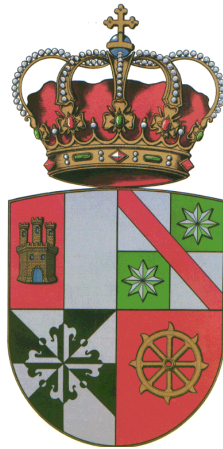


UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA
Departamento de Sistemas Informáticos



TESIS DOCTORAL

Técnicas de enrutamiento inteligente para redes
de sensores inalámbricas

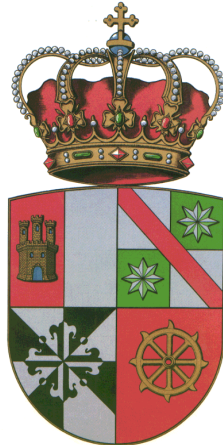
Presentada por:
Antonio Manuel Ortiz Torres

Dirigida por:
Dra. Dña. Teresa Olivares Montes
Dr. D. Luis Orozco Barbosa

Albacete, Julio de 2011

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA

Departamento de Sistemas Informáticos



**Técnicas de enrutamiento inteligente para redes
de sensores inalámbricas**

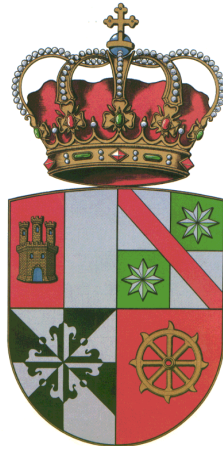
Tesis Doctoral
presentada al Departamento de Sistemas Informáticos
de la Universidad de Castilla-La Mancha
para la obtención del título de
Doctor en Informática

Presentada por:
Antonio Manuel Ortiz Torres

Dirigida por:
Dra. Dña. Teresa Olivares Montes
Dr. D. Luis Orozco Barbosa

Albacete, Julio de 2011

UNIVERSITY OF CASTILLA-LA MANCHA
Computing Systems Department



Intelligent Routing Techniques for Wireless
Sensor Networks

A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in
Computer Science to be presented with due permission of the
Computing Systems Department, for public examination and debate.

Author:
Antonio Manuel Ortiz Torres

Advisors:
Dra. Dña. Teresa Olivares Montes
Dr. D. Luis Orozco Barbosa

Albacete, July 2011

*Yo soy áspero y seco,
como la tierra que a mis pies se mece:
pardo el sayal del Sancho, y duro el diente,
y uno a un risueño gesto de zagal
un entero Quijote de Occidente.*

Tierra seca, Juan Torres Grueso.

Agradecimientos

Hay tantas personas que han estado a mi lado durante la realización de esta tesis, que me sería imposible nombrarlas a todas. Mi agradecimiento a todos vosotros, y en especial:

A Teresa, que desde el primer día no ha escatimado esfuerzos para que este trabajo viese la luz. Gracias por el apoyo en los momentos más duros, por los consejos, por las revisiones, por no dudar nunca que este trabajo iba a ser una realidad...

A Luis, cuyo sabio consejo ha encaminado este trabajo hasta lo que es ahora. Gracias por compartir conmigo tu experiencia.

A mis padres, Antonio y María José. Gracias a los dos, por apoyarme siempre y por enseñarme que la satisfacción de un trabajo bien hecho compensa el esfuerzo realizado.

A mi hermana Cecilia, que siempre está ahí, más cerca o más lejos, para echarnos unas risas.

A Ángela. Gracias por las sonrisas, por tu paciencia, por los ánimos, por ser mi otra mitad...

A mis tías. Gracias por vuestro apoyo incondicional.

A mi tío Juan Luis. Gracias por hacerme sentir un campeón.

A Antonio y Marivi. Gracias por animarme a decantarme por la investigación. Vuestro apoyo hace que me sienta orgulloso de mi trabajo.

A mis amigos, los de Tomelloso, los de Albacete, los de Dinamarca... y los del resto del mundo, gracias a todos por las charlas, por los cafés y los téis, por las fiestas, por los fines de semana, por las cenas, por los viajes, por las noches interminables... gracias por ayudarme a desconectar cuando más lo necesito.

A mis compañeros del I3A, por crear un ambiente de trabajo extraordinario, y estar siempre dispuestos a echar una mano. Gracias por las líneas de código, por las ideas, por los almuerzos, por los viajes a los congresos...

A todos vosotros, gracias por vuestro apoyo que sin duda me ha ayudado a llegar hasta aquí. Este trabajo es tan mío como vuestro.

Resumen

Las redes de sensores inalámbricas son cada vez más populares, gracias al amplio rango de aplicaciones en el que pueden ser utilizadas. Pero este tipo de redes presenta ciertos problemas, derivados de las limitaciones de los nodos en términos de capacidad de procesamiento, almacenamiento, energía o ancho de banda, entre otras. De esta forma, los protocolos y algoritmos diseñados para trabajar en este tipo de redes deben cumplir ciertos requerimientos de eficiencia, como pueden ser el tiempo de respuesta, la calidad de servicio o el consumo energético.

Los experimentos previos llevados a cabo en nuestro laboratorio con redes de sensores y aplicaciones de monitorización, revelaron problemas en el funcionamiento de los protocolos de comunicación utilizados, principalmente relacionados con el consumo de energía y con el rendimiento de las comunicaciones. Después de un exhaustivo estudio de los resultados obtenidos en estas pruebas, se concluyó que el mecanismo de enrutamiento utilizado carecía de la eficiencia necesaria para hacer llegar al destino los datos enviados por los nodos.

En la literatura existen diversas propuestas para llevar a cabo el encaminamiento en redes de sensores, pero bien los procedimientos utilizados, o bien los parámetros considerados, no satisfacían los requerimientos de nuestras aplicaciones de monitorización. De esta forma, se optó por el desarrollo de un esquema de enrutamiento propio: NORA (*Network rOle-based Routing Algorithm*), que está orientado a aplicaciones de monitorización y es capaz de enrutar los datos desde todos los nodos de la red hasta la estación base, considerando el consumo de energía como principal parámetro a optimizar, con el fin de extender el tiempo de vida de la red, a la vez que las comunicaciones son llevadas a cabo de forma eficiente y fiable.

Con el fin de mejorar el rendimiento de esta primera propuesta, se ha diseñado un mecanismo de lógica difusa para llevar a cabo la evaluación de

los parámetros que son considerados por NORA, en la toma de decisiones de enrutamiento: el número de saltos hasta la estación base y el nivel de batería restante.

La lógica difusa es un mecanismo de decisión inspirado en la lógica de control humana. Tiene bajos requerimientos de procesamiento y es una técnica eficiente para llevar a cabo la definición, combinación y evaluación de parámetros. De esta forma nace NORIA (*Network rOle-based Routing Intelligent Algorithm*), cuyo mecanismo de acción es igual al de NORA, salvo que utiliza la salida del sistema de evaluación de parámetros basado en lógica difusa, para llevar a cabo las decisiones de enrutamiento.

