



ARQUITECTURA DE REDES DE SENSORES INALAMBRICAS WSNs:
ESTADO DEL ARTE

LILIANA ESPERANZA BAUTISTA TORRES

CAROLINA MELISSA GÓMEZ LÓPEZ

Trabajo de monografía presentado a
la Facultad de Ingeniería Electrónica
como requisito parcial para optar al título de
ESPECIALISTA EN TELECOMUNICACIONES

ING. RAUL RESTREPO
ASESOR

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
BUCARAMANGA
2008

ARQUITECTURA DE REDES DE SENSORES INALAMBRICAS WSNs: ESTADO DEL ARTE

Todo el trabajo descrito en este documento es de la autoría de los abajo firmantes y fue realizado bajo la dirección del tutor asignado, excepto donde se han hecho referencias al trabajo de otros.

Liliana Esperanza Bautista Torres

Carolina Melissa Gómez López

Certificado de aprobación:

Fecha

Los abajo firmantes certificamos haber leído este trabajo de investigación dirigida y que, en nuestra opinión, es totalmente adecuado, en calidad y nivel de profundidad, para optar al título de tecnólogo.

(firma)

Nombres y apellidos asesor
Programa

Cargo
Área
Facultad

(firma)

Nombres y apellidos Jefe del

Cargo
Facultad

Nombres y apellidos Jefe del Departamento
de Promoción y Desarrollo Académico
Cargo

Nombres y apellidos del usuario
Cargo

A dios de la vida, la luz infinita que ilumina nuestras mentes y nuestras almas.

*A nuestros padres, quienes son una verdadera
e inagotable fuente de inspiración.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiéramos agradecer a nuestras familias, la familia Bautista Torres y la Familia Gómez López, por su incondicional apoyo a través de todo este proceso; sin su energía, colaboración, paciencia y ánimo el desarrollo de nuestra investigación no habría tenido éxito.

Asimismo, al personal de la institución *Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga*, pero principalmente a los profesores de la especialización, por todos sus aportes recibidos durante la formación académica.

Merecen también de toda nuestra gratitud aquellas personas que nos apoyaron e impulsaron a completar nuestra investigación: nuestros queridos amigos.

CONTENIDO

TABLA DE ILUSTRACIONES	8
1. INTRODUCCIÓN	11
CAPITULO 1	13
GENERALIDADES	13
1.1 Redes de comunicación	13
1.1.1 Topologías de Red.	13
1.1.2 Protocolos de comunicación y enrutamiento.	15
1.1.3 Administración de Potencia.	18
1.1.4 Estructuras de Red y Redes jerárquicas.	19
1.1.5 Desarrollos históricos y estándares.	22
CAPITULO 2	24
APLICACIONES	24
2.1 Ejemplos de aplicación	24
2.1.1 Aplicaciones de ayuda a desastres.	24
2.1.2 Control del ambiente y mapeo de biodiversidad.	25
2.1.3 Edificios Inteligentes.	25
2.1.4 Vigilancia y Mantenimiento Preventivo.	26
2.1.5 Agricultura.	26
2.1.6 Medicina y Cuidado de la Salud.	26
2.1.7 Logística.	26
2.1.8 Telemática.	27
2.2 Tipos de Aplicaciones	28
2.2.1 Detección de Eventos.	28
2.2.2 Medidas Periódicas.	28
2.2.3 Función de aproximación y detección de límites.	28
2.2.4 Rastreo.	29
3 CAPITULO 3	30
4 CARACTERÍSTICAS DE LAS WSNs	30
3.1 Requerimientos	30
3.1.1 Tipo de servicio.	30
3.1.2 Calidad de Servicio.	31
3.1.3 Tolerancia a Errores.	31
3.1.4 Tiempo de vida.	31
3.1.5 Escalabilidad.	32

3.1.6	Gran rango de densidad.	32
3.1.7	Programabilidad.	32
3.1.8	Mantenimiento.	32
3.2	Mecanismos Requeridos.	32
3.2.1	Comunicación Inalámbrica Multisaltos.	33
3.2.2	Operación de Energía Eficiente.	33
3.2.3	Auto-configuración.	33
3.2.4	Colaboración y Procesamientos en red.	33
3.2.5	Data Centric.	33
3.2.6	Localidad.	34
3.2.7	Uso de intercambios.	34
3.3	Redes Ad hoc móviles y Redes de sensores inalámbricas	34
3.3.1	Aplicaciones y equipos.	35
3.3.2	Aplicaciones específicas.	36
3.4	IEEE 1451 y Sensores inteligentes	39
	Sensores inteligentes y Sensores virtuales	39
	CAPITULO 4	41
	ARQUITECTURA DEL NODO SENSOR	41
4.1	Plataforma hardware	42
4.1.1	Controlador.	43
4.1.2	Memoria.	44
4.1.3	Sensores y actuadores.	44
4.1.4	Dispositivo de comunicación.	45
4.1.5	Suministro de energía del nodo sensor.	47
4.2	Ejemplo de nodos de sensores	49
4.2.1	La familia "Mica Mote".	49
4.2.2	Los nodos EYES.	51
4.2.3	Scatterweb.	51
	CAPITULO 5	53
	ARQUITECTURA DE LA RED DE SENSORES INALAMBRICAS	53
5.1	Escenarios de red de sensores	54
5.2	Redes solo salto versus multisalto	54
5.3	Múltiples nodos recolectores y nodos fuentes	55
5.4	Tres tipos de movilidad	56
5.5	Principios de diseño para WSNs	58
5.5.1	Organización distribuida.	59
5.5.2	Procesamiento en la red.	59
5.5.3	Agregación.	59
5.5.4	Fuente de codificación y compresión distribuida.	60
5.5.5	Procesamiento de señal colaboradora y distribuida.	61
5.5.6	Redes basadas en agentes o códigos móviles.	62
5.5.7	Fidelidad y exactitud adaptables.	62
5.5.8	Data centric.	63
5.5.9	Información de ubicación.	63
5.5.10	Patrones de actividad.	63
5.5.11	Heterogeneidad.	63

6. CONCLUSIONES	65
7. ABREVIATURAS	66
8. REFERENCIAS	67
9. BIBLIOGRAFÍA	68

TABLA DE ILUSTRACIONES

<i>Figura 1 Red de Sensores Inalámbrica</i>	11
<i>Figura 2 Topologías de Redes Básicas</i>	14
<i>Figura 3 Topología en Anillo de cura propia.</i>	15
<i>Figura 4 Encabezado de un mensaje Ethernet</i>	15
<i>Figura 5 Modelo de Referencia OSI</i>	17
<i>Figura 6 Generador de potencia - MEMS</i>	19
<i>Figura 7 Enrutamiento multicast</i>	20
<i>Figura 8 Construcción de dos redes en malla.</i>	20
<i>Figure 9 Reduciendo complejidad de Redes en Malla</i>	21
<i>Figure 10 Diferentes aplicaciones de la red de sensores inalámbricas</i>	27
<i>Figure 11 Figura Modelo de una red Ad-Hoc</i>	35
<i>Figure 12 Modelo general de un sensor inteligente. IEEE 1451</i>	40
<i>Figure 13 Vista general de un nodo sensor.</i>	41
<i>Figure 14 Componentes principales de un nodo sensor</i>	43
<i>Figure 15 Diagrama general del extremo frontal RF</i>	47
<i>Figure 16. Tabla 1. Densidades de energía de baterías de macroescala</i>	48
<i>Figure 17. Tabla 2. Densidades de energía y potencia de algunas fuentes.</i>	48
<i>Figure 18. Esquema general de un nodo sensor</i>	50
<i>Figure 19 Esquema y fotografía de un nodo Mica.</i>	50
<i>Figure 20 Nodo sensor EYES</i>	51
<i>Figure 21 Servidor Web encajado ScatterWeb.⁸</i>	52
<i>Figure 22 Forma distribuida y descentralizada</i>	53
<i>Figure 23 Fuentes y recolectores</i>	54
<i>Figure 24 Múltiples fuentes y o múltiples recolectores.</i>	56
<i>Figure 25 Movilidad del nodo recolector</i>	57
<i>Figure 26 Área de los nodos sensores detectando un evento</i>	58
<i>Figure 27 Ejemplo de agregación</i>	60

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ARQUITECTURA DE REDES DE SENSORES INALAMBRICAS
WSNs: ESTADO DEL ARTE

AUTOR(ES): Liliana Esperanza Bautista Torres
Carolina Melissa Gómez López

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Raúl Restrepo

RESUMEN

Construir redes de sensores inalámbricas se ha hecho posible con algunos avances fundamentales habilitando tecnologías. Lo primero y más importante entre estas tecnologías es la miniaturización del hardware. Características más pequeñas en chips han bajado el consumo de los componentes básicos de un nodo sensor al nivel que las Redes de Sensores Inalámbricas pueden contemplar. Reducir la talla de los chips y mejorar la eficiencia de energía hacen reducir el costo significativamente, lo que es necesario para desarrollar nodos redundantes. La contraparte a las tecnologías básicas de hardware es software. La primera pregunta a responder es la división principal de tareas y funcionalidades en un único nodo – la arquitectura del sistema operativo o ambiente de ejecución. Este ambiente debe soportar intercambio de información entre capas y modularidad para permitir mantenimientos simples. La tercera parte a resolver entonces es el problema de cómo diseñar protocolos de comunicación apropiados. Las redes de sensores inalámbricas cumplen muy bien los requerimientos de aplicaciones de monitoreo de variables, entre otras; y el uso de esta tecnología permite tanto la monitorización remota en tiempo real como la monitorización fuera de línea. Las redes de sensores son la clave para adquirir información necesitada por ambientes inteligentes, ya sea en edificios, utilidades, industria, hogar, sistemas de transporte o donde sea. Las medidas contra conflictos terroristas recientes requieren redes distribuidas de sensores que puedan operar utilizando aeronaves y teniendo capacidades de auto-organización. En tales aplicaciones, instalar cables es usualmente poco práctico. Una red de sensores requiere ser fácil y rápida de instalar y mantener. Actualmente están en furor y se espera que en los próximos años su evolución sea significativa.

PALABRAS CLAVES: WSNs, Redes de sensores inalámbricas, Sensor Inteligente.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: WIRELESS SENSOR NETWORKS ARCHITECTURE: STATE-OF-THE-ART

AUTOR(ES): Liliana Esperanza Bautista Torres
Carolina Melissa Gómez López

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Raúl Restrepo

RESUMEN

To build wireless sensor networks has become possible with some fundamental advances in enabling technologies. First and most important among these technologies is the miniaturization of hardware. Smaller feature sizes in chips have driven down the power consumption of the basic components of a sensor node to a level that wireless sensor networks can contemplate. Reduced chip size and improved energy efficiency is accompanied by reduced cost, which is necessary to make redundant deployment of nodes affordable. The counterpart to the basic hardware technologies is software. The first question to answer is the principal division of tasks and functionalities in a single node – the architecture of the operating system or runtime environment. This environment has to support cross-layer information exchange and modularity to allow for simple maintenance. The third part to solve then is the question of how to design appropriate communication protocols. Sensor networks are the key to gathering the information needed by smart environments, whether in buildings, utilities, industrial, home, shipboard, transportation systems automation, or elsewhere. Recent terrorist and warfare countermeasures require distributed networks of sensors that can be deployed using, aircraft, and have self-organizing capabilities. In such applications, running wires or cabling is usually impractical. A sensor network is required that is fast and easy to install and maintain. Nowadays are popular and it is expected its significant evolution in the next years.

PALABRAS CLAVES: WSNs, Wireless Sensor Networks, Smart Sensor.

1. INTRODUCCIÓN

Los ambientes Inteligentes representan el siguiente paso en el desarrollo evolutivo en edificios, industrias, casas, tableros de control y automatización de sistemas de transporte. El ambiente inteligente incurre primordialmente en datos sensoriales del mundo real; se adquieren de múltiples sensores de diferentes modalidades en locaciones distribuidas. Necesita información acerca de sus alrededores así como su trabajo interno; esto es capturado en sistemas biológicos mediante la distinción entre exteroceptores y propioceptores.

Los retos en la jerarquía a la hora de detectar cantidades relevantes, monitorear y recolectar datos, evaluar la información, presentar mensajes representativos para el usuario y activar funciones de alarma son enormes. La información necesitada por los ambientes inteligentes está dada por las Redes de Sensores Inalámbricas Distribuidas, las cuales son responsables por sensor así como por mantener las primeras etapas del proceso jerárquico.

La importancia de las redes de sensores está resaltada por el número de recientes iniciativas que incluyen el programa DARPA SENSIT y programas militares.

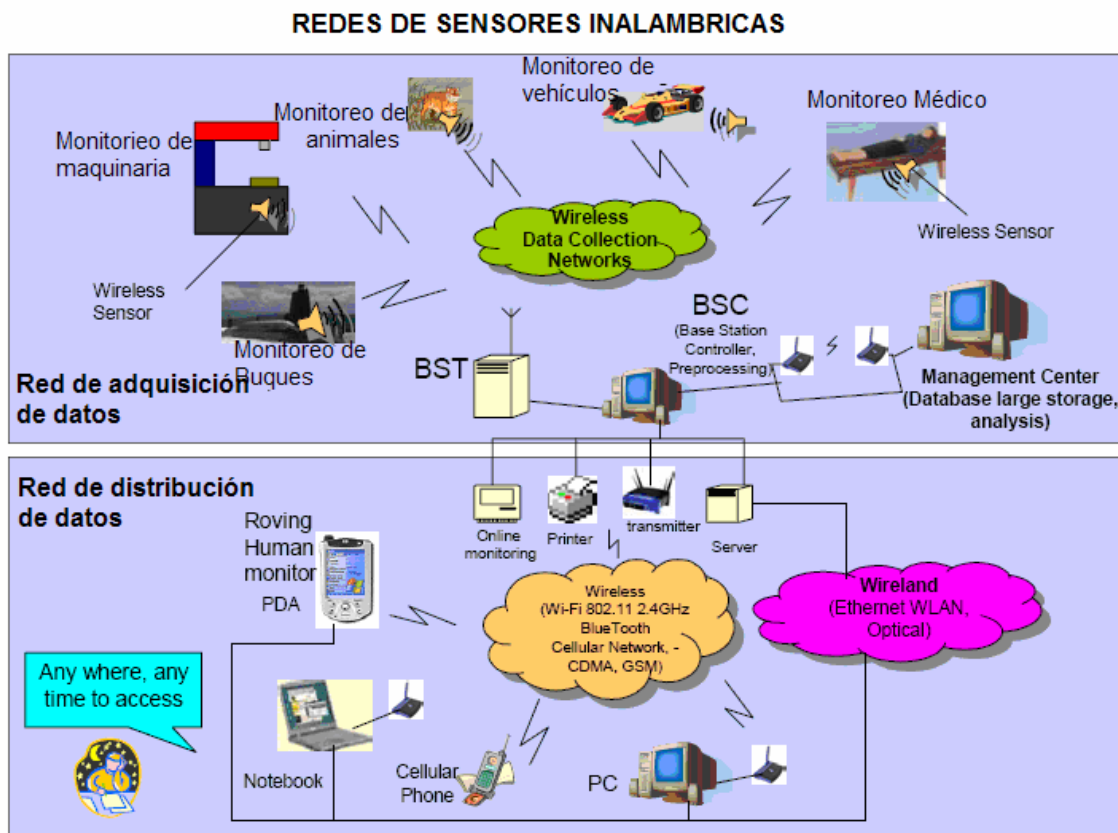


Figura 1 Red de Sensores Inalámbrica

La figura muestra la complejidad de redes de sensores inalámbricas que consisten generalmente de una red de adquisición de datos y una red de distribución de datos, monitoreadas y controladas por un director central.

La abundancia de tecnologías disponibles hace difíciles incluso la selección de componentes; el estudio de redes de sensores inalámbricas es un reto que requiere un enorme y amplio conocimiento de una gran variedad de disciplinas. Se tocará brevemente el aspecto de hardware de las WSNs. Nos enfocaremos en la arquitectura de las WSNs y protocolos para resolver dudas de comunicación. A través de la monografía, se sintetizan las redes de comunicación, redes de sensores inalámbricas, auto organización, procesamiento de señales y toma de decisiones, y finalmente algunos conceptos de automatización hogareña.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

Las redes de sensores inalámbricas son poderosas en cuanto soportan muchas aplicaciones diferentes del mundo real, son también un reto en investigación y problemas de ingeniería debido a su flexibilidad. No hay una sola lista de requerimientos que clasifica claramente todas las WSNs, y tampoco una única solución técnica que abarque el diseño de éstas.

En varias aplicaciones, nodos individuales en la red no pueden ser fácilmente conectados a una fuente de poder cableada y por lo tanto deben disponer de baterías. En otras aplicaciones, puede que la fuente de poder no sea un factor principal y de esa forma otras métricas como la exactitud y precisión de los resultados entregados pueden ser más importantes.

1.1 Redes de comunicación

El estudio de redes de comunicación cubre varios años a niveles universitarios. Sin embargo, para comprender y ser capaz de implementar una red de sensores, algunos conceptos básicos de primaria son suficientes.

1.1.1 Topologías de Red.

El tópico básico en redes de comunicación es la transmisión de mensajes para alcanzar un mensaje prescrito confiable y con una determinada QoS. QoS puede ser especificada en términos de retraso del mensaje, tasas de errores, pérdidas de paquetes, consideraciones económicas y la aplicación, una de las topologías básicas de red será usada.

Una red de comunicación está compuesta de nodos, cada uno con un poder computacional y puede transmitir y recibir mensajes sobre enlaces de comunicación, inalámbricos o cableados. Las topologías básicas se muestran en la figura e incluyen mayas, estrellas, árboles y buses. Una red puede que consista en varias subredes interconectadas de diferentes topologías. Las redes son luego clasificadas como redes de área local (LAN), por ej. Al interior de un edificio, o WANs por ej. Entre edificios.

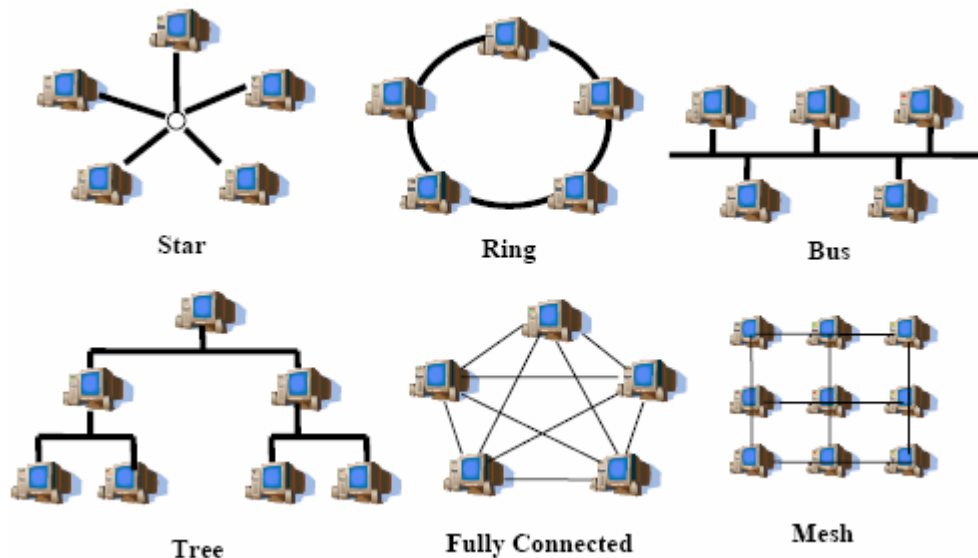


Figura 2 Topologías de Redes Básicas

Redes completamente conectadas tienen problemas de complejidad (Garey 1979); a medida que los nodos son adicionados, el número de enlaces incrementa exponencialmente. Por lo tanto, para redes grandes, el problema de enrutamiento es intolerante incluso con la disponibilidad de potentes máquinas.

