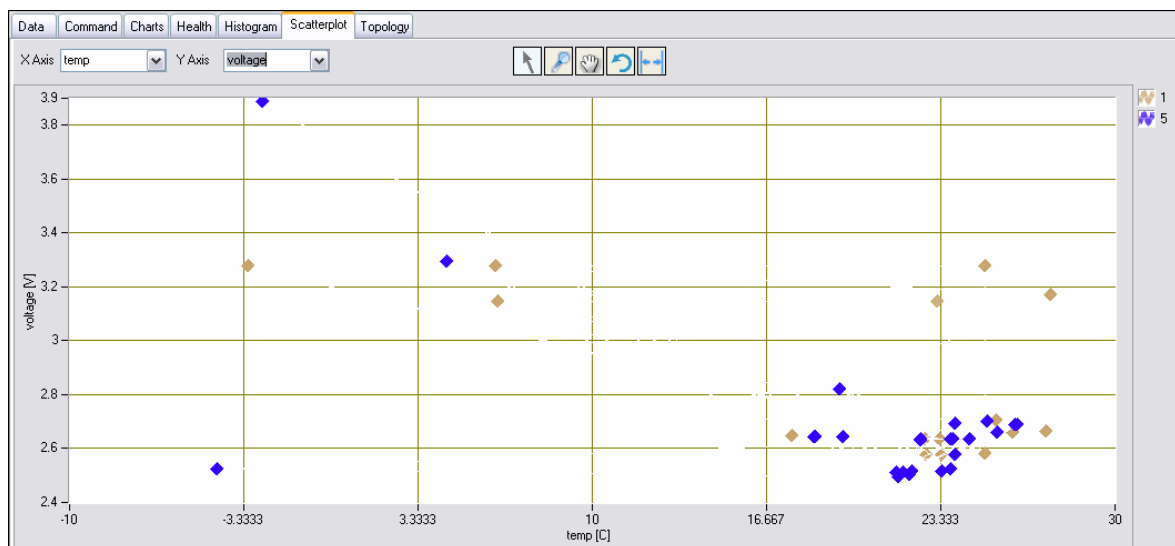


Figura. 7.20. Diagrama de Dispersión de los nodo 1 y 5.

En la anterior figura se indica la relación que existe entre los valores de voltaje y temperatura de los nodos 1 y 5.

CAPITULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

8.1 CONCLUSIONES

- El advenimiento de la tecnología ha facilitado el desarrollo de sistemas de redes con dispositivos pequeños de bajo consumo de energía, que combinan la computación programable con múltiples detecciones de sensado y la capacidad de comunicación inalámbrica. Las aplicaciones de estas redes han encajado nodos sensores en ambientes físicos para facilitar el acoplamiento, la adquisición de nueva información y las capacidades de procesamiento. El número de nodos sensores y las dinámicas de sus ambientes de funcionamiento plantean desafíos únicos en cómo adquirir la información, almacenarla dentro de una red de sensores y enviarla hacia clientes externos o estaciones bases para su análisis.
- Las redes de sensores se han hecho realidad al converger la tecnología de los sistemas micro-electromecánicos MEMS, las comunicaciones inalámbricas y la electrónica digital.
- Una red de sensores inalámbrica consiste de un gran número de nodos sensores autónomos que llevan a cabo varias tareas de detección y de control, las cuales están enlazadas por un medio inalámbrico. En general, un nodo sensor es un dispositivo capaz de capturar información física, como temperatura, presión, movimiento de un objeto, y volver esas características físicas del ambiente en medidas cuantitativas. Las WSN se están convirtiendo de simples redes con pequeños números de nodos sensores, en diversas formas que contienen crecientes números de nodos distribuidos con funciones enriquecidas. Las WSN han revelado

un potencial significativo al proveer ambientes más seguros y sanos para los seres humanos y así han atraído mucha atención de la industria en los recientes años.