Los buenos resultados obtenidos con NORIA en términos de tiempo de comunicación extremo a extremo, consumo de energía y precisión de las rutas creadas, motivaron la incorporación de este mecanismo a los protocolos de enrutamiento utilizados en el estándar ZigBee, *Tree Routing* para redes en árbol y AODV para redes en malla. Con el fin de mejorar la precisión de la evaluación llevada a cabo por el módulo de lógica difusa, se añadió la fuerza de la señal al conjunto de parámetros de entrada, obteniendo así una métrica más precisa. Los resultados de los experimentos muestran una importante reducción en el número de paquetes enviados, reduciendo así la sobrecarga, y una mejora en la longitud de las rutas establecidas, favoreciendo así una reducción importante en el consumo de energía.

Índice

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
1. Introducción	1
1.1. Motivación y objetivos	2
1.2. Aportaciones	4
1.3. Organización de la tesis	6
2. Estado del arte	9
2.1. Redes de sensores inalámbricas	9
2.1.1. Descripción detallada	11
2.1.2. Dispositivos	13
2.1.3. Arquitecturas	17
2.1.4. Sistemas operativos	19
2.1.5. Simuladores	21
2.1.6. Entorno de simulación utilizado en los experimentos: Omnet++ y Castalia	24
2.1.7. Aplicaciones	28
2.1.8. Monitorización. Características principales	37
2.2. Auto-organización en redes de sensores	39
2.2.1. Características de la auto-organización	41
2.2.2. Técnicas de auto-organización	47
2.2.3. Pautas de desarrollo para mecanismos de auto-organización en redes de sensores	51
2.3. Enrutamiento en redes de sensores	53
2.3.1. Requisitos para el encaminamiento en WSN	54

2.3.2.	Principios de diseño	55
2.3.3.	Características de los protocolos de enrutamiento	55
2.3.4.	Propuestas de enrutamiento más utilizadas en redes de sensores	59
2.4.	Técnicas de inteligencia artificial aplicadas al enrutamiento en redes de sensores	64
2.4.1.	Redes Neuronales	65
2.4.2.	Colonias de hormigas	66
2.4.3.	Machine Learning	67
2.4.4.	Lógica difusa, nuestra elección para la evaluación conjunta de variables	68
2.5.	Primeras conclusiones	70
3.	Primera propuesta de enrutamiento: NORA	73
3.1.	Definiciones previas	74
3.2.	Funcionamiento	77
3.2.1.	Descubrimiento de vecinos y creación de rutas	77
3.2.2.	Incorporación y eliminación de nodos	82
3.3.	Ejemplo de funcionamiento	84
3.4.	Experimentos con NORA	86
3.4.1.	Entorno utilizado	86
3.4.2.	Escenarios	86
3.4.3.	Parámetros estudiados	90
3.4.4.	Metodología y parámetros de simulación	92
3.4.5.	Resultados	93
3.5.	Conclusiones	100
4.	Propuesta de enrutamiento basado en lógica difusa: NORIA	101
4.1.	Inteligencia artificial aplicada al encaminamiento	101
4.1.1.	Definiciones previas	102
4.2.	Módulo de decisión basado en lógica difusa	105
4.3.	NORIA	108
4.4.	Pruebas realizadas	110
4.4.1.	Comparación de rendimiento	110
4.4.2.	Experimentos	111
4.4.3.	Resultados	112

4.5. Conclusiones	115
5. Incorporación del módulo de inteligencia artificial al estándar ZigBee	117
5.1. La arquitectura ZigBee	118
5.1.1. ZigBee en detalle	119
5.2. La capa de red en ZigBee	120
5.2.1. Enrutamiento en topologías en árbol	120
5.2.2. Enrutamiento en topologías en malla	121
5.3. Uso del módulo de inteligencia artificial de NORIA	126
5.3.1. Enrutamiento inteligente en árboles: FL:TR	130
5.3.2. Enrutamiento inteligente en mallas: AODV-FL	132
5.4. Experimentos	133
5.4.1. FL-TR	136
5.4.2. AODV-FL	140
5.5. Conclusiones	146
6. Conclusiones y trabajos futuros	149
6.1. Conclusiones obtenidas	150
6.2. Contribuciones de la tesis	151
6.3. Trabajos futuros	153
6.4. Publicaciones realizadas	154
A. PhD Summary	163
A.1. Introduction and motivation	163
A.2. Objectives	165
A.3. Tasks	165
A.4. Chapter Summary	166
A.5. Contributions	168
A.6. Publications	169

Índice de figuras

2.1. Topologías en estrella y árbol	12
2.2. Topologías en malla y clúster	13
2.3. Arquitectura genérica de los nodos sensores	14
2.4. Resumen de las características de los nodos	15
2.5. Resumen de las características de los gateways	17
2.6. Arquitectura ZigBee	18
2.7. Arquitectura 6LoWPAN	19
2.8. Sistema modular de simulación en Castalia	27
2.9. Esquema modular de un nodo sensor en Castalia	28
2.10. Detalle de nodo sensor utilizado en el proyecto Wisevine	29
2.11. Esquema de la red de monitorización del cultivo de col [39]	30
2.12. Monitorización del linco ibérico [44]	31
2.13. Monitorización de la evolución de glaciares [45]	32
2.14. Red de sensores para la monitorización de entornos volcánicos [49]	33
2.15. Dispositivos utilizados en el proyecto Ecosense	33
2.16. Distribución de los dispositivos de medición y comunicación en la red Ecosense	34
2.17. Redes de sensores utilizadas para vigilar entornos estratégicos [57]	35
2.18. Sensores desplegados en el interior de un contenedor de trans- porte [60]	36
2.19. Esquema de posicionamiento de sensores (izq.) y sistema im- plantado en un paciente (der.) [62]	37
2.20. Clasificación de las características de los protocolos de enrutamien- to para redes de sensores	56

3.1. Transiciones del algoritmo NORA durante el descubrimiento de la red	81
3.2. Topología ejemplo	84
3.3. Mensajes enviados por los nodos a lo largo del tiempo	85
3.4. Ejemplo de topología grid regular	90
3.5. Ejemplo de topología grid irregular	91
3.6. Árbol creado por NORA para una red de 21 nodos	93
3.7. Árbol creado por NORA para una red de 41 nodos	94
3.8. Árbol creado por NORA para una red de 81 nodos	95
3.9. Tiempo de creación de caminos en NORA con respecto al número de nodos	96
3.10. Número de paquetes para crear los caminos con NORA.	97
3.11. Tiempo de creación de caminos en NORA y TR.	98
3.12. Longitudes máximas y mínimas de los caminos para NORA y TR	99
4.1. Ejemplo de conjuntos difusos	102
4.2. Diagrama de evaluación de datos en Mamdani y TSK	104
4.3. Conjuntos difusos para el nivel de batería restante	106
4.4. Conjuntos difusos para el número de saltos hasta la Estación Base	106
4.5. Conjuntos difusos para la variable de salida	107
4.6. Paquetes enviados en la creación de rutas	113
4.7. Consumo medio de energía para NORA, NORIA y TR con respecto a CDS	113
4.8. Tiempo de creación del árbol de comunicaciones	114
4.9. Número de nodos que reenvían datos desde otros nodos	115
5.1. Acciones ante la recepción de un RREQ en AODV	123
5.2. Ejemplo de descubrimiento de ruta en AODV	124
5.3. Conjuntos difusos para número de saltos en FL-TR	127
5.4. Conjuntos difusos para número de saltos en AODV-FL	127
5.5. Conjuntos difusos para el nivel de batería restante	128
5.6. Conjuntos difusos para la calidad de la señal recibida	129
5.7. Conjuntos difusos para el valor de evaluación (salida)	130
5.8. Acciones ante la recepción de un RREQ en AODV-FL	134
5.9. Tiempo de set-up de la red	137
5.10. Número de Routers tras crear el árbol de comunicaciones	138

