

# Estudio y evaluación de prestaciones de redes inalámbricas de sensores

Javier Querol Morata

**Profesor:**

Juan Vicente Capella Hernández



Proyecto de Informática de Sistemas:

E.T.S de Ingeniería Informática

2010-2011

# 1. Tabla de contenidos

2.	Introducción	4
3.	¿Qué es una red de sensores inalámbrica?	5
4.	Aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas	6
4.1.	Aplicaciones militares	6
4.2.	Aplicaciones medioambientales	6
4.3.	Aplicaciones sanitarias	7
4.4.	Otras aplicaciones comerciales	7
5.	Técnicas de encaminamiento	7
6.	Principios de diseño para encaminamiento de redes de sensores inalámbricas	8
6.1.	Autonomía	8
6.2.	Eficiencia energética	8
6.3.	Escalabilidad	8
6.4.	Resilencia	8
6.5.	Heterogeneidad de los dispositivos	8
6.6.	Movilidad adaptativa	9
7.	Clasificación de los protocolos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas	9
7.1.	Jerarquía de los nodos	9
7.2.	Envío de datos	9
8.	Técnicas de optimización para encaminamiento de redes de sensores inalámbricas	10
8.1.	Basadas en atributos	10
8.2.	Basadas en la eficiencia energética	10
8.3.	Basadas en la agregación de datos	10
8.4.	Basadas en el esquema de direccionamiento	10
8.5.	Basadas en su posicionamiento	11
8.6.	Basadas en la comunicación multipath	11
8.7.	Basadas en la calidad de servicio (QoS)	11
9.	Protocolos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas	12
9.1.	Clasificación de los protocolos en función de su estructura de red	13

9.1.1.	Encaminamiento plano	13
9.1.1.1.	SPIN (Sensor protocols for information via negotiation)	14
9.1.1.2.	Directed Diffusion (Difusión directa)	16
9.1.1.3.	Rumor Routing	18
9.1.1.4.	[68] Rango de Rumor Routing	18
9.1.1.5.	MCFA (Minimum Cost Forwarding Algorithm)	19
9.1.1.6.	GBR (Gradient-Based)	20
9.1.1.7.	COUGAR	21
9.1.1.8.	ACQUIRE (Active Query Forwarding in Sensor Networks)	22
9.1.2.	Encaminamiento jerárquico	23
9.1.2.1.	LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)	24
9.1.2.2.	PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)	26
9.1.2.3.	TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols)	28
9.1.2.4.	MECN (Small Minimum Energy Communication Network)	30
9.1.2.5.	SAR (Sensor Aggregates Routing)	31
9.1.3.	Encaminamiento posicional	32
9.1.3.1.	GAF (Geographic Adaptive Fidelity)	32
9.1.3.2.	GEAR (Geographic and Energy Aware Routing)	33
9.1.3.3.	GOAFR (Greedy Other Adaptive Face Routing)	35
9.2.	Clasificación de los protocolos en función de su protocolo de operaciones	36
9.2.1.	Protocolos de encaminamiento multipath	36
9.2.2.	Encaminamiento basado en consultas	37
9.2.3.	Encaminamiento basado en negociación	38
9.2.4.	Encaminamiento basado en calidad de servicio (QoS)	38
9.2.5.	Procesamiento coherente y no coherente	39
10.	Protocolos de encaminamiento en redes de sensores subacuáticas	41
11.	Tolerancia a fallos en los protocolos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas	45
12.	Comparativa entre algoritmos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas	47
13.	Conclusiones y trabajo futuro	50
14.	Referencias	51

## 2. Introducción

Las redes de sensores inalámbricas se crean con la intención de monitorizar el medio ambiente. La principal tarea de un nodo de una red de sensores es coleccionar datos de un cierto dominio, procesarlos y transmitirlos a la estación base donde se encuentra la aplicación. Sin embargo, asegurar una conexión directa entre el sensor y la estación base para transmitir información puede provocar un derroche de energía considerable. Por ello, es esencial que los otros nodos colaboren en la comunicación propagando los mensajes del nodo origen hasta la estación base.

En un principio, la comunicación entre un nodo y la estación base puede ser concebida sin un protocolo de encaminamiento. Bajo esta condición, el algoritmo de inundación es la solución más simple. En este algoritmo, el nodo transmisor retransmite la información a todos los nodos vecinos mediante *broadcast*, éstos repiten la operación hasta que la información llega a su destino. La simplicidad del algoritmo implica varios problemas. En primer lugar, muchos nodos comienzan a presentar problemas al recibir información redundante de otros nodos, estos a su vez, replican la información a otros nodos acrecentando el problema. Además los nodos no tienen en cuenta sus recursos para limitar su funcionalidad.

Una posible optimización consiste en la utilización del algoritmo *gossiping* [1]. Este algoritmo evita el problema de la implosión al transmitir los datos a los nodos seleccionados en lugar de informar a todos los nodos vecinos como ocurría en la inundación. Este problema se acrecienta cuando se incrementa el número de nodos en la red.

A causa de las deficiencias expuestas anteriormente, resulta necesario el empleo de protocolos de encaminamiento. Una de las principales limitaciones es la identificación de los nodos. Desde que las redes de sensores inalámbricas están compuestas por una cantidad de nodos significativa, la asignación de identificadores únicos resulta inviable [2]. El uso de un identificador como la dirección MAC o las coordenadas GPS no es recomendable debido a la carga que supone [3]. De hecho, el direccionamiento basado en atributos encaja mejor con las especificaciones de las redes de sensores inalámbricas, en este caso un atributo como el posicionamiento del nodo y el tipo de sensor nos pueden servir para identificar el destino.

Una vez identificados los nodos, los protocolos de encaminamiento se encargan de la construcción y el mantenimiento de las rutas entre nodos. Las diferentes formas en las que operan los protocolos de encaminamiento los hacen adecuados para un tipo de aplicaciones.

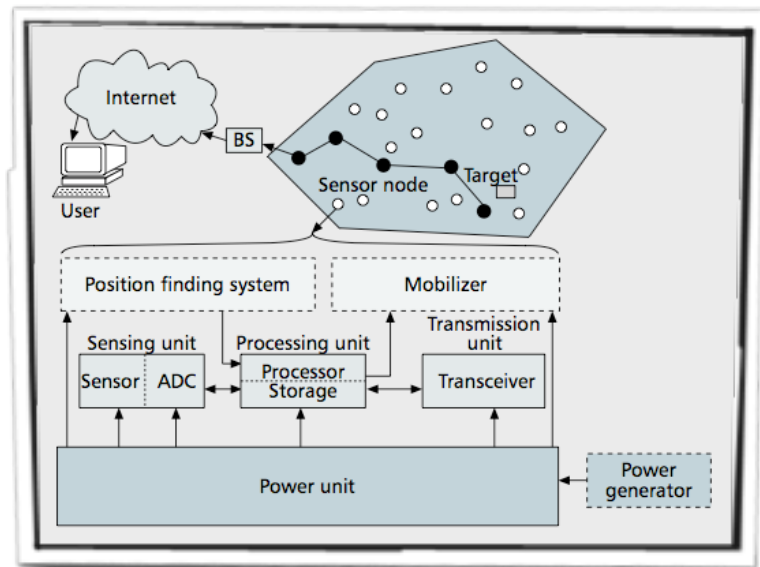
En la actualidad, existen multitud de propuestas relacionadas con los algoritmos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas. En este documento vamos a explicar el funcionamiento de estos protocolos y los clasificaremos atendiendo a sus posibilidades.

### 3. ¿Qué es una red de sensores inalámbrica?

Una red de sensores inalámbrica es una red inalámbrica formada por una serie de dispositivos autónomos que disponen de sensores que monitorizan eventos como movimiento, vibración, humedad, temperatura, sonido etc. Cada uno de estos dispositivos (nodos) consta de cuatro partes principales:

- **Unidad de proceso**
- **Sensor**
- **Transceptor**
- **Batería**

Dependiendo del uso pueden haber otros componentes como un elemento localizador (gps), un generador de energía etc.



En la figura se observa la arquitectura de un nodo real. [64]

Generalmente los nodos tienen tamaños pequeños. Sin embargo, la idea es ir reduciendo el tamaño a medida que la tecnología avanza, especialmente en sistemas electro-mecánicos (MEMS). A causa del bajo ancho de banda y el reducido consumo, los rangos de transmisión se ven restringidos a 30 metros aproximadamente. Es por ello, que hace falta una cantidad considerable de nodos para poder abarcar un rango medianamente amplio. La capacidad de cómputo de los nodos también se ve mermada debido a las restricciones energéticas.

En contraste con los sistemas operativos *multithread* o multiproceso, los nodos de las redes de sensores inalámbricas utilizan sistemas operativos de complejidad menor. Algunos ejemplos de sistemas operativos para estos nodos son:

- **TinyOS**
- **Contiki**
- **MANTIS**
- **BTnut**
- **SOS**
- **Nano-RK**

## **4. Aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas**

Las aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas son muy amplias, abarcan tanto el ámbito comercial como el no comercial. La variedad de tipos de sensores hacen que prácticamente cualquier estímulo sea susceptible de captura con la tecnología actual.

Estas son algunas condiciones que pueden medir los sensores:

- Temperatura
- Humedad
- Movimiento
- Luminosidad
- Presión
- Niveles de ruido
- Presencia o ausencia de un determinado objeto
- Niveles de stress mecánico
- Dirección y velocidad

### **4.1. Aplicaciones militares**

El bajo coste de los nodos hacen que las redes de sensores inalámbricas sean muy apreciadas en el campo de batalla. Algunas aplicaciones militares son:

- Monitorización de unidades amigas, equipamiento y munición
- Seguimiento de enfrentamientos
- Exploración del terreno y del enemigo
- Orientación
- Evaluación de daños
- Detección de ataques nucleares, biológicos y químicos

### **4.2. Aplicaciones medioambientales**

La distribución de los nodos de forma aleatoria hacen que este tipo de redes sean adecuadas para la monitorización medioambiental. Algunas aplicaciones son:

- Reconocimiento del medio
- Detección de desastres naturales, como incendios, inundaciones o terremotos.
- Precisión en la agricultura
- Monitorización del hábitat
- Detección de contaminación
- Exploración planetaria

### **4.3. Aplicaciones sanitarias**

El avance tecnológico ha conseguido hacer nodos cada vez más pequeños y hacen posible su aplicación en el ámbito sanitario. Algunas aplicaciones son:

- Monitorización de constantes vitales
- Monitorización de pacientes y doctores
- Administración de medicamentos

### **4.4. Otras aplicaciones comerciales**

Existen otras aplicaciones no englobadas en las categorías anteriores como pueden ser:

- Domótica
- Museos interactivos
- Alarmas
- Sistemas de seguridad en la automoción
- Control de inventario

## **5. Técnicas de encaminamiento**

Compartir información entre dispositivos separados requiere de conexiones físicas entre ellos como cables, enlaces y un lenguaje de comunicación, llamado protocolo, que hace posible el entendimiento entre ellos. El concepto de red está construido como una variación de este principio. En las redes de sensores inalámbricas, al igual que en otras redes, hacen uso de técnicas de encaminamiento / protocolos para proveer de comunicación a los nodos para la transmisión de datos. A pesar de que los conceptos son los mismos, las redes de sensores inalámbricas tienen unas características que las hacen sensiblemente diferentes al resto y que hay que tener en cuenta a la hora de elegir las técnicas de encaminamiento adecuadas:

- Baja capacidad de cómputo
- Energía limitada
- Bajo ancho de banda
- Alta densidad de nodos
- Disposición aleatoria de los nodos

## **6. Principios de diseño para encaminamiento de redes de sensores inalámbricas**

A causa de los escasos recursos en términos computacionales y energéticos, los protocolos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas deben de cumplir una serie de requisitos

### **6.1. Autonomía**

La posibilidad de contar con unidades de control para la radio y el encaminamiento no es real al ser un punto fácil de ataque. Al no haber ninguna entidad centralizada que tome las decisiones de encaminamiento, éstas han de ser transferidas a los nodos de la red.

### **6.2. Eficiencia energética**

Los protocolos de encaminamiento deben prolongar la vida de la red mientras mantienen un alto grado de conectividad que permita la comunicación entre nodos. Es importante tener en cuenta que en la mayoría de los casos resulta imposible el recambio de la batería, ya que están ubicados de forma aleatoria o son inaccesibles.

### **6.3. Escalabilidad**

Las redes de sensores inalámbricas están compuestas por cientos de nodos por lo que debe ser posible trabajar con grandes cantidades de nodos.

### **6.4. Resiliencia**

Los sensores pueden parar su servicio de forma impredecible por motivos medioambientales o por el consumo de la batería. Los protocolos de encaminamiento deben tener esto en cuenta y ser capaces de lidiar con estas situaciones, así, cuando un nodo falla, se ha de descubrir una ruta alternativa.

### **6.5. Heterogeneidad de los dispositivos**

La mayoría de las aplicaciones civiles de las redes de sensores inalámbricas constan de nodos homogéneos, pero la introducción de diferentes tipos de sensores puede significar un incremento significativo del rendimiento. El uso de nodos con diferentes procesadores, transceptores o sensores pueden mejorar las características de la red. Además, la escalabilidad de la red, el drenaje de energía o el ancho de banda son candidatos potenciales para beneficiarse de la heterogeneidad de los nodos.



## **6.6. Movilidad adaptativa**

Las diferentes aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas pueden demandar nodos para hacer frente a su propia movilidad, la movilidad de la estación base o del evento a capturar. Los protocolos de encaminamiento deben proveer el soporte necesario para éste tipo de situaciones.

## **7. Clasificación de los protocolos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas**

Teniendo en cuenta sus procedimientos, los protocolos de encaminamiento pueden ser clasificados de acuerdo a los siguientes criterios.

### **7.1. Jerarquía de los nodos**

En los esquemas planos, todos los sensores de los nodos actúan por igual en el proceso de encaminamiento. En cambio, los protocolos de encaminamiento jerárquicos clasifican los sensores de acuerdo a su funcionalidad [4]. La red se divide en grupos o *clusters*. El líder, o nodo maestro, es elegido en el grupo para coordinar las actividades del *cluster* y comunicarse con los otros nodos fuera de su *cluster*. La diferenciación de los nodos puede ser dinámica o estática.

### **7.2. Envío de datos**

Dependiendo de la aplicación, la interacción de los datos en redes de sensores inalámbricas se puede producir de diferentes formas. El modelo de envío de datos indica el flujo de información entre los nodos y la estación base [5]. El modelo de envío de datos se divide en las siguientes clases: continuo, orientada a eventos, orientado a consultas o híbrido. En el modelo continuo, los nodos transmiten periódicamente la información que los sensores captan durante un intervalo determinado. En cambio, en el modelo orientado a consultas, los nodos han de esperar a ser consultados para transmitir sus datos obtenidos. En el modelo orientado a eventos, los sensores emiten sus datos cuando se produce un evento de intereses. Finalmente, el esquema híbrido combina las estrategias anteriores, así los sensores informan periódicamente sobre los datos obtenidos pero también responden a consultas. También pueden ser programados para informar sobre sus intereses.

## **8. Técnicas de optimización para encaminamiento de redes de sensores inalámbricas**

Las particularidades de las redes de sensores inalámbricas las hace bastante diferentes con respecto a otro tipo de redes. Por ello, debemos tener en cuenta una serie de requerimientos y adaptar las técnicas de encaminamiento para cumplir unas especificaciones determinadas.

### **8.1. Basadas en atributos**

En estos algoritmos, la estación base envía peticiones a ciertos sectores y espera a la respuesta de los sensores dispuestos en esta región. Siguiendo un esquema atributo-valor, las consultas informan sobre los datos requeridos. La selección de los atributos depende de la aplicación. Una característica importante de estos esquemas es que el contenido de los mensajes se analiza en cada salto para tomar decisiones sobre su encaminamiento.

### **8.2. Basadas en la eficiencia energética**

Partiendo de la base de que muchas rutas pueden comunicar a un nodo con la estación base, el objetivo de los algoritmos energy-aware es la selección de aquellas rutas que maximizan el tiempo de vida de la red. Para ello, se marcan como preferidas aquellas rutas compuestas por nodos que disponen de mayor autonomía.

### **8.3. Basadas en la agregación de datos**

Los datos obtenidos por los sensores serán muy parecidos a los obtenidos por sus nodos vecinos ya que normalmente captan fenómenos comunes. Una forma de reducir el consumo es mediante la técnica de agregación de datos. La agregación de datos consiste en la supresión de información redundante en los diferentes mensajes. Si la supresión de información se produce mediante técnicas de procesamiento de señales, entonces el procedimiento se llama fusión de datos.

### **8.4. Basadas en el esquema de direccionamiento**

Las redes de sensores inalámbricas están formadas por un número significativo de nodos, así la asignación de identificadores únicos resulta inviable. El uso de la dirección MAC o de las coordenadas GPS no es recomendable ya que introduce una sobrecarga considerable [6]. No es necesario la creación de redes con identificadores únicos para identificar el nodo destino o un paquete específico. De hecho, el direccionamiento basado en atributos encaja mejor con las especificaciones de las redes de sensores inalámbricas. En este caso, un atributo como la posición de un nodo o el tipo de sensor se usa para la identificación del destino. Con respecto a los identificadores, se han propuesto dos modelos diferenciados.