- La administración de WSNs es una nueva área de investigación que recientemente está empezando a recibir la atención necesaria por parte de la comunidad de investigadores. El fundamental aspecto acerca de la administración de las WSNs concierne en como dicha administración promueve recursos de productividad y calidad de servicio. Además, un aspecto importante, es el impacto que tiene la administración de los servicios sobre el tiempo de vida de la red, la latencia, el procesamiento y el área de cobertura. El punto más importante en el que hay que enfatizar es que la introducción de la administración genera un costo, el cual debe de ninguna forma afectar el comportamiento de la red. De hecho, la meta es conseguir grandes ventajas con la implementación de una administración de recurso de red compensando los gastos indirectos que se introduce al usar dicha administración. Otro aspecto interesante es que el esquema de administración que se elegirá depende fundamentalmente al tipo de aplicación de la WSN.
- Se examinó y analizó las arquitecturas y requisitos para la organización de una red de sensores, específicamente, las características más comunes de las redes de sensores inalámbricos involucradas en el desarrollo de la arquitectura de red apropiada. El análisis ha sido conducido en tres niveles de abstracción: subsistema, nodo individual y, la red. Los objetivos principales de diseño y tendencias actuales, así como sus ventajas relativas y limitaciones, fueron definidos. La arquitectura de los nodos sensores fue presentada y la estructura general de las redes de sensores fue ilustrada; la arquitectura de organización de comunicación de las redes de sensores fue discutida así como las arquitecturas correspondientes a la diseminación de información; y se concluye que la arquitectura de una WSN generalmente va ser dinámica y estará ligada directamente con la aplicación que se de a la red.
- Con respecto a la topología de la red y debido a sus consideraciones de eficiencia de energía, la comunicación multi-salto es usada como el modo de comunicación principal en redes de sensores, mientras que el modo jerárquico, basado en grupos de sistema de redes de multi-salto o multi-salto basado en clusters es descrito como

el modo operacional para ocuparse de asuntos asociados con problemas de dimensionalidad, especialmente en los sistemas de sensores de gran escala. Debido a que una red de sensores es más orientada a la información que las redes inalámbricas tradicionales con fines específicos, la estrategia de fusión de datos juega un papel importante en el diseño de la red. Varias estrategias de fusión/diseminación de datos fueron discutidas y fueron desde métodos de centralización métodos locales/distribuidos y proveyeron diversos intercambios entre precisión, costo de comunicación, y costo de computación/procesamiento.

- El ruteo en las redes de sensores es una nueva área de investigación, con limitados pero rápidamente crecientes resultados en grupos de investigación. Ellas tienen como objetivo común el tratar de extender el tiempo de vida de la red de sensores. Después de todo, las técnicas de ruteo se clasifican basadas en la estructura de la red en tres categorías: ruteo simple, jerárquico y adaptable. Adicionalmente, estos protocolos pueden ser clasificados de acuerdo a técnicas de ruteo por rutas múltiples, por consultas, o por negociación dependiendo de la operación del protocolo. Aunque muchas de estas técnicas de ruteo parecen prometedoras, muchos retos en las redes de sensores deben ser resueltos aun; tendencias futuras en las técnicas de ruteo en las WSN se encaminan a diferentes direcciones, pero todas comparten el objetivo común de prolongar el tiempo de vida de la red.
- Las redes de sensores son considerablemente diferentes de las redes de datos tradicionales; la principal diferencia se da en que las redes de sensores tienen restricción de energía, cómputo, almacenaje, y apremios de ancho de banda. El problema principal del recurso en tales redes es la energía porque éstas son redes desatendidas y los nodos no pueden tener fuentes de energía recargables. La energía es tan importante como los algoritmos usados para el funcionamiento de la red ya que deben ser cortos, exactos y permitan el ahorro de energía, prolongando el tiempo de vida operacional de la red. Los nodos sensores tienen restricciones fuertes de hardware y software en términos de energía de procesamiento, capacidad de memoria, curso de vida de la batería, y rendimiento del proceso de comunicación.