5.11. Longitud de los caminos para los nodos más alejados	139
5.12. Función de densidad de probabilidad para la longitud de los caminos	140
5.13. Ahorro de energía conseguido por AODV-ETX y AODV-FL con respecto a AODV	143
5.14. Mensajes enviados durante el descubrimiento de rutas	143
5.15. Número de colisiones para AODV, AODV-ETX y AODV-FL . .	144
5.16. Retardo extremo a extremo	145
5.17. Longitud media de las rutas	146

Índice de Tablas

3.1. Ejemplo de tabla de vecinos utilizada por NORA	75
3.2. Parámetros relativos al canal de comunicaciones utilizado en los experimentos	88
3.3. Parámetros relativos al chip de radio utilizado en los experimentos	88
3.4. Número de nodos según el radio de la red	89
4.1. Ejemplo de reglas difusas	104
4.2. Conjunto de reglas difusas de NORIA	108
5.1. Reglas difusas para FL-TR y AODV-FL	131
5.2. Parámetros MAC utilizados en los experimentos con TR, FL-TR, AODV, AODV-FL y AODV-ETX	135

Capítulo 1

Introducción

RESUMEN:

En este capítulo nos introducimos en las redes de sensores, que constituyen el tema central entorno al cual se desarrolla esta tesis. Se relata la motivación que nos llevó a iniciar este trabajo y los objetivos marcados. Además, presentamos brevemente las aportaciones realizadas y describimos la estructura que ha seguido el desarrollo de la presente tesis.

Desde que en 1998 viese la luz el primer nodo sensor con capacidad de comunicación inalámbrica, el mundo de las redes de sensores inalámbricas no ha dejado de evolucionar. Multitud de universidades, empresas y centros de investigación de todo el mundo trabajan actualmente en nuevos desarrollos para este tipo de redes.

El pequeño tamaño de los nodos sumado a su gran funcionalidad y a las múltiples posibilidades que ofrecen las redes de sensores, hacen que esta tecnología se esté extendiendo no sólo en el entorno industrial y de la investigación sino que también está empezando a introducirse en el ámbito doméstico, gracias en parte a un precio cada vez más reducido.

La facilidad de despliegue de los nodos sensores y la operación desatendida de los mismos han favorecido en gran medida la expansión de las redes de sensores. Además, su versatilidad y la variedad de entornos donde puede ser utilizada esta tecnología están contribuyendo en gran medida su rápida expansión.

1.1. Motivación y objetivos

Las redes de sensores inalámbricas presentan ciertos problemas derivados de las limitaciones de los nodos. Estas limitaciones en cuanto a capacidad de procesamiento, almacenamiento, energía disponible, ancho de banda o rango de comunicación entre otras, hacen que los desarrollos orientados a este tipo de redes deban ser lo más eficientes posible, ya que las características específicas de las redes de sensores impiden la utilización de protocolos diseñados para otro tipo de redes inalámbricas.

Los diferentes protocolos y algoritmos orientados a redes de sensores se centran generalmente en optimizar parámetros como el tiempo de respuesta, la calidad de servicio o la conectividad de la red, considerando en la mayoría de los casos, el consumo energético como el principal parámetro a optimizar.

En los primeros experimentos realizados en nuestro laboratorio con redes de sensores para monitorización, se detectaron ciertos fallos en el funcionamiento de las mismas, principalmente en el aspecto energético, ya que algunos nodos de la red agotaban sus baterías mucho antes de lo especificado por el fabricante, y a nivel de comunicación, debido a una deficiente actuación del software que venía incorporado de fábrica en los nodos.

Todos los datos de la red eran recogidos por un nodo central conocido como Estación Base. Así, los problemas en las comunicaciones fueron rápidamente detectados, ya que tras el despliegue inicial de la red, los primeros datos recogidos por los nodos, tardaban más tiempo del esperado en llegar a su destino. Además, también se detectó la pérdida de un alto porcentaje de los paquetes enviados por los nodos.

Tras un profundo análisis de la forma en la que los nodos se comunicaban, se llegó a la conclusión de que los métodos utilizados para llevar a cabo el encaminamiento, carecían de la eficiencia necesaria para manejar los datos enviados por los nodos y entregarlos de manera efectiva a la Estación Base.

En la literatura existían diversas propuestas orientadas a la creación de rutas en redes de sensores, pero bien los procedimientos utilizados, o bien los parámetros considerados, no se ajustaban a los requerimientos de nuestro caso particular. Por esto, una vez concluido el estudio de los resultados obtenidos en los experimentos preliminares, se decidió llevar a cabo el desarrollo de un algoritmo de enrutamiento capaz de llevar los datos desde todos los nodos de la red hasta la Estación Base, teniendo siempre en cuenta el consumo energético como principal parámetro a reducir (rutas más cortas y eficientes, menor

número de paquetes transmitidos, reducción de la sobrecarga...), con el objetivo de prolongar el tiempo de vida de la red en aplicaciones de monitorización.

Dado que la red con la que se pretendía trabajar era estática y se deseaba poder almacenar todos los datos recogidos por los nodos para su posterior análisis, se optó por organizar la red siguiendo una estructura de árbol. De esta forma se facilitaría la recogida de datos por parte de la Estación Base, para llevar a cabo un posterior análisis de los mismos.

De este modo nace NORA (*Network rOle-based Routing Algorithm*), encargado básicamente de crear una estructura lógica con forma de árbol centrado en la Estación Base, que permite recoger los datos de todos los nodos de la red y asignar diferentes roles a los diferentes nodos o grupos de nodos. Además, con el fin de maximizar en la medida de lo posible el tiempo de vida de la red, y para desviar la carga a los nodos con mejor estado, se toman decisiones teniendo en cuenta el número de saltos hasta la Estación Base y la batería restante de los nodos, ya que en las aplicaciones de monitorización estos dos parámetros son muy importantes a la hora de crear las rutas.