- La posibilidad de que el identificador se repita en la red pero manteniendo su singularidad en áreas cercanas. De esta forma, un nodo que sabe que su identificador es único en un área de  $k$ -saltos, siendo  $k$  un parámetro a configurar.
- El otro modelo propuesto garantiza que los identificadores son únicos en toda la aplicación. Asumiendo esto, otros protocolos como encaminamiento, MAC o configuraciones de red pueden ser usados de forma simultánea.

## 8.5. Basadas en su posicionamiento

Cuando esta técnica es usada, un nodo decide que ruta de encaminamiento en función de la posición del destino final y de la posición de algunos de los nodos en la red.

## 8.6. Basadas en la comunicación *multipath*

Con esta técnica, los nodos utilizan múltiples rutas desde el origen hasta el destino. El propósito de la comunicación *multipath* es la de incrementar la fiabilidad y el rendimiento de la red, estas rutas no deben compartir ningún enlace. Hay dos formas de que la comunicación *multipath* se lleve a cabo:

- Se establece una ruta como activa para el encaminamiento, mientras, las otras rutas son almacenadas para futuros propósitos.
- Distribución del tráfico a través de múltiples rutas.

## 8.7. Basadas en la calidad de servicio (QoS)

Existen determinadas aplicaciones que requieren calidad de servicio para garantizar el intercambio de información. En muchos casos se requiere una frecuencia de muestreo efectiva, retardos limitados y precisión temporal. Satisfacer estas necesidades no es siempre posible ya que pueden contradecir los principios de algunos protocolos. Por ejemplo, un protocolo de encaminamiento puede estar diseñado con la intención de prolongar la vida de la red mientras que la aplicación demanda una frecuencia de muestreo efectiva que necesita de transmisiones periódicas y por tanto, mayor consumo.



En el gráfico se muestra la relación entre la calidad de servicio y su dependencia con el objetivo del protocolo de encaminamiento y su estrategia. [65]

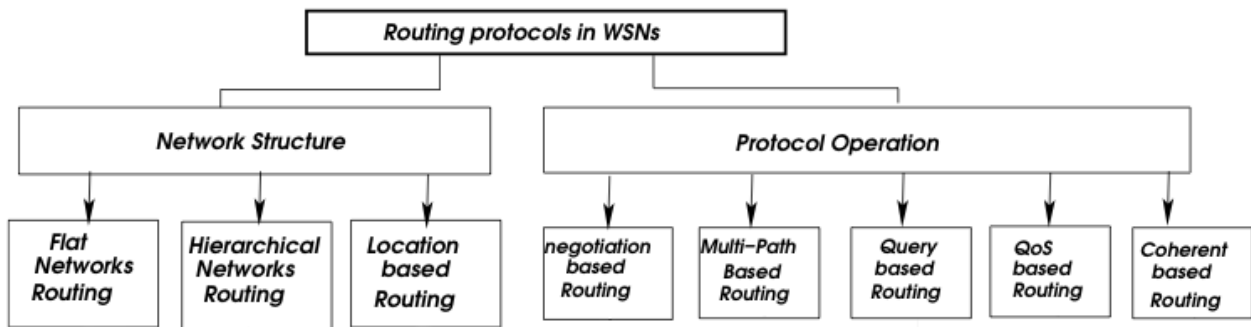
## 9. Protocolos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas

A continuación ofrecemos el estado del arte de los protocolos de encaminamiento en las redes de sensores inalámbricas. En función a la estructura de la red, podemos clasificar estos protocolos en tres categorías diferenciadas, encaminamiento plano, encaminamiento jerárquico y encaminamiento basado en localidad. En el encaminamiento plano todos los nodos tienen la misma función. En encaminamiento jerárquico, en cambio, los nodos tienen diferentes roles. En el encaminamiento basado en localidad, la disposición de los nodos tiene un valor crucial a la hora de trazar rutas.

Consideramos un protocolo de encaminamiento adaptativo si ciertos parámetros del sistema pueden ser controlados con el fin de adaptar la red a unas condiciones determinadas. Además estos protocolos también pueden clasificarse atendiendo a otras características como *multipath*, consultas, negociación, calidad de servicio o coherencia de datos dependiendo de la forma de operar del protocolo. También podemos clasificarlos en otras tres categorías en función de como la fuente es capaz de encontrar la ruta hasta su destino, proactivos, reactivos e híbridos. En los protocolos proactivos, todas las rutas son computadas antes de que sean necesarias, mientras que en los protocolos reactivos, las rutas se calculan a medida que se necesitan. Los protocolos híbridos emplean una combinación de ambas ideas. Cuando los sensores de los nodos son estáticos, es preferible tener una tabla de encaminamiento en lugar de emplear protocolos reactivos. El descubrimiento de rutas y su configuración en los protocolos reactivos necesitan de una cantidad de energía significativa.

Otro tipo de clase de encaminamiento es el llamado encaminamiento cooperativo. En el encaminamiento cooperativo, los nodos envían información al nodo central donde se agregan los datos y pueden ser objetivo de procesamiento futuro, y por tanto reducir el coste de

encaminamiento en términos energéticos. Muchos otros protocolos dependen del coste temporal y de la posición de los datos. Es por ello que podemos clasificar los protocolos por su estructura de red o por su criterio de encaminamiento. En la siguiente figura se muestra dicha clasificación.



Taxonomía de los protocolos de encaminamiento [66]

## 9.1. Clasificación de los protocolos en función de su estructura de red

La estructura de la red juega un papel significativo en la forma de operar de las redes de sensores inalámbricas. En esta sección ofrecemos con detalle los protocolos que pertenecen a esta categoría.

### 9.1.1. Encaminamiento plano

En el encaminamiento plano, todos los nodos ejecutan las mismas tareas en la red. Debido a la gran cantidad de nodos, no es posible la asignación de un identificador único a cada nodo. Esta consideración nos lleva a la centralización de los datos en el encaminamiento, donde la estación base envía consultas a ciertas regiones de la red y espera a los datos recopilados por los sensores ubicados en esa zona. Al ser los datos demandados mediante consultas, el nombramiento basado en atributos se hace necesario para especificar las propiedades de los datos. A continuación hacemos una descripción más profunda de algunos algoritmos de encaminamiento que siguen este concepto, destacando sus ventajas y sus problemas de rendimiento.

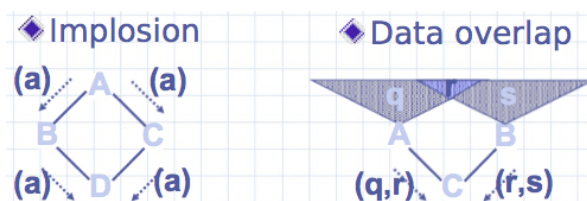
### 9.1.1.1. SPIN (Sensor protocols for information via negotiation)

SPIN es un protocolo de sensores que establece las bases para la transmisión y comunicación entre nodos y presenta una serie de mejoras respecto a los protocolos tradicionales [6][7].

Disemina toda la información en cada nodo a todos los nodos de la red asumiendo que todos los nodos en la red son potenciales estaciones base. Esto permite al usuario hacer peticiones a cualquier nodo y recibir la información necesaria de forma inmediata. Este tipo de protocolos se basan en la propiedad de que los nodos cercanos tienen datos similares y por tanto solo hay necesidad de transmitir la información que los otros nodos no poseen. La familia de protocolos SPIN utilizan negociación de información (*data negotiation*) y algoritmos *resource-adaptive*. Los nodos bajo SPIN asignan un nombre de alto nivel para describir los datos recopilados (metadatos) y negociar los metadatos antes de que la información sea transmitida. Esto asegura que no haya redundancia en los datos enviados por la red. La semántica del formato de los metadatos no están especificados en SPIN, sino que es la aplicación quien lo gestiona. Por ejemplo, los sensores debe usar sus identificadores únicos para la transmisión de los metadatos si ocupan una cierta región conocida. Además, SPIN tiene acceso al nivel de energía restante de cada nodo y adapta el protocolo para minimizar el gasto energético.

La familia de protocolos SPIN está diseñada para superar las deficiencias producidas en la sobrecarga por negociación y la adaptación de recursos. Esta familia esta ideada en base a dos conceptos principales:

1. Los nodos operan de forma más eficiente y conservan energía enviando la descripción de los datos en lugar de enviar todos los datos
2. Protocolos convencionales como los basados en *flooding* o *gossiping* [8] desperdician energía y ancho de banda cuando envían de forma innecesaria copias de los datos por sensores que cubren áreas solapadas. Además el protocolo de encaminamiento por *flooding* tiene el problema de la *implosion* que se produce por la duplicación de mensajes enviados al mismo nodo o *data overlap* cuando dos nodos de la misma región envían paquetes muy parecidos al mismo nodo vecino, esto provoca un gasto innecesario de energía. En cambio *gossiping* evita el problema de la implosión simplemente eligiendo un nodo aleatorio para enviar el paquete en lugar de enviarlo a todos los nodos vecinos, sin embargo esto provoca un retraso en la propagación de los datos entre nodos.



[6] Implosion y Data overlap

El sistema de metadatos que emplea SPIN resuelve los problemas de inundación y además ahorra una cantidad significativa de energía. SPIN es un protocolo dividido en 3 etapas y cuyos nodos utilizan 3 tipos de mensajes: ADV, REQ y DATA.

ADV se usa para advertir de nuevos datos, REQ para pedir nuevos datos y DATA son los datos en sí. El protocolo comienza cuando un nodo obtiene datos nuevos y está preparado para compartirlos. Entonces emite un mensaje por broadcast de tipo ADV que contiene únicamente metadatos. Si un nodo vecino está interesado en los datos, entonces envía un mensaje REQ pidiendo los datos y DATA se envía al nodo vecino. El nodo vecino repite este proceso con sus vecinos y así sucesivamente. Por tanto toda la red de sensores recibirá una copia de la información.

La familia de los protocolos SPIN incluye muchos protocolos. Los dos principales son SPIN-1 y SPIN-2 que incorporan una fase de negociación antes de que los datos sean transferidos para asegurar que la información que es transferida resulta útil. Además, cada nodo dispone de un gestor de recursos que la permite monitorizar el consumo, esta información es compartida entre nodos antes de la transmisión de los datos. SPIN-2 es una extensión de SPIN-1 e incorpora un mecanismo para el mejor funcionamiento de la red relacionado con el consumo energético. Cuando la energía en los nodos es abundante, SPIN-2 se comunica utilizando las tres etapas de SPIN-1. Sin embargo, cuando la energía de un nodo empieza a escasear, se reduce la participación en el protocolo.

En conclusión, SPIN-1 y SPIN-2 son protocolos sencillos que distribuyen información de forma eficiente. Estos protocolos son indicados para situaciones donde los nodos son móviles porque basan sus decisiones de encaminamiento en la información facilitada por los vecinos. Otros protocolos de la familia SPIN son:

- SPIN-BC: Protocolo diseñado para canales broadcast
- SPIN-PP: Protocolo diseñado para las comunicaciones punto-a-punto.
- SPIN-EC: Protocolo similar a SPIN-PP pero con jerarquía energética.
- SPIN-RL: Protocolo similar a SPIN-PP pero con ajuste para los canales con pérdidas.

Una de las ventajas de SPIN reside en que los cambios topológicos de la red son localizados gracias a que cada nodo solo necesita información de los nodos vecinos que están a un salto de distancia.

SPIN proporciona un ahorro energético significativo y evita el problema de los datos redundantes. En cambio, el mecanismo de aviso de transmisión de datos no garantiza el envío de éstos. Si los nodos interesados en la información captada por un nodo lejano se encuentran separados por nodos intermedios, los cuales no están interesados en la información, es posible que la información no llegue a su destino.

### 9.1.1.2. Directed Diffusion (Difusión directa)

En [9], Intanagonwiwat propuso un paradigma en la agregación de datos para redes de sensores inalámbricas llamado difusión directa. La idea principal del paradigma es la de tener los datos centralizados (DC) mediante la combinación de los datos que provienen de diferentes fuentes eliminando la redundancia y minimizando el número de transiciones, además de ahorrar energía y prolongar su tiempo de vida. En contra de lo que ocurre en el encaminamiento punto-a-punto, el encaminamiento DC encuentra rutas a muchos destinos desde diferentes fuentes que permite la consolidación de la información redundante.

En difusión directa, los sensores captan eventos y crean gradientes de información en sus respectivas zonas. La estación base solicita los datos mediante difusión de intereses. Los intereses describen la tarea a realizar por la red. Estos se transmiten por la red salto a salto, y se retransmite de cada nodo a sus vecinos. Como los intereses se transmiten a lo largo de toda la red, los gradientes deben de configurarse para escribir los datos que satisfagan las peticiones de los nodos.

El proceso consiste en que la estación base pide datos diseminando sus intereses y los nodos intermedios los propagan. Cada nodo que recibe los intereses prepara un gradiente hacia estos nodos. Este proceso se repite hasta que los gradientes están listos desde la fuente hasta la estación base. La fuerza del gradiente difiere en función de los nodos vecinos. En esta etapa los bucles no son comprobados, pero se eliminarán más tarde. Cuando intereses y gradientes concuerdan, entonces se escoge la mejor ruta dentro de todos los caminos posibles, así se evita el problema de la inundación. Para mejorar la comunicación, los datos se agregan sobre la marcha. La finalidad es encontrar la mejor forma de transmitir la información desde la fuente al destino. La estación base refresca y reenvía los intereses cuando empieza a recibir datos desde las fuentes. Esto es necesario porque no se garantiza que los intereses sean transmitidos por la red.

Todos los nodos son dependientes de la aplicación, lo que permite ahorrar energía seleccionando las rutas de forma empírica y también, cacheando y procesando los datos en la red. El cacheo de datos aumenta la eficiencia, robustez y la escalabilidad de la coordinación entre nodos, que es la esencia de la difusión de datos. Otro uso de la difusión directa es la propagación instantánea de un evento hacia algunas partes de la red.

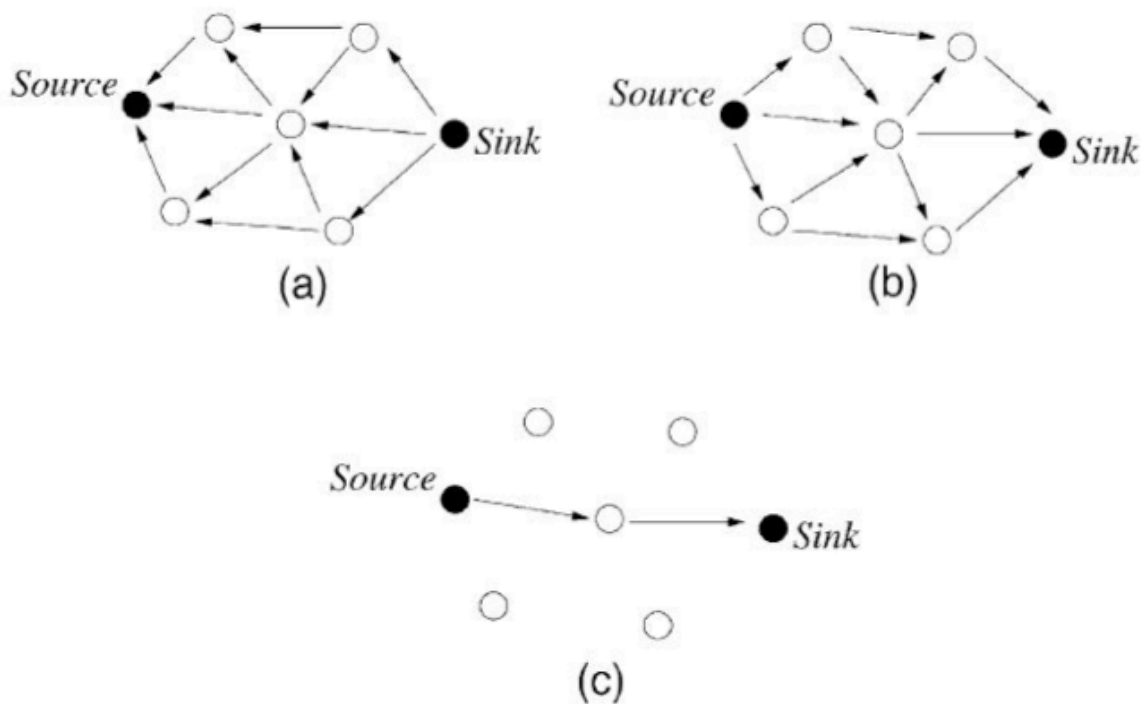
El rendimiento de los métodos para agregar datos usados en la difusión directa se ve afectado por la posición de los nodos fuente, el número de fuentes y la topología de la red.