- La cobertura de los sensores es un elemento importante para la QoS en las aplicaciones de las WSN. La cobertura es generalmente asociada con la eficiencia de energía y la conectividad de la red, dos propiedades importantes de las WSN. Para acomodar una WSN grande con recursos limitados y topología dinámica, los protocolos y algoritmos de control de cobertura se ejecutan mejor si son distribuidos y localizados.
- Las redes de sensores inalámbricas tienen usos emocionantemente numerosos, en virtualmente todos los campos de la ciencia e ingeniería, incluyendo cuidado de la salud, industria, en lo militar, seguridad, ciencia ambiental, geología, agricultura, y estudios sociales, monitorización de ecosistemas, control de climatización en edificios. También, pueden ser aplicados a casi cualquier entorno, especialmente aquellos en los que los sistemas de sensores conectados convencionales son imposibles o no están disponibles, tales como en terrenos no hospitalarios, campos de batalla, espacio exterior, o en la profundidad de los océanos.
- La simulación se realiza bajo la plataforma de MoteView que ha sido diseñado para hacer de interfaz entre el usuario y una red de sensores inalámbricos en funcionamiento. MoteView proporciona a los usuarios las herramientas para simplificar el despliegue y monitorización. La simulación se proporciona debido a la facilidad que presenta el software MoteView de conectarse a una base de datos, para poder analizar y hacer gráficas a partir de las lecturas de los sensores.
- MoteView como cualquier solución de simulación, realiza ciertas asunciones: MoteView no modela el mundo real. Proporciona abstracciones de ciertos fenómenos del mundo real (por ejemplo, topología de red, cobertura de la red, establecimiento de enlaces de comunicación, etc.). Los resultados de MoteView son válidos para comparar arquitecturas análisis de datos a partir de las lecturas hechas por los nodos sensores en un determinado tiempo. Todas las señales de radio en la red tienen la misma fuerza. MoteView se centra a la simulación a nivel de aplicación real, no tanto a nivel de protocolos. MoteView soporta todas las tarjetas sensoras y de adquisición de datos del fabricante Crossbow.

8.2 RECOMENDACIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

- Estamos ante una tecnología bastante reciente, para la cual existe mucho diseño pero poca implementación, aun no se halla una tendencia clara de sistemas operativos y plataformas de hardware, provocando una falta de estándares y protocolos comunes.

- Hay mucho por hacer a todos los niveles:
 - Físico: sensores más pequeños y con capacidad de procesamiento mayor.
 - Software: sistemas operativos, algoritmos distribuidos, middleware, etc.
 - Comunicación: protocolos de enrutamiento, mantenimiento de topología, descubrimiento de vecinos, etc.

- La redes sensoriales inalámbricas proponen muchos desafíos para su investigación:
 - Capacidad de comunicación con ancho de banda limitado.
 - Eficiencia energética vs. Retardo.
 - Limitación en el tamaño del buffer.
 - Soporte de múltiples tipos de tráfico.
 - Maximizar el tiempo de vida de la red al mismo tiempo que la aplicación cumpla con requisitos de QoS.
 - Fallos en la topología, conectividad, particiones en la WSN, movilidad de los nodos, etc.
 - Requisitos de adaptabilidad y flexibilidad.
 - Dinamismo de la red.
 - Capacidad de manejar recursos limitados de los nodos sensores.
 - Algoritmos distribuidos donde todos los nodos sean capaces de cooperar para elaborar una respuesta, tomando en cuenta las capacidades de los nodos (por ejemplo energía).
 - Heterogeneidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ephremides, A, “Energy concerns in wireless networks”, *IEEE Mag. Wireless Commun*, 9, 48-59, Aug. 2002.
- [2] Ruiz, L.B., Nogueira, J.M.S., Loureiro, A.A.F., “MANNA: a management architecture for wireless sensor networks”, *IEEE Commun. Mag.*, 41(2), 116-125, Feb. 2003.
- [3] Hong, X., Gerla, M., Wang, H., and Clare, L., “Load balanced, energy-aware communications for Mars sensor networks”, *IEEE Aerospace Conf*, 3, 1109-1115, 2002.
- [4] George, V. et al., “The design of a low-energy FPGA”, in *Proc. ISLPED*, 1999.
- [5] Ilyas, Mohammad, Mahgoub, Imad, “Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems”; EUA, 2005.
- [6] Heinzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H. “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks”, *Proc. 33rd*, Hawaii.
- [7] Escolar Díaz, M. Soledad, WIRELESS SENSOR NETWORKS: Estado del Arte e Investigación, http://arcos.inf.uc3m.es/~sescolar/index_files/presentacion/wsn.pdf, Marzo 2007.
- [8] Shen, C-C., Srisathapornphat, C. and Jaikaeo, C., “Sensor information networking architecture and applications”, *IEEE Personal Commun.*, 52-59, August 2001.
- [9] Savvides, A., Han, C., and Srivastava, M., “Dynamic fine-grained localization in ad hoc networks of sensors”, *Proc. ACM MobiCom 01*, 166-179, Rome, July 2001.
- [10] Sankarasubramaniam, Y., Akan, O.B., and Akyildiz, I.F., “ESRT: event to sink reliable transport for wireless sensor networks. Proc. ACM MOBIHOC 2003”, 177-188, Annapolis, MD, June 2003.