Redes en malla son regularmente redes distribuidas que permiten generalmente la transmisión solo a los nodos vecinos más cercados. Los nodos en estas redes son habitualmente idénticos, por lo que las redes enmalladas son también conocidas como punto a punto. Estas redes son un buen modelo para redes de sensores inalámbricas de gran escala que se encuentran distribuidas sobre una región geográfica, por ej. Sistemas de vigilancia y seguridad. Una ventaja de las redes en malla es que, aunque todos los nodos deben ser iguales y tener las mismas capacidades de cómputo y transmisión, ciertos nodos pueden ser designados como “líderes de grupo” y toman funciones adicionales. Si un líder es deshabilitado, otro nodo puede tomar entonces esas tareas.

Todos los nodos de la **topología en estrella** están conectados a un único nodo hub. El hub requiere manejar gran cantidad de mensajes, enrutamientos y capacidades de toma de decisiones. Si un enlace de la comunicación se corta, sólo afectará un nodo; sin embargo, si el hub está incapacitado, la red se destruye. En la **topología en anillo** todos los nodos operan la misma función y no hay un nodo líder. Los mensajes viajan generalmente alrededor del anillo en una sola dirección. No obstante, si el anillo se corta, toda la comunicación se pierde. La **red en anillo doble** como se muestra tiene dos anillos y es más tolerante a fallas.

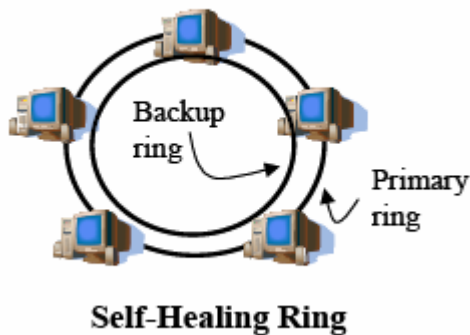


Figura 3 Topología en Anillo de cura propia.

Con la **topología en bus**, los mensajes son transmitidos en broadcast en el bus a todos los nodos. Cada nodo cuequea la dirección destino en el encabezado del mensaje y procesa el mensaje diseccionado a él. Esta topología es pasiva, cada nodo escucha simplemente los mensajes y si es responsable por la transmisión o no de los mensajes.

1.1.2 Protocolos de comunicación y enrutamiento.

Los tópicos de protocolos de comunicación y enrutamiento son complejos y requieren mucho estudio. Algunos básicos usados para comprender las redes de sensor serán presentados.

Encabezados. Cada mensaje tiene generalmente un encabezado que identifica el nodo fuente, el nodo destino, la longitud del campo de datos y otra información. Esto es usado por los nodos en el propio enrutamiento del mensaje. En mensajes codificados se incluyen bits de paridad. En *el enrutamiento de paquetes*, cada mensaje es dividido en paquetes de una longitud determinada. Los paquetes son transmitidos separadamente hacia la red y luego reensamblados en el destino. La longitud fija de paquetes hace más fácil en enrutamiento y satisfacción de la QoS. Generalmente, comunicaciones de voz usan circuitos de switcheo mientras que las transmisiones de datos utilizan enrutamiento de paquetes.

Preamble 8 bytes	Destination Address 6 bytes	Source Address 6 bytes	Length of Data field 2 bytes	Protocol header, Data, padding 0-1500 bytes
---------------------	-----------------------------------	------------------------------	------------------------------------	---

Ethernet Message Header

Figura 4 Encabezado de un mensaje Ethernet

Adicionalmente a la información que contienen los mensajes, en algunos protocolos (por ej. FDDI) los nodos transmiten tramas especiales para reportar e identificar las condiciones de falla. Esto puede permitir la reconfiguración de la red

por recuperación de fallas. Otras tramas especiales incluyen paquetes de descubrimiento de ruta o *ferret - buscador*, que fluyen a través de la red, por ej. Para identificar caminos más cortos, enlaces fallidos o el costo de la transmisión de la información. En algunos casos, el buscador regresa a la fuente y reporta el mejor camino para la transmisión del mensaje.

Cuando un nodo desea transmitir un mensaje, los protocolos de *handshaking* - en conjunto con el nodo destino, son usados para mejorar la confiabilidad. La fuente y el destino deben transmitir alternativamente como sigue: confirmación para enviar, listo para recibir, envío del mensaje y mensaje recibido. *Handshaking* es usado para garantizar la QoS y retransmitir mensajes que no fueron bien recibidos.

Conmutación La mayoría de redes de computador usan la técnica de almacenamiento y envío (store and forward) para controlar el flujo de información (Duato 1996). Luego, cada vez que un paquete alcance un nodo, es completamente almacenado en la memoria local y transmitido como un todo. Técnicas de conmutación más sofisticadas incluyen el *wormhole*, el cual divide el mensaje en unidades más pequeñas conocidas como unidades de control de flujo o *flits*. El encabezado de las unidades determina la ruta. Cuando la determina, los demás lo siguen en fila. Esta técnica alcanza actualmente la latencia más baja. Otro escenario de conmutación popular es *virtual-cut-through* o *conmutación de corte virtual*. Aquí, cuando el encabezado llega al nodo, es enrutado sin esperar el resto del paquete. Los paquetes son guardados en buffer ya sea en los de software o hardware.

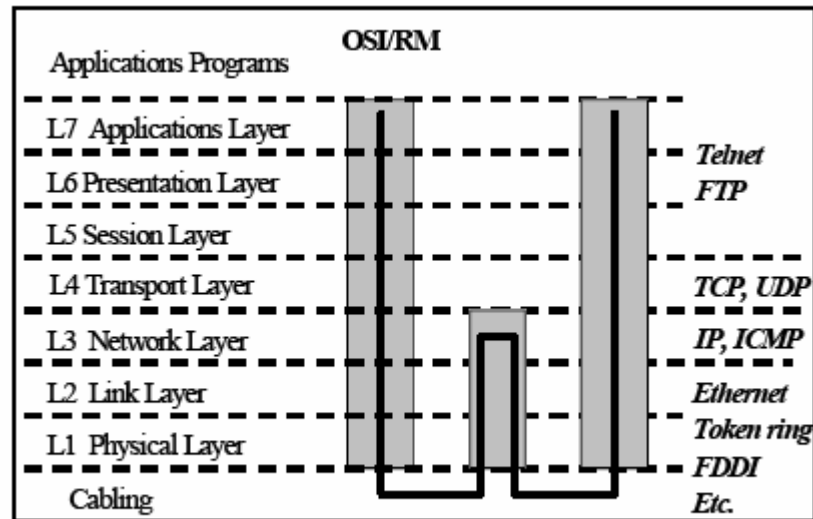
Protocolos de Múltiple Acceso Cuando múltiples nodos quieren transmitir, los protocolos necesitan evitar colisiones y perder datos. En el esquema ALOHA, usado primeramente en los 70's en la universidad de Hawai, un nodo transmite un mensaje cuando lo desee. Si recibe una confirmación, todo está bien. Si no, el nodo espera un tiempo randómico y retransmite el mensaje.

En FDMA División de frecuencia con múltiple acceso, diferentes nodos tienen diferentes frecuencias de portadoras. Ya que los recursos de frecuencia son divididos, el ancho de banda disponible para cada nodo disminuye. FDM también requiere hardware adicional e inteligencia en cada nodo. En CDMA un único codo es usado por cada nodo para codificar sus mensajes. Esto incrementa la complejidad de la transmisión y recepción. En TDMA, en enlace RF es dividido en un eje de tiempo, dándole a cada nodo un slot de tiempo determinado que pueda usar para la comunicación. Esto reduce la tasa de barrido, pero una ventaja principal es que el TDMA puede ser implementado en software. Todos los nodos requieren precisión, sincronizar los relojes para TDMA.

Modelo de Referencia de Interconexión en Sistemas Abiertos. (OSI/RM)

La Organización de Estándares Internacionales ISO especifica en la arquitectura OSI/RM la relación entre los mensajes transmitidos en una red de comunicación y programas de aplicaciones ejecutados por los usuarios. El desarrollo de este estándar abierto ha infundado la adopción por diferentes desarrolladores de crear interfaces bajo sistemas compatibles estandarizados. La figura muestra las siete

capas de OSI/RM. Cada capa puede ser modificada sin afectar a las demás. La capa de transporte provee detección y corrección de errores. Enrutamiento y control de flujo son efectuados por la capa de Red. La capa física representa en enlace real de las interconexiones. La capa de aplicación incorpora los programas ejecutados por los usuarios.



Open Systems Interconnection Reference Model

Figura 5 Modelo de Referencia OSI

Enrutamiento Ya que una red distribuida tiene múltiples nodos y maneja muchos mensajes, cada nodo es un recurso compartido, se toman muchas decisiones. Deben haber múltiples caminos desde la fuente al destino; por lo tanto, el enrutamiento de mensajes es un tema importante. Las medidas de operación afectadas por el esquema de enrutamiento son el rendimiento (cantidad de servicio) y el retardo promedio de paquetes (calidad de servicio). Estos esquemas deben evitar también el deadlock y livelock. (Ver más abajo)

Los métodos de enrutamiento pueden ser regulados, planeados, adaptables, centralizados, distribuidos, etc. Quizás el esquema más simple de enrutamiento es el token ring (Smythe 1999). Cuando un nodo quiere transmitir, captura el token y adjunta el mensaje, a media que el token viaja, el destino lee el encabezado y captura el mensaje. Este método es un esquema completamente descentralizado que usa efectivamente TDMA. Aunque es confiable, se puede ver en los resultados el malgasto de la capacidad de la red.

Esquemas de enrutamiento fijo A veces, usar tablas de enrutamiento que determinan el próximo nodo, dado el nodo de ubicación y el nodo destino del mensaje; las tablas pueden ser muy largas para redes grandes y no puede tomar en cuenta efectos en tiempo real como enlaces fallidos o enlaces congestionados.

Esquemas de enrutamiento adaptables dependen del estado real de la red y pueden tener en cuenta varias medidas de operación, incluyendo costo de

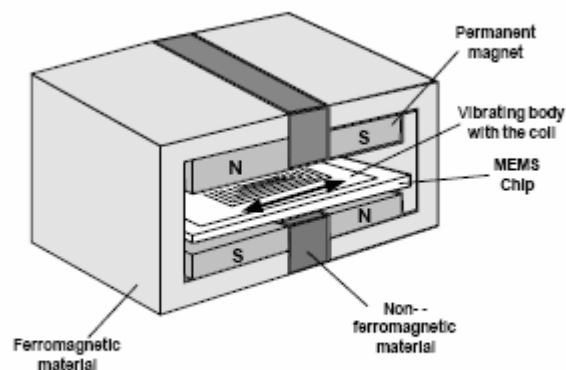
transmisión sobre un enlace dado, la congestión del enlace, la confiabilidad del camino y tiempo de transmisión.

Deadlock y livelock (Muerte por bloqueo - Bloqueo en línea) Las redes de comunicación de gran escala contienen ciclos (caminos circulares) de nodos; cada nodo es un recurso compartido que puede manejar múltiples mensajes fluyendo por diferentes caminos. Por lo tanto, las redes de comunicación son susceptibles a un *deadlock*, donde todos los nodos en un ciclo específico tienen búferes completos y esperan por otros. Entonces, no se puede transmitir ningún código porque no hay ningún nodo que pueda liberar espacio, así que todas las transmisiones en ese ciclo se paralizan. Por otro lado, el *livelock*, es la condición donde un mensaje es continuamente transmitido en la red y nunca alcanza su destino, es una deficiencia de algunos esquemas de enrutamiento que enlutan el mensaje a enlaces alternados cuando en enlace deseado está congestionado, sin tomar en cuenta que el mensaje debe ser enrutado cerca de su destino final. Muchos esquemas de enrutamiento están disponibles para enrutar evitando deadlock y livelock. (Duato 1996).

Control de Flujo En redes en línea, cada nodo tiene una fila asociada o un búfer que puede apilar mensajes. En estas redes, el control de flujo y asignación de recursos son importantes. Los objetivos del control de flujo son proteger la red de problemas relacionados a sobre cargas y problemas de velocidad, y mantener la QoS, eficiencia y libre de *deadlocks*. Si un nodo A tiene prioridad alta, sus mensajes son preferencialmente enrutados en cualquier caso. Hay varias técnicas para control de flujo, como control de operaciones (buffer management) en donde a ciertas porciones del espacio en búfer se le asignan propósitos específicos; en el *chocke packet* (algoritmo de paquetes reguladores), cualquier nodo congestionado envía paquetes a los otros nodos diciéndoles que reduzcan sus transmisiones.

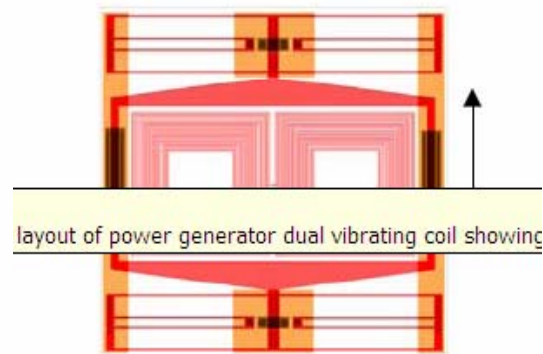
1.1.3 Administración de Potencia.

Con el avance de redes ad hoc de sensores geográficamente distribuidos en sitios remotos, hay un enfoque en incrementar el tiempo de vida de los nodos sensores a través de la generación de potencia, conservación y administración de energía. Investigaciones recientes se basan en el diseño de pequeños MEMS (Sistemas microelectromecánicos) componentes de RF para transceivers, incluyendo capacitores, inductores, etc. El factor limitante ahora está en la fabricación de inductores micros. Otra realidad en el diseño de generadores MEMS usan tecnologías que incluyen solar, vibración (electromagnética y electrostática), termal, etc.



Generador de potencia usando el método de vibración y electromagnético

Figura 6 Generador de potencia - MEMS



MEMS fabrication layout of power generator dual vibrating coil showing folded beam suspension.

Dispositivos RF-ID (Identificación RF) están implementando microcircuitos con un tanque L-C que almacena potencia desde señales recibidas y luego lo usa para transmitir una respuesta. RF-ID opera en un rango de baja frecuencia de 100KHz – 1.5MHz o de alta frecuencia de 900MHz- 2.4GHz, el cual tiene un rango de operación de más de 30m. Los registros de RF-ID no son costosos y son utilizados en manufactura y control de inventario de ventas, que contienen control de envíos, etc. Son instalados en medidores de agua en algunas ciudades, permitiendo que un vehículo métrico simplemente viaje y lea remotamente los registros actuales.

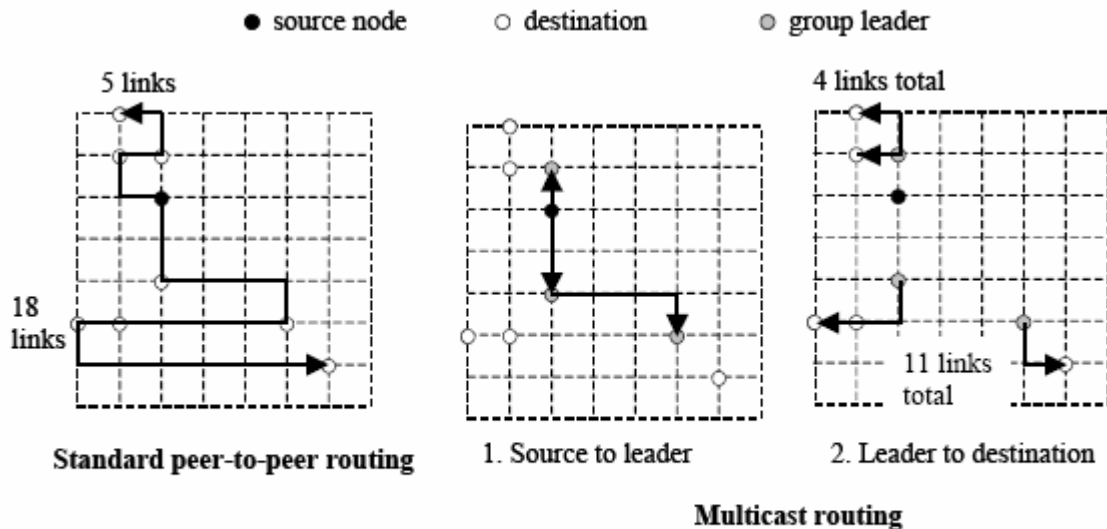
1.1.4 Estructuras de Red y Redes jerárquicas.

Las tablas de enrutamiento para redes distribuidas incrementan exponencialmente a medida que un nodo es agregado a la red. Una malla $n \times m$ tiene nm enlaces y hay múltiples caminos desde cada fuente a cada destino. Estructuras de redes jerárquicas simplifican el enrutamiento, y están también dispuestas a hacer procesamiento de señales distribuidas y toma de decisiones si un proceso se puede hacer en cada capa jerárquica.

Se ha demostrado (Lewis y Abdallah, 1993) que redes completamente conectadas tienen una complejidad NP-difícil, mientras que imponiendo protocolos de enrutamiento restringiendo los caminos permitidos para obtener el flujo entrante, resulta en una complejidad polinomial. Estos protocolos modernizados son propios en redes jerárquicas.

Sistemas Multicast En redes enmalladas se usa un esquema jerárquico basado en líderes para la transmisión de mensajes (Chen et al. 2000). Cada grupo de nodos tiene un líder designado que es responsable por recibir mensajes y transmitirlo a nodos fuera del grupo. La parte a de la figura muestra el mensaje enrutado en una red enmallada usando el protocolo estándar punto a punto. Se muestra la longitud de los caminos del enlace. La parte b y c muestran los mismos dos mensajes siendo enrutados con un protocolo multicast. El total de caminos de

transmisión son significativamente cortos. Multicast ha sido implementado utilizando esquemas basados en árboles y caminos.



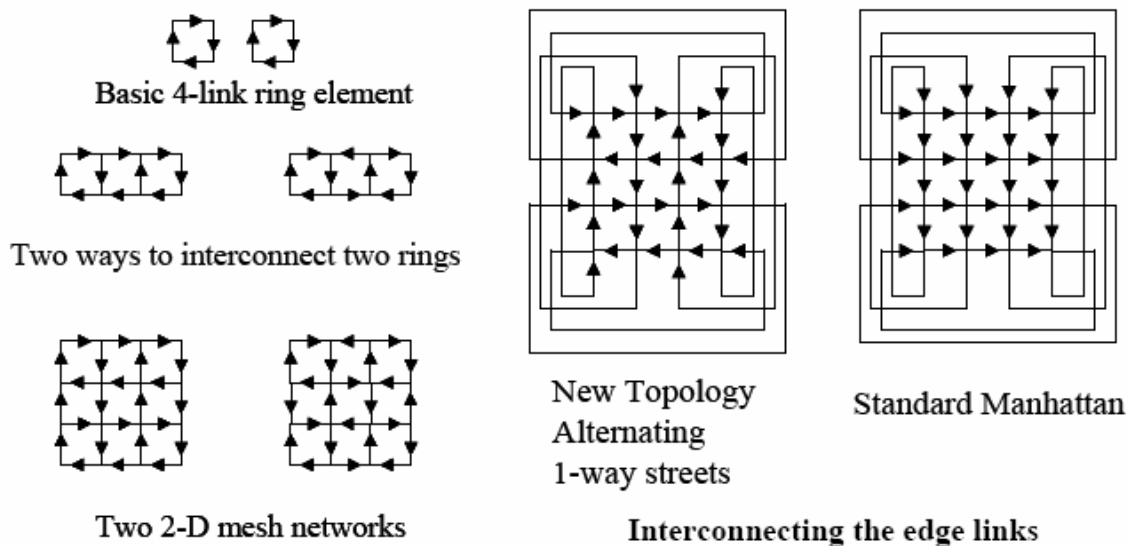
Taken from Chen et al. (2000)

Multicast routing improves efficiency and reduces message path length

Figura 7 Enrutamiento multicast

Redes Jerárquicas

La figura muestra un elemento de 4 anillos que consiste en cuatro nodos y cuatro enlaces. Se ven dos formas de conectar estos dos anillos, lo que resulta en dos redes de malla de estructuras diferentes. La primera red consiste en alternar calles de un sentido, mientras el segundo consiste en alternar vórtices de dirección. Es interesante analizar estas dos estructuras desde el punto de vista de las nociones de divergencia de flujo.



Constructing two mesh networks

Figura 8 Construcción de dos redes en malla.

En cualquier red, el fenómeno de *edge binding* (bordes fijos), significa que mucha de la potencia de enrutamiento de estaciones periféricas es desperdiciado porque los enlaces periféricos no son usados. Los mensajes tienden a reflejar la frontera hacia el interior o moverlos paralelamente a la periferia. (J.W.Sith, Rand Corp. 1964). Para evitar esto, la geometría Manhattan conecta los nodos de un borde de la red con los nodos del borde opuesto. La figura muestra la geometría Manhattan así como la red construida a partir de la malla de un sentido.

A medida que los nodos son agregados, el número de enlaces incrementa exponencialmente, esto deja problemas de complejidad NP en enrutamiento y recuperación de fallas. Para simplificar la estructura de la red se pueden usar las técnicas de clústeres jerárquicos. La estructura jerárquica debe ser consistente, esto es, debe tener la misma estructura en cada nivel. La figura muestra una red 4 x 4 en malla y también un clúster en cuatro grupos. La estructura de clúster tiene una topología en anillo doble. Para reducir la complejidad del enrutamiento, se puede deshabilitar uno de los anillos y obtener una estructura en anillo. La siguiente figura muestra una red en malla 8 x 8. Primero se muestran todos los enlaces y luego el clúster jerárquico con algunos enlaces deshabilitados para reducir la complejidad. Se ha escogido dejar el anillo exterior en cada nivel.

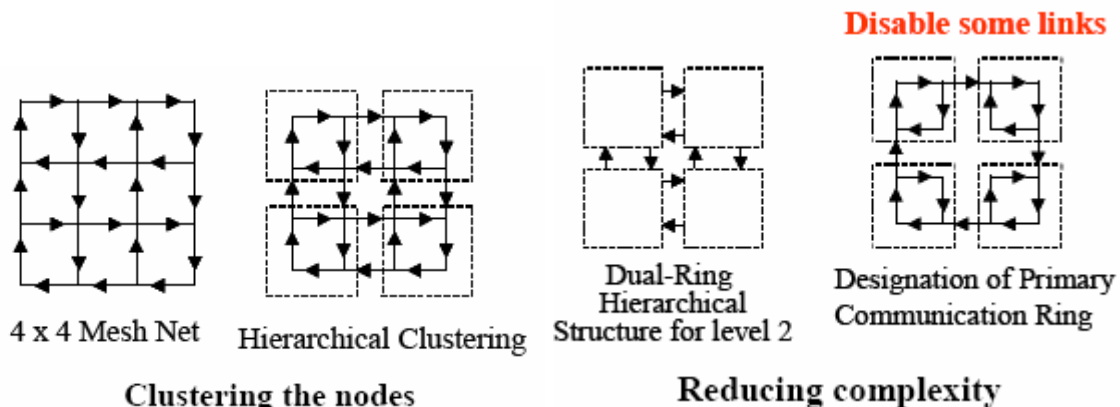


Figure 9 Reduciendo complejidad de Redes en Malla

Enrutamiento distribuido, toma de decisiones y DSP. Es natural en enrutamiento y recuperación de fallas para estas redes jerárquicas, designar el nodo de entrada para cada grupo como el líder. Este nodo debe hacer decisiones adicionales más allá de las de los otros nodos, incluyendo disponibilidad de recursos para evitar *deadlocks*, deshabilitar enlaces, activar recuperación de fallas y así sucesivamente. Esto conlleva a una trama muy natural para toma de decisiones distribuidas y procesamiento digital de señales DSP, en donde el líder del grupo procesa los datos desde el grupo antes de transmitirlos. El nodo líder en comunicaciones debe ser el nodo de entrada mientras que el líder en DSP debe ser el nodo de salida.

1.1.5 Desarrollos históricos y estándares.

Mucha de esta información ha sido tomada de PC Tech Guide, contiene un sumario de los estándares de redes de comunicación, topologías y componentes.

Ethernet El Ethernet fue desarrollado a mediados de los 70's por Xerox, DEC e Intel y estandarizado en 1979. El IEEE publicó el estándar oficial para ethernet IEEE 802.3 en 1983. El Fast Ethernet opera a 10 veces más en cuanto a velocidad que el ethernet regular y fue oficialmente adoptado en 1995. Introdujo nuevas características como operación full-duplex y auto negociación. Ambos estándares utilizan tramas de longitud variable IEEE 802.3, que tienen paquetes entre 64 a 1514 bytes.

Token ring En 1984, IBM introdujo las redes de 4Mbit/s de token ring. El sistema era robusto y de alta calidad, pero su costo produjo que quedara detrás de ethernet debido a su popularidad. IEEE estandarizó el token ring con la especificación IEEE 802.5. La FDDI especificó un token a 100Mbit/s en una LAN en anillo doble que usaba cable de fibra óptica. Fue desarrollado por ANSI a mediados de los 80's y su velocidad excedía las capacidades actuales de ethernet y de IEEE 802.5.

Gigabit Ethernet. La alianza gigabit ethernet fue fundada en 1996 y el estándar se publicó en 1999, especificando una capa física que utilizaba una mezcla de tecnologías del ethernet original y cables de fibra óptica de FDDI.

Cliente-Servidor Las redes cliente-servidor se volvieron populares a finales de los 80's con el reemplazo de grandes computadoras por PC personales. Los programas de aplicación para ambientes de computación distribuidos están esencialmente divididos en dos partes: el cliente y el servidor. El PC del usuario es el cliente y máquinas más poderosas hacen la interfaz a la red.

Arquitecturas punto a punto. No hay servidores y los computadores se conectan entre sí, usando generalmente una topología en bus para compartir archivos, impresoras, acceso a Internet y otros recursos. Tiene todas las máquinas con capacidades y responsabilidades equivalentes.

802.11 LAN inalámbricas. IEEE certificó la especificación IEEE 802.11 en 1997 como un estándar para las WLAN. WiFi, como es conocida, es útil y rápido para crear redes de PCs, impresoras y otros dispositivos en un ambiente local, por ej. En casa. Computadores y portátiles de hoy en día tienen hardware que soportan WiFi.

Bluetooth fue iniciado en 1998 y estandarizó por la IEEE como WPAN Redes de área personal inalámbricas en la especificación IEEE 802.15. Bluetooth es una tecnología de RF de corto rango que facilita la comunicación con dispositivos electrónicos entre sí y con Internet, perdiendo sincronización de datos transparente al usuario. Soporta varios dispositivos incluyendo PCs, portátiles, impresoras, teclados, mice, celulares, PDAs y otros productos. Bluetooth usa la banda de 2.4 GHz y puede transmitir datos a más de 1Mbit/s, puede penetrar barreras sólidas no metálicas y tiene un rango nominal de 10 mts que puede ser extendido a 100m.

Home RF fue iniciada en 1998 y tiene metas similares a las de Bluetooth para WPAN. Sus metas comparten transmisiones datos/voz. Tiene interfases con Internet así como la PSTN Red de telefonía pública conmutada. Utiliza la banda de 2.4GHz y tiene un rango de 50m, perfecta para el hogar.

IrDA es una tecnología WPAN que tiene un corto rango que se ajusta muy bien para recepción de señales selectivas.

CAPITULO 2 APLICACIONES

2.1 Ejemplos de aplicación

El diseño y optimización de una red de sensores inalámbrica se ilustra en el conocimiento y comprensión de distintas áreas: el tipo de aplicación limita la opción de protocolos de enrutamiento, y características de baterías recargables influyen en los patrones de estado de reposo en un nodo.

El adelanto de las redes de sensores inalámbricas indica que esta visión tecnológica facilitará muchas aplicaciones existentes y traerá otras completamente nuevas.

Para distintos parámetros físicos, existe tecnología apropiada de sensores que puede ser integrada en un nodo de una WSN. Algunos de los más populares son temperatura, humedad, luz visual e infrarroja (desde luminancias simples a cámaras), acústica, vibración (por ej. Para detectar levantamientos sísmicos), presión, sensores químicos (para gases de diferentes tipos o para evaluar la composición de aceites), esfuerzo mecánico, sensores magnéticos (para detectar vehículos pasantes), incluso radares.

Sin embargo, mientras más sofisticadas sean las capacidades de censar, por ejemplo los juguetes en un jardín infantil podrían tener sensores táctiles o de movimiento para determinar su propia velocidad o ubicación. [2]

Actuadores controlados por un nodo de una red de sensores inalámbrica no son quizá muy multifacéticos. Típicamente controlan un dispositivo mecánico como un servo motor, o realizan conmutación de algunas aplicaciones eléctricas mediante relays eléctricos como una lámpara o similares.

Con las bases de los nodos que tienen la facultad de censar o actuar en combinación con las habilidades computacionales y de comunicación, muchas clases de aplicaciones pueden ser construidas a partir de diferentes tipos de nodos, incluso de distintas clases en una aplicación. Una breve lista de escenarios podría cubrir el diseño del espacio y los diferentes requerimientos de varias aplicaciones [3, 4, 5]

2.1.1 Aplicaciones de ayuda a desastres.

Una de las aplicaciones frecuentemente mencionadas para las WSN son las de ayuda a desastres. Un escenario típico es la detección de fuego: los nodos de sensor son equipados con termómetros y pueden determinar su propia ubicación (relativa a cada nodo o en coordenadas absolutas. Estos sensores son ubicados sobre el fuego, por ejemplo, en un bosque desde un helicóptero. Colectivamente

se produce un “mapa de temperaturas” de el área o de un determinado perímetro de áreas con altas temperaturas que pueden ser accedidas desde el exterior, por ejemplo por bomberos equipados con PDAs, Asistentes Digitales Personales. Similares escenarios son posibles para el control de accidentes en plantas químicas, por ejemplo.

Algunas de estas aplicaciones de ayuda a desastres tienen parecido con aplicaciones militares donde los sensores deber detectar por ejemplo, tropas enemigas en vez de incendios. En tales aplicaciones los sensores deben ser lo suficientemente baratos para considerar colocarlos ya que se necesita un gran número de unidades y requerimientos de un alto tiempo de vida no son particularmente altos.

2.1.2 Control del ambiente y mapeo de biodiversidad.

WSNs pueden ser usadas para el control del medio ambiente por ejemplo, con respecto a la polución química - una posible aplicación en los sitios de arrojo de basuras-. Otro ejemplo es la vigilancia del suelo marino; y relativo al control ambiental, es el uso las WSNs para tener un conocimiento acerca del número de plantas y especies animales que viven en un determinado hábitat (mapeo de biodiversidad).

La principal ventaja de una WSN aquí es la operación de censado sin cables, cerca de los objetos que deben ser observados; ya que los sensores pueden ser lo suficientemente pequeños para no ser obstructivos, no crearán disturbios en los animales o plantas observados. Generalmente, un gran número de sensores es requerido con altos requerimientos en tiempo de vida.

2.1.3 Edificios Inteligentes.

Los edificios desperdician una gran cantidad de energía con el uso ineficiente de aires acondicionados, humedad y ventilación. Un mejor monitoreo de temperatura en tiempo real, alta resolución, humedad y otros parámetros físicos en un edificio a través de una WSN puede aumentar considerablemente el nivel de confort y reducir el consumo de energía.

En adición, cada nodo sensor puede ser usado para monitorear niveles de esfuerzo mecánico en edificios de zonas con registros sísmicos. Sistemas similares pueden ser aplicados en puentes. Otro tipo de sensores pueden ser utilizados para detectar personas atrapadas en un colapso y comunicar tal información a un equipo de rescate.

La ventaja principal aquí es el mapeo colaborativo de parámetros físicos. Dependiendo de la aplicación en particular, los sensores pueden ser posicionados en los edificios existentes o incorporados en los edificios en construcción. Si no hay disponibilidad de tomas de energía, los requerimientos de tiempo de vida pueden ser muy altos – algunas decenas de años- pero el número requeridos de nodos y por lo tanto el costo, es relativamente modesto, dados los costos de todo el edificio.

2.1.4 Vigilancia y Mantenimiento Preventivo.

Una idea es arreglar los nodos sensores en áreas de difícil acceso de maquinaria donde se pueden detectar patrones de vibración que indican la necesidad de mantenimientos. Ejemplos de tal maquinaria pueden ser ejes robóticos de los trenes y aplicaciones en manufactura.

2.1.5 Agricultura.

Aplicando WSN a la agricultura, permite la irrigación precisa y fertilización a través de sensores de composición humedad/aceite en los campos. Se requiere un número relativamente pequeño de sensores, cerca de un sensor por un área de 100 m x 100 m. A su vez, el control de plagas puede mejorar con la vigilancia de la tierra. También, controlar el estatus de salud de los animales (chequeando la temperatura del cuerpo, contador de pasos o similares) colocando sensorias a cada vaca o cerdo por ejemplo y activando alarmas si los límites son excedidos.

2.1.6 Medicina y Cuidado de la Salud.

El uso de WSN en aplicaciones de salud es potencialmente muy benéfico, pero también éticamente controversial. Un rango de posibilidades desde cuidados postoperatorios en intensivos, en los cuales los sensores son directamente colocados en los pacientes – la ventaja de hacerlo de esta manera sin cables es considerable en esta situación-, vigilancia en pacientes y administración de drogas automáticas.

2.1.7 Logística.

En diferentes aplicaciones de logística, es concebible para almacenar bienes con sensores simples que permitan un rastreo a estos objetos durante el transporte o facilitar inventarios en bodegas o tiendas.

En estas aplicaciones no es necesariamente utilizar un nodos sensor para comunicar activamente, lecturas pasivas de los datos es generalmente suficiente; por ejemplo, cuando una maleta es trasladada alrededor de las cintas en un aeropuerto y pasa cierto punto de chequeo. Tal lectura pasiva es mucho más simple y barata que las comunicaciones activas y procesos de información discutidos en otros ejemplos. Esto es realizado por registros de RFID Identificadores de Radio Frecuencia.

Por otra parte, un RFID no puede soportar aplicaciones más avanzadas. Es difícil imaginar cómo un sistema pasivo puede ser usado para ubicar un ítem en una bodega ya que no puede fácilmente almacenar información acerca de la historia de los objetos.

2.1.8 Telemática.

Parcialmente relacionado con aplicaciones de logística se encuentran aquellas para contextos telemáticos, en donde los sensores implantados en las calles puedan obtener información acerca de las condiciones de tráfico (296). Puede interactuar con los carros para intercambiar advertencias de peligros acerca de las condiciones de las carreteras o bloqueos de tráfico más adelante.

Aparte de estas, otros tipos de aplicaciones para WSNs que han sido mencionados en literatura incluyen alas de aviones y soporte para espacios inteligentes, control de pérdidas en plantas de tratamiento de agua, museos interactivos, monitoreo de hábitat de pájaros en islas remotas e implante de sensores en el cuerpo humano (para monitoreo de glucosa o como prótesis de retina) [6]

La mayoría de estas aplicaciones son de alguna forma, posibles incluso con tecnologías actuales y sin el uso de las redes de sensores inalámbricas, todas las soluciones en curso son sin sensores (sensor starved) [7]

Muchas aplicaciones trabajarían mucho mejor con información a un nivel espacial y temporal alto con resoluciones acerca del objeto que las concierne y pueden ser provistas con tecnologías de sensores tradicionales. WSNs son superiores proporcionando la información requerida con precisión, a tiempo y con el consumo mínimo de recursos. Ver figura10

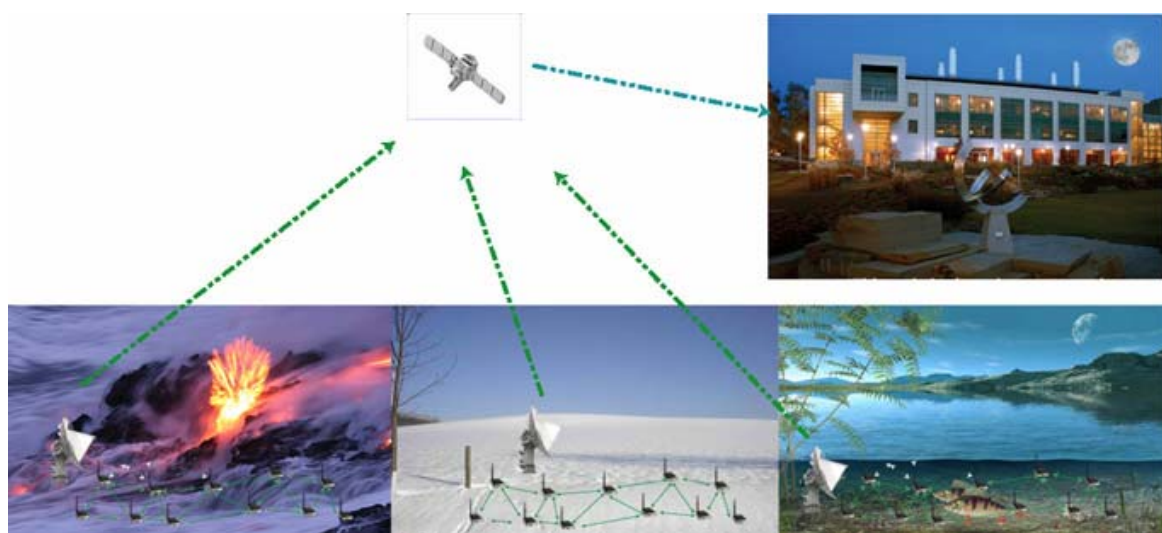


Figure 10 Diferentes aplicaciones de la red de sensores inalámbricas¹

¹ oevlsi.ece.cornell.edu/?ID=20

2.2 Tipos de Aplicaciones

Muchas de estas aplicaciones comparten algunas características básicas. En la mayoría, hay una clara diferencia entre **fuentes** de datos – los nodos actuales que sensan datos- y **recolectores** –nodos donde deben ser entregados los datos. Estos recolectores algunas veces son parte de la misma red de sensores; a veces son sistemas “afuera” de la red (ej. El PDA de bomberos comunicándose con una WSN). También hay usualmente, pero no siempre, más fuentes que recolectores y el recolector es ignorante o no interesado en la identidad de las fuentes; los datos como tal son más importantes.

Los **patrones de interacción** entre fuentes y recolectores muestran algunos comportamientos típicos. Los más relevantes son:

2.2.1 Detección de Eventos.

Los nodos sensores deben reportar al(os) recolector (es) una vez han detectado la ocurrencia de un evento específico. Los eventos más simples pueden ser detectados localmente por un único nodo sensor (ej. Un límite de temperatura es excedido); tipos de eventos más complicados requieren la colaboración de sensores vecinos o incluso remotos para decidir si un evento ha ocurrido (ej. Un gradiente de temperatura se torna muy abrupto). Si varios eventos diferentes pueden ocurrir, la **clasificación de eventos** podría ser un tópico adicional.

2.2.2 Medidas Periódicas.

Los sensores pueden tener tareas específicas reportando valores medidos periódicamente. Ocasionalmente, estos reportes pueden ser activados por un evento detectado, el periodo de reporte es una aplicación dependiente.

2.2.3 Función de aproximación y detección de límites.

La manera en que un valor físico como cambios de temperatura de un lugar a otro puede ser considerado como una función de ubicación. Una WSN puede ser usada para aproximar esta función desconocida (para extraer sus características espaciales), usando un número limitado de muestras tomadas en cada nodo sensor individual. Este mapeo aproximado debe estar disponible en el recolector. Cómo y cuándo descargar el mapeo depende de las necesidades de la aplicación, como la precisión de la aproximación y el intercambio propio del consumo de energía.

Análogamente, un problema relevante puede ser encontrar áreas o puntos dados con mismo valor. Un ejemplo es encontrar puntos isotermales en una aplicación de incendios para detectar el borde de un incendio actual. Esto puede ser generalizado como encontrando límites en tales funciones o enviando mensajes a lo largo de los patrones de restricciones en ambos, espacio y/o tiempo [8].

2.2.4 Rastreo.

La fuente de un evento puede ser móvil (ej. Un intruso en escenarios de vigilancia). La WSN puede ser usada para reportar descargas en los eventos de posición de la fuente al recolector, potencialmente con estimados acerca de la velocidad y dirección. Para hacer esto, los nodos de sensores tienen que cooperar antes de que las descargas puedan ser reportadas al recolector.

Estas interacciones pueden ser bosquejadas en tiempo y espacio (reportando eventos solo con una longitud de tiempo, o ciertas áreas). Estos requerimientos pueden cambiar dinámicamente en el tiempo; los recolectores tienen que tener una manera de informar a los sensores de sus requerimientos en tiempo de ejecución. Además, estas interacciones pueden tomar lugar solo para un pedido específico de un recolector, o pueden tener relaciones de larga duración entre muchos sensores y varios recolectores.

Los ejemplos también han mostrado una gran diversidad en **opciones de operación**. Que van desde bien planificadas operaciones de nodos de sensor (ej. En aplicaciones de mantenimiento de maquinaria) a operaciones randómicas dejando caer un gran número de nodos desde un aeroplano sobre un incendio forestal.

Las aplicaciones también influyen las **opciones de mantenimiento** disponibles: Esto es práctico para completar el mantenimiento en tales sensores – quizá si se requieren en el transcurso del mantenimiento en la maquinaria asociada.

En relación a estas opciones están las **opciones de suplemento de energía**. En algunas aplicaciones, las tomas de energía cableadas son posibles; para nodos de sensores auto sostenidos dependen del tiempo de misión requerido, puede ser trivial (en aplicaciones de pocos días de uso) o un reto, especialmente cuando no se puede hacer ningún mantenimiento y los nodos deben operar varios años. Obviamente, un precio aceptable y tamaño por nodo juegan un papel crucial en el diseño de suplemento de energía.

CAPITULO 3

CARACTERÍSTICAS DE LAS WSNs

Retos para las WSNs

El manejo de tan amplio rango de aplicaciones sería difícilmente posible con cualquier actuación de una WSN. Sin embargo, han surgido ciertas ventajas, especialmente con respecto a las características y mecanismos de tales sistemas. Comprender estas características y sus nuevos mecanismos es el mayor reto en la visión de las redes de sensores inalámbricas.

3.1 Requerimientos

Las siguientes características son compartidas por la mayoría de ejemplos de aplicaciones discutidos.

3.1.1 Tipo de servicio.

El tipo de servicio entregado por una red de comunicación convencional es evidente – mueve bits de un lugar a otro-. Para una WSN, el movimiento de bits es sólo el camino hacia un final, pero no el propósito en sí. Una WSN provee información significativa y/o acciones acerca de una tarea dada: “La gente quiere respuestas, no números” (Steven Glaser, UC Berkeley). Adicionalmente, conceptos como “scoping” – bosquejo- de interacciones para especificar regiones geográficas o medir intervalos de tiempo son importantes. Además, nuevos

paradigmas al usar tales redes han surgido, así como nuevas interfaces y nuevas formas de pensar acerca del servicio de una red.

3.1.2 Calidad de Servicio.

Relacionada al tipo de servicio de la red está la calidad de ese servicio. Los requerimientos tradicionales de calidad de servicio – usualmente vienen de aplicaciones de tipo multimedia – como retrasos delimitados o mínimo ancho de banda son irrelevantes cuando las aplicaciones son tolerantes a la latencia o el ancho de banda de los datos transmitidos es muy pequeño en primer lugar. En algunos casos, sólo la entrega ocasional de un paquete puede ser más que suficiente, en otros casos, existen requerimientos de confiabilidad muy altos. Y en otros casos, el retraso es importante cuando los actuadores están siendo controlados entiendo real por la red de sensores. El radio de entrega del paquete es una métrica insuficiente; lo que es relevante es la cantidad y calidad de la información que puede ser extraída a recolectores dados acerca del objeto o área observada.

Por lo tanto, conceptos de calidad como detección confiable de eventos o de aproximación de calidad, por ejemplo en un mapa de temperatura, es significativo.

3.1.3 Tolerancia a Errores.

Los sensores pueden quedarse sin energía o quizá tener un daño, o la comunicación inalámbrica entre dos nodos puede estar permanentemente interrumpida; es importante que la WSN sea capaz de tolerar tales fallas. Para tolerar una falla en un nodo, el uso de redundancias es preciso, usando más nodos de los que serían estrictamente necesarios si todos los nodos funcionaran correctamente.

3.1.4 Tiempo de vida.

En muchos escenarios, los nodos tienen que obtener energía (usando baterías). Reemplazar esas fuentes de energía en el campo es usualmente poco práctico y simultáneamente, una WSN debe operar por lo menos por un tiempo de misión dado o el mayor tiempo posible, por esta razón el tiempo de vida de una WSN se convierte en un factor muy importante. Evidentemente una manera eficiente de energía de operación de la WSN es vital.

Como alternativa o suplemento de toma de energía, una fuente de poder limitado (como celdas solares por ejemplo) podría estar presente en un nodo sensor. Estas fuentes no tienen el poder suficiente para asegurar la operación continua pero pueden recargar algunas baterías. Bajo ciertas condiciones, el tiempo de vida de la red podría ser idealmente infinito.

El tiempo de vida de una red también tiene consecuencias directas contra la calidad del servicio: invertir más energía puede incrementar la calidad pero baja el tiempo de vida. La definición precisa del tiempo de vida depende de la aplicación; una opción simple es usar el tiempo hasta que el primer nodo falle (o se quede sin

energía) como el tiempo de vida de la red. Otra opción incluye el tiempo hasta que la red es desconectada en dos o más particiones, el tiempo hasta que el 50% de los nodos fallen, o el tiempo cuando por primera vez un punto en la región observada no esté cubierto por lo menos por un nodo sensor (es posible y benéfico cuando se usan redundancias).

3.1.5 Escalabilidad.

Una WSN puede incluir un gran número de nodos, las arquitecturas empleadas y protocolos deben permitir también ser escalables.

3.1.6 Gran rango de densidad.

En una WSN, el número de nodos por unidad de área - la densidad de una red - puede variar considerablemente. Diferentes aplicaciones tendrán diferentes densidades de nodo. Incluso con una aplicación dada, la densidad varía sobre el tiempo y el espacio porque los nodos fallan o se trasladan; la densidad no debe ser necesariamente homogénea en toda la red y la red se debe adaptar a tales variaciones.

3.1.7 Programabilidad.

No solo será necesario para los nodos al procesar información, sino también tienen que reaccionar con flexibilidad ante cambios en sus tareas. Estos nodos deben ser programables, y su programación debe poder ser cambiada durante la operación cuando nuevas tareas sean importantes. Un procesamiento de información fijo es insuficiente.

3.1.8 Mantenimiento.

El ambiente de una WSN y la misma WSN cambian (baterías usadas, fallas en nodos, nuevas tareas), el sistema se debe adaptar. Debe monitorear su propia salud y estatus para cambiar parámetros operacionales o para escoger diferentes usos (por ej proveer menor calidad cuando el recurso energético sea escaso). En este sentido, la red tiene que automantenerse; también debe ser capaz de interactuar con mecanismos de mantenimiento externos para asegurar su operación a una calidad requerida [9].

3.2 Mecanismos Requeridos.

Para cumplir estos requerimientos, se deben encontrar mecanismos innovadores para una red de comunicación, así como nuevas arquitecturas y protocolos. Un reto particular es la necesidad de encontrar mecanismos que son específicos a la naturaleza de una aplicación dada para soportar requerimientos como calidad de servicio, tiempo de vida y mantenimiento. Por otra parte, esos mecanismos

también tienen que generalizar a un rango más amplio de aplicaciones menos completas. Algunos de los mecanismos que forman parte de una WSN son:

3.2.1 Comunicación Inalámbrica Multisaltos.

Una comunicación directa entre el emisor y receptor enfrenta limitaciones. En particular, comunicaciones sobre largas distancias son sólo posibles usando altos niveles de transmisión y de energía. El uso de nodos intermedios y retrasos pueden reducir el poder total requerido. En consecuencia, muchas formas de WSNs son llamadas de comunicación multisaltos.

3.2.2 Operación de Energía Eficiente.

Para soportar largos tiempos de vida, la operación de energía eficiente es una técnica clave. Algunas opciones incluyen transporte de datos entre dos nodos con bajo consumo de energía (medidas en J/bit) o más importante, el control de la energía usando solicitudes de información.

3.2.3 Auto-configuración.

Una WSN tendrá que configura la mayoría de sus parámetros operacionales autónomamente, independiente de la configuración externa – el número absoluto de nodos y simplificación de operaciones requerirá esta capacidad en la mayoría de aplicaciones. Por ejemplo, los nodos deben ser capaces de determinar su posición geográfica usando solamente otros nodos de la red, llamado “auto-ubicación”. También, la red debe ser capaz de tolerar nodos con fallas (debido a una batería agotada por ejemplo) o integrar nuevos nodos (por el incremento de operaciones después de una falla, por ejemplo)

3.2.4 Colaboración y Procesamientos en red.

En algunas aplicaciones, un único sensor no es capaz de decidir si un evento ha ocurrido, pero varios sensores deben colaborar para detectar un evento y sólo los datos en conjunto de muchos sensores proveen información suficiente. La información es procesada en la red como tal con varias formas de alcanzar esta colaboración, en vez de tener todos los nodos transmitiendo todos los datos a redes externas y procesarlos fuera de la red.

3.2.5 Data Centric.

Redes de comunicación tradicionales son típicamente centralizadas alrededor de la transferencia de datos entre dos dispositivos específicos, equipado cada uno con por lo menos una dirección de red, esta operación es llamada dirección-centric. En una WSN donde los nodos son operados con redundancia para protegerlos contra fallas o compensar la baja calidad del equipo, la identidad de un nodo en particular se vuelve irrelevante. Lo que es importante son las respuestas y

valores como tal, no de qué nodo provino, por lo tanto cambiar desde un paradigma de dirección-centric a un data-centric diseñando la arquitectura y protocolos de comunicación es prometedor.

Un ejemplo para esta interacción data-centric sería pedir la temperatura promedio en un área dada, y no requerir lecturas de temperaturas desde nodos individuales. Tal paradigma de data-centric puede ser usado también para fijar condiciones de alertas o eventos (“activar una alarma si la temperatura excede un límite”).

3.2.6 Localidad.

El principio de localidad tendrá que ser asegurado extensivamente para asegurar en particular, escalabilidad. Los nodos, los cuales son muy limitados en recursos como memoria deben tener en cuenta limitar el estado en que ellos acumulan durante el procesamiento de protocolo para guardar sólo información acerca de sus vecinos directos. La esperanza es que permitirá que la red se pueda escalar con un gran número de nodos sin tener un procesamiento poderoso en cada uno. Sin embargo, cómo combinar el principio de localidad con diseños de protocolo eficiente es todavía un tópico abierto de investigación.

3.2.7 Uso de intercambios.

Similar al principio de localidad, las WSNs tienen que dar un gran giro en sacar ventaja de varios intercambios esenciales entre metas contradictorias mutuamente; durante el diseño de sistema/protocolo y el tiempo de ejecución. Un intercambio importante es en la densidad de nodos: dependiendo de la aplicación, operación y fallas de nodos en la ejecución, la densidad de la red cambia considerablemente – los protocolos deben manejar situaciones muy diferentes, posiblemente presentes en diferentes lugares de una sola red. De nuevo, no todas las inquietudes de investigación han sido resueltas.

Por qué las redes de sensor son diferentes?

En la base de estas aplicaciones y retos principales, dos relativos cercanos de las WSNs se tornan aparentes: MANETs (Redes Ad Hoc Móviles) por una parte y fieldbuses en otra.

3.3 Redes Ad hoc móviles y Redes de sensores inalámbricas

Una red Ad hoc es una red que está literalmente lista para un propósito específico y conocer una necesidad de comunicación emergente. El ejemplo más simple de una red ad hoc es quizá un set de computadores conectados y cableados entre sí desde una red pequeña, como pocos portátiles en una sala de conferencia. En este ejemplo, el aspecto de auto-configuración es crucial – se espera que la red trabaje sin un manejo o configuración manual. Ver figura 11

Usualmente, la noción de una MANET está asociada con comunicaciones inalámbricas y específicamente comunicaciones inalámbricas multipunto; también, el nombre indica la movilidad de nodos participantes con un ingrediente esencial. Ejemplos de tales redes son operaciones de ayuda a desastres –bomberos comunicándose entre sí- o redes en locaciones difíciles como sitios de construcción grandes, donde el desarrollo de infraestructura inalámbrica (puntos de acceso, etc.), dejar cables sueltos no es una opción factible. En tales redes, los nodos individuales forman juntos una red que transmite paquetes entre los nodos para extender el alcance de un único nodo, permitiendo a la red expandirse en grandes áreas geográficas que no fuera posible con una comunicación directa de transmisor – receptor. Los dos retos básicos en una MANET son la reorganización de las redes en cuanto al movimiento de los nodos y manejar los problemas del alcance limitado de las comunicaciones inalámbricas. [10, 11]

Estos problemas generales son compartidos entre MANETs y WSNs. Sin embargo, hay algunas diferencias principales entre los dos conceptos, garantizando una distinción entre ellas e investigaciones separadas para cada una.

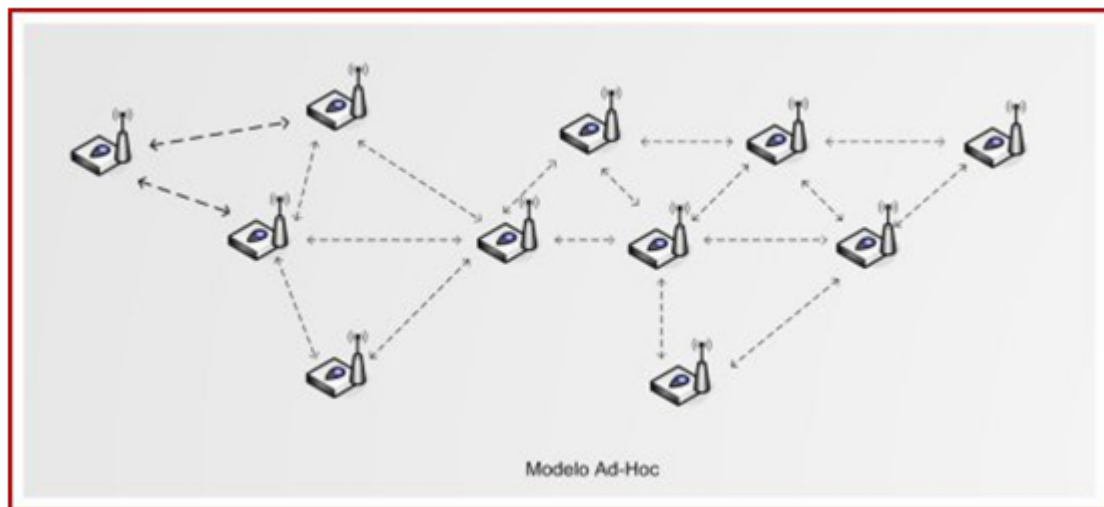


Figure 11 Figura Modelo de una red Ad-Hoc²

3.3.1 Aplicaciones y equipos.

Las MANETs están asociadas de alguna manera con diferentes aplicaciones así como diferentes equipos que las WSNs: en una MANET, la Terminal puede ser medianamente potente (un portátil o un PDA) con una batería de larga duración. Este equipo es necesitado porque en las aplicaciones comunes de una MANET hay usualmente un humano en el círculo: la MANET es usada para comunicación de voz entre dos personas, o para establecer un acceso a una infraestructura

² www.ceni2t.org/sensores.html

remota como un servidor web. Por lo tanto, el equipo debe ser suficientemente potente para soportar estas aplicaciones.

3.3.2 Aplicaciones específicas.

Teniendo un gran número de combinaciones de sensado posibles, tecnologías de computación y comunicación, muchos escenarios de aplicaciones diferentes para WSNs son posibles. Es poco probable que exista una solución que se ajuste a todo. A manera de ejemplo, WSNs son concebibles con redes de diferentes densidades, desde operaciones muy pequeñas a muy densas, lo que requiere protocolos diferentes o por lo menos adaptables. Esta diversidad, aunque presente, no es tan amplia en las MANETs.

Interacción con el ambiente. Dado que las WSNs se ven forzadas a interactuar con el ambiente, se espera que las características de tráfico difieran mucho una de otra. Una consecuencia típica es que las WSNs sean probables de presentar bajas tasas en una gran escala de tiempo, pero pueden tener tráfico muy denso cuando algo pasa (un fenómeno conocido por sistemas en tiempo real como lluvia de eventos o tormentas de alarma). Largos períodos (meses) de inactividad pueden alternarse con periodos cortos (segundos o minutos) de muy alta actividad en la red, presionando su capacidad al límite. Las MANETs por otro lado, son utilizadas para soportar más aplicaciones convencionales (web, voz, etc.) con sus características de tráfico bien comprendidas.

Escala Potencialmente, las WSN tienen que escalar un gran número (miles o quizá cientos de miles) de entidades más que redes ad hoc, requiriendo soluciones diferentes o más escalables. Como un caso en concreto, nodos de sensor provistos con un único identificador son costosos y es un precio de operación que puede ser evitado; los protocolos que trabajan sin tales identificadores se vuelven importantes en WSNs, pero están lejos de asumirlos como parte de los nodos en MANETs.

Energía En ambas WSNs y MANETs, la energía es un recurso escaso. Pero las WSNs tienen requerimientos más ajustados en tiempo de vida de la red, y recargando o reemplazando baterías de nodos WSN no es una opción tan viable como en las MANETs. El impacto de la energía en toda la arquitectura del sistema es mucho más profundo en WSNs que en MANETs.

Auto configuración Similar a las redes ad hoc, WSNs demandan ser auto configurables en redes conectadas, pero con diferente tráfico, intercambio de energía que requieren nuevas soluciones. Sin embargo, es en este aspecto que las MANETs y WSNs son probablemente más parecidas.

Dependencia y QoS Los requerimientos concernientes a la dependencia y QoS son algo diferentes. En una MANET, cada nodo individual debe ser confiable; en una WSN, un nodo individual es casi irrelevante. La calidad de servicio en una

MANET está dado por aplicaciones tradicionales (bajo retardo para aplicaciones de voz por ejemplo); para WSNs, completamente nuevos conceptos de QoS son requeridos, para lo que se debe tener en cuenta también el consumo de energía.

Data Centric La operación redundante hace de un protocolo data-centric atractivo en una WSN. Este concepto es desconocido en las MANETs. Aunque aplicaciones como compartir archivos son usadas en MANETs, protocolos data-centric son irrelevantes.

Simplicidad e insuficiencia de recursos Ya que los nodos de sensor son simples y el recurso de energía escaso, el software de operación y de red debe mantener orden de magnitud más simple que los computadores actuales. Esta simplicidad requiere romper con las reglas convencionales en las capas para software de red, ya que generalmente disponen de tiempo y espacio. Además, recursos como memoria, que es relevante en comparación con los de pesados protocolos de enrutamiento como los usados en MANETs, no están disponibles en cantidades arbitrarias, requiriendo soluciones nuevas, escalables y eficientes.

Movilidad El problema de movilidad en MANETs es causado por nodos moviéndose alrededor, cambiando rutas multipunto en la red. En una WSN este problema también puede existir si los nodos de sensor son móviles en la aplicación dada. Hay dos aspectos adicionales de movilidad para ser considerados en WSNs.

Primero, la red de sensor puede ser usada para detectar y observar un fenómeno físico (en aplicaciones de detección de intruso, por ejemplo). Este fenómeno es la causa de eventos que pasan en la red (como activar alarmas) y pueden también originar algún procesamiento local, por ejemplo determinando si hay realmente un intruso. Qué pasa si este fenómeno se traslada?, Idealmente, datos que han sido recolectados en un lugar deben estar disponibles en el siguiente, también, en aplicaciones de rastreo hay una tarea explícita en la red para asegurar que alguna actividad está pasando en nodos alrededor del fenómeno de observación.

Segundo, los recolectores de información en la red (nodos donde la información debe ser entregada) pueden ser móviles también. En principio, esto no es diferente de la movilidad de nodos en general en las redes MANET, pero puede causar algunas dificultades para los protocolos que operan eficientemente en escenarios completamente estáticos.

Más allá, tanto en MANETs y WSNs, la movilidad puede estar correlacionada – un grupo de nodos moviéndose en un ambiente similar. Esta correlación puede estar dada en una MANET por ejemplo, un grupo de personas viajando juntas. En una WSN, los movimientos de nodos pueden estar correlacionados porque los nodos están siendo llevados por una tormenta, un río u otro fluido.

En conclusión, hay cosas en común, pero el hecho que las WSNs tienen que soportar diferentes aplicaciones, interactuar con el ambiente físico y adjudicar varios intercambios cuidadosamente, considerando sistemas de WSNs como un concepto distinto de MANETs.

Fieldbuses y redes de sensores inalámbricas

Fieldbuses son redes que están específicamente diseñadas para operar bajo circunstancias duras en tiempo real y usualmente con tolerancia a fallas, para ser usada predominantemente en aplicaciones de control. Ejemplos incluyen el Profibus y redes de Token Bus IEEE 802.4 . [12]

Debido a los rigurosos requerimientos de tiempo real, estas redes son usualmente cableadas y solo las capas uno (física), dos (capa de enlace) y siete (aplicación) del modelo de referencia OSI son usadas, evitando comunicación entre múltiples puntos y asociando retardos de espera en nodos intermedios.

Ya que los buses de campo también tienen que lidiar con el ambiente físico por lo que reportan datos sensados y controlan, son en este sentido similares a las WSNs. Con alguna justificación, WSNs pueden ser consideradas ejemplos de buses de campo inalámbricos. Existen algunas diferencias, WSNs no disponen de garantías en tiempo real, pero pueden tolerar retardos y variabilidades. Además, los intercambios adaptables que las WSNs pueden realizar (precisión vs eficiencia de energía por ej.) es un concepto que no esta comúnmente presente en los buses de campo; específicamente, los buses de campo no hacen nada para conservar la energía y sus protocolos no están preparados para hacerlo. Estas distinciones pueden servir como una guía rústica, sin embargo, el límite entre estas dos áreas de investigación es ciertamente borroso.

Habilitando Tecnologías para redes de sensores inalámbricas

Construir redes de sensores inalámbricas se ha hecho posible con algunos avances fundamentales habilitando tecnologías. Primero y más importante entre estas tecnologías es la miniaturización del hardware. Características más pequeñas en chips han bajado el consumo de los componentes básicos de un nodo sensor al nivel que las WSNs pueden contemplar. Esto es particularmente relevante a microcontroladores y chips de memoria como tal, pero también, a radio módems, responsable por la comunicación inalámbrica que se han convertido mucho más eficientes energéticamente. Reducir la talla de los chips y mejorar la eficiencia de energía hacen reducir el costo significativamente, lo que es necesario para desarrollar nodos redundantes.

Más allá del procesamiento y comunicación, el equipo actual de sensado es la tercera tecnología relevante. Aquí, sin embargo, es difícil generalizar debido al gran rango de posibilidades de sensores.

Estas tres partes básicas de un nodo sensor van acompañadas de una fuente de poder. Esto requiere, dependiendo de la aplicación, baterías de alta capacidad que duren por largo tiempo y pueden proporcionar pequeñas cantidades de corriente. Idealmente un nodo sensor también tiene un dispositivo para escanear energía, recargando baterías con energía recolectada desde el ambiente –celdas solares o generación por vibración – son opciones concebibles. Este concepto demanda que las baterías sean eficientemente cargadas con pequeñas cantidades de corriente, lo cual no es un estándar.

La contraparte a las tecnologías básicas de hardware es software. La primera pregunta a responder es la división principal de tareas y funcionalidades en un único nodo – la arquitectura del sistema operativo o ambiente de ejecución. Este ambiente debe soportar intercambio de información entre capas y modularidad

para permitir mantenimientos simples. Esta arquitectura de software en un único nodo debe ser extendida a la arquitectura de la red, donde la división de tareas entre nodos no solo en un único nodo, es una cuestión relevante – por ejemplo, cómo estructurar interfaces para programadores de aplicaciones -. La tercera parte a resolver entonces es el problema de cómo diseñar protocolos de comunicación apropiados.

3.4 IEEE 1451 y Sensores inteligentes

Las Redes de sensores inalámbricas satisfacen estos requerimientos. Funciones deseadas para nodos de sensor incluyen: fácil instalación, auto identificación, auto diagnóstico, confiabilidad, disponibilidad de tiempo para la coordinación con otros nodos, algunas funciones de software y DSP, y protocolos de control e interfaces de red. (IEEE 1451 Expo 2001).

Las características más importantes del estándar IEEE 802.15.4³ son la flexibilidad de la red, bajo costo y bajo consumo de energía. El propósito del estándar es definir los niveles de red básicos para dar servicio a un tipo específico de red inalámbrica de área personal (WPAN) centrada en la habilitación de comunicación entre dispositivos ubicuos con bajo coste y velocidad (en contraste con esfuerzos más orientados directamente a los usuarios medios, como WiFi). Se enfatiza el bajo coste de comunicación con nodos cercanos y sin infraestructura o con muy poca, para favorecer aún más el bajo consumo. Este estándar se puede utilizar en aplicaciones domóticas e industriales, donde se requieren un bajo consumo de energía.

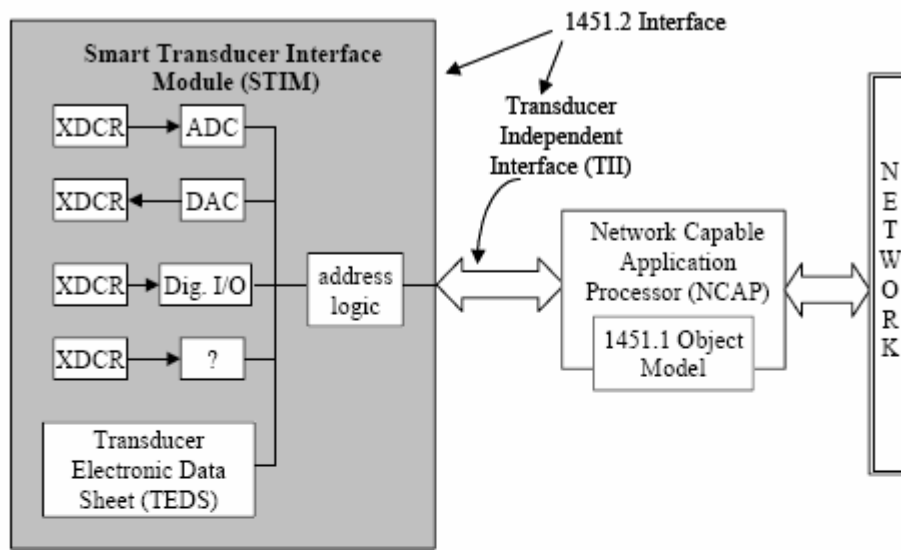
Hoy en día, hay muchos fabricantes en el mercado, es también muy costoso para ellos fabricar transductores especiales para cada red. Componentes de diferentes fabricantes deben ser compatibles, por lo que en 1993 la IEEE y el NIST Instituto Nacional de Estándares y Tecnología empezaron a crear un estándar para redes de sensores inteligentes. IEEE 1451. El objetivo de este estándar es hacer más fácil para diferentes fabricantes, el desarrollo de sensores inteligentes y que interactúen con las redes.

Sensores inteligentes y Sensores virtuales

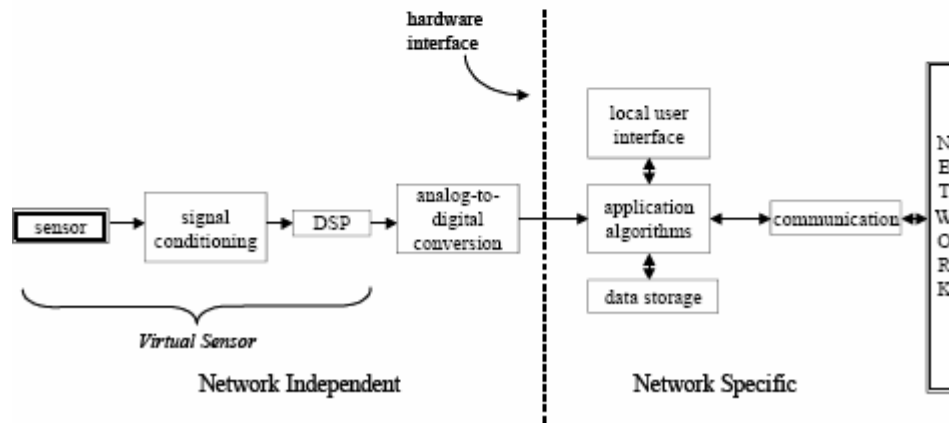
La figura muestra una arquitectura básica de IEEE 1451 (Conway y Hefferman 2003). Los componentes principales incluyen STIM, TEDS, TII y NCAP como se detalla. Un sensor inteligente es un sensor que provee funciones extras aparte de las necesarias para generar una representación correcta de la cualidad sensada. (Frank 2000). Incluyen las condiciones de señal, procesamiento de señal y funciones de alarmas. Un modelo general de un sensor inteligente se muestra en la figura. Los objetivos para un sensor inteligente incluyen trasladar la inteligencia lo más cerca al punto de medida, haciéndolo efectivo para integrar y mantener el sistema de sensores distribuidos, creando un encuentro de transductores, control,

³ www.ieee802.org/15/pub/TG4.html

computación y comunicación hacia una meta en común y de la misma manera interactuando con numerosos sensores de diferentes tipos. El concepto de un *Sensor virtual* es también ilustrado. Un sensor virtual es el sensor físico, más el condicionamiento de la señal asociada y el procesamiento digital de la señal DSP requerido para obtener valores confiables en la información sensada. EL sensor virtual es un componente de un sensor inteligente.



The IEEE 1451 Standard for Smart Sensor Networks



A general model of a smart sensor [IEEE 1451 Expo, Oct. 2001]

Figure 12 Modelo general de un sensor inteligente. IEEE 1451

CAPITULO 4

ARQUITECTURA DEL NODO SENSOR

Las redes de sensores inalámbricas están constituidas por una cantidad de nodos monitoreando extensas áreas. Son nodos autónomos, capaces de organizarse y autorestaurarse, de tal modo que a pesar de que alguno de ellos falle la red busca otros caminos para transportar los paquetes de datos y se adapta al medio físico en el cual se desarrolla la aplicación.

Los nodos sensores comprenden de una parte hardware y software requerido para ejecutar una mínima carga computacional. En el momento de elegir los componentes hardware a utilizar se tiene en cuenta los requerimientos propios de la aplicación donde se define el tamaño, peso, capacidad de procesamiento, costos y consumo de energía de los nodos sensores. Ver figura 13.

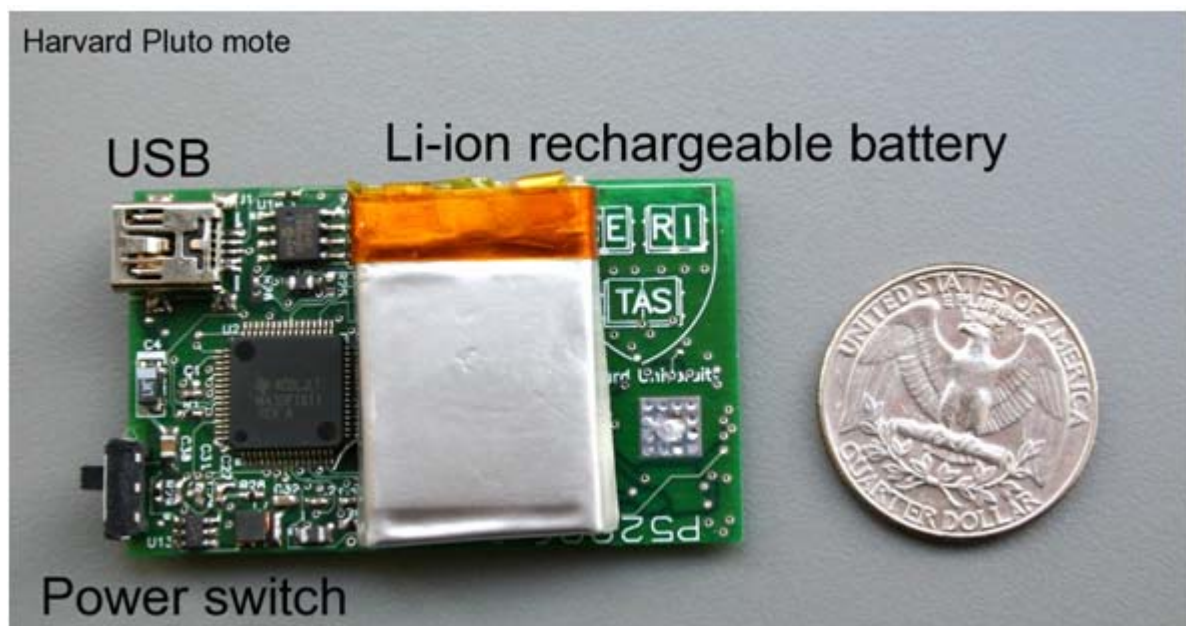


Figure 13 Vista general de un nodo sensor.⁴

⁴ <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/proj/codeblue>

4.1 Plataforma hardware

Por lo general, un nodo sensor completo mide menos de 1cc, pesa menos de 100g y así alcanza a tener un costo de menos de US\$1 y disipar menos de 100uW. En casos extremos, los nodos terminan reduciéndose a tamaños diminutos como partículas de polvo. Pero en aplicaciones reales el tamaño no es tan importante, el interés se centra en el suministro de energía y costos.

Un nodo sensor común comprende de lo siguiente:

1. Controlador: es la unidad de procesamiento, ejecuta los códigos programados.
2. Memoria: guarda la programación y datos recogidos. Se puede utilizar diferentes tipos de memoria.
3. Sensores y actuadores: son las interfaces hacia el mundo físico; dispositivos que pueden observar y controlar parámetros físicos del ambiente.
4. Comunicación: en una red con nodos de inflexión requiere de un dispositivo para enviar y recibir información sobre un canal inalámbrico.
5. Suministro de energía: dispone de baterías como fuente de energía. Algunas veces utiliza como medio de recarga la energía obtenida del ambiente. (celdas solares).

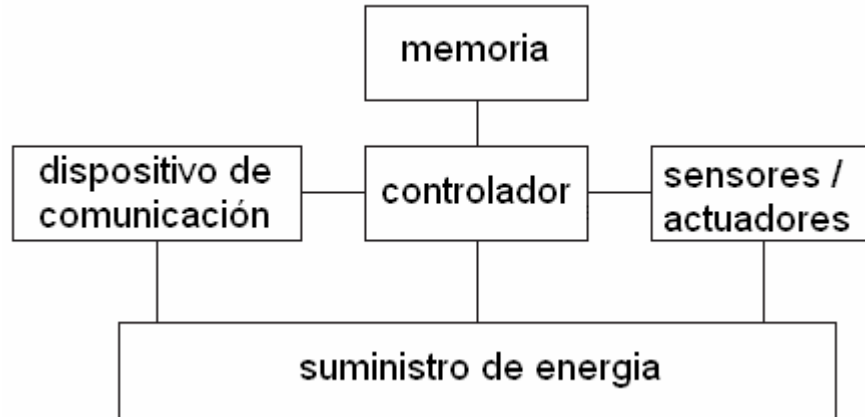


Figure 14 Componentes principales de un nodo sensor

Los componentes del sensor trabajan de tal manera que siempre exista una compensación entre el consumo de energía y el cumplimiento de sus tareas.

A través de la interconexión de componentes se transporta paquetes de datos y control. El envío más sencillo contiene datos analógicos del sensor entregados al controlador. También está el sensor inteligente, el cual realiza un pre procesamiento al dato censado y solo se comunica con el controlador cuando exista una alarma, como el cruce de un umbral por parte de un sensor de temperatura.

4.1.1 Controlador.

Es la parte inteligente del nodo sensor. Es el encargado de recoger los datos provenientes de los sensores, procesa los datos y decide cuando y donde enviar la información. Recoge datos de otros nodos sensores activos, además interviene en el comportamiento de los actuadores. Ejecuta varios programas desde adquisición y tratamiento de los datos hasta protocolos de comunicación y enrutamiento.

Se encuentran disponibles varias arquitecturas de controladores con compensación entre flexibilidad, rendimiento, eficiencia de energía y costos.

La primera opción es el procesador de propósito general. Es aquel que se utiliza en los computadores de escritorio. Es un procesador bastante sobredimensionado y el consumo de energía es alto. Existen procesadores más simples llamados microcontroladores, se caracterizan por su alto grado de flexibilidad en la conexión con otros dispositivos (sensores). Posee otras características propicias para este tipo de sistemas encajados como el conjunto de instrucciones utilizadas para el procesamiento de datos en tiempo crítico y el bajo consumo de energía. Los microcontroladores son apropiados para las redes de sensores inalámbricas WSNs porque tienen la capacidad de entrar en estados de sueño (sleep states), donde algunas partes del controlador están activas lo que permite reducir el consumo de energía. La deficiencia que presentan los sistemas que utilizan microcontrolador es que no hay unidad de gestión de memoria, limitando la funcionalidad de la memoria y la memoria virtual está ausente.

Un caso especial de procesadores programables son los DSPs (Digital Signal Processor) elaborados para procesar un gran número de datos vectoriales en paralelo a muy alta velocidad. En comunicaciones inalámbricas de banda ancha los DSPs funcionan satisfactoriamente. Pero en redes de sensores los requerimientos de comunicación son menos complicados y el procesamiento de las señales recogidas por la actual forma de monitoreo no es tan robusto, razón por la cual los DSPs no son comúnmente utilizados.

Otra opción de controlador, es la combinación de la flexibilidad característica de un microcontrolador y el uso de arreglo de compuertas en campo programable (FPGAs) o en su lugar circuitos integrados de aplicación específica (ASICs). Los FPGAs permiten programar en campo abierto adaptando el sistema a las nuevas condiciones de trabajo. Pero esto genera un alto consumo de energía y tiempo. No es recomendable reprogramar con frecuencia como se puede hacer en microcontroladores. El Asic es un procesador especializado, diseñado para aplicaciones específicas, como routers y switches de alta velocidad. Este proporciona un mejor rendimiento y eficiencia de energía sacrificando flexibilidad. Cuando un microcontrolador requiere desarrollo en software. El Asic cumple la misma funcionalidad en hardware, por lo tanto la componente hardware se hace más costoso.

Para aplicaciones hechas en WSNs, donde implique un gran número de nodos sensores que validen la fabricación y los objetivos involucrados en su operación no cambian drásticamente en el tiempo son condiciones que justifican el uso de ASICs en dicha red. Sin embargo la flexibilidad y bajo costo que se puede conseguir con la implementación de micro controladores, hacen de esta arquitectura la comúnmente implementada en las actuales redes de sensores inalámbricas.

Se pretende dividir las tareas de procesamiento para un mejor rendimiento, entre las cuales, algunas de bajo nivel, de funcionalidad fija ser desarrolladas por Asics mientras que las de alto nivel, con mayor flexibilidad ser ejecutadas por microcontroladores, es un diseño de gran interés en los temas de investigación.

4.1.2 Memoria.

El dimensionamiento de la capacidad de memoria es un factor decisivo en los costos de manufacturación y consumo de energía en el nodo sensor. Sin embargo los requerimientos de la aplicación determinan las características de memoria.

4.1.3 Sensores y actuadores.

La esencia de las redes de sensores inalámbricas y su vasto rango de aplicaciones radica en el funcionamiento de muchos sensores y actuadores operando en conjunto para cumplir ciertas tareas específicas.

Los sensores se dividen en tres categorías:

Sensores omnidireccionales pasivos: son aquellos que miden una magnitud física sin manipular la realidad del entorno. Son elementos pasivos. Algunos de estos

sensores obtienen la energía del medio ambiente requerida para la amplificación de la señal analógica. El concepto de dirección no influye en las mediciones. Ejemplos de esta categoría incluye termómetros, sensores de luz, micrófonos, sensores químicos sensibles a ciertas sustancias, vibración, humedad, presión de aire, detectores de humo, entre otros.

Sensores de haz angosto pasivos: son elementos pasivos. La dirección es tenida en cuenta en la medición. Un ejemplo es una cámara que realiza varias tomas de medidas en una dirección específica, y requiere ser rotada en caso de que haya un cambio de posición para realizar otras medidas.

Sensores activos: corresponde al grupo de sensores que alteran el medio ambiente en sus sondeos. Ejemplos tales como los radares o algunos sensores sísmicos, que generan ondas de choque a través de pequeñas explosiones.

En general, el campo de la investigación teórica de redes de sensores, encierra los sensores de tipo pasivo, omnidireccional. Los sensores de haz angosto son usados en algunos campos de prueba, pero no hay una investigación sistemática que provea la forma de controlar y programar la circulación de todos estos sensores.

Actuadores: Son un gran número de actuadores presentes en una WSN. La acción más básica que un nodo de sensor ejecuta es encender o apagar un interruptor o un relé, o fijar un valor específico. Si este controla un motor, una bombilla u otro objeto físico no tienen ningún interés los protocolos de comunicaciones en estas acciones. Sin embargo una red debe conocer la idiosincrasia de los actuadores y tener como principio de diseño el arreglo de un actuador acompañado por una acción de control.

4.1.4 Dispositivo de comunicación.

Las comunicaciones por medios guiados son una elección frecuentemente observadas en varias redes de sensores.

Últimamente se encuentra un atractivo por las comunicaciones inalámbricas, favorable para el escenario en donde se lleva a cabo las aplicaciones de este tipo de red donde el cableado es una limitante. En primera instancia se realiza una selección del medio de transmisión: en los cuales incluye radiofrecuencia (RF), comunicaciones ópticas, y ultrasonido. Medios como la inductancia magnética son utilizados en casos muy específicos. La comunicación basada en radiofrecuencia es el medio elegido para redes de sensores inalámbricas porque se ajusta a los requerimientos, maneja altas velocidades de datos, permite un amplio rango de frecuencias de operación, las tasas de error son aceptables y el gasto de energía es razonable, también una característica fundamental es que no requiere línea de vista entre el transmisor y el receptor, indispensable en estos ambientes donde se presenta muchos obstáculos.

Las redes de sensores inalámbricas basadas en sistemas de radiofrecuencia trabajan típicamente en el rango de frecuencias comprendido entre 433MHz y 2.4GHz.

TRANSCÉPTORES

En el nodo sensor, ciertos dispositivos deben cumplir tareas de transmisión y recepción de tramas de datos que a su vez son convertidos en ondas de radio. Dichos dispositivos son conocidos como transceptores capaces de actuar como transmisores y al mismo tiempo receptores además de hacer el proceso de conversión.

Una estructura bastante común de un transceptor se localiza en el extremo local de radio frecuencia y en la parte de bandabase:

El extremo frontal se encarga de procesar la señal análoga y la parte de bandabase procesa la señal ya digital y la transmite al procesador y demás circuitos digitales.

Entre estas dos partes existe una conversión en frecuencias en donde interviene una o dos frecuencias intermedias (lfs). En la frontera entre el dominio análogo y digital contiene conversores análogos/digitales y conversores digitales/análogos

El extremo frontal de RF realiza el procesamiento de la señal análoga en la banda actual de radiofrecuencia de 2.4GHz para aplicaciones industriales, científicas y medicas.

El siguiente diagrama describe la arquitectura de un extremo frontal de radiofrecuencia:

- Amplificador de potencia (PA) : acepta las señales convertidas provenientes de la parte bandabase y las amplifica para ser luego transmitidas por la antena
- Amplificador de ruido de bajo nivel (LNA): amplifica señales entrantes débiles provenientes de los nodos, a niveles convenientes para su posterior procesamiento sin afectar la relación SNR y cierra el paso a señales fuertes desde nodos cercanos, el rango está por encima de los 100db. sin ninguna acción administrativa el amplificador LNA está activo todo el tiempo produciendo un gasto de energía significativo del transceptor.
- Osciladores locales y mezcladores: usados para convertir las frecuencias de las señales RF en frecuencias intermedias. La señal con frecuencia RF f_{RF} es multiplicada en el mezclador con la frecuencia fija del oscilador local f_{LO} resultando la señal de frecuencia intermedia igual a $f_{LO} - f_{RF}$

Algunas arquitecturas incluyen otros elementos como filtros.

Se distinguen cuatro estados en un transceptor frecuentemente:

1. transmitiendo: los elementos implicados en la transmisión están activos y la antena radia energía.
2. recibiendo: la parte de recepción esta activa
3. inactivo: el transceptor está listo para recibir pero no recibe correctamente. En este estado algunas partes del circuito receptor se encuentran activas y otras no, es el caso, cuando en el circuito de sincronización, algunos elementos que

intervienen en la adquisición están activos, mientras aquellos involucrados con el seguimiento están apagados y solo se encienden cuando la adquisición halla encontrado algo.

4. sueño: en este estado las partes significativas del transceptor están apagadas. Existen diferentes estados de sueños, difieren en la cantidad de circuitos que se encuentran apagados, en los tiempos de recuperación y en la energía de arranque.

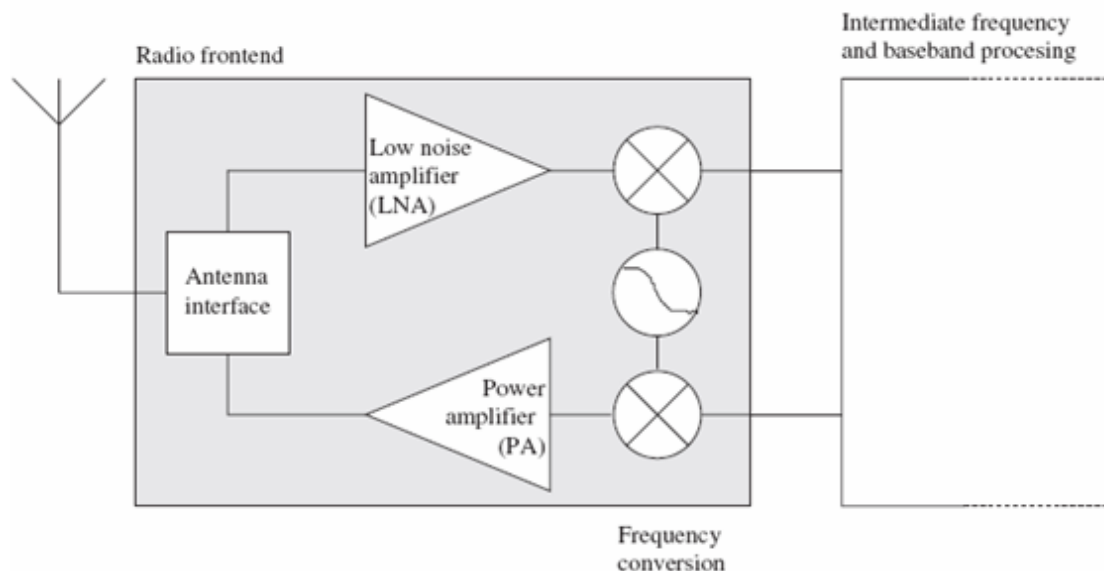


Figure 15 Diagrama general del extremo frontal RF⁵

4.1.5 Suministro de energía del nodo sensor.

Contar con una fuente de alimentación sin ataduras es crucial en los nodos sensores. Es de carácter relevante el almacenamiento y suministro de energía de manera requerida, adicionalmente tratar de reponer la energía consumida desde una fuente de alimentación externa en el tiempo.

La fuente de potencia en los nodos sensores es la batería no recargable como fuente principal y otros dispositivos de energía desechables recargables como baterías secundarias.

Las baterías son almacenamientos electro-químicos de energía. Los componentes químicos que contiene son un factor determinante en la tecnología de la batería.

La capacidad de almacenamiento debe ser alta en un dispositivo pequeño, poco peso y bajo costo. La medida principal es la energía por volumen expresado en unidades de J/cm^3 . La tabla X contiene algunos valores típicos de densidades de energía usando la tecnología de baterías de macroescala. El desarrollo de baterías de microescala insertadas en un chip se está llevando a cabo actualmente.

⁵ **Karl, Holger y Willig, Andreas.** *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. s.l. : John Wiley & Sons, 2005. 0-470-09510-5. p. 25

Primary batteries			
Chemistry	Zinc-air	Lithium	Alkaline
Energy (J/cm ³)	3780	2880	1200
Secondary batteries			
Chemistry	Lithium	NiMHd	NiCd
Energy (J/cm ³)	1080	860	650

Figure 16. Tabla 1. Densidades de energía de baterías de macroescala

Energía almacenada: Comprende de almacenamientos de energía no convencionales como celdas de combustible, micromotores térmicos, radioactividad. Que convierten la energía almacenada en eléctrica en una forma menos directa.

Todo el suministro de energía se guarda en el nodo, en el momento en que este se agota el nodo comienza a fallar, para evitar esto se recurre a un nodo externo alimentado por una energía tomada del ambiente siempre disponible.

En la figura 17 se muestran los valores típicos de densidades de potencia y energía de diferentes fuentes de energía.

Energy source	Energy density
Batteries (zinc-air)	1050–1560 mWh/cm ³
Batteries (rechargeable lithium)	300 mWh/cm ³ (at 3–4 V)
Energy source	Power density
Solar (outdoors)	15 mW/cm ² (direct sun) 0.15 mW/cm ² (cloudy day)
Solar (indoors)	0.006 mW/cm ² (standard office desk) 0.57 mW/cm ² (<60 W desk lamp)
Vibrations	0.01–0.1 mW/cm ³
Acoustic noise	3 · 10 ⁻⁶ mW/cm ² at 75 dB 9, 6 · 10 ⁻⁴ mW/cm ² at 100 dB
Passive human-powered systems	1.8 mW (shoe inserts)
Nuclear reaction	80 mW/cm ³ , 10 ⁶ mWh/cm ³

Figure 17. Tabla 2. Densidades de energía y potencia de algunas fuentes.⁶

⁶ *Ibíd.* p. 36

4.2 Ejemplo de nodos de sensores

Hay un número significativo de nodos disponibles para desarrollo e investigación de redes de sensores inalámbricos. Dependiendo de los escenarios de aplicación, estos tienen que cumplir diferentes requerimientos con respecto al tiempo de vida de la batería, robustez mecánica, de la cubierta del nodo, tamaño. Aquí se encuentran los desarrollos principales que han aportado en el proceso de investigación.

4.2.1 La familia “Mica Mote”.

Inicia en el año de 1990, una familia entera de nodos surge de los proyectos de investigación de la universidad de California en Berkeley, particularmente con la colaboración de Intel, por varios años. Ellos son conocidos comúnmente como “Mica Motes”, las cuales tienen diferentes versiones (Mica, Mica2, Mica2dot). Estos son comercialmente disponibles por la compañía Crossbow en diferentes versiones y diferentes kits. TinyOS es el sistema operativo usado para estos nodos.

Un ejemplo de esquema general de un nodo se muestra en la figura 18.

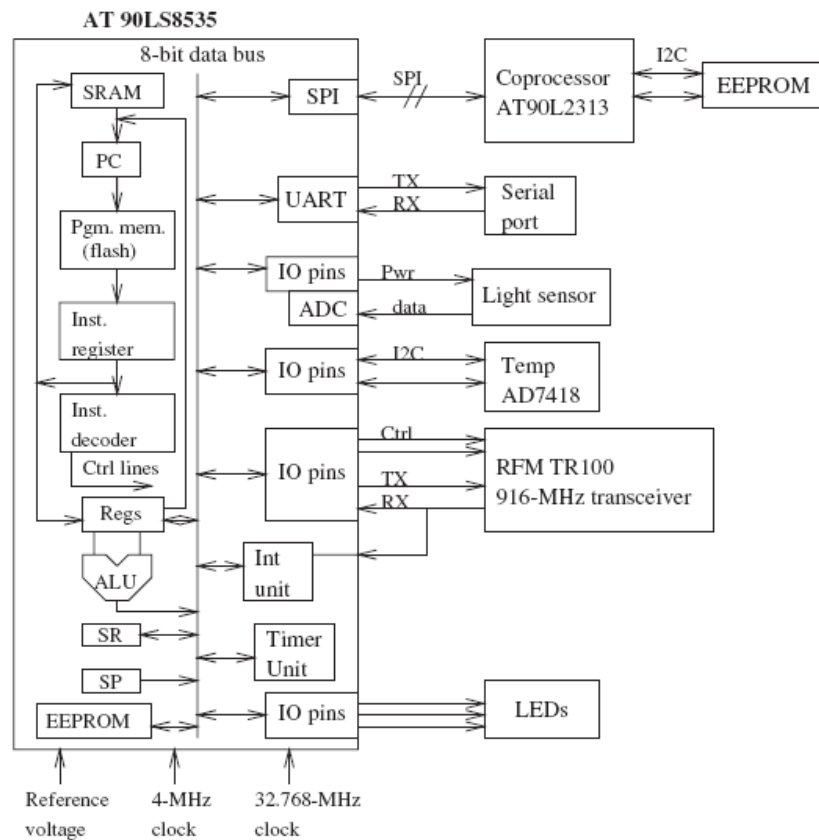


Figure 18. Esquema general de un nodo sensor⁷

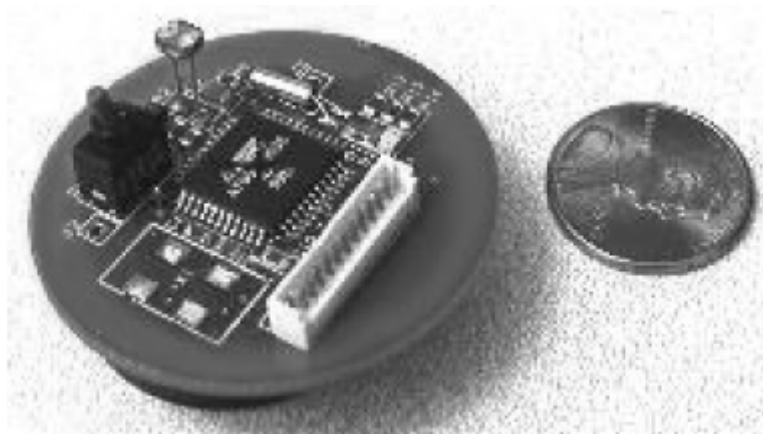


Figure 19 Esquema y fotografía de un nodo Mica.

Las tarjetas se caracterizan por un microcontrolador de la familia de Atmel, un simple radio modem (usualmente un TR 1000 de RFM), y varias conexiones externas. Por lo tanto, es posible la conectividad de tarjetas de sensores adicionales, como sensores de humedad o barométricos. Además recintos especializados han sido construidos para uso en ambientes hostiles. Los sensores

⁷ *Ibíd.* p. 55

son conectados al controlador a través de bus I2C o SPI, dependiendo de la versión.

4.2.2 Los nodos EYES.

Proyecto “redes de sensores con eficiencia de energía” (EYES), desarrollado por Infineon respaldado por la unión Europea. Son otro ejemplo de un típico nodo de sensor. Este es equipado con un microcontrolador MSP 430 de Texas Instrument, un modem radio Infineon TDA 5250, con un filtro SAW y un control de potencia de transmisión; el radio modem además reporta la medida de fuerza de la señal a el controlador. El nodo tiene una interfaz al PC USB, además de la posibilidad de adicionar actuadores/sensores. Vea la figura 19.

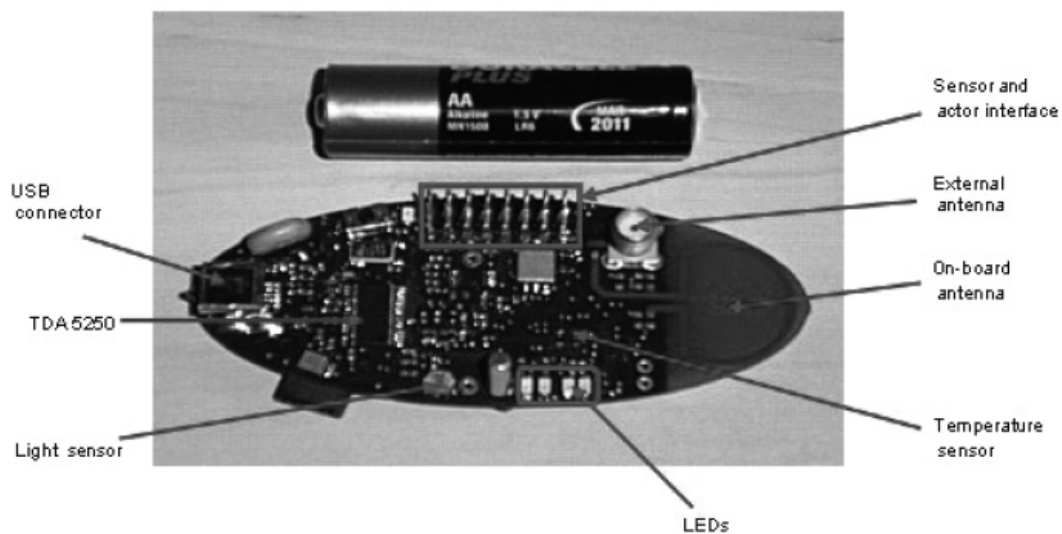


Figure 20 Nodo sensor EYES⁸

4.2.3 Scatterweb.

La plataforma ScatterWeb fue realizada por el grupo de telemática y sistemas de computación de la Universidad Freie de Berlín. Esta es una familia entera de nodos, partiendo de un nodo de sensor estándar (basado en el microcontrolador MSP 430) y encajando con servidores Web, además vienen equipados para un amplio rango de posibilidades de interconectividad, como Bluetooth y modo de radio de baja potencia, conexiones para I²C o CAN están disponibles. Ver la figura 20.

⁸ *Ibíd.* p. 56



Figure 21 Servidor Web encajado ScatterWeb.⁸⁹

Soluciones comerciales

Aparte de los anteriores prototipos de investigación académica, hay unos dispositivos de tipo nodo-sensor disponibles comercialmente. Algunas compañías incluidas son “ember” (www.ember.com), crossbow (www.xbow.com), el mercado aquí es muy dinámico y en continuo avance.

Otra compañía dedicada a fabricar sensores, nodos de voltaje y estaciones base inalámbricas con software incluido es MicroStrain Inc. (www.microstrain.com).

⁹ *Ibíd.* p. 57

CAPITULO 5

ARQUITECTURA DE LA RED DE SENSORES INALAMBRICAS

La arquitectura de redes de sensores inalámbricas utiliza muchas fuentes. Históricamente, muchos trabajos relacionados han sido hechos en el contexto de movilidad, auto-organización, redes ad hoc. Mientras estas redes son previstas para diferentes propósitos, ellos parten de la necesidad de una organización de forma distribuida y descentralizada. Desde una perspectiva diferente, las redes de sensores están relacionadas con un procesamiento en tiempo real, redes punto a punto, y agentes móviles. Ver figura 22.



Figure 22 Forma distribuida y descentralizada

El número de investigaciones y publicaciones acerca de las arquitecturas de establecimiento de redes de sensores inalámbricos es inmenso, es difícil atribuir quien fue el que tuvo la idea certera de esta clase de red, desde que muchas de

ellas son derivaciones obvias de áreas ya mencionadas, además conceptos similares han sido propuestos más o menos frecuentemente por diferentes autores.

5.1 Escenarios de red de sensores

Los modelos de interacción típicos para WSNs comprenden detección de eventos, medidas periódicas y seguimiento. Además se manejan dos conceptos nodos fuentes y nodos recolectores. Una fuente es alguna unidad en la red que puede proveer información, que es, típicamente un nodo de sensor; este podría también ser un nodo actuador que permite retroalimentación en una operación.

Un nodo recolector, por otra parte, es una unidad donde la información es requerida, hay esencialmente tres opciones para un recolector: este podría pertenecer a la red de sensores y ser otro nodo sensor/actuador, o este podría ser una unidad externa a la red. El segundo caso, el recolector podría ser un dispositivo actual, por ejemplo, una computadora de mano o PDA usada para interactuar con la red de sensores; esta podría además ser simplemente un gateway hacia otra red mucho mas grande como el Internet, donde el actual requerimiento para la información viene de algún nodo lejano y solo se conecta indirectamente a dicha red de sensores. Estos tres tipos de recolectores se observan en la figura 23 mostrando fuentes y recolectores en comunicación directa.

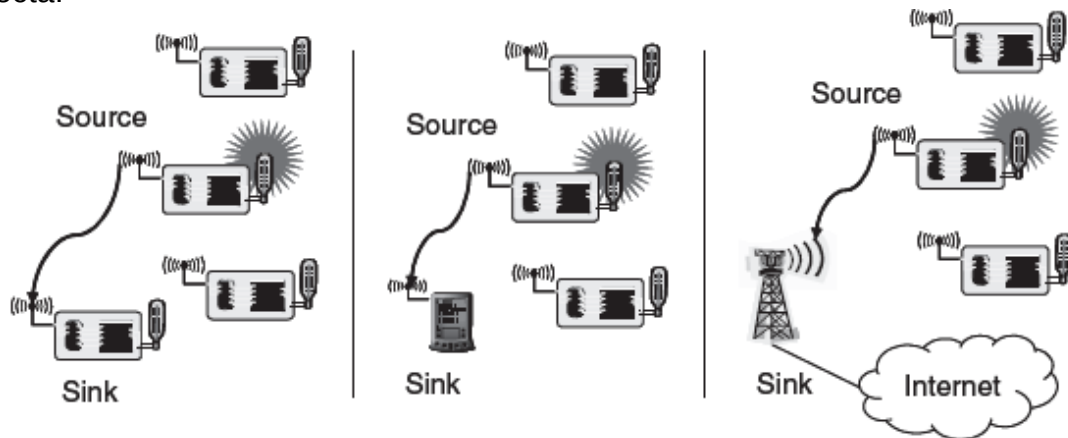


Figure 23 Fuentes y recolectores¹⁰

5.2 Redes solo salto versus multisalto

Desde las bases de la comunicación radio y la limitación de potencia inherente, le sigue la limitación en la distancia factible entre el transmisor y el receptor. La razón de esta distancia limitada, la comunicación directa y simple no siempre es posible en las WSNs, las cuales son previstas para cubrir grandes extensiones de tierra

¹⁰ *Ibíd.* p. 60

(aplicaciones ambientales o agricultura), o que operan en radios difíciles con atenuaciones altas (en edificios).

Para superar la limitación de distancia, una solución práctica es usar estaciones repetidoras, con los paquetes de datos tomando caminos multisalto desde la fuente hacia el recolector. Este concepto de redes multisalto es bastante atractivo en redes de sensores inalámbricas como los nodos sensores, ellos mismos actúan como nodos repetidores, previniendo la necesidad de equipos adicionales. De acuerdo a la aplicación, la probabilidad de tener un nodo sensor intermedio en el lugar correcto puede ser bastante alta. Por ejemplo, cuando un área dada tiene que ser equipada uniformemente con nodos sensores donde sea, pero sin embargo, no hay una garantía de que tales rutas multisalto desde la fuente hasta el recolector existan, ni que tal ruta es la mas corta.

El multisalto ha sido la solución trabajada para superar problemas de largas distancias y obstáculos, esta ha sido pedida para mejorar la eficiencia de energía de comunicación.

La intención detrás de esta petición es que, como la atenuación de señales de radio es por lo menos cuadrática en ambientes grandes, este consume menos energía por usar repetidores en lugar de comunicación directa. Para determinar la orientación de la constante SNR para todos los receptores (asumiendo una tasa de error insignificante para este SNR). La energía radiada requerida para comunicación directa sobre una distancia d es cd^a (c es alguna constante, $a \geq 2$ coeficiente de perdidas por trayectoria); usando un repetidor a una distancia $d/2$ reduce esta energía a $2c(d/2)^a$

Pero este cálculo solo considera la energía radiada, no la actualmente consumida (la energía consumida en el nodo repetidor intermedio). Incluso asumiendo que este repetidor pertenece a la WSN y esta dispuesto a cooperar, cuando al computar la energía requerida total es necesario tomar en cuenta el consumo total de potencia. Esto es un ejercicio fácil para mostrar que la energía es actualmente gastada si el repetidor intermedio es usado para cortas distancias d . solo para largas d hace que la energía radiada domine los costos de la energía fija consumida en el transmisor y receptor electrónicos. La distancia concreta donde la comunicación directa y multisalto están en balance depende de muchos parámetros específicos de dispositivo y ambientales. Sin embargo, esta relación es a menudo no considerada.

Cabe señalar que solo las redes multisalto operan en un modo de almacenamiento y adelanto. En dicha red, un nodo tiene que recibir correctamente un paquete antes de que este avance a alguna parte. Alternadamente, propuestas innovadoras intentan explotar hasta recepciones erróneas de paquetes, por ejemplo, cuando múltiples nodos envían el mismo paquete y cada transmisión individual no puede ser recibida, pero colectivamente, un nodo puede reconstruir el paquete completo.

5.3 Múltiples nodos recolectores y nodos fuentes

En varios casos se presentan múltiples fuentes y/o múltiples recolectores, en el caso más difícil, múltiples fuentes deben enviar información a múltiples recolectores en donde ya sea la totalidad o parte de la información tiene que llegar a todos o algunos de los recolectores. En la figura 24 se observa estas combinaciones.

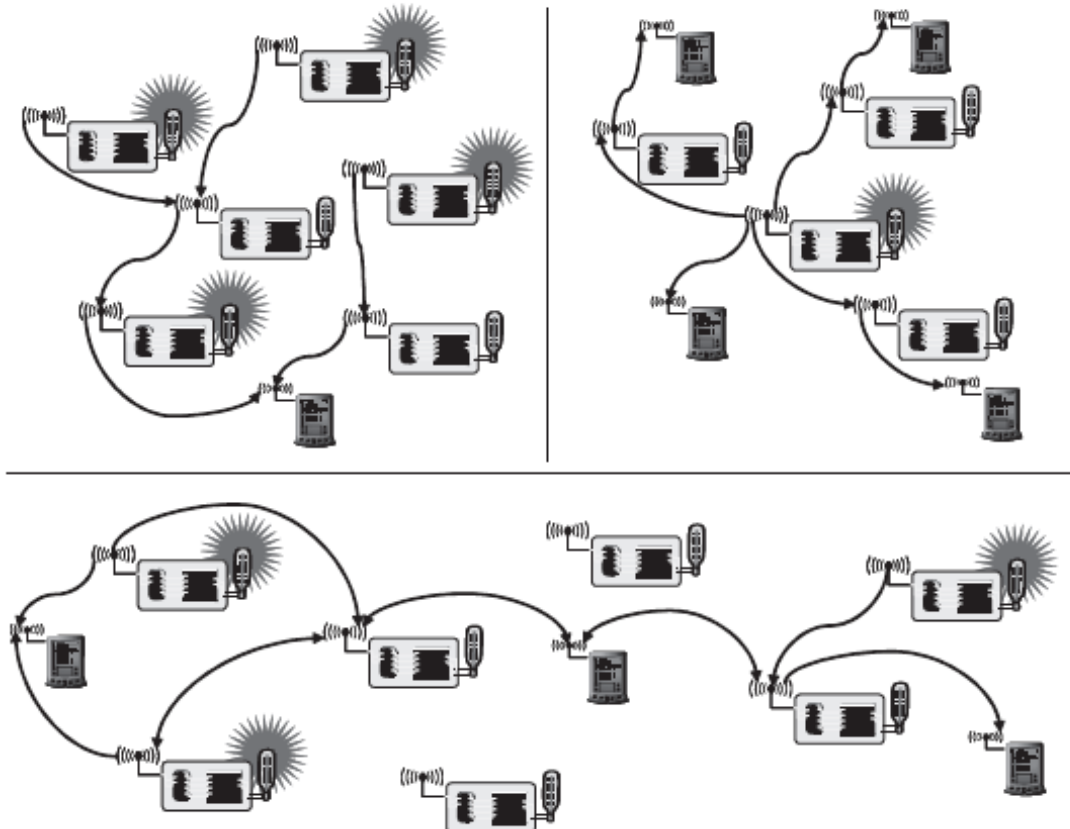


Figure 24 Múltiples fuentes y o múltiples recolectores. En la parte inferior observamos como ambos las fuentes activas y recolectores reenvían datos a los recolectores que se encuentran en el extremo izquierdo y derecho de la red.¹¹

5.4 Tres tipos de movilidad

En los escenarios discutidos arriba todos los participantes están estacionarios. Pero una de las ventajas de la comunicación inalámbrica es la capacidad de soportar elementos móviles. En redes de sensores inalámbricas pueden aparecer en tres formas diferentes:

Movilidad del nodo: el nodo de sensor inalámbrico en si puede ser móvil. El significado de tal movilidad es una aplicación altamente dependiente. En ejemplos como control ambiental, la movilidad del nodo no funciona muy bien mientras que

¹¹ *Ibíd.* p. 62

en vigilancia en ganadería (el nodo sensor se ata al ganado, por ejemplo) esta es una regla muy común.

Ante la movilidad del nodo, la red tiene que reorganizarse frecuentemente lo suficiente para ser capaz de funcionar correctamente. Es claro que hay compensaciones entre la frecuencia y la velocidad del movimiento del nodo por un lado y la energía requerida para mantener un nivel deseado de funcionalidad en la red por otra parte.

Movilidad del recolector

El nodo recolector de información puede ser móvil. Mientras este puede ser un caso especial de movilidad de nodo, el aspecto importante es la movilidad de un nodo recolector de información que no es parte de la red de sensores, por ejemplo, un usuario humano pide información a través de un PDA mientras camina en un edificio inteligente. Ver figura 25

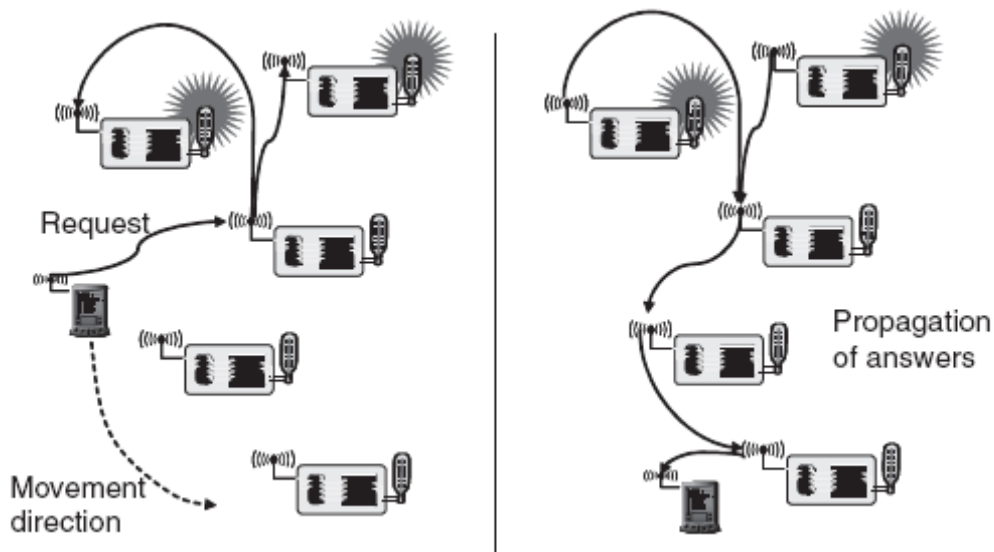


Figure 25 Movilidad del nodo recolector¹²

En un caso simple, tal solicitante puede interactuar con la WSN en un punto y completar sus interacciones antes de seguir. En muchos casos, interacciones consecutivas pueden ser tratadas como separadas, solicitudes no vinculadas. Si el solicitante se le es permitido las interacciones con algunos nodos o solo con nodos específicos es una opción de diseño por las capas de protocolo apropiadas.

Un solicitante móvil es particularmente interesante, sin embargo, si el dato requerido no está localmente disponible, pero puede ser recuperado desde alguna parte remota de la red. Por tanto, mientras que el solicitante probablemente se comunicaría solo con nodos en su vecindad. Este podría haberse trasladado a otro lugar. La red, posiblemente con la asistencia de un solicitante móvil, debe formular disposiciones de manera tal que el dato requerido sigue y llega al solicitante de acuerdo a sus movimientos.

¹² *Ibíd.* p. 63

Movilidad del evento

En aplicaciones como detección de evento y en particular en aplicaciones de seguimiento, la causa de los eventos o los objetos para ser observados puede ser móvil.

En tales escenarios, es usual que el evento observado este cubierto por un número suficiente de sensores todo el tiempo. Por tanto, los sensores se despiertan alrededor del objeto, participan en actividad superior para observar el presente objeto, y después regresarse a estado de sueño. Como la fuente del evento se mueve a lo largo de la red, este es acompañado por un área de actividad dentro de la red. El ha sido llamado el modelo frisbee, este tema es descrito por la figura 26, donde el objetivo es detectar el movimiento de un elefante y observar este como se mueve alrededor. Nodos que no detectan alguna actividad son destinados a cambiar a estado de sueño a menos que ellos sean requeridos para transmitir información desde la zona de actividad a algún nodo recolector remoto.

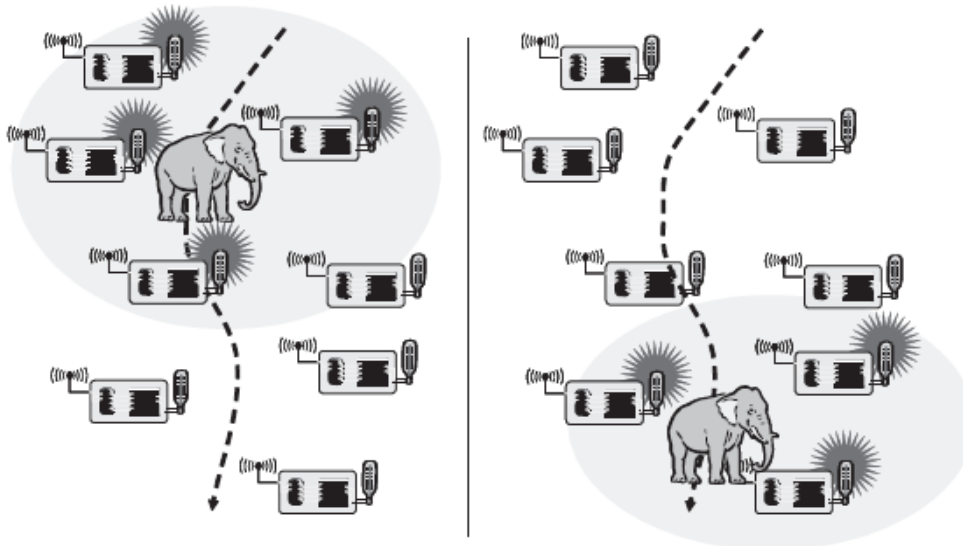


Figure 26 Área de los nodos sensores detectando un evento; un elefante caminando a través de la red.¹³

5.5 Principios de diseño para WSNs

Soporte QoS apropiado, eficiencia de energía y escalabilidad son objetivos importantes de diseño y optimización para redes de sensores inalámbricas, pero estas metas en si no proporcionan muchas pistas en como estructurar una red tal que ellas sean logradas. Unos cuantos principios básicos han surgido, los cuales pueden ser usados cuando se está diseñando protocolos en la creación de redes.

¹³ *Ibíd* p. 64

No obstante, el consejo general siempre a considerar son las necesidades particulares de la aplicación. Para cada uno de estos principios básicos, hay ejemplos donde seguirlos resultarían ser soluciones inferiores.

5.5.1 Organización distribuida.

Ambos la escalabilidad y el objetivo de una optimización robusta, y algún grado además de otros objetivos, exigen organizar la red en un modo distribuido. Esto significa que no debería haber una unidad centralizada a cargo. Tal entidad podría, por ejemplo, control de acceso al medio o tomar decisiones de direccionamiento, similar a las tareas que hace una estación base en una red celular móvil. El enfoque centralizado tiene desventajas en WSNs, por su difícil implementación en la red, donde los participantes solo tienen un rango de comunicación limitado. Los nodos de WSNs deben organizar cooperativamente la red, usando protocolos y algoritmos distribuidos. La autoorganización es un término usado comúnmente para este principio.

Cuando se organiza una red en modo distribuido, es necesario ser consciente de las deficiencias de potencial de este enfoque. En muchas circunstancias, un enfoque centralizado puede producir soluciones que se desarrollan mejor y requieren menos recursos (en particular, la energía). Para combinar las ventajas, una posibilidad de usar principios centralizados en un modo localizado por elección dinámica, fuera del conjunto de nodos iguales, nodos específicos que asumen las responsabilidades de un agente centralizado, por ejemplo, organizar acceso al medio. Tales elecciones resultan en una jerarquía, la cual tiene que ser dinámica: el proceso de elección debería ser repetida continuamente.

5.5.2 Procesamiento en la red.

Cuando organizamos una red en forma distribuida, los nodos en la red no están solo transmitiendo paquetes o ejecutando programas de aplicación, ellos están activamente envueltos en la toma de decisiones sobre como operar en la red. Esta es una forma específica de procesamiento de información que sucede en la red, pero se limita a la información sobre la red en si. Es posible extender este concepto también para tomar en cuenta los datos concretos que están siendo transportados por la red en este procesamiento de información, haciendo del procesamiento en la red un principio de diseño de primer grado.

5.5.3 Agregación.

Quizás la técnica de procesamiento en red más simple es la agregación. Supongamos un recolector está interesado en obtener medidas periódicas desde todos los sensores, pero el solo esta pertinente para chequear si el valor promedio ha cambiado. O si la diferencia entre el valor máximo y mínimo es también grande. En tal caso, evidentemente no es necesario transportar estas lecturas desde todos los sensores al nodo recolector, sino más bien, este basta enviar el promedio o los valores mínimos y máximos. La transmisión de datos es

considerablemente más costosa que incluso la computación compleja muestra los grandes beneficios de la eficiencia de energía de su acercamiento. El nombre agregación se origina del hecho que en nodos intermedios entre fuentes y recolectores, la información es agregada en una forma condensada fuera de la información proveniente de nodos lejanos desde el recolector (y potencialmente, lecturas propias de el agregado)

Claramente, la función de agregación esta aplicada en el nodo intermediario debe satisfacer algunas condiciones para que el resultado sea significativo; Una clasificación mas allá de funciones agregadas distinguen sensible-duplicado versus insensible, resumen versus ejemplar, monótono versus no monótono, y algebraico versus holístico funciones como promedio, conteo, o mínimo puede ganar mucho de la agregación; funciones holísticas como la media no son dóciles para agregación.

La figura 27 ilustra la idea de agregación. Por otra parte, un numero de sensores transmitiendo lecturas a un nodo recolector, usando comunicación multisalto. En total, 13 mensajes son requeridos (los números en la figura indican el numero de mensajes que viajan por un enlace dado.) cuando los nodos resaltados realizan agregación por ejemplo para valores promedio computarizados (mostrado en la parte derecha de la figura)- solo 6 mensajes son necesarios.

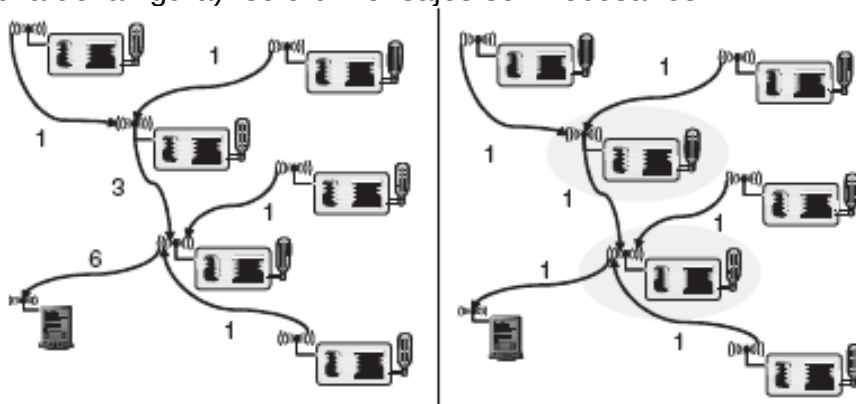


Figure 27 Ejemplo de agregación¹⁴

Los desafíos en este contexto incluye como determinar donde agregar resultados de nodos que, como esperan por el resultado tal y determinando el impacto de menos paquetes.

5.5.4 Fuente de codificación y compresión distribuida.

La agregación condensa y sacrifica información sobre los valores medidos en orden para no tener que transmitir todos los bits de datos de todas las fuentes al recolector. Es posible reducir el número de bits transmitidos (comparando la transmisión simple de todos los bits) pero aun se obtiene la información completa acerca de todas las lecturas de los sensores al recolector?

¹⁴ *Ibíd.* p. 68

Mientras esta pregunta suena sorprendentemente en primer lugar, es de hecho posible dar una respuesta positiva. Está relacionado a los problemas de compresión y codificación conocidos desde redes convencionales, donde mucho esfuerzo se invierte para codificar, por ejemplo, una secuencia de video, para reducir el ancho de banda requerido, el problema aquí es ligeramente diferente, en que nosotros estamos interesados en codificar la información entregada por varios sensores, no solo por una única cámara; además, esquemas de codificación tradicional tiende a poner esfuerzo en la codificación, la cual puede ser también computacionalmente compleja para nodos sensores simples.

Como puede el hecho que la información proveniente por sensores múltiples ser explotada para ayudar a la codificación? si los sensores están conectados y pueden intercambiar sus datos, este podría ser concebible (usando algoritmos de compresión estándar), pero por supuesto inútil. Por tanto, algún implícito, la información común entre dos sensores se requiere. Renombrar aquí que estos sensores son encajados en un ambiente físico. Es bastante probable que las lecturas de los sensores adyacentes vayan a ser bastante similares; ellos son correlacionados. Tal correlación puede de hecho ser explotado tal que no simplemente la suma de los datos puede ser transmitida, pero la sobrecarga puede ser guardada aquí. Las bases teóricas es el teorema por Slepian y Wolf. El cual lleva sus nombres.

Teorema Slepian-Wolf, es un ejemplo de correlación espacial explotada que es comúnmente presente en lecturas de sensores, siempre y cuando la red es lo suficientemente densa, comparado con lo derivado de la función observada y el grado de correlación entre lecturas en dos lugares, similarmente, correlación temporal puede ser explotados en protocolos de red de sensores.

5.5.5 Procesamiento de señal colaboradora y distribuida.

El procesamiento en red acerca de lo discutido hasta ahora no se está usando realmente la habilidad para procesar en los nodos de sensores, o solo se esta usando este para operaciones triviales como promediar o encontrar el máximo. Cuando la cálculos complejos en una cierta cantidad de datos están siendo hechos, este puede aun mejorar la eficiencia de energía para calcular estas funciones en los nodos sensor desafiando su capacidad de procesamiento, si de regreso la cantidad de datos que están siendo comunicados pueden ser reducidas.

Un ejemplo para este concepto es el cálculo distribuido de una transformada rápida de Fourier. Dependiendo en donde los datos de entrada están localizados, hay diferentes algoritmos disponibles para computar un FFT en un modo distribuido. Con diferentes compensaciones entre complejidad de cálculo local y la necesidad para comunicación. En principio, este es similar al algoritmo diseñado por computadores paralelos. Sin embargo, aquí no solo la latencia de comunicaciones pero también el consumo de energía y la computación son parámetros relevantes para decidir entre varios algoritmos.

Tales cálculos distribuidos son bastante aplicables para algoritmos tipo procesamiento de señal.

5.5.6 Redes basadas en agentes o códigos móviles.

Con la posibilidad de ejecutar programas en la red, otros modelos computacionales o paradigmas de programación son posibles. Uno de estos modelos es la idea de codificación móvil o redes basada en agentes.

La idea es tener una representación corta, compacta del código del programa que sea lo suficientemente pequeña para ser enviada de nodo a nodo. Este código será ejecutado luego, localmente, por ejemplo, recolectando medidas, 70 arquitecturas de red y luego se decide a dónde será enviado a continuación. Esta idea ha sido usada en varios ambientes, un ejemplo clásico es que de un agente que es enviado a recoger la información del mejor itinerario de viaje, saltando de un computador de un agente a otro y eventualmente retornando al usuario que ha comenzado la investigación.

Un nuevo avance es considerar sistemas inspirados biológicamente, en particular, la *inteligencia de enjambres* de grupos o de entidades simples, trabajando en conjunto para alcanzar una meta común.

En redes de sensores inalámbricas, los agentes móviles y conceptos relacionados han sido considerados en varios contextos, la mayoría con respecto al enrutamiento de consultas y para fusión de datos. También se ha propuesto que las máquinas virtuales para WSNs tengan un lenguaje nativo que admita una representación compacta de las operaciones más comunes que un código móvil en una WSN ejecutaría, permitiendo que este código sea pequeño.

5.5.7 Fidelidad y exactitud adaptables.

Como ejemplo, se considera una aplicación de una función de aproximación. Claramente, cuantos más sensores participen en la aproximación, la función es muestreada en más puntos y por lo tanto la aproximación es mejor. Pero, a cambio de esto, se necesitará más energía. Ejemplos similares hay para aplicaciones de detección de eventos y rastreo y en general para WSNs.

Por lo tanto, corresponde a una aplicación que de alguna forma defina el grado de exactitud de los resultados (asumiendo que puede vivir con imprecisión o resultados aproximados) y es la tarea de los protocolos de comunicación, tratar de alcanzar por lo menos esta exactitud así como el mejor desempeño energético posible. Además, la aplicación debe ser capaz de adaptarse a sus requerimientos en el estado actual de la red; cuántos nodos han fallado ya, cuánta energía puede ser recolectada del ambiente, cuáles son las condiciones operacionales (eventos críticos ocurridos recientemente) y así sucesivamente. Por lo cual, la aplicación necesita retroalimentación de la red acerca de su estado para tomar tales decisiones. Pero como se discutió en el contexto de la métrica de QoS en las WSNs, la gran variedad de aplicaciones de WSNs hace un poco difícil realizar una interface uniforme para expresar tales requerimientos y mucho menos protocolos

de comunicación que apliquen estas tomas de decisiones. Este es aún uno de los principales problemas de investigación de las WSNs.

5.5.8 Data centric.

Dirección de datos, no nodos.

En redes de comunicación tradicionales, el foco de una relación de comunicación es usualmente el par de compañeros comunicados – el emisor y receptor de los datos. Por otro lado, en una red de sensores inalámbrica, el interés en una aplicación no está en la **identidad** de un nodo sensor en particular, sino en la información reportada acerca del ambiente físico. Esto es, cuando una WSN es redundante y cualquier evento dado puede ser reportado por múltiples nodos, no le concierne a la aplicación de cuál de estos nodos precisamente proviene el dato. Este hecho de que no sea la identidad del nodo sino el dato en sí sea el centro de atención es llamado **data-centric networking**.

El direccionamiento data-centric también habilita expresiones simples de las relaciones de comunicación, no es necesario distinguir relaciones entre uno a uno, uno a muchos, o muchos a muchos ya que el set de nodos participantes está definido implícitamente.

Aparte de proveer una manera más natural para las aplicaciones a la hora de expresar sus requerimientos, las redes y el direccionamiento data-centric es también solicitada para el mejoramiento del rendimiento de operación y especialmente de la eficiencia de energía de una WSN.

5.5.9 Información de ubicación.

Otra técnica útil es utilizar la información de ubicación en los protocolos de comunicación cuando se presente tal información. Ya que la ubicación de un evento es una información crucial para muchas aplicaciones, tienen que existir mecanismos que determinen la ubicación de nodos sensores (y posiblemente también de los en eventos observados). Una vez que la información esté disponible, puede ser simplificado el diseño y operación de los protocolos de comunicación y puede mejorar considerablemente la eficiencia de energía.

5.5.10 Patrones de actividad.

Los patrones de actividad en una red de sensores inalámbrica tienden a ser un poco diferente de las redes tradicionales. Mientras que es cierto que la tasa de datos promediados en un largo tiempo puede ser muy pequeña cuando hay eventos esporádicos que reportar, esto puede cambiar dramáticamente cuando algo pasa. Una vez ocurre un evento, puede ser detectado por una gran cantidad de sensores rompiendo en un frenesí de actividades, causando el conocido efecto lluvia. Por lo tanto el protocolo diseñado debe ser capaz de manejar estas ráfagas de tráfico mediante la capacidad de conmutar entre modos de baja y alta actividad.

5.5.11 Heterogeneidad.

Relacionado al uso de patrones de actividad, se encuentra el uso de la heterogeneidad en la red. Los nodos sensores pueden ser heterogéneos por construcción, esto es, algunos nodos tienen baterías más grandes, dispositivos de comunicación de más largo alcance o procesadores más potentes. Pueden ser heterogéneos por evolución, todos los nodos comienzan en un estado igual, pero ya que algunos tienen que desarrollar más tareas durante la operación de la red, han gastado sus recursos de energía, u otros nodos tienen mejores oportunidades de acumular energía del ambiente (por ej. Nodos en áreas de sombra están en desventaja cuando utilizan celdas solares).

Finalmente una consideración acerca de los aspectos de implementación de los protocolos de comunicación en WSNs es necesaria. Lo que queda por ser definido es principalmente una colección por defecto de componentes, de los cuales no todos tienen que estar siempre disponible en los nodos de sensor pero pueden formar una caja de herramientas básicas de protocolos y algoritmos sobre los que trabajar.

Todas las redes de sensores inalámbricas requieren una forma física, protocolos de capa 2 o MAC, existirán redes de sensores inalámbricas que requieran algunas funcionalidades de las capas de transporte y enrutamiento. Además, hay módulos de ayuda como sincronización de tiempo, control de topología o localización pueden ser útiles. La lista de componentes que están activos en un nodo sensor puede ser compleja y cambiar de aplicación a aplicación. Los componentes del protocolo pueden también interactuar con otros de dos diferentes maneras:

Una es el simple intercambio de paquetes de dato al pasarlos de un componente a otro y procesado por protocolos diferentes. El otro tipo de interacción es el intercambio de información entre capas. Esta posibilidad mantiene la promesa de optimización de protocolos, pero se pueden correr riesgos. por ejemplo, argumentando que el uso imprudente de diseños de capas cruzadas puede llevar a ciclos de retroalimentación, poniendo en peligro la funcionalidad y rendimiento de todo el sistema. Claramente, estas consecuencias no son fáciles de ignorar y se debe tener cuidado para evitar esos inesperados ciclos.

6. CONCLUSIONES

Las redes de sensores inalámbricas cumplen muy bien los requerimientos de aplicaciones de monitoreo de variables, entre otras; y el uso de esta tecnología permite tanto la monitorización remota en tiempo real como la monitorización fuera de línea.

Los continuos avances en la miniaturización e incremento en las funciones de operación de los dispositivos involucrados permiten a los sensores disponer de las herramientas necesarias brindar un alto rango de aplicaciones en muchas industrias. Además, permiten una integración rápida y fácil con el resto de elementos del sistema mediante el uso de estándares y protocolos disponibles, obteniendo las ventajas de las arquitecturas diseñadas.

Las WSNs permiten aumentar la autonomía de todos los componentes involucrados en aspectos como auto-organización, auto-configuración, autogestión y su auto-adaptación.

A lo largo de esta lectura, se han mencionado y explicado la mayoría de aspectos funcionales y físicos de las redes de sensores inalámbricas, procurando así un entendimiento acerca de los nodos sensores, su desarrollo, operación, componentes y algunas aplicaciones.

Debido al gran rango de aplicaciones y de componentes, se sabe que se necesitarán diferentes arquitecturas de red y tareas que conlleven al fácil cumplimiento de las labores de los nodos sensores y toda la red. Cada una con sus ventajas y desventajas, ya que aún no se dispone de un nodo sensor inalámbrico perfecto y adaptable a todas las situaciones. Se encuentran redes que emplean varios tipos de nodos para cumplir sus obligaciones como nodos con más o menos potencia; varios tipos de comunicaciones inalámbricas, etc.

Mientras que la mayoría de aplicaciones están en procesos de investigación, las capacidades que emergen cada día en nodos sensores están aparentemente listas para su integración.

Las redes de sensores son la clave para adquirir información necesitada por ambientes inteligentes, ya sea en edificios, utilidades, industria, hogar, sistemas de transporte o donde sea. Las medidas contra conflictos terroristas recientes requieren redes distribuidas de sensores que puedan operar utilizando aeronaves y teniendo capacidades de auto-organización. En tales aplicaciones, instalar cables es usualmente poco práctico. Una red de sensores requiere ser fácil y rápida de instalar y mantener. Actualmente están en furor y se espera que en los próximos años su evolución sea significativa.

7. ABREVIATURAS

ASICs	Circuitos integrados de aplicación específica
DSP	Procesamiento digital de señales
FPGA	Arreglo de compuertas programables de campo
IEEE	Instituto de ingenieros de electricidad y electrónica
IrDa	Asociación de datos infrarrojos
LAN	Local Area Network - Red de área local
MANETs	Mobile Ad hoc NETworks - Redes Ad hoc móviles
MEMS	Sistemas microelectromecánicos
PDA	Asistente Personal Digital
PSTN	Red de telefonía pública conmutada
WAN	Wide Area Network - Red de área amplia
WSN	Wireless Sensor Network - Red de sensor inalámbrica

8. REFERENCIAS

- [2] M. Srivastava, R. Muntz, and M. Potkonjak. Smart Kindergarten: Sensor-based Wireless Networks for Smart Developmental Problem-solving Environments (Challenge Paper). *Proceedings of the 7th Annunal International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 132–138. ACM Press, Rome, Italy, July 2001. <http://www.acm.org/pubs/articles/>
- [3] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless Sensor Networks: A Survey. *Computer Networks*, 38: 393–422, 2002.
- [4] P. Bonnet, J. E. Gehrke, and P. Seshadri. Querying the Physical World. *IEEE Personal Communications*, 7(5): 10–15, 2000.
- [5] J. Burrell, T. Brooke, and R. Beckwith. Vineyard Computing: Sensor Networks in Agricultural Production. *IEEE Pervasive Computing*, 3(1): 38–45, 2004.
- [6] L. Schwiebert, S. K. S. Gupta, and J. Weinmann. Research Challenges in Wireless Networks of Biomedical Sensors. In *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM Mobicom)*, pages 151–165, Rome, Italy, July 2001.
- [7] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva, D. Patel, and S. Roundy. PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking. *IEEE Computer*, 33(7): 42–48, 2000.
- [8] D. Ganesan, D. Estrin, and J. Heidemann. DIMENSIONS: Why do we need a New Data Handling Architecture for Sensor Networks? *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 33(1): 143–148, 2003.
- [9] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, Atlanta, GA, September 2002.
- [10] C. E. Perkins, editor. *Ad Hoc Networking*. Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ, 2001.
- [11] I. Stojmenovic, editor. *Handbook of Wireless Networks and Mobile Computing*. Wiley, 2002.

[12] N. P. Mahalik, editor. *Fieldbus Technology – Industrial Network Standards for Real-Time Distributed Control*. Springer, Berlin, Germany, 2003.

9. BIBLIOGRAFÍA

Romer, Kay. *The Design Space of Wireless Sensor Networks*. 2004, IEEE Wireless Communications.

Aakvaag, Niels y Frey, Jan Erik. *Redes de sensores inalámbricos nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial*. 2006, Revista ABB 2 .

Tamayo y Tamayo, Mario. *El Proceso de la Investigacion*. s.l. : tercera edicion Limusa Noriega Editores, págs. 72-130.

Ye, W, Heidemann, J y Estrin, D . *An energy - efficient mac protocol for wireless sensor networks*. New York : international Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2002.

Jordan, R y C., Abdallah. *Wireless communications and networking: an overview*. New Mexico : Report Elect. and Comp. Eng Dept., Univ. New Mexico., 2002.

Karl, Holger y Willig, Andreas. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. s.l. : John Wiley & Sons, 2005. 0-470-09510-5.

Sohraby, Kazem, Daniel, Minoli y Taieb, Znati. *Wireless Sensor Networks technology, protocols and applications*. s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 2007. ISBN 978-0-471-74300-2.

Acosta Silva, David Arturo. *Manual para la elaboracion y presentacion de trabajos academicos escritos*. Bogota : Creative Commons, 2006.

Micro Strain Inc. www.microstrain.com. Actualizado 2008.

Cross Bow Technology Inc. *Revolutionary Wireless Sensors and Inertial Systems*. www.xbow.com . Actualizado 2007.