La difusión directa difiere de SPIN en dos aspectos principales:



- El método de petición de datos en la difusión directa puede provocar la saturación de algunas tareas en los nodos. En SPIN sin embargo, los sensores advierten de la disponibilidad de los datos permitiendo realizar peticiones a los nodos interesados.
- Toda la comunicación en difusión directa sea realiza vecino a vecino, con la capacidad de que cada nodo agregue datos y cachee información. No hay necesidad de mantener la topología de la red, al contrario de lo que pasa en SPIN.

En cambio, difusión directa no puede ser aplicada en aplicaciones que requieran un envío continuo de datos a la estación base. Esto se produce porque la petición de datos no resulta útil en este tipo de aplicaciones. Además de que encontrar datos que satisfagan las peticiones produce una carga extra en los nodos.



Ejemplo de Difusión Directa [67]

(a) Propagación de intereses (b) Preparación del gradiente (c) Envío de datos

### 9.1.1.3. Rumor Routing

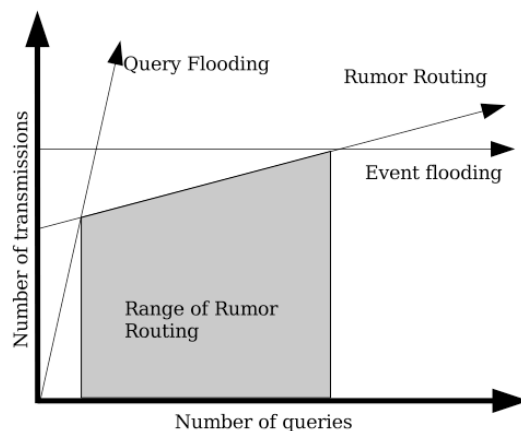
Rumor Routing es una variación de difusión directa y está diseñado especialmente para aplicaciones donde el encaminamiento geográfico no es posible [10]. El método que utiliza la difusión directa para propagar las peticiones a toda la red, cuando no hay criterio geográfico, es por inundación de datos, pero en algunos casos donde solo se requiere pequeñas cantidades de información la inundación no es la mejor opción. De forma paralela a este modelo, se puede inundar ciertos eventos si el número de nodos es pequeño y el número de peticiones es grande.

La idea es proporcionar la información a los nodos que están interesados intentando evitar la sobrecarga de la red al enviar información a todos los nodos. Por ello Rumor Routing, en lugar de inundar eventos a lo largo de la red, utiliza unos paquetes llamados agentes.

Cuando un nodo detecta un evento, éste se añade a su tabla local, llamada tabla de eventos y se genera un agente. El agente viaja a través de la red para propagar la información de eventos locales a otros nodos. Cuando un nodo genera una petición para un evento, los nodos que conocen la ruta puede responder consultando su tabla de eventos. Por ello, no es necesario congestionar la red con inundaciones, mejorando el coste de la comunicación.

Esto tiene parte negativa, Rumor Routing solo mantiene una ruta entre la fuente y el destino, esto no pasa de difusión directa, que puede encaminarse por diferentes rutas.

Las simulaciones muestran que se ahorra una cantidad significativa de energía con Rumor Routing en comparación con difusión directa, además de poder administrar nodos fallidos. Estas pruebas solo son eficientes si el número de nodos es pequeño, para redes de gran tamaño empieza a ser costoso mantener actualizadas las tablas de eventos.

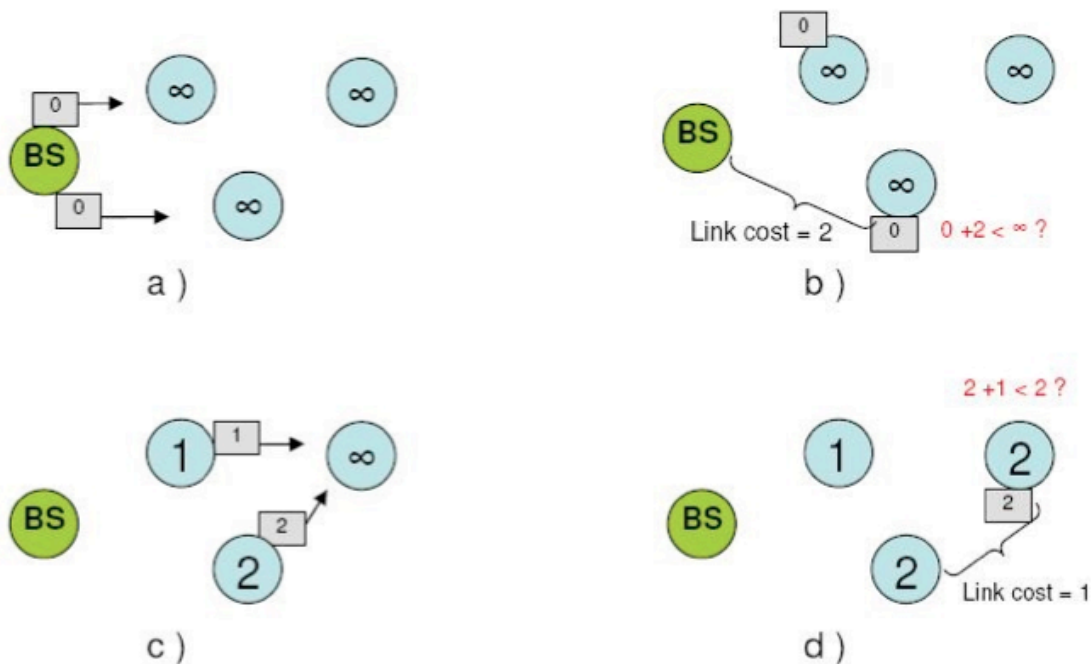


[68] Rango de Rumor Routing

### 9.1.1.4. MCFA (Minimum Cost Forwarding Algorithm)

En algoritmo MCFA, cada nodo almacena la ruta menos costosa entre él y la estación base [11]. Inicialmente el coste mínimo se establece a infinito. La estación base retransmite mediante difusión un mensaje cuyo coste se establece a cero. Cuando un nodo recibe dicho mensaje, compara el coste del mensaje con su coste mínimo. Si el coste del mensaje sumado al coste del enlace es menor que el coste que tiene el nodo, entonces se actualiza el coste del mensaje, el coste almacenado por el nodo y se distribuye a los vecinos, en caso contrario se descarta la transmisión del mensaje.

Es por ello que se aprovecha el hecho de que la dirección de la ruta hacia la estación base es siempre conocida. Sin embargo, es posible que algunos nodos actualicen varias veces su ruta, lo que contribuye a la carga del sistema. También es posible que los nodos que se encuentran lejos de la estación base tengan que retransmitir más mensajes que aquellos nodos que se encuentren más próximos. Una posible solución a este problema es la utilización de un algoritmo *backoff*, que obliga a los nodos a retransmitir hasta que pasa un tiempo  $a * lc$ . Donde  $a$  es una constante predefinida y  $lc$  es el coste del mensaje recibido.



[66] Minimum Cost Forwarding

- Cada nodo establece su coste mínimo a infinito
- La estación base retransmite el mensaje con un coste establecido a 0
- Si el coste del mensaje + coste del link  $<$  coste local, se actualiza el coste local y el coste del mensaje y se vuelve a retransmitir el mensaje
- Si el coste del mensaje + coste del link  $\geq$  coste local, se descarta el mensaje.

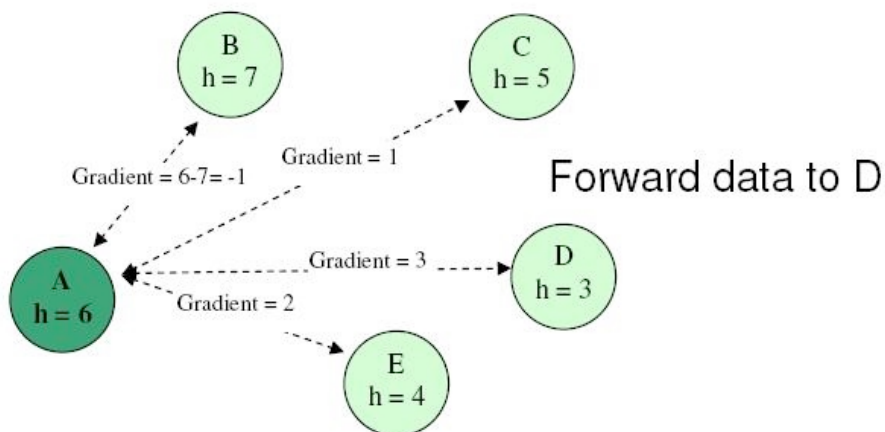
### 9.1.1.5. GBR (Gradient-Based)

Propuesta por Schurgers [12], se trata de otra variante de difusión directa. Su paradigma principal es el cálculo de un parámetro llamado la “altura del nodo”, que es la ruta mínima entre el nodo y la estación base en término de número de saltos entre ellos. Para ello, se memoriza el número de saltos cuando los intereses son distribuidos a lo largo de toda la red, así cada nodo puede calcular su altura. La diferencia entre la altura de un nodo y la de su vecino se le llama gradiente de la unión entre ellos. Los paquetes son distribuidos por las uniones cuyos gradientes son mayores. GBR hace uso de técnicas auxiliares como la agregación de datos y la propagación de tráfico ordenado para dividir de forma uniforme la carga en la red.

Cuando múltiples rutas atraviesan un mismo nodo, este nodo puede combinar datos para una determinada función. GBR dispone de tres métodos diferentes para la diseminación de los datos:

- Esquema estocástico, donde un nodo escoge un gradiente al azar cuando hay dos o más saltos que tengan el mismo gradiente.
- Esquema basado en la energía, un nodo incrementa su altura cuando su energía desciende de un cierto umbral establecido, así los otros nodos evitan enviar datos a través del nodo débil.
- Esquema basado en streaming, donde nuevos *streams* no son encaminados a través de nodos que actualmente forman parte del camino utilizado por otros *streams*.

El objetivo principal de estos tres esquemas es obtener una distribución de carga balanceada del tráfico de la red, además de incrementar la vida de la red. Simulaciones muestran un rendimiento superior de GBR sobre difusión directa en términos energéticos.



[66] Gradient Based Routing

### 9.1.1.6. COUGAR

COUGAR es un protocolo de encaminamiento que ve la red como una gran base de datos distribuida, donde algunos nodos contienen información no disponible temporalmente [13].

El funcionamiento de COUGAR consiste en el almacenamiento de información histórica por parte de los nodos. Cabe señalar la posibilidad de que se almacene información errónea por parte de los nodos debido a unas pobres condiciones de propagación de la información. Para evitar dicha circunstancia, COUGAR dispone de una interfaz similar a SQL que incorpora algunas cláusulas para modelar la distribución de probabilidad. La estación base es responsable de generar el plan de peticiones para seleccionar un nodo especial, que llamaremos nodo maestro. Los nodos maestro son los encargados de incorporar información y distribuir los resultados a la estación base.

Por tanto, podemos afirmar que COUGAR se trata de un protocolo de datos centralizado y cuya principal idea es el uso de consultas declarativas para aliviar a la red de los procesos de consulta en determinadas tareas como la elección de sensores relevantes [13]. COUGAR utiliza la agregación de datos en la red como medida para el ahorro energético. La abstracción es posible gracias a la incorporación de una capa de consulta entre la capa de red y la de aplicación. COUGAR incorpora un mecanismo de selección para decidir que nodos van a ser nodos relevantes.

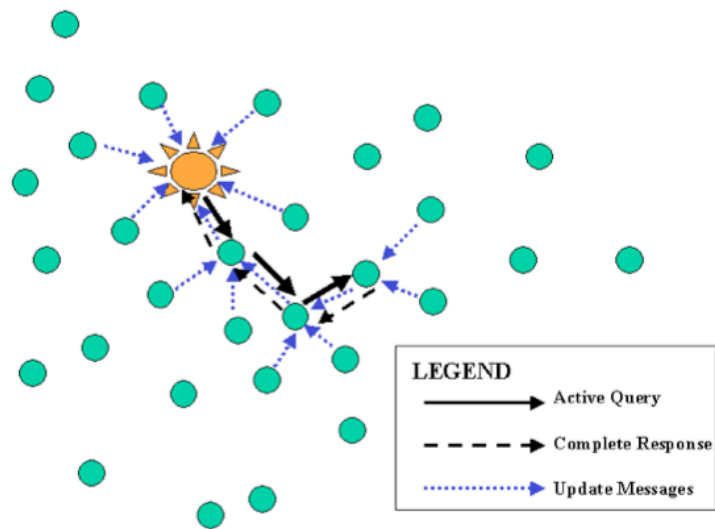
La estación base es responsable de generar el plan de consultas, el cual especifica la información necesaria sobre el flujo de datos y el cálculo de la red para consultas entrantes y el envío a los nodos relevantes. El plan de consultas también describe como se selecciona un nodo maestro para la consulta. Esta arquitectura proporciona un ahorro a nivel computacional que se ve reflejado en el consumo cuando los datos generados son considerables.

Sin embargo, COUGAR presenta algunos inconvenientes. La inclusión de una capa extra en cada sensor del nodo puede provocar un consumo excesivo de energía y memoria. También es necesario la sincronización de los nodos antes del envío de los datos al nodo maestro. Además, el nodo maestro ha de ser mantenido dinámicamente para evitar que se le interprete como un punto de acceso.

### 9.1.1.7. ACQUIRE (Active Query Forwarding in Sensor Networks)

Este algoritmo también considera la red de sensores inalámbrica como una base de datos distribuida [14]. En este esquema, un nodo inyecta paquetes de consulta en la red. Los nodos vecinos detectan los paquetes con información obsoleta, los actualizan y los reenvían al nodo. Entonces, el nodo escoge aleatoriamente un vecino para propagar la consulta que ha de ser resuelta. A medida que la consulta avanza por la red, se resolverá en componentes más pequeños hasta que esté completamente resuelta. Será en este punto cuando las respuestas sean enviadas de vuelta al nodo origen.

Esta propuesta desarrollada por Sadagopan resulta similar a COUGAR ya que ambos interpretan la red como una gran base de datos distribuida, la principal diferencia es que ACQUIRE va dividiendo las consultas en consultas cada vez más pequeñas.



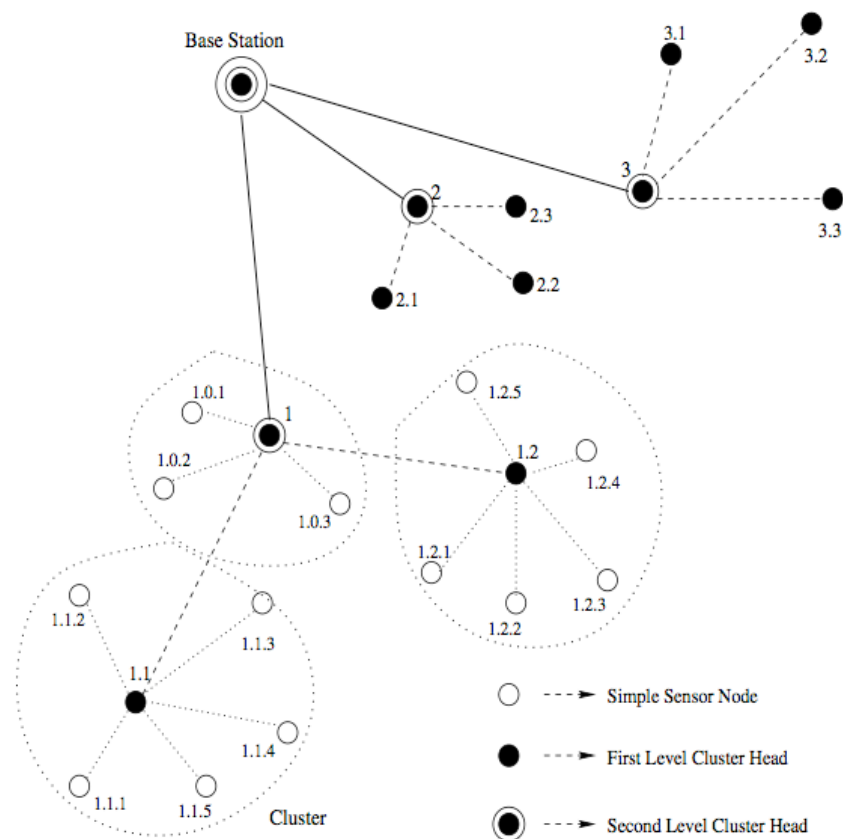
ACQUIRE con una búsqueda anticipada de un salto [14]

La forma de operar de ACQUIRE es la siguiente. La estación base envía una consulta, que es reenviada por cada nodo que la recibe. Durante este proceso, cada nodo trata de responder parcialmente a la consulta usando su información precacheada y reenviándola. Si la información precacheada no está actualizada, entonces los nodos recopilan información de otros nodos vecinos que se encuentran a  $d$  saltos. Una vez la consulta está resuelta completamente, se envía de vuelta por el mismo camino o por el camino más corto.