- [11] Wan, C.Y., Campbell, A.T., and Krishnamurthy, L., “PSFQ: a reliable transport protocol for wireless sensor networks, Proc. WSNA 2002”, Atlanta, GA, September 2002.
- [12] [Heinzelman, W., Kulik, J., and Balakrishnan, H., “Adaptive protocols for information dissemination in WSN”, *Proc. 5th ACM/IEEE Mobicom Conf. (MobiCom’99)*, Seattle, WA, August, 1999. 174-185.
- [13] E. Shih et al., “Physical layer driven protocols and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks”, *ACM/IEEE MOBICOM’01*, 272-287, Italy, July 2001.
- [14] Romero Corral, Víctor Hugo, y Aguilar Noriega, Leocundo, Gateway para Redes de Sensores Inalámbricas y Redes 802.11b, Zacatecas, Zac, Abril 5 — 7, 2006.
- [15] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, “Difusión directa para redes sensoriales inalámbricas”, *IEEE/ACM Trans. Networking*, 11(1), 2-16, 2003.
- [16] K. Sohrabi and J. Pottie, “Protocols for self-organization of a wireless sensor network”, *IEEE Personal Comm.*, 7(5), 16-27, 2000.
- [17] S. Lindsey and C. Raghavendra, “PEGASIS: power – efficient gathering in sensor information systems”, *Int. Conf. Communication Protocols*, 149-155, 2001.
- [18] A. Manjeshwar and D.P. Agarwal, “TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks”, in *1st Int. Workshop Parallel distributed Computing Issues Wireless Networks Networks Mobile Computing*, April 2001.
- [19] A. Manjeshwar and D.P. Agarwal, “APTEEN: a hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks”, *Parallel Distributed Process. Symp., Proc. Int., IPDPS 2002*, 195-202.
- [20] V. Rodoplu and T.H. Meng, “Minimum energy mobile wireless sensor networks”, *IEEE JSAC*, 17(8), Aug. 1999, 1333-1344.
- [21] L. Li and J.Y. Halpern, “Minimum energy mobile wireless networks revisited”, *ICC’01*, Helsinki, Finland, 37-78, June 2001.