Con el objetivo de mejorar NORA, se revisaron diversos métodos de combinación de parámetros, para optimizar la toma de decisiones. Tras descartar -debido a su bajo rendimiento- métodos estadísticos como medias ponderadas, o complejos análisis matemáticos, se estudiaron diversas técnicas basadas en inteligencia artificial. Propuestas como redes neuronales o colonias de hormigas fueron algunas candidatas, pero su complejidad a la hora de ser ejecutadas, hizo que fueran rápidamente descartadas para su ejecución en los nodos sensores. La lógica difusa, sin embargo, es un método que necesita menor capacidad de cómputo para ser ejecutado, es eficiente y además permite definir y combinar de manera efectiva los diferentes parámetros a considerar en la toma de decisiones.

La lógica difusa se presenta como un sistema de decisión que trabaja de forma similar a la lógica de control humana. Permite definir mediante el lenguaje humano las entradas y salidas, y proporciona un método simple para obtener conclusiones, tomando como base una serie de datos de entrada que pueden ser imprecisos o ambiguos.

De esta forma, se define un sistema basado en lógica difusa que permite la combinación de diferentes parámetros de los nodos, y calcula un valor de salida que facilita la tarea de evaluación de los mismos, para decidir si son incluidos o no en las rutas definidas. Así, al aplicar este sistema a NORA nace NORIA (*Network rOle-based Routing Intelligent Algorithm*), que basa sus decisiones

en la salida del sistema de lógica difusa, y que mejora a NORA en diversas métricas de evaluación de rendimiento.

Los buenos resultados obtenidos en los experimentos con NORIA avalan el uso del sistema de decisión basado en lógica difusa, por lo que durante la última etapa de la realización de esta tesis, se llevó a cabo la incorporación de una ampliación del módulo de decisión de NORIA en el estándar ZigBee [1], para ser utilizado como métrica a la hora de llevar a cabo la toma de decisiones de enrutamiento en los protocolos utilizados a tal efecto en este estándar.

Así, se incorpora el módulo de decisión basado en lógica difusa a *Tree Routing*, la propuesta de ZigBee para el enrutamiento en redes en árbol, dando lugar a FL-TR (*Fuzzy-Logic-based Tree Routing*). Para este caso, se ha añadido otra interesante variable, la fuerza de la señal recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*) al módulo de decisión basado en lógica difusa, para realizar así una evaluación más completa de los nodos asegurando la recepción de los paquetes en los nodos destino.

Para ciertas aplicaciones de monitorización, era necesaria la comunicación directa entre pares de nodos de la red, para lo cual, resulta muy eficiente la utilización de redes con estructura de malla, en las que cualquier nodo puede comunicarse con cualquier otro nodo dentro de la misma red. Así, se incluyó nuestro módulo de evaluación basado en lógica difusa en AODV, la propuesta utilizada en ZigBee para encaminar los datos en redes en malla, que se encuentra detallada en el RFC 3561 [2]. Comparamos AODV y AODV-FL y comprobamos las importantes mejoras que se obtienen al utilizar la métrica basada en lógica difusa.

Tras introducir el tema a tratar y las soluciones propuestas para solventar los problemas encontrados, a continuación se resumen las aportaciones realizadas en esta tesis.

1.2. Aportaciones

Esta tesis presenta un nuevo protocolo de encaminamiento para redes de sensores, NORA, cuyo módulo de decisión ha sido mejorado dando lugar a NORIA. Además, este módulo de decisión fue extendido e incorporado a dos propuestas de enrutamiento utilizadas en el estándar ZigBee: TR para redes en árbol y AODV para redes en malla.

NORA, *Network rOle-based Routing Algorithm*

Como se ha comentado anteriormente, NORA es un algoritmo de enrutamiento que crea una estructura lógica en árbol para llevar a cabo las comunicaciones en la red. NORA utiliza como parámetros a considerar, para llevar a cabo la toma de decisiones, el número de saltos hasta la Estación Base y el nivel de batería restante de los nodos.

NORA utiliza un enfoque basado en roles -es decir, asignar diferente funcionalidad a los nodos o grupos de nodos de la red-, para llevar a cabo las tareas de enrutamiento, de forma que los nodos con mejor estado son los encargados de reenviar los datos de otros nodos hacia la Estación Base, permitiendo ahorrar energía a aquellos nodos cuyas baterías se encuentran más agotadas. Además, al tener en cuenta el número de saltos hasta la Estación Base, se aseguran caminos de longitud mínima.

NORIA, *Network rOle-based Routing Intelligent Algorithm*

NORIA es una versión mejorada de NORA que incorpora un sistema basado en lógica difusa para combinar y evaluar los parámetros a considerar en la toma de decisiones.

Al igual que su predecesora, NORIA utiliza un enfoque basado en roles para llevar a cabo la creación de una estructura de comunicaciones en forma de árbol. La diferencia radica en el sistema utilizado para combinar los parámetros considerados en la toma de decisiones. De esta forma, se combinan el número de saltos hasta la Estación Base con el nivel de batería restante de los nodos, para obtener un valor de salida que representa la capacidad del nodo para ser seleccionado como padre.

Los buenos resultados obtenidos con este método de evaluación de variables, han propiciado su incorporación al estándar ZigBee, dando lugar así a las dos siguientes aportaciones.

FL-TR, *Fuzzy-Logic-based Tree Routing*

El estándar ZigBee define *Tree Routing* (TR), un protocolo de enrutamiento proactivo para redes en árbol que combina el número de saltos con información relativa a la calidad de la señal, para llevar a cabo la creación de las rutas.

Con el fin de mejorar la toma de decisiones en TR, *Fuzzy-Logic-based Tree Routing* (FL-TR) incorpora una versión ampliada del módulo de evaluación basado en lógica difusa de NORIA.

Al número de saltos hasta la Estación Base y el nivel de batería restante, el sistema de decisión utilizado en FL-TR añade la fuerza de la señal recibida, para mejorar así la robustez de los árboles creados.

AODV-FL, Ad-hoc On-demand Distance Vector routing with Fuzzy Logic

AODV es la propuesta utilizada en el estándar ZigBee para llevar a cabo el encaminamiento en redes en malla.

Con el fin de definir también un esquema de enrutamiento para este tipo de estructura de red, se incorporó la versión mejorada del módulo de decisión de NORIA a AODV, dando lugar así a AODV-FL. Dado que las redes en malla carecen de Estación Base, el número de saltos utilizado en este caso, representa la distancia entre los nodos fuente y destino.

La gran sobrecarga que se produce en la red al ejecutar AODV ha sido reducida drásticamente gracias a la incorporación del módulo de evaluación basado en lógica difusa y a ligeros cambios en la forma de proceder del protocolo, proporcionando así un importante ahorro de energía y tiempo de comunicación extremo a extremo.

Los diversos experimentos realizados, llevados a cabo mediante simulación, como paso previo a la implantación en redes reales, muestran el buen funcionamiento de estas propuestas, al comparar su rendimiento con el de otras propuestas presentes en la literatura, mejorando entre otros parámetros: tiempos de creación de caminos, longitud de las rutas, número de mensajes utilizados y energía consumida por los nodos.

1.3. Organización de la tesis

Esta tesis presenta una propuesta acumulativa, así como la incorporación de los métodos utilizados a algunas de las propuestas de enrutamiento utilizadas en el estándar ZigBee. Dado que se combinan técnicas de diversos campos, en el Capítulo 2 se detalla el estado del arte tanto en redes de sensores en general (hardware utilizado, aplicaciones, arquitecturas, sistemas operativos, simuladores), como en propuestas de auto-organización, enrutamiento y téc-

nicas de inteligencia artificial utilizadas en el ámbito de las redes de sensores inalámbricas.

NORA, la propuesta de enrutamiento para redes de sensores se presenta en el Capítulo 3, en el que también se muestran los experimentos realizados para estudiar el rendimiento de la propuesta, comparándola con TR, el protocolo utilizado en el estándar ZigBee para llevar a cabo el encaminamiento en redes en árbol.

En el Capítulo 4 se detalla el sistema de lógica difusa propuesto, para llevar a cabo la evaluación de los parámetros de los nodos y se presenta NORIA, la evolución de NORA que basa sus decisiones en los resultados ofrecidos por dicho sistema.

Por su parte, el Capítulo 5 se centra en la capa de red de la arquitectura ZigBee. Se detallan las propuestas utilizadas para encaminar los datos en redes en árbol y en malla, así como la mejora e incorporación del módulo de decisión basado en lógica difusa de NORIA a los protocolos TR y AODV. También se analizan los resultados obtenidos en los experimentos con dichas propuestas.

Finalmente, en el Capítulo 6 se detallan las contribuciones realizadas, fruto del trabajo llevado a cabo durante el desarrollo de esta tesis, así como las conclusiones obtenidas, proponiendo también ciertas líneas de trabajo que pueden continuar los desarrollos propuestos en esta tesis.

Capítulo 2

Estado del arte

RESUMEN:

En este capítulo se detalla el estado del arte relacionado con la temática de la tesis. En primer lugar se lleva a cabo una descripción detallada de las redes de sensores, así como de los dispositivos, arquitecturas, simuladores, y problemas principales que presentan este tipo de redes. A continuación, la auto-organización para redes de sensores, y el enrutamiento como una parte del proceso de auto-organización son analizados a fondo, presentando diversas clasificaciones y estudiando las técnicas más comúnmente utilizadas. Finalmente, se analiza el uso de técnicas de inteligencia artificial aplicadas a redes de sensores, ya que utilizaremos una técnica de inteligencia artificial para ayudar en la toma de decisiones de enrutamiento. De esta forma, se completa la definición de las bases teóricas utilizadas para la realización de este trabajo.

2.1. Redes de sensores inalámbricas

Las redes de sensores se están haciendo cada vez más populares, especialmente en aplicaciones que requieran una monitorización continua de diversas variables del entorno, en las que el uso de sensores tradicionales es inviable. Dominios de aplicación tan variados como monitorización ambiental, industrial, de edificios, controles de domótica, maniobras militares o medicina, son algunos de los ejemplos para los que esta tecnología puede servir de gran ayuda, siempre que se consideren diversos parámetros como el coste, la facilidad y la autonomía de uso.

Una red de sensores inalámbrica está formada por un conjunto de nodos sensores, que consisten en pequeños sistemas informáticos embebidos, encargados de recoger datos del entorno como temperatura, humedad o presión atmosférica, y que pueden comunicarse de forma inalámbrica [3, 4]. Normalmente, los datos de la red son recopilados por un nodo conocido como Estación Base, nodo central o sumidero, que se encarga de recibir la información de todos los nodos de la red. Este nodo central suele estar conectado a un PC o a un dispositivo capaz de almacenar gran cantidad de información. Una vez que los datos son recogidos por los sensores, son procesados por los nodos y enviados a la Estación Base utilizando diversos protocolos de comunicación inalámbrica.

Este tipo de redes pueden ser utilizadas en casi cualquier ámbito donde se necesite una monitorización continua, por lo que el despliegue de los nodos puede no seguir ningún tipo de orden. Los algoritmos y protocolos utilizados deben ser capaces de funcionar de forma autónoma y adaptable con el fin de satisfacer eficientemente los requerimientos de cada aplicación.

Debido a la naturaleza de los nodos y a las diversas aplicaciones en las que pueden ser utilizados, las redes de sensores tienen una serie de características, que las diferencian del resto de redes inalámbricas [5, 6]:

- **Limitaciones:** el pequeño tamaño de los nodos no permite (por el momento) la incorporación en ellos de potentes procesadores ni de sistemas de almacenamiento de gran capacidad. Además, la energía, proporcionada por baterías, limita la cantidad de tiempo de funcionamiento de los nodos. Por esto, se presentan restricciones en cuanto a procesamiento, almacenamiento, energía y comunicaciones. Estas limitaciones deberán ser contempladas por los desarrollos orientados a ser utilizados en las redes de sensores.
- **Escalabilidad:** el gran número de nodos que pueden ser desplegados para cumplir una cierta tarea, puede ser hasta de varios órdenes de magnitud mayor que las redes de área local tradicionales. Así, las técnicas de comunicación empleadas deberán mantener su funcionalidad y eficiencia cuando crezca el número de nodos de la red.
- **Auto-configuración:** la configuración manual de cada uno de los nodos se torna imposible al manejar redes de más de unas decenas de nodos. Por ello, las redes de sensores deben ser capaces de operar de forma autónoma y desatendida, adaptándose a posibles cambios que puedan producirse debido a la incorporación, eliminación y cambios de localización de los nodos.

- **Simplicidad:** como consecuencia de las limitaciones de los nodos y el tamaño de las redes, las aplicaciones y protocolos desarrollados, deben ser lo más simples posible.
- **Especificidad:** la gran cantidad de parámetros y opciones disponibles a la hora de diseñar una red de sensores hacen que sean altamente dependientes de la aplicación, por lo que muchas de las propuestas presentes en la literatura están orientadas a determinados tipos de aplicación.

Actualmente, gracias a la aparición de nodos de precio reducido, las redes de sensores están comenzando a salir de los centros de investigación para ser implantadas en entornos reales. La diversidad de entornos en los que estas redes pueden trabajar ha llevado a empresas y centros de investigación de todo el mundo al desarrollo de técnicas, protocolos y aplicaciones relacionadas con las redes de sensores inalámbricas.

2.1.1. Descripción detallada

Formalmente, una red de sensores puede ser representada por un grafo $G = \{V, E\}$ compuesto por un conjunto de vértices $V = \{u, v, w, \dots, z\}$, que representan los nodos de la red, y $E = \{\{u, v\}, \{v, w\}, \dots, \{w, z\}\}$ un conjunto de ejes que representa los enlaces entre los nodos de la red. Cabe destacar que un eje $\{u, v\} \in E$ existe sí, y sólo sí, el nodo u está al alcance del nodo v y viceversa. Tomando esto como base, se pueden definir diversos conceptos relativos a las redes de sensores:

- Un camino entre dos nodos $u, v \in V$ viene dado por una sucesión alterna de nodos y ejes $(u, \{u, v\}, v, \{v, w\}, \dots, y, \{y, z\}, z)$. En teoría de grafos, el número de ejes de un camino se denomina longitud; en el caso de las redes de sensores lo denominaremos número de saltos y se denotará como $H_{\{u,v\}}$. Para simplificar, al representar los caminos entre nodos de la red de sensores, se expresarán únicamente los nodos que formen este camino considerando que dos nodos consecutivos están unidos por un eje. Por ejemplo, el camino $\{i, j, m\}$, existirá si y sólo si $\{i, j\} \in E$ y $\{j, m\} \in E$.
- El nivel de batería de un nodo $u \in V$ viene representado por B_u , por lo que vamos a considerar $B = \{B_u, B_v, B_w, \dots, B_z\}$ como el conjunto de los niveles de batería del conjunto de nodos V .

Estas definiciones serán de gran ayuda a la hora de especificar formalmente las técnicas propuestas en esta tesis.

La estructuración lógica de la red suele ser llevada a cabo generalmente por los protocolos de red y acceso al medio. Al carecer de infraestructuras físicas, las redes de sensores pueden adoptar la estructura que más convenga en cada aplicación. Las topologías más comunes de las redes de sensores son malla, estrella, árbol y basadas en clústers [7]:

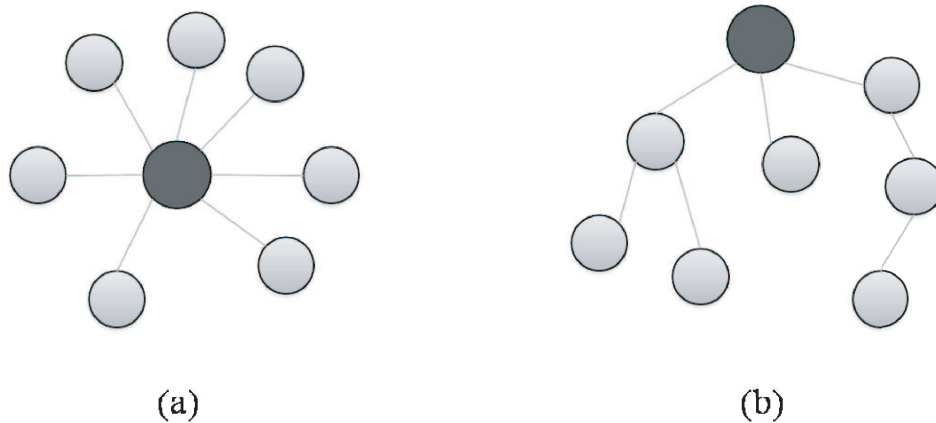


Figura 2.1: Topologías en estrella y árbol

- **Topologías en estrella:** son sistemas de un sólo salto en el que todos los nodos pueden comunicarse de forma directa con la Estación Base (ver Figura 2.1a). Los nodos no pueden comunicarse directamente con el resto; todas las comunicaciones tienen que pasar por la Estación Base. Una analogía al mundo de las redes en general podría ser la arquitectura cliente-servidor de las redes Ethernet.
- **Topologías en árbol:** pueden ser consideradas como una generalización de las redes en estrella. Los caminos definidos en estas redes van desde cualquier nodo hasta la Estación base, pudiendo atravesar varios nodos intermedios hasta llegar a ella (ver Figura 2.1b).
- **Topologías en malla:** estas redes permiten a los datos *saltar* de nodo en nodo. De esta forma, un nodo es capaz de comunicarse con cualquier otro, de modo que los datos pueden atravesar nodos intermedios hasta llegar a su destino (ver Figura 2.2a).

- **Topologías basadas en clúster:** esta clase de topología separa los nodos en grupos gobernados por un cabeza de clúster (ver Figura 2.2b). Los cabeza de clúster pueden comunicarse entre si, de forma que un nodo que quiera enviar datos a otro, se los enviará a su cabeza de clúster y éste lo reenviará al nodo destino, si pertenece a su clúster, o a un cabeza de clúster vecino que conozca la ruta hacia el destino.

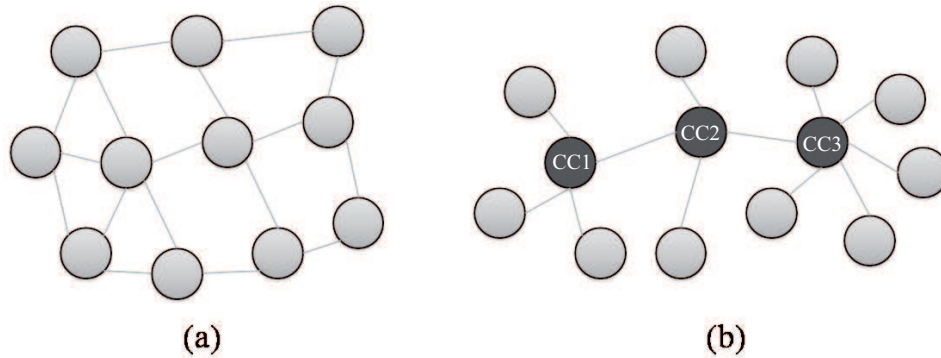


Figura 2.2: Topologías en malla y clúster

Una vez que se han definido las redes de sensores y las topologías que pueden formar, a continuación se detallan los dispositivos utilizados en este tipo de redes.

2.1.2. Dispositivos

Los nodos que componen las redes de sensores están formados generalmente por una placa en la que se integran: micro-controlador, memoria de trabajo y secundaria, y sistema de entrada/salida. Los desarrollos más modernos también incorporan sensores y conexión USB.

Los primeros nodos con capacidad de procesamiento y comunicación inalámbrica datan de 1998, pero la idea de este tipo de dispositivos es originaria de los años 80 del pasado siglo. Los nodos más modernos, incorporan en una misma placa un micro-controlador de 16 bits, memoria RAM, memoria Flash, sensores de temperatura, humedad y luminosidad, comunicación inalámbrica que puede alcanzar los 250kbps, conector USB para la conexión con un PC y conector de expansión para la conexión de dispositivos como *displays* LCD, antenas, sensores adicionales o periféricos digitales. En general, la arquitectura de los nodos está formada por seis componentes principales [8] (ver Figura 2.3):

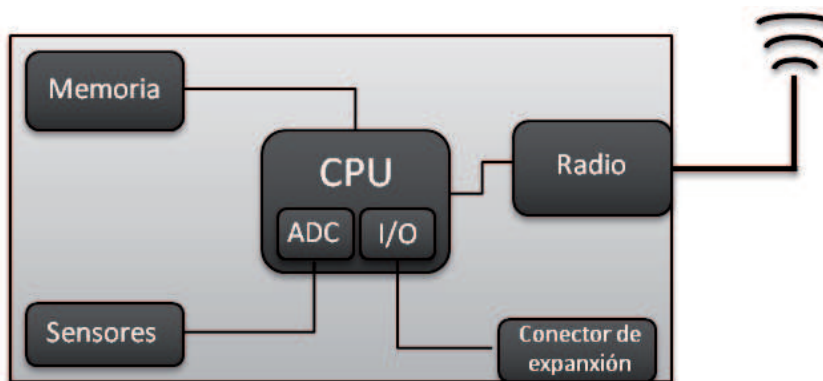


Figura 2.3: Arquitectura genérica de los nodos sensores

- **Micro-controlador de propósito general:** se encarga del procesamiento de los datos, de la gestión de memoria, sensores, comunicaciones inalámbricas y control de periféricos acoplados al conector de expansión.
- **Memoria:** hay dos tipos: RAM, para la ejecución de aplicaciones y Flash para el almacenamiento secundario de los datos.
- **Sensores:** son los encargados de recoger los datos del entorno. Los hay de luminosidad, temperatura, humedad, presión atmosférica, radiación solar, posicionamiento global (GPS), aceleración, presencia, CO₂, etc.
- **Radio:** el chip de radio es el encargado de llevar a cabo la comunicación inalámbrica entre nodos y de éstos hasta la Estación Base. Es el componente que más energía consume y de su rapidez y eficiencia depende en gran medida el rendimiento global de la red.
- **Antena:** utilizada para ampliar la cobertura de las comunicaciones.
- **Conector de expansión:** dependiendo del modelo de nodo que se trate, el conector de expansión puede proporcionar varios servicios: comunicación serie con el PC, ya sea para reprogramación del dispositivo o para recolección de datos, incorporación de una placa de sensores, display LCD para el visionado de la actividad del sensor, antenas para extender la cobertura, y en general cualquier periférico digital compatible y que pueda ser manejado por el micro-controlador.

Para facilitar el ahorro de energía, el controlador debe poder manejar los componentes de manera individual, procediendo a su desconexión en caso de

no ser necesarios. Hay estudios recientes que aprovechan la energía solar [9] o las vibraciones para recargar las baterías.






Modelo de nodo					
Microcontrolador	ATMega128 8MHz 4k SRAM 128k Flash 4k EEPROM	ATMega128 8MHz 4k SRAM 128k Flash 4k EEPROM	ATMega128 8MHz 4k SRAM 128k Flash 4k EEPROM	ATMega128 8MHz 10k SRAM 48k Flash	ATMega128 416MHz 256k SRAM 32 MB Flash
Almacenamiento externo	512k Flash	512k Flash	512k Flash	1 MB Flash	32MB Flash
Chip de radio	CC1000 (315/868/916 MHz)	CC2420 (2.4 GHz)	CC1000 (315/868/916 MHz)	CC2420 (2.4 GHz)	CC2420 (2.4 GHz)
Velocidad de transmisión	38.4 kbps	250 kbps	38.4 kbps	250 kbps	250 kbps
Voltaje de trabajo	2.7 V	2.7 V	2.7 V	2.1 V	3.2 V
Consumo máximo	27.7 mA (MCU on, Radio RX)	27.7 mA (MCU on, Radio RX)	25 mA (MCU on, Radio RX)	23 mA (MCU on, Radio RX)	65 mA (MCU on, Radio RX)
Consumo mínimo	<15 mA	<16 mA	<15 mA	5.1 μ A	390 μ A
Ranuras de expansión	51 pines, 8 canales ADC	51 pines, 8 canales ADC	18 pines, 6 canales ADC	16 pines, 6 canales ADC, 2 DAC	UART 3x AC97, GPIOs 12C, SDIO, SPI 2x, I2S
Puertos de comunicación	Serie y JTAG	Serie y JTAG	Serie y JTAG	USB y JTAG	USB
Sensores integrados	-	-	Temperatura	Temperatura, humedad y luminosidad	-
Sistema operativo	TinyOS	TinyOS	TinyOS	TinyOS	Linux

Figura 2.4: Resumen de las características de los nodos

Los avances en materia de tecnología hacen que se vayan sucediendo en el tiempo las diversas generaciones de nodos. En la Figura 2.4 se muestra una comparativa entre los modelos más representativos de nodos sensor que hay en el mercado.

Las sucesivas generaciones de nodos muestran una tendencia a la incorporación de micro-controladores más veloces y más eficientes en términos de

consumo energético. El tamaño de la memoria de almacenamiento masivo va en aumento, ya que las aplicaciones cuentan cada vez con mayores necesidades en este sentido. Por otro lado, es destacable el estancamiento en el tamaño de la memoria RAM, que es debido a que el ahorro de energía prima sobre la ejecución de aplicaciones complejas.

Los nodos Telos [10] supusieron un cambio generacional en esta tecnología, ya que integraban algunos sensores y conector USB. La incorporación del conector USB en los nodos hace que no sea necesario el uso de hardware adicional para su programación y comunicación con el PC, por lo que pueden cumplir funciones, tanto de nodo sensor, como de Estación Base. Por el contrario, las generaciones anteriores deben utilizar nodos centrales adicionales, que se encargan de la programación de los nodos sensores, además de recoger y almacenar los datos del resto de nodos de la red.

Estos nodos centrales o *gateways*, cuentan con una mayor capacidad de cálculo y almacenamiento, y normalmente funcionan conectados a la red eléctrica, por lo que no tienen restricciones en cuanto a energía. Pueden llevar a cabo dos funciones principales: almacenamiento temporal de los datos y/o pasarela hacia un PC. Generalmente, estos dispositivos están formados por:

- Procesador de propósito general, que tiene capacidad para ejecutar un sistema operativo estándar.
- Memoria de almacenamiento no volátil.
- Sistema de comunicaciones bilateral; por un lado debe recoger los datos de la red de sensores a la que pertenezca, y por otro, enviar los datos a través de una red ethernet, o una red wifi que permite que la información de la red de sensores pueda ser almacenada en un PC.

Entre los gateways más utilizados, destacan los fabricados por Crossbow [11], diseñados para programar nodos Mica, Mica2 y MicaZ. La Figura 2.5 muestra un resumen de las características de varios de estos dispositivos.

El auge de las redes de sensores, ha propiciado el nacimiento -también en España-, de empresas como Libelium [12], que diseña y fabrica sus propios nodos y proporciona sistemas basados en redes de sensores para ser utilizados en monitorización ambiental, salud, seguridad, control de procesos industriales, etc.

En general, los diferentes modelos de nodo disponibles en el mercado trabajan con diversas arquitecturas de comunicación, que son las encargadas de establecer los parámetros de comunicación entre los diferentes módulos que




Modelo de gateway	SPB 400 	MIB 510 	MIB 600 
Programación	Stargate, plataforma Xscale	Por puerto serie	Por puerto Ethernet
Conectores para nodos	Mica, Mica2, MicaZ (conector de 51 pines), Mica2Dot (conector 19 pines)	Mica, Mica2, MicaZ (conector de 51 pines), Mica2Dot (mediante cable de extensión)	Mica2, MicaZ (conector 51 pines)
Puerto	RS232 y Ethernet	RS232	Ethernet
Puerto de datos	Varios	RS232	Ethernet

Figura 2.5: Resumen de las características de los gateways

componen los nodos. A continuación se presentan las arquitecturas más utilizadas en el mundo de las redes de sensores.