Por tanto, ACQUIRE es capaz de lidiar con consultas complejas al permitir a los nodos resolverlas en partes. Esto supone una ventaja respecto a Difusión Directa ya que esta no era capaz de manejar consultas complejas por motivos energéticos. Por otro lado, podemos ajustar la eficiencia del algoritmo mediante el parámetro  $d$ . Cuando  $d$  es igual al diámetro de la red, ACQUIRE actúa de forma similar al *flooding*. Sin embargo, cuando  $d$  es pequeña, la consulta ha de recorrer más saltos. Por ello, dependiendo de las dimensiones de la red y de las características de ésta, variaremos  $d$ , hasta encontrar un valor que nos ofrezca el mayor rendimiento o se ajuste a las necesidades que presentemos.

## 9.1.2. Encaminamiento jerárquico

El encaminamiento jerárquico o basado en cluster, se propuso originariamente para redes cableadas, es una técnica de sobra conocida, que ofrece ventajas en cuanto a escalabilidad y comunicación eficiente. Es por ello que utilizaremos este concepto para las redes de sensores inalámbricas. En el encaminamiento jerárquico, los nodos con más energía se usan para procesar y enviar la información mientras que los nodos con menos energía se usan en la captura de información en las proximidades del objetivo. Esto conlleva a la creación de un cluster y a la asignación de tareas especiales a los nodos maestro para contribuir a la escalabilidad del sistema, a la prolongación de su vida útil y al ahorro energético. El encaminamiento jerárquico además de ser un método efectivo para el ahorro de energía, también provee al sistema de agregación de datos. Este protocolo consta de dos capas principales. Una de ellas se usa para seleccionar los nodos maestros y la otra se encarga del encaminamiento. Sin embargo, muchas técnicas de esta categoría no se centran en el encaminamiento, sino en dictaminar quién y cuando se enviarán o procesarán los datos, o en la asignación de un canal.



[16] Hierarchical Clustering

### 9.1.2.1. LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

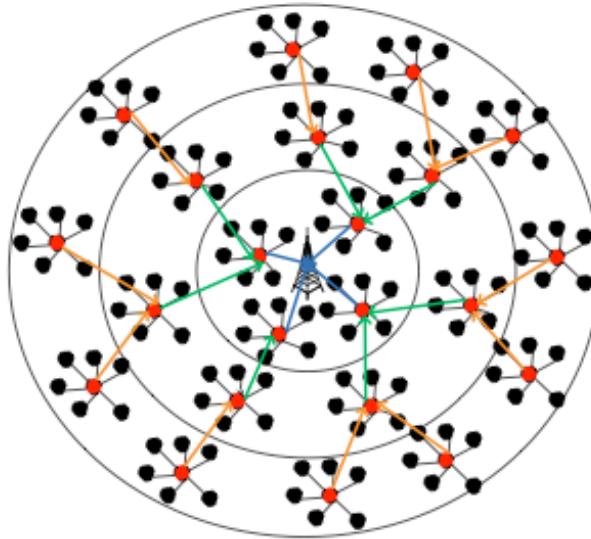
El protocolo Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) es un protocolo basado en clusters, que incluye información distribuida del cluster [6]. LEACH selecciona de forma aleatoria unos cuantos nodos y los trata como nodos maestros, cuya misión pasará a ser la de distribuir la carga de energía de forma uniforme a lo largo de la red. Los nodos maestros comprimen la información que les llega de los diferentes nodos pertenecientes al cluster y envían un paquete añadido a la estación base con el fin de reducir la cantidad de información a transmitir a la estación base. El protocolo LEACH utiliza las técnicas TDMA/CDMA MAC para reducir las colisiones entre clusters y dentro de los propios clusters. En cambio, la recolección de datos es centralizada y se ejecuta de forma periódica. Por ello, este protocolo es indicado cuando existe la necesidad de una monitorización constante. Un usuario puede no necesitar todos los datos de forma inmediata, por tanto, las transmisiones periódicas no son necesarias ya que minan la limitada energía de los nodos. Después de un intervalo de tiempo, se cambian los roles de los nodos maestros de forma aleatoria, así se disipa de forma uniforme la energía del sensor. Las simulaciones estipulan que alrededor de un 5% de los nodos actúan como nodos maestro.

El funcionamiento de LEACH se divide en dos fases, la fase de configuración y la fase de estado estacionario. En la fase de configuración, los clusters se organizan y se seleccionan los nodos maestro. En la fase de estado estacionario, se transfieren los datos actuales a la estación base. La duración de la fase de estado estacionario es más larga que la duración de la fase de configuración con el fin de minimizar la sobrecarga.

Cada nodo maestro se encarga de difundir un mensaje de aviso al resto de los nodos en la red, advirtiéndoles que son el nuevo nodo maestro. El resto de nodos, después de recibir este aviso, deciden a qué cluster desean pertenecer. Esta decisión se basa en la intensidad de la señal del aviso. Los nodos informan al nodo maestro que van a pasar ser miembros del cluster. Después de recibir todos los mensajes de los nodos que desean ser incluidos en el cluster y en función del número de nodos en el cluster, el nodo maestro crea un esquema TDMA y asigna a cada nodo un intervalo de tiempo durante el cual pueden transmitir. Este esquema se transmite a todos los nodos del cluster.

Durante la fase de estado estacionario, los sensores pueden comenzar la detección y transmisión de datos con el nodo maestro. El nodo maestro, después de recibir todos los datos, los agrega antes de enviarlos a la estación base. Después de un cierto tiempo, la red vuelve a la fase de configuración y entra en otra ronda de selección de nuevos nodos maestro. Cada cluster se comunica utilizando diferentes códigos CDMA para reducir la interferencia de los nodos que pertenecen a otros clusters.





[72] Ejemplo de cluster por niveles

Aunque LEACH es capaz de aumentar la vida útil de la red, todavía hay una serie de cuestiones acerca de los supuestos utilizados en este protocolo. LEACH asume que todos los nodos pueden transmitir con una potencia suficiente para alcanzar la estación base si fuese necesario y que cada nodo tiene un poder de cómputo suficiente para soportar diferentes protocolos MAC. Por lo tanto, no es aplicable en redes de grandes dimensiones. También supone que los nodos siempre tienen datos a enviar, y los nodos que se encuentran cerca unos de otros poseen datos relacionados. No es seguro que el número predeterminado de nodos maestro se distribuya de forma uniforme a través de la red. Por tanto, existe la posibilidad de que los nodos maestro elegidos sean concentrados en una parte de la red. Por lo que algunos nodos no tendrá ningún nodo maestro a su alrededor. Por otra parte, la idea de agrupar dinámicamente produce una sobrecarga adicional, por ejemplo, cambios de nodo maestro, avisos, etc., lo que puede reducir las ventajas respecto al consumo de energía.

Por último, el protocolo supone que todos los nodos disponen de la misma capacidad energética en cada ronda de elección, dando por hecho que los nodos maestro consumen la misma energía que los nodos tradicionales. El protocolo debería ampliarse para tener en cuenta que la capacidad energética de los nodos no es uniforme, es decir, el uso de umbrales basados en la energía.

### 9.1.2.2. PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

El protocolo Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) es básicamente una mejora del protocolo analizado anteriormente LEACH, y cuya idea principal es la de prolongar la vida de la red al tener los nodos la necesidad de comunicarse únicamente con sus vecinos más cercanos y turnarse en la comunicación con la estación base [15]. Cuando la ronda de comunicación de todos los nodos termina, comenzará una nueva ronda de nuevo. Esto reduce la energía necesaria para la transmisión por ronda, además de distribuirse la energía de forma uniforme por todos los nodos. Por tanto, PEGASIS tiene dos objetivos principales:

- Incrementar el tiempo de vida de cada nodo usando técnicas de colaboración.
- Permitir únicamente el tráfico local entre nodos que pertenezcan a una misma región para reducir el ancho de banda consumido.

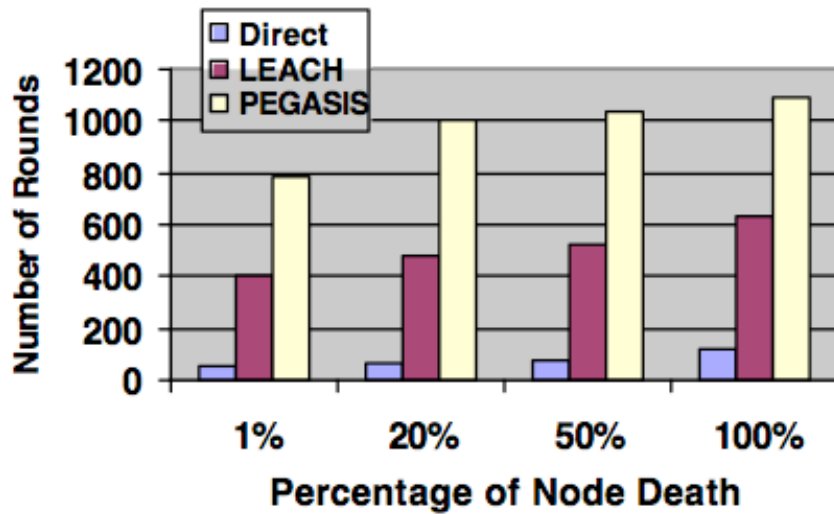
Al revés que LEACH, PEGASIS no utiliza el sistema de clusters y tan solo utiliza un nodo en cadena para transmitir a la estación base en lugar de utilizar múltiples nodos.

Para localizar los nodos vecinos más cercanos, cada nodo utiliza la intensidad de la señal para determinar la distancia respecto a sus vecinos, y reajustar la intensidad de la señal para que ésta solo pueda ser captada por uno de los nodos. La cadena en PEGASIS se forma con los nodos que están próximos entre ellos y forman un camino hasta la estación base. Esta información extra será enviada a la estación base mediante cualquier nodo que esté en la cadena y el resto de nodos que formen la cadena se encargaran de propagar la información por turnos hasta la estación base. La construcción de la cadena se genera mediante greedy fashion.

Las simulaciones muestran que PEGASIS es capaz de de incrementar la vida de la red el doble de tiempo de lo que es capaz LEACH. Esta mejora se produce al evitar la sobrecarga provocada por la generación dinámica del cluster que se genera en LEACH y al minimizar el número de transmisiones y recepciones utilizando la técnica de agregación de datos. A pesar de evitar el problema de la sobrecarga, PEGASIS sigue necesitando del ajuste dinámico de la topología de la red para que los nodos conozcan el estado energético de sus vecinos con el fin de saber por donde encaminar los datos. Este tipo de ajuste puede provocar una sobrecarga significativa, especialmente en situaciones donde la red tiene un tráfico grande.

Además, PEGASIS asume que cada nodo ha de ser capaz de comunicarse con la estación base directamente. También asume que cada nodo contiene una base de datos completa sobre la localización de los otros nodos de la red. PEGASIS también cuenta con que todos los nodos tienen un nivel de energía similar, y por tanto, su tiempo de vida también lo será.

El principal problema de PEGASIS es el retardo generado por los nodos lejanos a la cadena. Además, el nodo maestro puede producir cuellos de botella.



[15] Resultados de rendimiento en una red de 50m x 50m con una energía inicial de 0.25J / nodo

Como extensión de PEGASIS se ha desarrollado Hierarchical-PEGASIS cuyo objetivo es reducir el retardo producido por la transmisión de paquetes a la estación base. Para ello, se producen transmisiones simultáneas para evitar las colisiones, al incorporan codificación de la señal. Los protocolos basados en cadenas que disponen de nodos CDMA, construyen la cadena de nodos formando una estructura similar a un árbol jerárquico, y cada nodo seleccionado deberá transmitir la información al nodo del nivel superior de la jerarquía. Este método asegura la transmisión de datos de forma paralela y reduce el retardo de forma significativa. La extensión jerárquica mejora al PEGASIS original en un factor en torno a 60.

### 9.1.2.3. TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols)

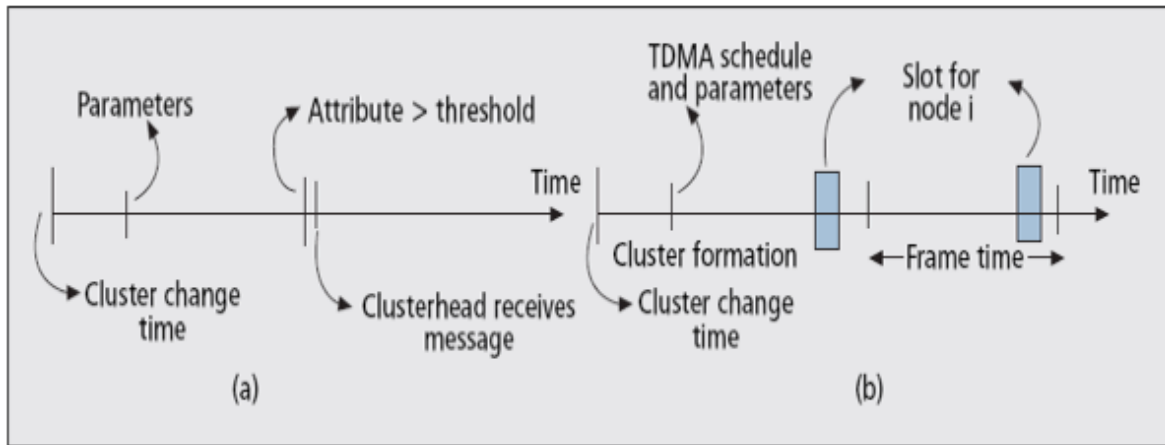
El protocolo TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols) fue propuesto para aplicaciones donde el tiempo es crítico. En este protocolo los sensores están continuamente capturando el medio pero la transmisión de los datos se hace de forma menos frecuente [16]. Un nodo maestro envía a sus nodos dependientes un umbral ‘duro’, que es el umbral establecido por el sensor al medir el medio, y un umbral ‘blando’, que es el pequeño cambio del valor de la medición que activa al nodo para encender el transmisor y enviar la información. Así, el umbral duro trata de reducir el número de transmisiones, al permitir a los nodos la transmisión sólo cuando el atributo se encuentra dentro del rango de interés. El umbral suave reduce aún más el número de transmisiones que se llevan a cabo, en contra de lo que ocurre cuando hay pocos/ningún cambio en el atributo detectado. Un valor pequeño del umbral suave da una imagen más precisa de la red, a costa de un mayor consumo de energía. Así, el usuario puede controlar el trade-off entre eficiencia energética y la exactitud de los datos. Cuando los nodos maestros van a cambiar, se envían los nuevos valores de los parámetros anteriores. El principal inconveniente de este sistema es que, si los umbrales no se reciben, los nodos no se comunican, y el usuario no recibirá ningún dato de la red.

Los sensores captan el medio de forma permanente. La primera vez que un parámetro del conjunto de atributos alcanza el valor del umbral duro, el nodo enciende su transmisor y envía los datos obtenidos. El valor percibido se almacena en una variable interna, llamada Sensed Value (SV). Los nodos enviarán datos en el período actual sólo cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- El valor actual del atributo percibido es mayor que el umbral duro.
- El valor actual del atributo detectado difiere de SV por una cantidad igual o mayor que el umbral suave.

Entre las características de TEEN se incluyen la idoneidad en aplicaciones donde el tiempo es un factor crítico. Además, dado que la transmisión de mensajes consume más energía que la captación de éstos, el consumo en este sistema es menor que en redes proactivas. El umbral suave puede ser modificado. En cada cambio de cluster, se envían los nuevos parámetros y así, el usuario puede cambiarlos según le sea necesario.

Los sensores de los nodos capturan el medio de forma permanente, y sólo los nodos que detectan datos por encima del umbral duro, podrán transmitir. Una vez que un nodo detecta un valor más allá del umbral duro, transmitirá los datos sólo cuando el valor de ese atributo cambie en una cantidad igual o mayor al umbral blando. Si un nodo no envía los datos durante un período igual al contador, se verá forzado a captar y difundir los datos.



[16] Secuencia de Threshold-sensitive Energy Efficient.

Se utiliza un esquema TDMA y a cada uno de los nodos del cluster se le asigna una ranura de transmisión. El principal inconveniente de este sistema es la complejidad adicional necesaria para ejecutar las funciones de umbral y la cuenta de tiempo.

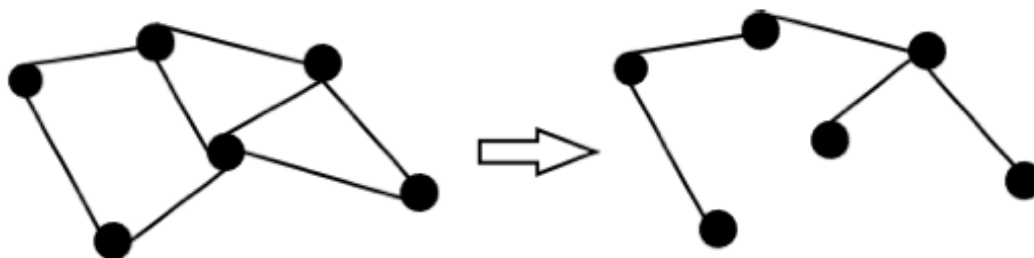
Las simulaciones han demostrado que el protocolo supera en rendimiento a LEACH al disminuir el número de transmisiones. Los principales inconvenientes de este esquema es la sobrecarga y la complejidad asociada a la formación de clusters multinivel, la implementación de funciones basadas en umbrales y a la forma en que se nombran las consultas.