- [22] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing", *IEEE/ACM MobiCom*, Rome, 70-80, July 16-21, 2001.
- [23] J. Al-Karaki and A. Kmal, "On the optimal data aggregation and in network processing based routing in wireless sensor network technical report", *Iowa State University*, 2003.
- [24] Q. Li, J. Aslam, and D. Rus, "Hierarchical power-aware routing in sensor networks", in *Proc. DIMAS Workshop Pervasive Networking*, May, 2001.
- [25] J. Kulik, W.R. Heinzelman, and H. Balakrishnan, "Negotiation-based protocols for disseminating information in WSN", *Wireless Networks*, 8, 169-185, 2002.
- [26] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, and D. Estrin, "Highly resilient, energy-efficient multipath routing in WSN", *ACM Mobil Computing Commun. Rev.*, 5(4), October 2001.
- [27] S. Meguerdichian, F. Koushanfar, G. Qu, and M. Potkonjak, Exposure in wireless ad hoc sensor networks, *Proc. 7th Annu. Int. Conference Mobile Computing Networking (MobiCom'01)*, 139-150, July 2001.
- [28] Zhang, H. and Hou, J.C., "Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks technical report UIUC", *UIUCDCS-R-2003-2351*, June 2003.
- [29] Kar, K. and Banerjee, S., "Node placement for connected coverage in sensor networks", *Proc. WiOpt 2003*; "Modeling Optimization Mobile, ad hoc Wireless Networks", March 2003.
- [30] Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Potkonjak, M. and Srivastava, M., "Coverage problems in wireless ad hoc sensor networks", *IEEE Infocom 2001*, 3, 1380-1387, April 2001.
- [31] Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Qu, G. and Potkonjak, M., "Exposure in wireless ad hoc sensor networks", *Proc. 7th Annu. Int. Conference Mobile Computing Networking (MobiCom'01)*, 139-150, July 2001.
- [32] Enge, P. and Misra, P., "Special issue on GPS: the global positioning system", *Proc. IEEE*, 87, 3-15, 1999.

- [33] Liao, W. H., Tseng, Y. C., Lo, K. L., and Sheu, J. P., "GeoGRID: a geocasting protocol for mobile ad hoc networks based on GRID", *J. Internet Technol.*, 1(2), 23-32, 2000.
- [34] Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D., and Anderson, J., "Wireless sensor networks for habitat monitoring", *ACM WSNA '02*, 88-97, Atlanta, Septiembre, 2002.
- [35] University of Melbourne's 'Smart' water systems to improve irrigation in Victoria, http://uninews.unimelb.edu.au/articleid_3151.html, 9 February 2006, Junio 2007.
- [36] Easton, M., "Using space technology to fight malaria", *Queen's Gazette*, 13, April 7, 2003.
- [37] Fields, Scott, Smart Pill to Report from Inside the Body, http://www.livescience.com/humanbiology/060626_smart_pill.html, 26 June 2006, Junio 2007.
- [38] Schwiebert, L., Gupta, S.K.S. and Weinamann, J., "Research challenges in wireless networks of biomedical sensors", *ACM SIGMOBILE 2001*, 151-165, Roma, Julio 2001.
- [39] Goldsmith, A. J. and Wicker, S.B., "Desing challenges for energy-constrained and-hoc wireless networks", *IEEE Wireless Commun.*, 8-27, August 2002.
- [40] Havinga, Paul, Collaborative Sensor Networks, <http://www.home.cs.utwente.nl/~havinga/sensor.html> , Junio 2007.
- [41] Smoke Net, <http://fire.me.berkeley.edu/smokeNet.html>, Junio 2007.
- [42] The Cricket Indoor Location System, <http://nms.lcs.mit.edu/projects/cricket>, Junio 2007.
- [43] Study Site Descriptions, http://www.its.dot.gov/jpodocs/repts_te/14318_files/study_site_desc.htm, Junio 2007.
- [44] Srivastava, M., Muntz, R. and Potkonjak, M., "Smart kindergarten: sensor-based wireless networks for smart developmental problem- solving environments", *ACM MOBICOM 2001*, 132-138, Italy, July 2001.
- [45] Crossbow, <http://www.xbow.com/home/homepage.aspx>, Julio 2007.

ACTA DE ENTREGA

El proyecto de grado “**ESTUDIO DE LAS REDES SENSORIALES COMO UNA NUEVA ALTERNATIVA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA**”, fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica, Carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército.

Sangolquí, _____

ELABORADO POR:

Sr. Edgar Javier Cobos Hernández

AUTORIDADES:

Ing. Gonzalo Olmedo
Coordinador de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones