

# Capítulo 3

## 3. Arquitecturas de las Redes de Sensores

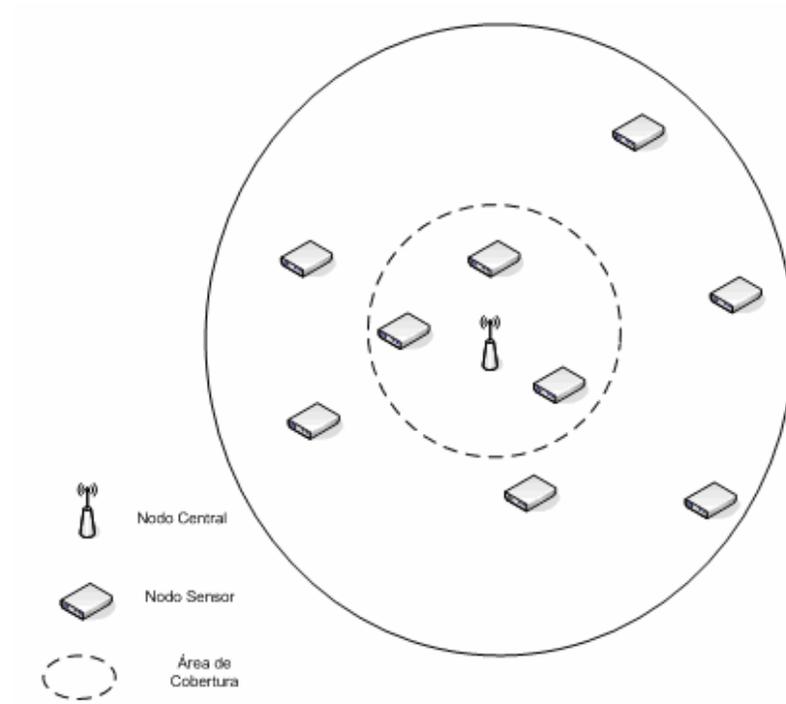
### 3.1 Visión General

El diseño de la arquitectura de una red de Sensores se ve influenciado por diversos factores tales como la tolerancia a fallas, la escalabilidad y el consumo de energía [AKI02] como vimos en el capítulo anterior. Existen entonces dos categorías para el diseño de la arquitectura de una red: por rango geográfico de cobertura y por arquitecturas de nodos en un conjunto con jefe y subalternos.

### 3.2 Rango Geográfico de Cobertura

Esta primera arquitectura cuenta con un **nodo central**, y diversos rangos de alcance que se le denominan **saltos** (el primer salto es el primer rango de cobertura dentro del cual se encuentra el nodo o los nodos más cercanos al nodo central).

Enseguida, se ilustra una arquitectura por rangos en la figura 3.1.



*Figura 3.1. Arquitectura por Rangos [AKI02].*

Como se observa en la figura 3.1, se tiene una red de sensores desplegados aleatoriamente. El nodo central, al iniciar muestra en un rango geográfico determinado qué elementos conforman la red. Por lo que en el primer rango, se descubren 3 nodos sensores. De manera inmediata se le da una identificación a cada nodo, que corresponde a una dirección única de acuerdo al

número de nodos totales en la red, para tenerlos localizados. Posteriormente el rango de muestreo se amplía, y se descubren 6 nodos más. De igual forma, se les asigna una identificación. El nodo central, continúa con el muestreo en búsqueda de más nodos hasta que toda el área geográfica ha sido barrida.

Es importante definir algunos términos en cuanto a la comunicación entre los nodos de una red de Sensores. Entendemos por enlace, a la conexión entre 2 nodos de forma directa sin la necesidad de nodos intermedios que mantengan la comunicación. Cada vez que un nodo se comunica con otro se dice que se encuentra a un salto. Esto es, que con un simple enlace directo, se conecta a otro nodo como si se saltara de un nodo a otro. Cuando tenemos que el nodo al cual se requiere comunicar se encuentra lejos, está implícito que la comunicación se efectuará entre  $N$  nodos mediante diversos enlaces o saltos (efecto multi-salto).