#### 9.1.2.4. MECN (Small Minimum Energy Communication Network)

MECN es un protocolo que basa su funcionamiento en la identificación de la posición de cada nodo mediante un sistema de localización de bajo consumo como GPS.

MECN identifica una región de retransmisión para cada nodo. La región de retransmisión consiste de nodos en un área envolvente donde se transmite a través de estos nodos y resulta más eficiente que la transmisión directa.

La idea principal de MECN es encontrar una subred, que tenga menos nodos y que requiera menos energía para la transmisión entre dos nodos en particular. De esta manera, las rutas de energía mínima se encuentran sin tener en cuenta todos los nodos de la red. Esto se realiza mediante una búsqueda personalizada para cada nodo, teniendo en cuenta su región. MECN es auto-configurable y por lo tanto se puede adaptar dinámicamente a la falta de nodos o al despliegue de nuevos sensores. La *small minimum energy communication network* (SMECN) [17] es una extensión de MECN. En MECN, se supone que cada nodo puede transmitir a todos los demás, lo cual no es posible en todo momento. En SMECN hay que tener en cuenta los posibles obstáculos entre cualquier par de nodos. Sin embargo, la red se sigue considerando como completamente conectada como en el caso de MECN. La subred construida por SMECN para la transmisión mediante energía mínima es más pequeña (en términos de número de aristas) que la construida por MECN.



La subred calculada por SMECN ayuda a enviar mensajes en las rutas de mínima energía. Sin embargo, el algoritmo propuesto es local, en el sentido de que en realidad no encuentra el camino de menor coste, sino que sólo construye una subred en la que se garantiza que existe. Por otra parte, la subred construida por SMECN hace que sea más probable que la ruta utilizada sea la que requiere menor consumo de energía. Además, la búsqueda de una subred con menor número de aristas introduce más sobrecarga en el algoritmo.

### 9.1.2.5. SAR (Sensor Aggregates Routing)

En [18], se proponen un conjunto de algoritmos para la construcción y el mantenimiento de clusters de sensores. El objetivo es monitorizar de forma colectiva la actividad en un entorno determinado. El cluster abarca aquellos nodos de la red que intervengan en tareas distribuidas de procesamiento. Los parámetros del predicado dependerán de la tarea y de sus recursos necesarios. La formación de clusters se describe en [18] en términos de asignación de recursos en las tareas de detección y comunicación. Los sensores que se encuentran en zonas de captación, se dividen en clusters en función de su intensidad de señal, por lo que sólo hay un pico por cluster. Es entonces cuando se eligen los nodos maestros de los clusters. Un pico puede representar un objetivo, múltiples objetivos, o ninguno en caso de que el pico sea generado por ruido. Para la selección de los nodos maestro, es necesario el intercambio de información entre nodos vecinos. Si un sensor, después de intercambiar paquetes con todos sus vecinos que se encuentran a un salto de él, y comprueba que es mayor que todos los nodos comprobados, se autoproclama nodo maestro. Este algoritmo de seguimiento basado en nodos maestro asume que el sólo el nodo maestro conoce la región geográfica de colaboración.

Se proponen tres algoritmos en [18]. Primero, un protocolo ligero, Distributed Affgregate Management (DAM), para la formación de clusters en tareas de monitorización. El protocolo consta de un predicado P para cada nodo, cuya finalidad es la de decidir si deben participar en un cluster, y la de intercambiar esquemas de mensajes M que contienen información acerca de la composición del cluster. Un nodo determina si pertenece a un cluster, basándose en el resultado de aplicar el predicado a los datos del propio nodo, así como a datos de otros nodos. Los clusters se forman transcurrido un periodo de tiempo. En segundo lugar, el algoritmo Energy-Based Activity Monitoring (EBAM) calcula el nivel de energía de cada nodo teniendo en cuenta el impacto de la señal, combinando de una forma ponderada, la energía detectada en el objetivo en cada sensor afectado, asumiendo que todos los sensores disponen de la misma capacidad energética. El tercer algoritmo, Expectation-Maximization Like Activity Monitoring (EMLAM), elimina la idea de que todos los nodos disponen de la misma cantidad de energía. El algoritmo EMLAM calcula las posiciones y las señales usando señales ya recibidas, y usa el cálculo para predecir como las señales de los objetivos deben ser combinadas en cada sensor. Este proceso se repite hasta que la estimación es lo suficientemente buena.

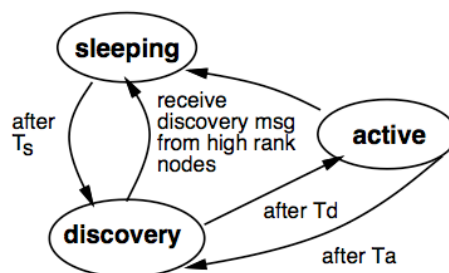
### 9.1.3. Encaminamiento posicional

En este tipo de encaminamiento, los nodos se direccionan en función de su posición. La distancia entre nodos vecinos se calcula en base a la potencia de su señal. Las coordenadas de los nodos vecinos se obtienen mediante el intercambio de información entre ellos.[19][20][21]. De forma alternativa, la posición de los nodos se puede obtener directamente a través de un GPS [23], si los nodos disponen de este sistema de localización. En algunos esquemas de localización, se indica al nodo que entre en modo hibernación mientras no haya actividad con el fin de ahorrar energía. Los problemas de diseño en los esquemas de hibernación se explican con mayor detenimiento en [22] [23]. Aquí revisamos la mayoría de protocolos de encaminamiento basados en la localización.

#### 9.1.3.1. GAF (Geographic Adaptive Fidelity)

El protocolo GAF (Geographic Adaptive Fidelity) fue diseñado con la intención de ser aplicado en redes móviles ad-hoc pero también es efectivo en determinadas redes de sensores inalámbricas [23]. La idea principal es la de dividir la red en pequeñas redes fijas. Dentro de cada zona, los nodos colaboran unos con otros para desempeñar diferentes roles. Por ejemplo, los nodos eligen a un sensor para que permanezca activo durante un cierto periodo de tiempo y después pase a estar inactivo. Este nodo es responsable de monitorizar e informar a la estación base en representación de los nodos de la zona. Por ello, GAF es capaz de ahorrar energía al mantener apagados los nodos innecesarios sin afectar a la fidelidad del encaminamiento. Cada nodo usa su localización GPS para asociarse a un punto determinado en la nueva mini-red. Los nodos asociados a un mismo punto en la nueva red se consideran equivalentes en términos de coste de encaminamiento. Esta técnica se explota para mantener en modo inactivo a los nodos de una determinada área con el fin de ahorrar energía. Hay tres estados diferenciados en GAF:

- **Descubrimiento**, para determinar los nodos vecinos en la nueva red.
- **Activo**, determina que el nodo participa activamente en el encaminamiento.
- **Dormido**, cuando la radio se desactiva.



[69] Estados de descubrimiento, activo y dormido.



Para poder gestionar esta movilidad, cada nodo de la nueva red calcula el tiempo que le queda de estar despierto y lo envía a sus nodos vecinos. Los nodos vecinos dormidos, ajustan su tiempo de inactividad para mantener la fidelidad del encaminamiento. Antes de que el tiempo de actividad de los nodos expire, los nodos dormidos despertarán y uno de ellos pasará a ser activo. Existe un problema a la hora de programar los roles de los nodos para que actúen como nodos maestro. El nodo maestro puede pedir a otros nodos del cluster que se enciendan y recolecten datos si el sensor capta algo. Entonces, el nodo maestro será el responsable de recibir esa información y transmitirla a la estación base.

### **9.1.3.2. GEAR (Geographic and Energy Aware Routing)**

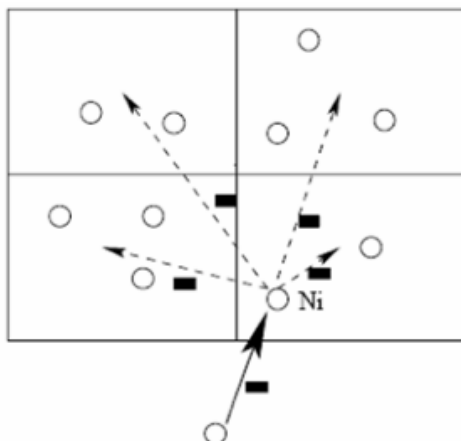
El protocolo Geographic and Energy Aware Routing (GEAR), utiliza energy aware y geographically-informed neighbor selection heuristics para encaminar los paquetes al destino [24]. La idea principal se basa en la restricción del número de intereses de Directed Diffusion considerando únicamente una región determinada, en lugar de considerar los intereses de toda la red. Haciendo esto, GEAR es capaz de ahorrar mucha más energía que en Directed Diffusion.

En GEAR, cada nodo conserva el coste estimado y el coste de aprendizaje para encontrar una ruta hasta el destino. El coste estimado es una combinación de la energía residual y la distancia al destino. El coste aprendido es un refinamiento del coste estimado que tiene en cuenta los agujeros en la red para el encaminamiento. Un agujero aparece cuando un nodo no tiene ningún vecino más cercano a la región destino que el propio nodo. Si no hay agujeros, el coste estimado y el coste aprendido es el mismo. El coste aprendido se propaga un salto hacia atrás cada vez que el paquete llega a su destino, así, la ruta del siguiente paquete podrá ser configurada.

Hay dos etapas en este algoritmo:

- La distribución de paquetes hacia el área objetivo: Una vez el nodo recibe un paquete, comprueba si los vecinos que tiene están más cercanos al objetivo que él mismo. Si hay más de uno, el nodo más cercano será elegido como el siguiente salto. Si todos los nodos vecinos están más próximos, entonces se trata de un agujero. En este caso, uno de los vecinos se elige para la transmisión del paquete mediante la función de coste aprendido. Esta elección puede ser actualizada de acuerdo a la convergencia del coste aprendido durante el envío de paquetes.
- La distribución de paquetes dentro del área objetivo: Si el paquete ha alcanzado dicha área, éste puede ser distribuido a lo largo de toda ella mediante inundación geográfica recursiva, o por inundación restringida. La inundación restringida es efectiva cuando los sensores no están densamente distribuidos. En las redes con gran cantidad de nodos, la inundación geográfica recursiva es más eficiente que la inundación restringida. En este caso, la región se divide en

cuatro sub-regiones y se crean cuatro copias del paquete. Este proceso de separación y distribución continúa hasta que solo queda un nodo.



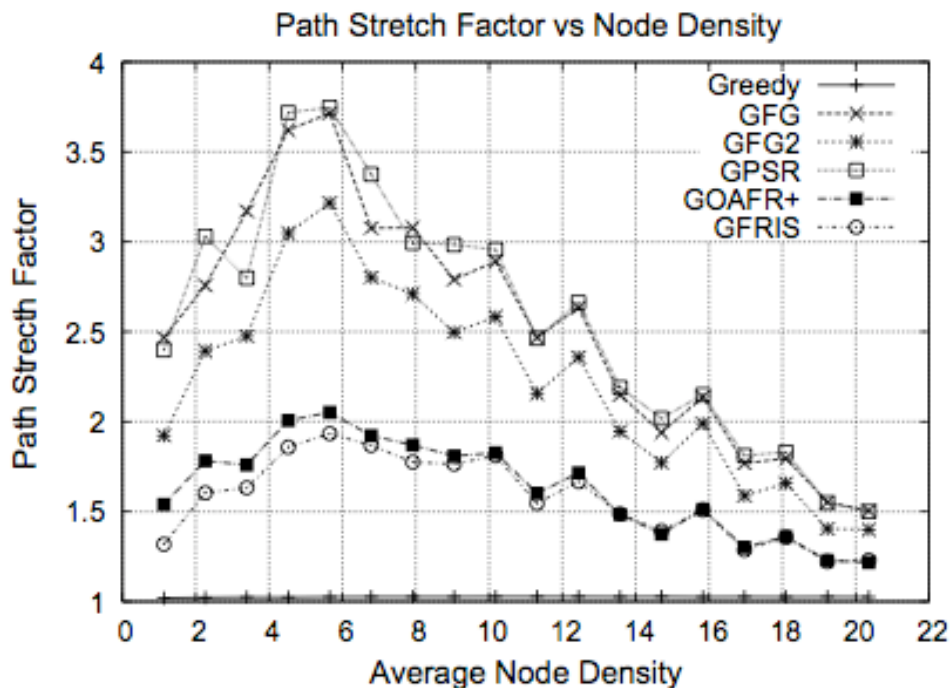
[24] Inundación geográfica recursiva

Si comparamos GEAR con otros protocolos similares como GPSR, que fue uno de los primeros en trabajar con encaminamiento geográfico y que usa grafos planos para solventar la problemática de los agujeros [24]. En el caso de GPSR, los paquetes siguen el perímetro de los grafos planos para encontrar su ruta. Además, GPSR reduce el número de estados que el nodo debe mantener, fue diseñado para redes móviles ad-hoc y requiere de un servicio de localización para el posicionamiento de las localizaciones y la identificación de los nodos. GEAR no solo reduce el consumo de energía para la configuración de las rutas, sino que también se comporta mucho mejor que GPSR en la distribución de los paquetes. Las simulaciones demuestran que en tráfico aleatorio, GEAR distribuye entre un 70% y un 80% más paquetes que GPSR. En condiciones de tráfico uniforme, GEAR distribuye entre un 25% y un 35% más que GPSR.

### 9.1.3.3. GOAFR (Greedy Other Adaptive Face Routing)

El algoritmo greedy de GOAFR siempre escoge el vecino más cercano al siguiente nodo en ser encaminado. Sin embargo, éste puede quedar atrapado en un camino sin salida, como por ejemplo, cuando un nodo vecino no tiene a ningún otro más cercano que el propio nodo. El algoritmo Other Face Routing (OFR) es una variante del algoritmo Face Routing (FR), el cual es el primero en garantizar la conexión con éxito entre un nodo fuente y el destino[25]. En cambio, el coste en el peor caso de FR es proporcional al tamaño de la red en términos de número de nodos.

El primer algoritmo que soluciona esta problemática es el Adaptive Face Routing (AFR), a pesar de ello, el caso promedio no resulta eficiente con AFR. El algoritmo simple greedy se comporta bien en redes densas, pero falla cuando la configuración de la red es muy simple [26]. Ha quedado demostrado que el algoritmo GOAFR puede lidiar con ambos peores casos de forma óptima y con una eficiencia energética considerable. Basándose en los resultados de simulación de GOAFR, hay varias formas de mejorar aún más el rendimiento promedio de los casos. También se demostró que GOAFR supera a otros algoritmos como GPSR o AFR.



[69] Path Stretch Performance on Non-uniform Topologies

## **9.2. Clasificación de los protocolos en función de su protocolo de operaciones**

En esta sección, se revisan los protocolos de encaminamiento que disponen de una funcionalidad de encaminamiento diferente. Cabe señalar que algunos de estos protocolos pueden haber sido clasificados en una o más categorías anteriores.

### **9.2.1. Protocolos de encaminamiento multipath**

En este apartado, se estudian los protocolos de encaminamiento que utilizan varias rutas de acceso en lugar de un solo camino para mejorar el rendimiento de la red. La tolerancia a fallos de un protocolo se mide por la probabilidad de que una ruta alternativa entre un emisor y un receptor exista cuando la ruta principal falla. La tolerancia a fallos se puede incrementar manteniendo varias rutas entre el origen y el destino a expensas de un mayor consumo de energía y generación extra de tráfico. Estas rutas alternativas se mantienen vivas mediante el envío de mensajes periódicos. Por lo tanto, la fiabilidad de la red se puede aumentar a expensas del incrementar el coste general para mantener los caminos alternativos.

Los autores en [27] proponen un algoritmo que encamine los datos a través de la ruta cuyos nodos tienen la mayor energía residual. El camino se sustituye cada vez que se encuentra un camino mejor. El camino principal se utilizará hasta que su energía descienda por debajo del nivel de energía de la ruta de reserva, momento en el cual, ésta pasará a ser usada. Con este enfoque, los nodos que usen la ruta principal no agotarán sus recursos energéticos mediante el uso continuo de la misma, y por consiguiente, alcanzarán una mayor autonomía. Sin embargo, el coste de cambio de ruta no se ha tenido en cuenta y habría que considerarse.

Los autores de [28] propusieron el uso de un conjunto de rutas medio-óptimas en determinadas ocasiones para aumentar la vida útil de la red. Los caminos son elegidos por medio de una probabilidad que depende de la velocidad de consumo de cada ruta. Puede resultar muy costoso el uso de el camino con la mayor energía residual cuando se utiliza para encaminar los datos en la red. Por lo tanto, existe un balance entre la reducción de la potencia total consumida y la energía residual de la red. Los autores en [29] proponen un algoritmo en el que la energía residual de la ruta se minimice con el fin de seleccionar una ruta de energía más eficiente.

En [30], el encaminamiento multipath se utiliza para mejorar la fiabilidad de las redes inalámbricas de sensores. El esquema propuesto es útil para la entrega de datos en entornos poco confiables. Se sabe que la fiabilidad de la red se puede aumentar al proporcionar varias rutas del origen al destino, enviando el mismo paquete en cada ruta. Sin embargo, la utilización de esta técnica, aumentará considerablemente el tráfico. Por lo tanto, hay un equilibrio entre la cantidad de

tráfico y la fiabilidad de la red. Esta compensación se estudia en [30] usando técnicas de redundancia que dependen del grado de multipath y de los caminos disponibles. La idea es dividir el paquete original en subpaquetes y enviar cada subpaquete a través de una de las rutas disponibles. Se ha demostrado que, incluso si alguno de estos subpaquetes se perdiera, el mensaje original todavía puede ser reconstruido. Según el algoritmo, se deduce que dado un número máximo de nodos, usando un nivel de mutipath superior a un cierto valor, se incrementará la probabilidad de fallo.

Directed Diffusion [9] es un buen candidato para el encaminamiento y envío multipath. Basado en el paradigma de difusión directa, en [31] se estudia un esquema de encaminamiento multipath que encuentra parcialmente varias rutas divididas. Se ha demostrado que el uso de múltiples rutas ofrece un alternativa viable para la recuperación de fallos de forma eficiente. La motivación del uso de caminos trenzados es el bajo coste de mantenimiento que ofrece. El coste de las rutas alternativas son comparables al coste de la ruta principal, ya que éstas tienden a ser mucho más cercanas a la ruta primaria.

### **9.2.2. Encaminamiento basado en consultas**

En este tipo de rutas, los nodos destino propagan una consulta de un nodo a la red y si un nodo dispone de los datos solicitados en la consulta, éste los enviará al nodo requerido. Por lo general, estas consultas se describen en lenguaje natural, o en lenguajes de consulta de alto nivel. Por ejemplo, el cliente C1 puede enviar una consulta al nodo N1 y preguntar: ¿Hay vehículos en movimiento en una región determinada?. Todos los nodos disponen de tablas con las consultas recibidas y enviarán los datos que concuerden con dichas consultas. Directed Diffusion [9] es un ejemplo de este tipo de encaminamiento. En la difusión directa, la estación base envía mensajes de interés hacia los sensores. Como el interés se propaga a través de la red de sensores, los gradientes provenientes de la fuente se configurarán al volver a la estación base. Cuando la fuente de datos tiene el interés, se envían los datos a lo largo de la ruta creada. Para rebajar el consumo de energía, la agregación de datos se realiza sobre la marcha.

El protocolo Rumor Routing [10] utiliza un conjunto de agentes de larga duración para crear rutas que se dirijan hacia los eventos que encuentren. Siempre que un agente atravesase un camino que conduce a un evento que no ha encontrado aún, creará un estado que conducirá al evento. Cuando los agentes llegan a través de rutas más cortas o rutas más eficientes, actualizarán las tablas de encaminamiento con las nuevas rutas. Cada nodo mantiene una lista de sus vecinos y una tabla de eventos que se actualiza cada vez que se encuentran nuevos eventos. Cada nodo también puede generar un agente de una manera probabilística. Cada agente contiene una tabla de eventos que se sincroniza con todos los nodos que lo visitan. El agente tiene una vida de un cierto número de saltos después de los cuales muere. Un nodo no generará una consulta a menos que se aprenda la ruta hacia el evento. Si no hay una ruta disponible, el nodo transmite una consulta en una dirección

aleatoria. A continuación, el nodo espera para saber si la consulta alcanzó el destino en un periodo de tiempo, si no hay respuesta del destino, el nodo inundará la red.

### **9.2.3. Encaminamiento basado en negociación**

Estos protocolos hacen uso de descriptores de datos de alto nivel con el fin de eliminar la transmisión de datos redundantes a través de la negociación. Las decisiones de comunicación se toman en función de los recursos que están disponibles para ellos. Los protocolos derivados de SPIN [6], discutido anteriormente, y los protocolos descritos en [7], son ejemplos de protocolos de encaminamiento basados en negociación. El motivo de estos protocolos es que el uso de las inundaciones para difundir los datos producirá implosión y superposición entre los datos enviados, por lo tanto, los nodos recibirán copias duplicadas. Esta operación consume más energía y más capacidad de procesamiento que si se enviaran los mismos datos desde diferentes sensores. Los protocolos SPIN están diseñados para difundir los datos de un sensor al resto de sensores asumiendo que estos pudieran ser estaciones base. Por lo tanto, la idea principal del encaminamiento basado en la negociación es la de suprimir la duplicación de la información y evitar que los datos redundantes se envíen al siguiente sensor o la estación base, mediante mensajes de negociación antes de que se comience la transmisión.

### **9.2.4. Encaminamiento basado en calidad de servicio (QoS)**

En los protocolos de encaminamiento basados en la calidad de servicio, la red ha de mantener el equilibrio entre el consumo de energía y calidad de los datos. En particular, la red debe cumplir ciertos parámetros de QoS durante la entrega de datos a la estación base, como por ejemplo, el retardo, la energía, el ancho de banda, etc.

Sequential Assignment Routing (SAR) propuesto en [32] es uno de los primeros protocolos de encaminamiento para redes de sensores inalámbricas, que introduce la noción de calidad de servicio en el encaminamiento. Las decisiones de encaminamiento en SAR dependen de tres factores: los recursos energéticos, la calidad de servicio en cada ruta, y el nivel de prioridad de cada paquete. Para evitar el fallo de una única ruta, se utiliza el enfoque multipath y esquemas de localización de rutas. Para crear varias rutas de acceso desde un nodo fuente, se crea un árbol con raíz en el nodo origen hacia los nodos destino (es decir, el conjunto de estaciones base). Los caminos de los árboles se construyen evitando los nodos con baja energía o pocas garantías de QoS. Al final de este proceso, cada nodo será parte del árbol multipath. Como tal, SAR es el protocolo multipath que tiene como objetivo lograr la eficiencia energética y la tolerancia a fallos. En esencia, SAR calcula una la calidad de servicio global como el producto de la calidad de servicio añadido y el peso del coeficiente asociado al nivel de prioridad del paquete.

Si la topología cambia debido a fallos en los nodos, se necesita re-calcular la ruta. Como medida preventiva, un nuevo período de cálculo de ruta es provocado por la estación base para tener en cuenta cualquier cambio en la topología. Para la recuperación de un estado erróneo se utiliza un handshake basado en un esquema de restauración de ruta local entre nodos vecinos. La recuperación de un fallo se efectúa mediante la aplicación de coherencia en las tabla de encaminamiento entre los nodos ascendentes y descendentes en cada ruta. Las simulaciones muestran que SAR ofrece menos consumo de energía que el algoritmo minimum-energy metric, que se centra sólo el consumo de energía de cada paquete sin tener en cuenta su prioridad. SAR mantiene varias rutas desde los nodos hasta la estación base. Sin embargo, aunque se garantice la tolerancia a fallos y la facilidad de recuperación, el protocolo sufre de la sobrecarga en el mantenimiento de las tablas y de los estados en cada nodo sobre todo cuando el número de nodos grande.

Otro protocolo de encaminamiento para redes de sensores inalámbricas basado en QoS que proporciona garantías de extremo a extremo en tiempo real es [33]. El protocolo requiere que cada nodo mantenga información sobre sus vecinos y utiliza el reenvío geográfico para el descubrimiento de las rutas. Además, en SPEED se esfuerzan por garantizar una cierta velocidad para cada paquete de la red, así cada aplicación puede calcular el retardo de extremo a extremo para los paquetes, dividiendo la distancia a la estación base por la velocidad del paquete antes de tomar una decisión. Por otra parte, SPEED puede dispone de un sistema que evita la congestión, cuando la red está congestionada. El módulo de encaminamiento en SPEED se llama Stateless Geographic Non-Deterministic forwarding (SNFG) y trabaja con los módulos de la capa de red. Los tiempos de retardo de cada nodo se crean calculando el tiempo transcurrido desde que se recibe un ACK de un vecino, como respuesta a un paquete de datos transmitidos. Al observar los retardos, SNGF selecciona un nodo que cumpla el requisito de velocidad. Si éste falla, se comprueba el ratio de transmisión del nodo, que se calcula observando los ratios fallidos de los vecinos del nodo (los nodos que no podrían proporcionar la velocidad deseada) y se alimenta al módulo SNGF. En comparación con Dynamic Source Routing (DSR) y el Ad-hoc On-Demand Vector Routing, SPEED ofrece un mejor rendimiento en términos de retardo de punta a punta y ratios fallidos. Por otra parte, la transmisión de energía total es menor debido a la simplicidad del algoritmo de encaminamiento.

### **9.2.5. Procesamiento coherente y no coherente**

El procesamiento de datos es un componente importante en el funcionamiento de las redes de sensores inalámbricas. Por lo tanto, las técnicas de encaminamiento emplean diferentes técnicas de procesamiento. En general, los nodos cooperan entre ellos para el procesamiento de zonas inundadas por diferentes datos. Dos ejemplos de técnicas de procesamiento de datos propuestas para las redes de sensores inalámbricas son las técnicas de encaminamiento basadas en el procesamiento de datos de forma coherente y no coherente [32]. En el encaminamiento mediante el procesamiento de datos coherentes, los nodos procesarán a nivel local los datos sin tratar, antes de

enviarlos a otros nodos para su posterior procesamiento. Los nodos que realizan el procesamiento posterior se denominan agregadores. En el encaminamiento coherente, los datos se reenvían a los agregadores después de un procesamiento mínimo. Este procesamiento mínimo incluye tareas como marcas de tiempo, supresión de la duplicación, etc. Para llevar a cabo un encaminamiento energéticamente eficiente, lo normal es la elección de procesamiento coherente.

Las funciones no coherentes tienen baja carga por tráfico de datos. Por otra parte, como el procesamiento coherente genera largas cadenas de datos, la optimización de las rutas es necesaria para la eficiencia energética. El procesamiento no coherente discurre a lo largo de tres etapas diferenciadas: (1) La detección de objetivos, la recopilación de datos y el procesamiento de éstos, (2) la declaración de los miembros, y (3) la elección de un nodo central. Durante la fase 1, se detecta el objetivo, los datos se recopilan y se preprocesan. Cuando un nodo decide participar en una tarea cooperativa, entrará en la fase 2 y declarará sus intenciones a sus vecinos. Esto debe hacerse tan rápido como sea posible para que cada nodo disponga de la información necesaria para el conocimiento de la topología de la red. Durante la fase 3, se elige un nodo central. La elección de un nodo central tiene como fin el procesamiento de información de forma más eficiente, y debe disponer de suficiente capacidad de cómputo y energía para llevar estas tareas a cabo.

En [32], se describen una serie de algoritmos que emplean este tipo de procesamiento. En el algoritmo Single Winner (SWE), un único nodo agregador se elige para el procesamiento complejo. La elección del nodo se basa en sus reservas de energía y en la capacidad de cómputo de ese nodo. Al final del proceso de SWE, existirá un árbol mínimo que abarcan por completo toda la red. En el algoritmo Multiple Winner (MWE), se propone una extensión simple del algoritmo SWE. Cuando todos los nodos son fuentes y envían sus datos al nodo agregador central, se consumirá una gran cantidad de energía y por tanto, tendrá un alto coste de procesamiento. Una forma de reducir el coste energético es limitar el número de fuentes que pueden enviar datos al nodo agregador central. En lugar de conservar los registros de los mejores nodos candidatos a nodo agregador central, cada nodo tendrá un registro de hasta  $n$  nodos de los candidatos. Al final del proceso de MWE, cada sensor de la red dispone de un conjunto de rutas de mínima energía para cada nodo de la fuente. Por ello, el algoritmo SWE se utiliza para encontrar el nodo que produce el menor consumo de energía.

A partir de ese momento, el nodo puede servir como nodo central para el procesamiento coherente. En general, el proceso de MWE tiene un retardo mayor, mayor carga y menor escalabilidad que las redes de procesamiento no coherente.



## 10. Protocolos de encaminamiento en redes de sensores subacuáticas

Las redes de sensores inalámbricas subacuáticas están formadas por sensores y vehículos que interactúan en la recolección de datos y en la ejecución de tareas. El diseño de un protocolo de encaminamiento que sea energéticamente eficiente es fundamental, y un reto en este tipo de redes, ya que los nodos cuentan con baterías que resultan difíciles de reemplazar o recargar. Por ello, las comunicaciones subacuáticas se ven afectadas de forma seria por la dinámica de la red, los tiempos de propagación y una alta probabilidad de error en los canales acústicos.

Actualmente existe una creciente necesidad de monitorización subacuática (exploración de los recursos submarinos o la detección de residuos como contaminación marina o escapes en las plantaciones) pero las tecnologías actuales no se adaptan a los requisitos demandados. Las redes acústicas subacuáticas de pequeñas dimensiones (UANs) [34][35] están asociadas a nodos que recolectan información usando telemetría remota o asumiendo comunicación punto a punto. En el caso de la telemetría remota resulta extremadamente cara. Y en el caso de la comunicación punto a punto no se suele utilizar porque los nodos no disponen de mucha capacidad de despliegue. Además las UANs suelen ser fijas, ancladas en el fondo marino o mediante un sistema de boyas en la superficie. En consecuencia, existe la necesidad de desarrollar un nuevo concepto de bajo coste que disponga de facilidad para el despliegue de los nodos como son las redes de sensores inalámbricas subacuáticas (UWSNs) [36]. Este tipo de redes han de ser escalables, móviles y capaces de auto-organizarse, además de eliminar la necesidad de cables para no interferir en la actividad naval [37].

Los sistemas de radio RF no funcionan bien en condiciones subacuáticas porque las ondas de radio se propagan solamente en muy bajas frecuencias (30-300 Hz) y necesitan de una antena considerable y mucha alimentación, además, las ondas ópticas se ven muy afectadas por la dispersión, es por ello que las redes de sensores subacuáticas utilizan las ondas acústicas como medio de propagación.

Al ser muy diferentes las redes existentes en tierra respecto a las redes subacuáticas debido a las propiedades intrínsecas de los ambientes submarinos, existen una serie de problemas añadidos que han de solventarse, como son:

### **Retardos de propagación:**

La velocidad de propagación de las señales acústicas en el agua es cinco veces menor a la velocidad de propagación de las ondas de radio. En consecuencia existen grandes retardos que pueden influir en la localización y sincronización.

**Movilidad de los nodos:**

Las redes de sensores inalámbricas se mueven con las corrientes (3-6km/h) [38]

**Alta probabilidad de errores en el canal acústico:**

El canal acústico bajo el agua dispone de una capacidad de ancho de banda limitada, que depende del rango de transmisión y la frecuencia, tiene retardos variables y errores causados por el ruido, las múltiples rutas y la difusión Doppler. En consecuencia, se puede experimentar una pérdida temporal de la conectividad. [39]

El ahorro energético es una preocupación importante en UWSNs porque los nodos funcionan con baterías y puede ser difícil el reemplazo o la recarga en entornos acuáticos. En las redes acústicas, la potencia necesaria para la transmisión se sitúa alrededor de 100 veces más que la potencia requerida para la recepción [40]. El diseño de protocolos de encaminamiento, que sea escalable, robusto y energéticamente eficiente en este tipo de redes es un tema de investigación fundamental. La mayoría de los protocolos de transmisión de datos existentes para redes de sensores en tierra no pueden ser aplicados directamente porque han sido diseñados para las redes fijas. Los protocolos de encaminamiento multi-salto ad hoc no son adecuados, ya que emplean técnicas de flooding para el encaminamiento de paquetes (por lo menos durante la etapa de descubrimiento) que llevaría a una red de sensores inalámbrica subacuática al agotamiento energético, ya que en estas condiciones el medio es altamente cambiante y los costes de encaminamiento producido por las actualizaciones podría ser muy alto.

Por otra parte, los protocolos ad hoc de encaminamiento geográfico [41,42] se podrían aplicar a los ambientes subacuáticos si se investiga cómo los nodos puede obtener información sobre la localización exacta con un consumo de energía mucho menor. El sistema de posicionamiento global (GPS) no resulta útil para lograr este propósito, ya que utiliza ondas de radar en la banda de 1,5 GHz y dichas ondas no se propagan en el agua marina, además, el GPS es rárano en las comunicaciones de datos, y la transmisión mediante ondas acústicas dispone de un alcance limitado. Actualmente, los esfuerzos se están centrando en el estudio y resolución del problema de la localización en redes de sensores inalámbricas subacuáticas [43-47].

Existe algunos protocolos de encaminamiento [48-53], [54,55] que han sido diseñados específicamente para las UWSNs. Algunos de ellos están basados en la localización [48-50]; En [48,49], los autores usan el concepto de encaminamiento por vector (definido como un vector del origen al destino [40] o como un vector para cada guardián (vectores hop-by-hop) [49]); En [50], los autores tienen en cuenta las condiciones cambiantes del canal bajo el agua, su aplicación y el diseño de algoritmos en caso de retardos significativos. Otro protocolo de encaminamiento [51] trata de aumentar la probabilidad de éxito en la entrega de datos reenviados a través de otras rutas hacia los diferentes destinos locales que forman un destino virtual (multipath routing). En [52] los autores proponen un protocolo de encaminamiento dinámico que dispone de tres etapas: el descubrimiento de rutas, el mantenimiento de la ruta y la invalidación de la ruta. En [53] se propone

un protocolo de encaminamiento sin intercambio de mensajes, evitando la sobrecarga. Por último, se propone un esquema adaptativo distribuido y agrupado, tanto para aguas poco profundas [54] como profundas [55], que asume la movilidad del nodo de forma aleatoria.

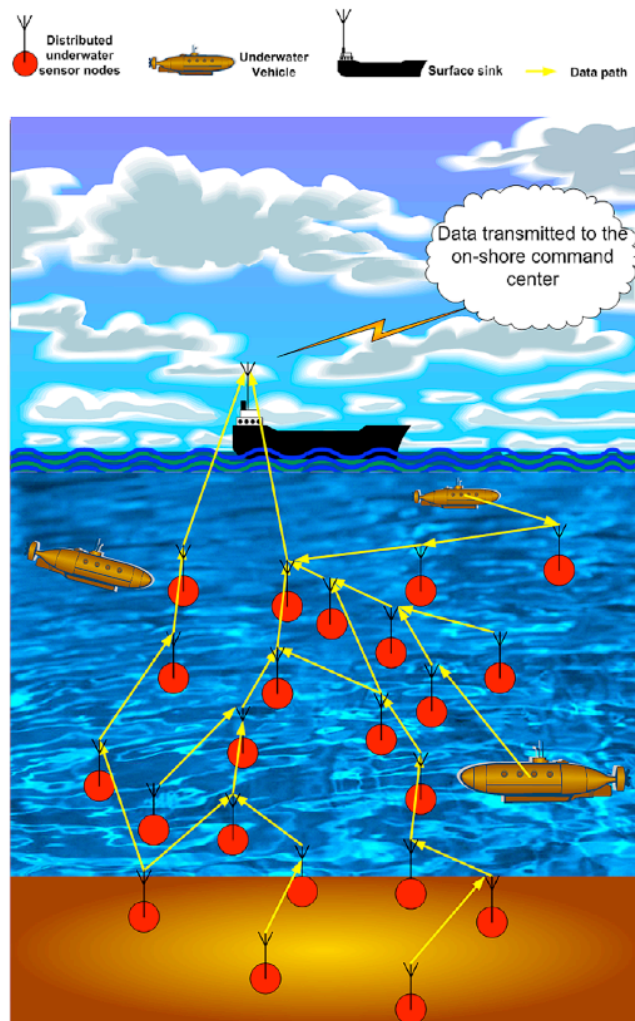
Sin embargo, todos estos protocolos tienen algunas características comunes: Asumen nodos sin GPS, además, son adaptables, escalables y de bajo consumo, características fundamentales para el diseño de protocolos de encaminamiento en este tipo de redes.

Podemos clasificar las redes en función de la disposición de sus nodos:

- **Fijas:** Los nodos están distribuidos por la superficie del agua mediante boyas o ancladas en el fondo marino [56].
- **Móviles:** Los nodos son más flexibles y disponen de mecanismos de configuración automática y autónoma en función de su localización.

A su vez, la estación base puede estar situada en la superficie y transmitir los datos vía radio o satélite o estar situada bajo el agua, que transmita los datos vía *multipath* con señales acústicas hacia otras estaciones.

Además, es posible que las redes de sensores inalámbricas subacuáticas cuenten con unos vehículos subacuáticos autónomos que ayudan a la recolección y transmisión de datos cuando la distancia entre nodos es grande.



[70] Red de sensores inalámbricos subacuáticos

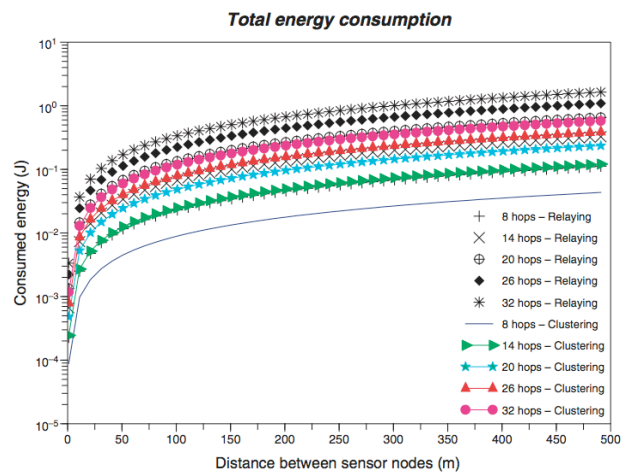
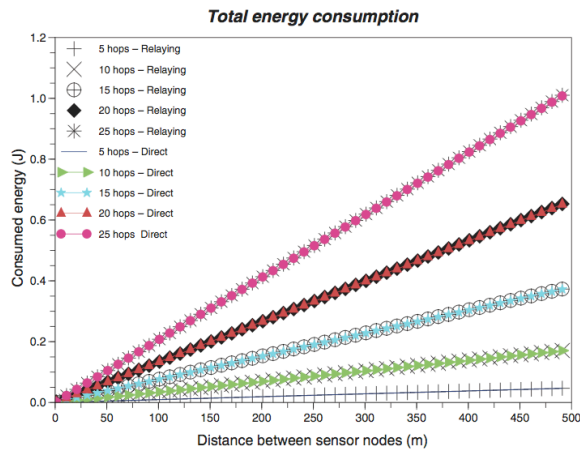
Si analizamos el consumo de las redes inalámbricas de sensores subacuáticas, podemos interpretar dos situaciones diferenciadas: agua superficial y aguas profundas [57]. Comparamos especialmente el esquema de transmisión, la estructura del *cluster* y la transmisión directa siempre desde el punto de vista energético.

En la siguiente gráfica [70] comparamos el consumo energético de la red a través de diferentes métodos de encaminamiento, tomando como referencia las rutas *multipath*:

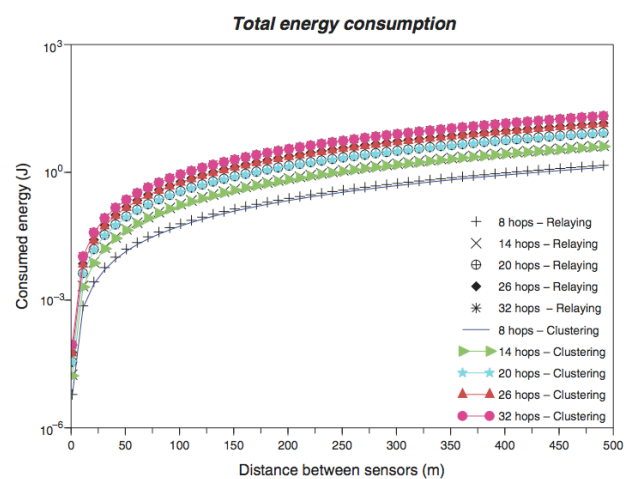
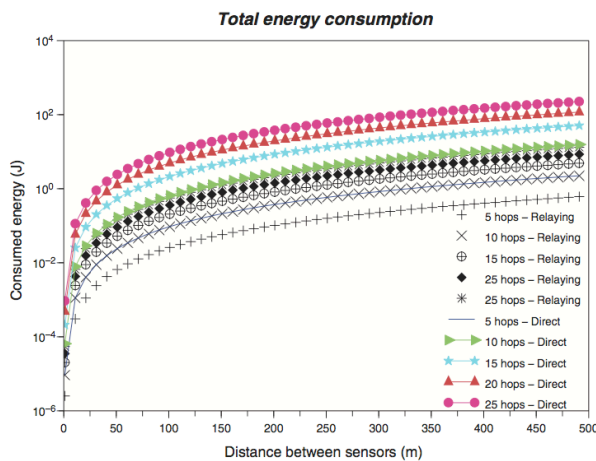
Enlaces directos y rutas *multipath*

Clustering y rutas *multipath*

Agua superficial



Aguas profundas



Como resultado, las gráficas muestran que el peor método es la transmisión directa, que ofrece unos pobres resultados en aguas profundas y no es recomendable porque el incremento de las interferencias acústicas causado por la alta energía de transmisión afecta al correcto funcionamiento de la red.

El uso de la técnica de transmisión de paquetes ofrece buenos resultados a nivel energético en aguas profundas e incrementa las capacidades de la red, aunque también incrementa la complejidad del protocolo de encaminamiento provocando un retardo general en la transmisión de paquetes. Las pruebas realizadas muestran que los protocolos de encaminamiento basados en el esquema de *clusters* ahorran más energía y muestran un mejor rendimiento en aguas superficiales. También observamos que este esquema es escalable respecto al número de nodos y a la distancia entre ellos.

## 11. Tolerancia a fallos en los protocolos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas

La tolerancia a fallos en los protocolos de redes de sensores inalámbricas ha sido un campo muy estudiado durante los últimos años. Los diseños de los primeros protocolos desarrollados, tenían en cuenta los fallos provocados por el agotamiento energético, y proponían una serie de mecanismos para prolongar el tiempo de vida de los nodos, distribuyendo el coste energético a lo largo de la red en la medida de lo posible. Existen otros protocolos que fueron diseñados para ser flexibles a los fallos de comunicación producidos por los nodos. La forma en que estos protocolos mitigan los fallos, es mediante el envío de múltiples copias de los datos a través de diferentes rutas, incrementando así la probabilidad de que los datos alcancen el objetivo. Bien es cierto, que estas técnicas tienen un coste de mantenimiento alto. Por ello, Couto ha presentado una modificación del protocolo ad hoc DSR, que calcula la confiabilidad de la ruta. [59]. Cuando se configura una nueva ruta, la modificación de DSR calcula la calidad de la ruta, usando la intensidad de la señal de cada salto a lo largo de la ruta. Los nodos siempre escogerán la ruta de mayor calidad, además, incrementará la probabilidad de que el envío se lleve a cabo. Alec Woo en [60] propuso un mecanismo similar, adaptado especialmente a las redes de sensores inalámbricas. Dada la posibilidad de fallo, es necesario encontrar rutas alternativas. Por ello, Khanna presenta una modificación de SPIN que añade rutas alternativas (backup routes) al protocolo [61].

Una alternativa para evitar los fallos consiste en la prevención y previsión de fallos. Sin embargo, este enfoque no está muy extendido en las redes de sensores inalámbricas, ya que los nodos son de bajo coste y sus recursos limitados, lo que dificulta el diagnóstico mediante hardware o software. En cambio, algunos estudios han identificado la relación entre un nodo defectuoso y el fallo de un nodo.

Las principales causas de fallo son:

**Fenómenos atmosféricos:** Los cambios ambientales puede modificar la señal de propagación, incluso pueden producir errores en la comunicación si la intensidad se reduce en exceso.

**Interferencias:** La cercanía de otros dispositivos con frecuencias similares, puede interferir en la comunicación de los nodos

**Desastres naturales:** Terremotos, inundaciones o corrimientos de tierra pueden producir daños irreparables en el hardware.

**Rotura accidental:** Los nodos pueden ser destruidos de forma accidental, ya sea por la intervención animal o por una caída desde cierta altura.

**Fallos en el procesador:** Un error de programación puede inducir al procesador a situaciones de fallo constante, provocando un bloqueo.

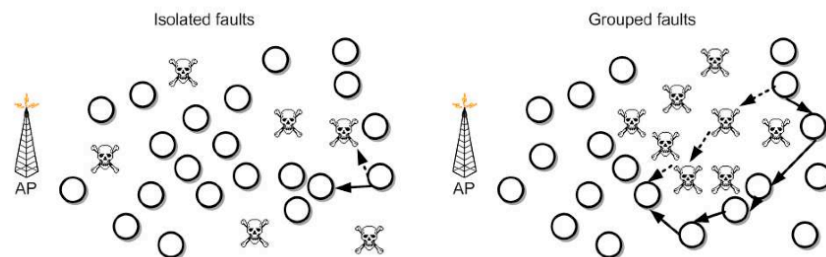
**Ataques:** Las redes de sensores inalámbricas son propensas a recibir ataques de seguridad, cuyo fin es evitar el correcto funcionamiento de la red. Sin embargo, los ataques de seguridad pueden ser evitados o parcialmente recuperables, con el uso de técnicas de tolerancia a fallos que evitan el paso de mensajes a través de rutas atacadas [62].

**Agotamiento energético:** El agotamiento energético conduce al fallo de la comunicación. Normalmente, las baterías no pueden ser cambiadas, al estar los nodos en zonas poco accesibles. Es por ello que es tan importante administrar correctamente el consumo energético.

Una vez descritos las posibles causas de fallo, las podemos clasificar en dos grupos:

**Fallos persistentes:** Indica si un nodos conseguirá funcionar con normalidad después de un fallo (fallo transitorio) o si el nodo fallará indefinidamente (fallos permanente) [63]. Desde la perspectiva de encaminamiento, los fallos transitorios se produce cuando el nodo permanece fuera de servicio durante unos minutos, mientras que el fallo permanente cuando el servicio queda impedido durante horas. Obviamente, los fallos producidos por fenómenos atmosféricos los clasificamos como permanentes.

**Fallos extendidos:** Indica el número de nodos fallidos. Un fallo es aislado cuando solo un nodo es el que falla. En cambio, será un fallo en grupo cuando varios nodos de la misma región fallan.



[71] Fallo aislado y fallo en grupo

Causas del fallo	Persistente	Extendido
Fenómenos atmosféricos	permanente	grupo
Interferencias	transitorio	aislado
Desastres naturales	permanente	grupo
Rotura accidental	permanente	aislado
Fallos en el procesador	transitorio	aislado
Ataques por interferencias	permanente	grupo
Ataques por colisión	ambos	aislado
Ataques por agujeros negros	ambos	aislado

## **12. Comparativa entre algoritmos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas**

El estudio de algoritmos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas ha sido foco de atención durante los últimos años y ofrece una serie de desafíos únicos en comparación con los algoritmos de encaminamiento tradicionales. De la afirmación anterior podemos concluir que cada protocolo tiene relación con otros protocolos de similares características al ser diseñados para el mismo fin, aunque se agreguen nuevas características a posteriori. Por tanto resulta difícil decir que un protocolo es mejor que otro porque las redes de sensores están diseñadas pensando en su aplicación.

Por ello, comparamos y contrastamos los protocolos de encaminamiento bajo una serie de parámetros. A partir del análisis de los protocolos anteriores, creemos que un buen protocolo de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas debe tener alguna de las siguientes características:

### **Arquitectura de cluster dinámica:**

Evita que los nodos maestros agoten su energía rápidamente, por lo que prolonga la vida útil de la red.

### **Agregación de datos:**

El procesamiento de las consultas resulta eficiente cuando la clasificación y fusión de datos se completa con rapidez, por lo que contribuye a una reducción de la carga y por consiguiente un ahorro de energía.

### **Elección aleatoria de la ruta:**

Si el algoritmo dispone de soporte para múltiples rutas hacia un destino con poca sobrecarga, puede ayudar al balanceo de la carga de la red y a tolerar fallos en los nodos.

### **Umbral en los nodos a la hora de enviar información capturada:**

La elección de umbrales apropiados puede solucionar el problema del “hot spot” y ahorrar energía eliminando las transmisiones innecesarias, prolongando la vida de los nodos.

En la siguiente tabla desglosamos los protocolos estudiados en base a las características más demandadas:

Protocolo	Clasificación	Consumo energético	Agregación de datos	Escalabilidad	Basado en consultas	Basado en negociación	Latencia	Multi path	Movilidad	Localización
SPIN	Plano	Limitado	Si	Limitada	Si	Si	Moderada	Si	Posible	No
Directed Diffusion	Plano	Limitado	Si	Limitada	Si	Si	Moderada	Si	Limitada	Si
Rumor Routing	Plano	No disponible	Si	Buena	Si	No	Moderada	No	Muy limitada	No
MCFA	Plano	No disponible	No	Buena	No	No	Moderada	No	No	No
GBR	Plano	No disponible	Si	Limitada	Si	No	Baja	No	Limitada	No
COUGAR	Plano	Limitado	Si	Limitada	Si	No	Moderada	No	No	No
ACQUIRE	Plano	No disponible	Si	Limitada	Si	No	Moderada	No	Limitada	No
LEACH	Jerárquico	Máximo	Si	Buena	No	No	Baja	No	Fija a la estación base	Si
PEGASIS	Jerárquico	Máximo	No	Buena	No	No	Moderada	No	Fija a la estación base	Si
TEEN	Jerárquico	Máximo	Si	Buena	No	No	Moderada	No	Fija a la estación base	Si
MECN	Jerárquico	Máximo	No	Baja	No	No	Moderada	No	No	No
SAR	Jerárquico	No disponible	Si	Buena	Posible	No	Moderada	No	Limitada	No
GAF	Posicional	Limitado	No	Buena	No	No	Moderada	No	Limitada	No
GEAR	Posicional	Limitado	No	Limitada	No	No	Moderada	No	Limitada	No
GOAFR	Posicional	No disponible	No	Buena	No	No	Moderada	No	No	No

En la siguiente tabla se muestra las posibles aplicaciones prácticas y los ataques a los que son vulnerables [58]:

Protocolo	Tipo de Aplicación	Proyecto	Nodos	Ataques
Directed Diffusion	Monitorización del medio ambiente	Bathymetry	100	A,B,C,D,E,F
GBR	Medicina	Vital sign	10-20	A,B,C,D,E,F
COUGAR	Monitorización del medio ambiente	Flood detection	200	A,B,C,D,E,F
ACQUIRE	Monitorización del medio ambiente	Flood detection	200	A,B,C,D,E,F
LEACH	Medicina	Artificial Retina	100	B, F
TEEN	Casa/Oficina	Aware Home	20-100	B, F
GAF	Monitorización del hábitat, Militar	ZebraNet, Tracking	100-1000, 200	A,D,F
GEAR	Casa/Oficina	Aware Home	20-100	A,B,D

**A)** Suplantación de la información a encaminar **B)** Reenvío selectivo **C)** Ataque por saturación a un destino determinado **D)** Ataque Sybil **E)** Agujeros de gusano **F)** Ataque por HELLO flood



Por tanto, para analizar las características de cada protocolo es imprescindible tener en cuenta cuales son las prioridades que determinaran los factores primordiales de nuestra red. Para ello clasificamos los protocolos en base a una serie de criterios que facilitaran la elección del protocolo. Estas clasificaciones tienen sentido al agrupar protocolos cuyo funcionamiento es similar y poseen características comunes. Es por ello que establecemos diferentes criterios a la hora de clasificar los protocolos. La clasificación más usual es en función de su topología. Es obvio que en protocolos cuyos nodos están estructurados de forma similar, dispondrán de unas características similares.

En la siguiente tabla realizamos una comparativa entre protocolos de encaminamiento jerárquico y encaminamiento plano donde podemos observar como difieren en sus características.

<b>Encaminamiento jerárquico</b>	<b>Encaminamiento plano</b>
Planificación basada en reserva	Planificación basada en contención
Evita colisiones	Presenta el problema de sobrecarga por colisiones
Ciclo de trabajo reducido gracias a los periodos de hibernación	Ciclo de trabajo variable controlando los tiempos de hibernación de los nodos
Agregación de datos por el nodo maestro del cluster	Los nodos son capaces de agregar datos de sus vecinos en rutas multisalto
Encaminamiento simple pero no óptimo	El encaminamiento puede ser óptimo si se le añade complejidad
Requiere de sincronización local y general	Los enlaces se crean sobre la marcha sin ningún tipo de sincronización
Sobrecarga de la formación de cluster sobre la red	Las rutas se crean solo en aquellas zonas donde hayan datos a enviar
Energía de disipación uniforme	La energía de disipación depende de los patrones de tráfico
La energía de disipación no puede ser controlada	La energía de disipación se adapta a los patrones de tráfico
Asignación del canal adecuado	No se garantiza la asignación del canal adecuado

## 13. Conclusiones y trabajo futuro

El encaminamiento en redes de sensores inalámbricas es un área de investigación relativamente nueva. En el documento se presenta una descripción global de las técnicas de encaminamiento más importantes profundizando en elementos críticos en este tipo de redes como pueden ser la autonomía, la tolerancia a fallos o la movilidad. Este documento dispone de las herramientas necesarias para facilitar al usuario la información necesaria para la elección del algoritmo indicado en función de sus necesidades.

Todos los protocolos de encaminamiento para redes de sensores inalámbricas tienen como premisa más importante, minimizar el coste energético de los nodos sin comprometer el envío de información.

En general, las técnicas de encaminamiento se clasifican en función de la estructura de red en tres categorías: plana, jerárquica, y localización. De forma paralela clasificamos a los protocolos de encaminamiento atendiendo a otros criterios como las técnicas basadas en consultas, en negociación, o en la calidad de servicio. También destacamos el balance entre el consumo energético y el coste de la comunicación, así como las ventajas y desventajas de cada técnica de encaminamiento. Aunque muchas de estas técnicas de encaminamiento parecen prometedoras, todavía hay muchos retos que deben ser solucionados en el ámbito de la comunicación en redes de sensores inalámbricas.

Aunque hemos visto que cada aproximación tiene sus ventajas y sus inconvenientes, la mayoría de las aproximaciones actuales tienen en consideración que la posición de los nodos es fija. Por ello, es importante el desarrollo de protocolos adaptativos, que sean capaces de manejar los cambios en la topología de la red, en situaciones donde la red necesite nodos con alta movilidad. Para ello, la complejidad computacional se verá aumentada en el proceso de captura de información. Pero el rápido desarrollo tecnológico en el campo de los procesadores, hace que este problema no vaya a ser, a priori, clave en un futuro.

Las redes de sensores inalámbricas están empleadas en ambientes hostiles, también están sujetas a condiciones climáticas cambiantes y expuestas a catástrofes naturales, por lo que estas redes son propensas al fallo.

Este tipo de redes está compuesto por elementos autónomos como son los nodos, los cuales deberán adaptarse a las condiciones ambientales para ofrecer un servicio con la calidad esperada. Para ello, los nodos deben tener rutas eficientes incluso ante la presencia de fallos y ataques de seguridad. Es por este motivo, por el cual las investigaciones futuras deben enfocarse en el estudio de algoritmos de encaminamiento teniendo en cuenta la calidad de servicio y la tolerancia a fallos.

## 14. Referencias

- (1) Zanjaj, E.; Baldi, M.; Chiaraluce, F. Efficiency of the Gossip Algorithm for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 15th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split–Dubrovnik, Croatia, September, 2007.
- (2) Zhou, H.; Mutka, M.W.; Ni, L.M. Reactive ID Assignment for Sensor Networks. In Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS), Washington, DC, USA, November, 2005.
- (3) Lin, J.; Liu, Y.; Ni, L.M. SIDA: Self-organized ID Assignment in Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems Conference (MASS), Pisa, Italy, October, 2007.
- (4) Tilak, S.; Abu-Ghazaleh, N.B.; Heinzelman, W. A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models. *Mob. Comput. Commun. Rev.* 2002, 6, 28–36.
- (5) Karl, H.; Willig, A. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons: Chichester, West Sussex, UK, 2005.
- (6) W. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," Proc. 5th ACM/IEEE Mobicom Conference (MobiCom '99), Seattle, WA, August, 1999. pp. 174-85.
- (7) J. Kulik, W. R. Heinzelman, and H. Balakrishnan, "Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, Volume: 8, pp. 169-185, 2002.
- (8) S. Hedetniemi and A. Liestman, "A survey of gossiping and broadcasting in communication networks", *IEEE Networks*, Vol. 18, No. 4, pp. 319-349, 1988.
- (9) C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks," Proceedings of ACM MobiCom '00, Boston, MA, 2000, pp. 56-67.
- (10) D. Braginsky and D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks," in the Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, October 2002.

- (11) F. Ye, A. Chen, S. Liu, L. Zhang, "A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks", Proceedings of the tenth International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), pp. 304-309, 2001.
- (12) C. Schurgers and M.B. Srivastava, "Energy efficient routing in wireless sensor networks", in the MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, McLean, VA, 2001.
- (13) Yao, Y.; Gehrke, J. The Cougar Approach to In-Network Query Processing in Sensor Networks. SIGMOD Rec. 2002, 31, 9–18.
- (14) Sadagopan, N.; Krishnamachari, B.; Helmy, A. The ACQUIRE Mechanism for Efficient Querying in Sensor Networks. In Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA), Anchorage, AK, May, 2003; pp. 149–155.
- (15) S. Lindsey, C. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems", IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002, Vol. 3, 9-16 pp. 1125-1130.
- (16) A. Manjeshwar and D. P. Agarwal, "APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks," Parallel and Distributed Processing Symposium., Proceedings International, IPDPS 2002, pp. 195-202.
- (17) L. Li, and J. Y. Halpern, "Minimum-Energy Mobile Wireless Networks Revisited," IEEE International Conference on Communications (ICC) 2001. Vol. 1, pp. 278-283.
- (18) Q. Fang, F. Zhao, and L. Guibas, "Lightweight Sensing and Communication Protocols for Target Enumeration and Aggregation", Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MOBIHOC), 2003, pp. 165-176.
- (19) N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin, "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices", Technical report 00-729, Computer science department, University of Southern California, Apr. 2000.
- (20) A. Savvides, C. Han, and M. Srivastava, "Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors," Proceedings of the Seventh ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), July 2001. pp. 166-179.
- (21) S. Capkun, M. Hamdi, J. Hubaux, "GPS-free positioning in mobile ad-hoc networks", Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2001 pp. 3481-3490.

- (22) B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris, "SPAN: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks", *Wireless Networks*, Vol. 8, No. 5, Page(s): 481-494, September 2002.
- (23) Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing," In *Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking 2001*, pp. 70-84.
- (24) Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan, "Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks", *UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023*, May 2001.
- (25) Stojmenovic and X. Lin. "GEDIR: Loop-Free Location Based Routing in Wireless Networks", In *International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems*, Boston, MA, USA, Nov. 3-6, 1999.
- (26) F. Kuhn, R. Wattenhofer, A. Zollinger, "Worst-Case optimal and average-case efficient geometric ad-hoc routing", *Proceedings of the 4th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, Pages: 267-278, 2003.
- (27) J.-H. Chang and L. Tassiulas, "Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks", *Proc. Advanced Telecommunications and Information Distribution Research Program (ATIRP2000)*, College Park, MD, Mar. 2000.
- (28) C. Rahul, J. Rabaey, "Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, vol.1, March 17-21, 2002, Orlando, FL, pp. 350-355.
- (29) Q. Li and J. Aslam and D. Rus, "Hierarchical Power-aware Routing in Sensor Networks", In *Proceedings of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking*, May, 2001.
- (30) S. Dulman, T. Nieberg, J. Wu, P. Havinga, "Trade-Off between Traffic Overhead and Reliability in Multipath Routing for Wireless Sensor Networks", *WCNC Workshop*, New Orleans, Louisiana, USA, March 2003.
- (31) D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, and D. Estrin, "Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks", *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 5, no. 4, pp. 1125, 2001.
- (32) K. Sohrabi, J. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless sensor network", *IEEE Personal Communications*, Volume 7, Issue 5, pp 16-27, 2000.

- (33) T. He et al., “SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks”, in the Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems, Providence, RI, May 2003.
- (34) J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed, Y. Li, Research challenges and applications for underwater sensor networking, in: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC2006), Las Vegas, Nevada, USA, April 3–6, 2006.
- (35) E. Sozer, M. Stojanovic, J. Proakis, Underwater acoustic networks, IEEE Journal of Oceanic Engineering 25 (1) (2000) 72–83.
- (36) J.-H. Cui, J. Kong, M. Gerla, S. Zhou, Challenges: building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications, Special issue of IEEE Network on Wireless Sensor Networking, May 2006.
- (37) M. Stojanovic, in: John G. Proakis (Ed.), Acoustic (Underwater) Communications, Entry in Encyclopedia of Telecommunications, John Wiley & sons, 2003.
- (38) W. Broecker, T.-H. Peng, Tracers in the Sea, Eldigio Press, Lamont Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, NY, 1982, pp. 689.
- (39) I.F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia, State of the art in protocol research for underwater acoustic sensor networks, to appear in ACM Mobile Computing and Communications Review (invited paper), 2007.
- (40) J. Partan, J. Kurose, B.N. Levine, A survey of practical issues in underwater networks, in: Proceedings of ACM International Work- shop on Underwater Networks (WUWNet), September 2006, pp. 17– 24.
- (41) S. Basagni, I. Chlamtac, V.R. Syrotiuk, B.A. Woodward, A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)’, MOBICOM 98. Dallas, Texas, USA.
- (42) Y. Ko, N.H. Vaidya, Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks, ACM/Baltzer Wireless Networks (WINET) Journal 6-4 (2000).
- (43) Z. Zhou, J.-H. Cui, S. Zhou, Localization for large-scale underwater sensor networks, in: Proceedings of IFIP Networking’07, Atlanta, Georgia, USA, May 14–18, 2007, pp. 108–119.

- (44) V.R. Chandrasekhar, W.K.G. Seah, Y.S. Choo, H.V. Ee, Localization in underwater sensor networks – survey and challenges, in: Proceedings of the First ACM International Workshop on Under- Water Networks (WUWNet), in conjunction with ACM MobiCom 2006, Los Angeles, California, USA, September 2006.
- (45) C.Tian, W. Liu, J. Jin, Y. Wang, Y. Mo, Localization and synchronization for 3D underwater acoustic sensor networks, in: Fourth International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC 2007), Hong Kong, China, vol. 4611 of Lecture Notes in Computer Science, Berlin, 2007, Springer Verlag, pp. 622– 631, ISBN 978-3-540-73548-9.
- (46) M. Erol, L. Vieira, M. Gerla, Localization with Dive’N’Rise (DNR) beacons for underwater acoustic sensor networks, in: Proceedings of ACM International Workshop on Underwater Networks (WUW- Net), September 2007, pp. 97–100.
- (47) M. Erol, L. Vieira, M. Gerla, AUV-aided localization for underwater sensor networks, in: Proceedings of International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications (WASA), August 2007.
- (48) P.Xie, J.-H. Cui, L. Lao, VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks, in: Proceedings of IFIP Networking’06, Coimbra, Portugal, May 15–19, 2006.
- (49) N. Nicolaou, A. See, P. Xie, J.-H. Cui, D. Maggiorini, Improving the robustness of location-based routing for underwater sensor networks, in: Proceedings of IEEE OCEANS’07, Aberdeen, Scotland, June 2007.
- (50) D. Pompili, T. Melodia, I.F. Akyildiz, Routing algorithms for delay- insensitive and delay-sensitive applications in underwater sensor networks, in: Proceedings of ACM Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Los Angeles, CA, September 2006.
- (51) W. KG Seah, HX Tan, Multipath virtual sink architecture for underwater sensor networks, in: Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS2006 Asia Pacific Conference, Singapore, May 16–19, 2006.
- (52) W. Liang, Y. Haibin, L. Liu, L. Bangxiang, C. Chang, Information- carrying based routing protocol for underwater acoustic sensor network, in: Proceedings of International Conference on Mechatron- ics and Automation, ICMA 2007, August 2007.
- (53) U. Lee, J. Kong, E. Magistretti, J.-S. Park, M. Gerla, Time-critical underwater sensor diffusion with no proactive exchanges and negli- gible reactive floods, *Ad Hoc Networks Journal* (Elsevier) 5 (6) (2007).

- (54) M.C. Domingo, R. Prior, A distributed clustering scheme for underwater wireless sensor networks, in: Proceedings of 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007), Athens, Greece, September 2007.
- (55) M.C. Domingo, R. Prior, Design and analysis of a gps-free routing protocol for underwater wireless sensor networks in deep water, in: Proceedings of UNWAT 2007, Valencia, Spain, October 2007.
- (56) S. Wang, M. Tan, Research on architecture for reconfigurable underwater sensor networks, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), March 2005.
- (57) Domingo, M.C.; Prior, R. Energy Analysis of Routing Protocols for underwater wireless sensor networks. *Comput. Commun.* 2008, 31, 1227–1238.
- (58) J. Du, S. Peng, Choice of Secure Routing for Applications in Wireless Sensor Networks, in: International Conference on Multimedia Information Networking and Security 2009.
- (59) D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In *Proceedings of the 9th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '03)*, San Diego, California, September 2003.
- (60) A. Woo, T. Tong, and D. Culler. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 14–27. ACM Press, 2003.
- (61) G. Khanna, S. Bagchi, and Y.-S. Wu. Fault tolerant energy aware data dissemination protocol in sensor networks. In *IEEE Dependable Systems and Networks Conference*, June 2004.
- (62) A. D. Wood and J. A. Stankovic. Denial of service in sensor networks. *Computer*, 35(10):54–62, 2002.
- (63) A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, and C. Landwehr. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Trans. Dependable Secur. Comput.*, 1(1):11–33, 2004.
- (64) L. García, A. Sandoval, A. Triviño. Routing Protocols in Wireless Sensor Networks, October 2009
- (65) J. N. AL-Karaki, A. E. Kamal, “Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey”, *IEEE Wireless Communications*, Volume 11, Issue 6, Dec. 2004 Page(s):6 - 28



- (66) Ozcan Ilikhan. “Wireless Sensor Networks”, May 2010
- (67) I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. “Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks”, 38(4):393–422, April 2002.
- (68) A.Ahtiainen. “Summary of Rumor Routing in Wireless Sensor Networks”
- (69) S.Tao, A.L. Ananda, C.Mun. “Greedy Face Routing with Face ID Support in Wireless Networks”
- (70) M.C. Domingo, R.Prior. “Energy analysis of routing protocols for underwater wireless sensor networks”
- (71) D.Macedo, L.Correia, A. dos Santos, A.Loureiro, J. Nogueira, G.Pujolle. “Evaluating Fault Tolerance Aspects in Routing Protocols for Wireless Sensor Networks”, Fourth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, 2005.
- (72) M.Omer, A.Basit, G.Asadullah. “MR-LEACH: Multi-hop Routing with Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy”, 2010.