Uno de los escenarios donde se emplea este tipo de arquitectura puede presentarse en centros de trabajos como oficinas. En ellas, se requiere de un soporte medular inalámbrico para acceder mediante los nodos centrales en una red alámbrica (por medio de nodos centrales ya sean distribuidos o Ad hoc, que brinden conectividad inalámbrica) [DIN02]. Así, el personal de lugar podría manejar sus PDA's (Personal Digital Assistant) como pocket PC's, Palms, etc.

Para complementar esta descripción estructural se presentan tres protocolos empleados en la arquitectura por rango geográfico de cobertura: inicio, de mantenimiento y de ruteo.

### **3.1.1 Unified Network Protocol Framework (UNPF)**

Desarrollado en la Universidad Estatal de Washington, **UNPF** [DIN01] es un conjunto de protocolos que son parte de la arquitectura de rangos para redes de Sensores. UNPF integra tres operaciones dentro de su propia estructura como el protocolo de inicialización y mantenimiento, de control de acceso al medio y por último, aunque no menos importante, de ruteo de información.

#### **3.1.1.1 Protocolo Inicialización y Mantenimiento de la Red**

Este protocolo organiza los nodos sensores dentro de diferentes rangos, mediante su capacidad de radio difusión del nodo central. El nodo central puede alcanzar a todos los nodos mediante el canal de control.

El nodo central radiodifunde su **Identificación** (ID) usando un método de acceso al medio que utiliza codificación de la información en un ancho de banda compartido conocido como CDMA (Code Division Multiple Access) en el canal de control común (para todos). Todos los nodos escuchan el canal y guardan la identificación del nodo central. Ellos a su vez mandan de vuelta sus identificaciones con niveles bajos de potencia. Con esto, el nodo central sabe que aquellos nodos que pueden escuchar (debido a que conocen el código para

desencriptar la información) se encuentran en su primer salto. Subsecuentemente, el nodo central difunde un paquete de control con las identificaciones de los nodos del primer rango y los nodos que escuchan al nodo central responden con una señal de control. Así todos los nodos del primer rango registran las identificaciones de los otros nodos, formando éstos el segundo rango. Esto continúa hasta que se ha barrido toda la red en busca de nuevos nodos, logrando así que la estructura de rangos se forme mediante rondas sucesivas de búsqueda.

Periódicamente, se actualizan la información de los nodos y la estructura de los rangos ya sea por que los nodos no tengan más energía o porque se hayan movido del rango dentro del cual se encontraban.

### **3.1.1.2 Protocolo de Control de Acceso al Medio**

Este protocolo se ejecuta de forma previa a la fase de transmisión de información por lo que el canal transmisor distribuido TDMA (**DTROC**) lo solicita [DIN01].

Cada nodo tiene asignado un canal de recepción por el nodo central, y el canal es re-usado para evitar colisiones. La transmisión de los nodos se calendariza por ranuras de tiempo para todos los nodos vecinos. Esto permite que la transmisión se realice libre de colisiones y se ahorre energía cada vez que los nodos se encuentren apagados ya que no realizan ninguna operación de

envió/recepción. Las dos funciones que realiza el DTROC son la asignación de canal de recepción para los nodos y la calendarización para compartir el canal de recepción entre los nodos vecinos.

### **3.1.1.3 Protocolo de Ruteo**

La responsabilidad del protocolo de ruteo es el intercambio de información [DIN01], encontrando el camino más confiable para alcanzar el destino deseado teniendo en consideración la distancia, el requerimiento mínimo de energía y el tiempo de vida del enlace inalámbrico; búsqueda de la información en el caso de que la conexión falle; reparación de los enlaces caídos gastando el mínimo de potencia de procesamiento y mínimo uso del ancho de banda.

La arquitectura de rango permite que la información de los nodos sensores se propague de enlace en enlace al nodo central. El nodo que transmite es seleccionado conforme a su nivel de energía, con el propósito de alargar la longevidad de la red.

Habiendo explicado las características importantes de la primera categoría de arquitectura referente a las redes inalámbricas de Sensores pasamos a la segunda arquitectura denominada de conjunto.

## 3.2 Arquitectura de Conjunto

Esta arquitectura, se emplea especialmente en las redes de Sensores dada la oportunidad de agregar información a medida que ésta pasa de nodo en nodo. Cuando los nodos recopilan la información de interés, el *cluster-head* (**jefe de conjunto**) la reúne y la envía a un nodo específico, dependiendo de la necesidad de información requerida por dicho nodo. A su vez, para formar y designar a estos jefes de conjunto, la red deberá de ser autónoma y auto-organizada de manera distribuida. Para lograr esto, se emplean protocolos a nivel capa de red como el denominado LEACH [HEI00] (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) que se detalla en una sección 3.2.1.

En general, los nodos en una red de sensores, frecuentemente necesitan organizarse dentro de **conjuntos** (*clusters*).

Este tipo de arquitectura se basa en la creación de conjuntos o arreglos de nodos, gobernados mediante jefes de conjuntos llamados comúnmente *cluster-heads*. Los nodos en cada conjunto, tiene la función de intercambiar mensajes con sus respectivos jefes de conjunto (siguen siendo nodos), los cuales en general son el punto de acceso para que los nodos dentro del conjunto se conecten hacia la red alámbrica.

La arquitectura de conjunto permite la construcción de estructuras jerarquizadas y habilita el uso de los recursos limitados, como lo son el espectro de frecuencia, el ancho de banda y la energía. Por ejemplo, si el tamaño del conjunto corresponde a un rango directo de comunicación de los nodos, se pueden usar protocolos más simples para el ruteo y la difusión de información dentro del conjunto. Adicionalmente, el mismo tiempo o frecuencia en el multiplexado puede ser re-usado a través de los diferentes conjuntos dentro de la red.

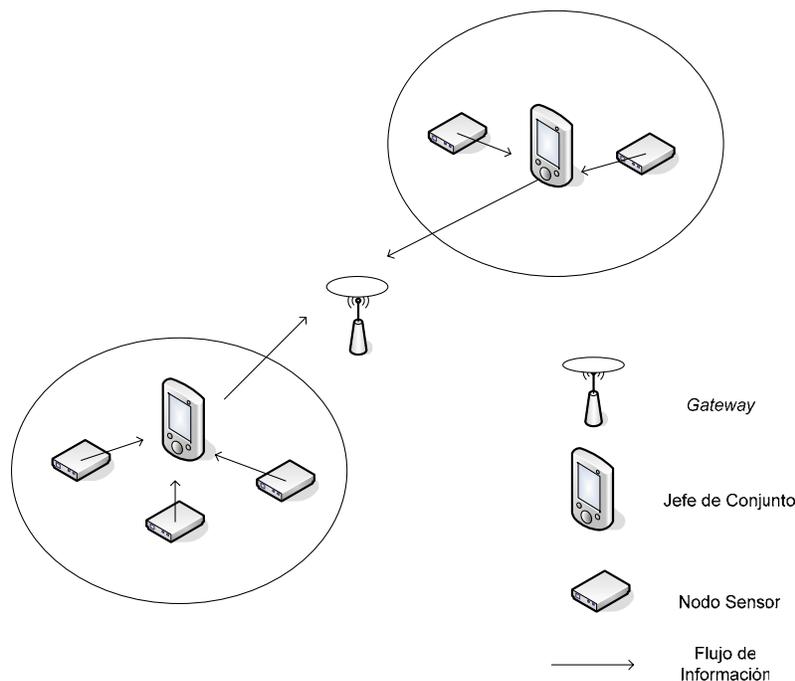
De igual forma, es posible monitorear la red e identificar nodos irregulares (mal funcionamiento), incluyendo los que tengan o no diferentes características, dentro de un rango de comunicación (algunos nodos son designados como jefes de conjunto con respecto a otros en cuestión de su desempeño).

Sin embargo, en diversos casos, los nodos son idénticos en todas sus características y cuentan con un rango de comunicación común siendo parte de un tamaño de conjunto promedio. Para ello, existen, varios protocolos que distribuyen la elección de un jefe de conjunto para la configuración basados principalmente en identificadores de nodos únicos (**UIDS**) estos pueden tener identificaciones asignadas para la inicialización de nodos. Algunas variantes es cuando un nodo cualquiera se denomina jefe de conjunto. En otros escenarios, cada nodo se nomina así mismo para ser un jefe de conjunto en base a su valor de identificación mayor. Cuando los nodos se comunican con dos o más jefes de conjunto se les llama gateways (nodos que hacen que circule el tráfico de un conjunto a otro). En algunas aplicaciones se debería considerar las identificaciones (**ID's**) como un

peso, para indicar cual de los nodos debería ser nominado a ser un jefe de conjunto.

Por otro lado, es importante establecer el rango de comunicación entre los conjuntos de la red mediante los gateways y jefes de conjunto (el resto de los nodos se comunican vía el jefe de conjunto). Se puede determinar la distancia mínima de separación de los jefes de conjunto, comparándole con el rango de comunicación de los nodos. Esto asegurará que se tenga un número límite de vecinos jefes de conjunto distribuyendo la información.

La figura 3.2 representa una típica arquitectura de conjunto donde cualquier mensaje puede alcanzar a un jefe de conjunto en al menos dos saltos, dependiendo de que tan grande sea la extensión de la red.



*Figura 3.2 Arquitectura de Conjunto [HEI00].*

### **3.2.1 LEACH**

Este protocolo enfocado para la arquitectura de conjunto, busca la minimización de la energía de disipación en las redes de Sensores [HEI00].

**LEACH** selecciona nodos de manera aleatoria y escoge un jefe de conjunto. Esta elección no es permanente, sino que se lleva a cabo de forma periódica una reelección, para que la disipación de energía que experimenta un jefe de conjunto se distribuya a todos los nodos de la red de forma equitativa. Cada iteración en la selección de los *cluster-heads* se le llama **ronda** (*round*).

La operación del LEACH se divide en dos fases: la de ajuste de jefe de conjunto y la de establecimiento del tiempo que va a ser jefe de conjunto un nodo dado.

Durante la fase de ajuste, cada nodo sensor escoge un número aleatoriamente entre 0 y 1. Si este número es menor que el umbral superior del nodo  $n, T(n)$ , el nodo sensor se convierte en un jefe de conjunto. El umbral  $T(n)$  se calcula así,

$$T(n) = \begin{cases} (P)/(1 - P[r * \text{mod}(1/P)]) & \text{Si } n \in G, \text{ de lo contrario} \\ 0 & \end{cases} \quad (3.1)$$

donde,

$n$  = número de nodo

$T(n)$  = valor de umbral superior de nodo

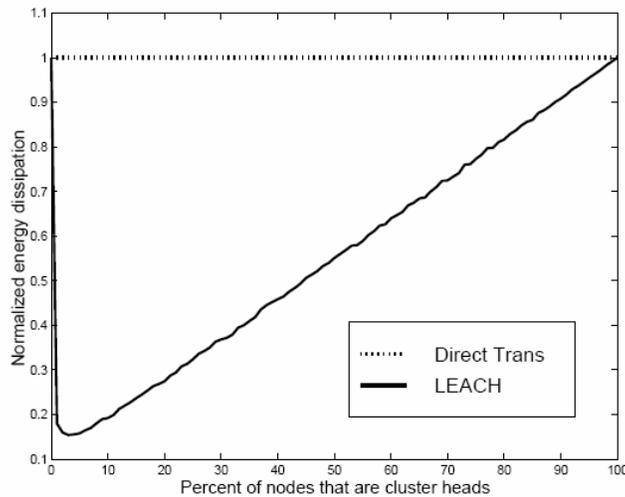
$P$  = es el porcentaje deseado de nodos que son jefes de conjunto (e.g.,  $P=0.005$ ),

$r$  = es la ronda en la que se está actualmente

$G$  = es el conjunto de nodos que no han sido jefes de conjunto en las pasadas  $1/P$  rondas.

Usando el umbral, cada nodo será un jefe de conjunto a un punto dado dentro de  $1/P$  rondas. Durante la ronda 0 ( $r=0$ ), cada nodo tiene una probabilidad  $P$  de ser seleccionado jefe. Así la probabilidad de que los nodos restantes sean jefes aumenta, ya que después de cada ronda son menos los nodos faltantes que adquiere esa condición de jefes. Posteriormente a  $(1/P)-1$  rondas,  $T=1$  para cada nodo que no haya sido jefe de conjunto, y más tarde de  $1/P$  rondas, todos los nodos son una vez más elegibles para ser jefe de conjunto. De cierta forma, el algoritmo LEACH [HEI00] asegura que todos los nodos gasten la misma cantidad de energía. Después de la selección, todos los jefes de conjunto avisan a los demás nodos del papel que juegan. El resto de los nodos, eligen localmente a su jefe de conjunto en cualquier momento con cierta probabilidad. Cada nodo determina a que jefe de conjunto desea pertenecer en base a un mínimo consumo de energía en comunicación (en sí, al jefe de conjunto más cercano en base a la potencia de la señal de aviso). Una vez que ya sean

han agrupado los nodos en conjunto, el jefe de conjunto junta la información correspondiente a los nodos que les brinda servicio, y les agrega información de los diversos status de los nodos. Y todo esto lo compacta y lo manda a un nodo central. Posteriormente, los jefes de conjunto asignan mediante un código TDMA a los miembros del conjunto. La figura 3.3 muestra como la energía de disipación varía a medida que el porcentaje de jefes de conjunto cambia. Observemos que a valores del 0% y 100% de jefes de conjunto se tiene la misma comunicación directa en la red. En algunas ocasiones, algunos nodos de la red se encuentran muy distantes de su jefe de conjunto, provocando así que la energía global aumente [HEI00].



**Figura 3.3** Energía total de Sistema disipada [HEI00].

En la figura 3.3 se observa que la transmisión directa es equivalente a no tener jefes de conjunto o en el otro caso que todos los nodos sean jefes de conjunto.

En fase de establecimiento, una vez que los nodos han decidido a que jefe de conjunto pertenecer, es indispensable que se den de alta como miembros de ese conjunto específico. Cada nodo transmite su información al jefe de conjunto mediante un protocolo de acceso múltiple al medio de control con un sensado de portadora. Durante esta fase, todos los jefes de conjunto mantienen sus receptores encendidos. Los jefes de conjunto reciben todos los mensajes con la información de los nodos que desean estar en el conjunto. En base a número de nodos en el conjunto, el jefe crea una calendarización por medio de códigos de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) informando a cada nodo cuando puede realizar sus transmisiones (la calendarización se radiodifunde de vuelta a los nodos). Los jefes de conjunto añaden información con respecto a los nodos que existen dentro de sus conjuntos y fusionan la información con la de cómputo local. El nodo central, recibe solo información añadida por los jefes. El radio de cada nodo que no sea jefe de conjunto, puede apagarse hasta que el nodo entre en la ranura de tiempo que le corresponde para acceder al canal de comunicación, buscando la conservación de la energía. Es importante mencionar que, para reducir la interferencia, cada conjunto se comunica entre sí, por medio del uso de diversos códigos CDMA (*Code División Multiple Access*). De esta forma, cada vez que exista un nuevo jefe de conjunto, se escoge un código a partir de una lista. El nuevo jefe, informa a los nodos del papel que desempeñará y le indica que código emplear para transmitir.

Por lo que, las señales de radio de los conjuntos vecinos serán filtradas y no corromperá las transmisiones dentro del conjunto.

El protocolo de ruteo LEACH, se emplea en arquitecturas de conjuntos, con el propósito de minimizar el consumo global de energía, distribuyendo la carga a todos los nodos en diferentes instantes de tiempo. El protocolo es completamente distribuido y no requiere de un control de información de un nodo central. Además, no es necesario que los nodos tengan un conocimiento amplio de la arquitectura de la red para poder ejecutarlo. Más adelante, se explica como se desea recabar información sobre un factor de interés en un momento y región dada.