2.1.3. Arquitecturas

Las arquitecturas de red se definen con el objetivo de organizar los diferentes protocolos y servicios de comunicación que pueden ser ejecutados por los nodos que conforman las redes. Esta estructuración de las comunicaciones debe estar suficientemente definida para que los desarrolladores, tanto de hardware como de protocolos, puedan crear productos y definiciones que sean totalmente funcionales al combinarse con el resto de protocolos, servicios y dispositivos del sistema [13].

Las redes de sensores han adoptado -con ciertos cambios-, la arquitectura de cinco capas utilizada en las redes TCP/IP, resultante de una simplificación

de la arquitectura OSI. Los cambios más significativos se refieren a la comunicación entre las diferentes capas. En TCP/IP existen una serie de interfaces que permiten la comunicación entre capas. Las arquitecturas para redes de sensores en cambio, utilizan servicios globales del sistema para que la comunicación entre capas sea lo más transparente posible. De este modo, la capa física será capaz de mandar, por ejemplo, una interrupción a la capa de aplicación de forma directa, sin tener que atravesar el resto de capas intermedias. Las arquitecturas más utilizadas en las redes de sensores inalámbricas son ZigBee y 6LoWPAN:

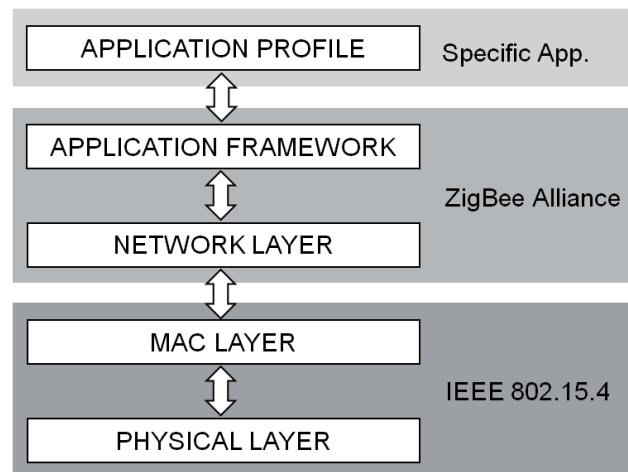


Figura 2.6: Arquitectura ZigBee

- ZigBee**: la alianza ZigBee [1], junto con el estándar IEEE 802.15.4 [14] ha definido una pila de protocolos estándar para ser utilizada en las redes de sensores inalámbricas. IEEE 802.15.4 define las capas física y de acceso al medio de la arquitectura, mientras que ZigBee especifica la capa de red, el marco de la aplicación y los perfiles de los dispositivos utilizados, además de servicios de seguridad. La Figura 2.6 muestra las diferentes capas de la arquitectura ZigBee, que ha sido especialmente diseñada para maximizar el tiempo de vida de las baterías en aplicaciones con baja tasa de envío de datos que requieren comunicaciones fiables.

A nivel de red, ofrece la posibilidad de trabajar con tres tipos de topología: estrella, malla y árbol. Para los dos últimos, utiliza dos protocolos bien conocidos como son AODV y Tree Routing, que serán detallados en

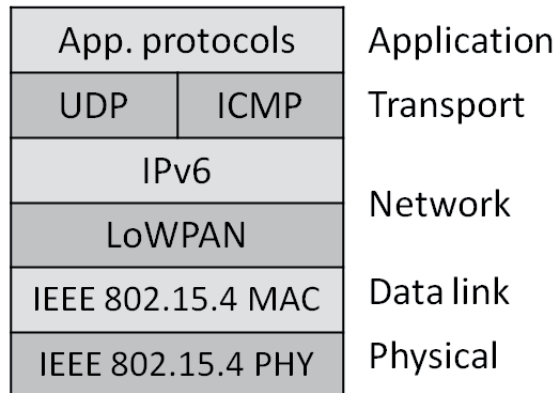


Figura 2.7: Arquitectura 6LoWPAN

el Capítulo 5, ya que uno de los objetivos de esta tesis es mejorar el rendimiento de estos dos protocolos.

- **6LoWPAN:** *IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks* [15] es una arquitectura que define el uso del direccionamiento IPv6 para las redes de sensores, permitiendo así su inclusión en la red global, favoreciendo el acceso a los nodos desde cualquier lugar. La Figura 2.7 muestra los componentes principales de esta arquitectura. Para la definición de la capa física y el acceso al medio, utiliza al igual que ZigBee, el estándar IEEE 802.15.4, mientras que en la capa de red, utiliza direccionamiento IPv6 adaptado a estas redes mediante la capa LoWPAN, que proporciona el encapsulamiento y los métodos necesarios para permitir la coexistencia de 802.15.4 e IPv6. La capa de transporte puede utilizar UDP o ICMP, dependiendo de los requerimientos de cada aplicación.

Para llevar a cabo la programación de los nodos, siguiendo la estructura definida por la arquitectura elegida, los nodos sensores, al igual que el resto de los sistemas informáticos complejos, también cuentan con sistemas operativos que se encargan de la implementación de la funcionalidad de los nodos.

2.1.4. Sistemas operativos

Los sistemas operativos para redes de sensores presentan diferencias en cuanto a restricción de recursos, dinamismo de las redes y despliegue desaten-

dido, con respecto a los sistemas operativos tradicionales. El surgimiento de las redes de sensores, y de sucesivas generaciones de nodos ha hecho que cada vez sea mayor el número de sistemas operativos que permiten el desarrollo de aplicaciones para este tipo de redes.

En la literatura se pueden encontrar artículos que resumen las propiedades de algunos sistemas operativos para redes de sensores [16]. A continuación, se muestran algunos de los más utilizados:

- **TinyOS:** *Tiny Microthreading Operating System* [17] es el sistema operativo más utilizado para gestionar el funcionamiento de los nodos. Está basado en un diseño multihilo y está dirigido por eventos, de forma que las aplicaciones reaccionan ante los acontecimientos externos mandando una señal de interrupción cuando llega un evento. TinyOS es de código abierto y se estructura en componentes que proporcionan una abstracción hardware o una determinada funcionalidad. Ante un evento o una interrupción hardware, se establece una cadena de invocaciones a componentes para responder de forma efectiva. Además, TinyOS proporciona dos abstracciones más: tareas, que son ejecutadas cuando el procesador no está atendiendo a ningún evento o interrupción, y comandos, que son utilizados para que un componente ejecute una secuencia de código concreta. TinyOS está en continua evolución y sus actualizaciones y novedades se encuentran disponibles para su descarga gratuita en su página web [18].
- **MantisOS:** es un sistema operativo para redes de sensores basado en hilos [19]. Los hilos consisten en entidades computacionales simples que tienen su propio estado. La ejecución de una aplicación conlleva la ejecución de múltiples hilos. Es de código abierto, pero la falta de actualizaciones (la última data de 2007) hacen que no se hayan resuelto algunos problemas relativos a la sobrecarga de memoria al llevar a cabo la gestión de los hilos.
- **Contiki:** este sistema operativo combina las ventajas de los eventos y de los hilos. Contiki [20] es de código abierto e híbrido, ya que está dirigido por eventos, pero soporta también la planificación multihilo como una librería opcional a nivel de aplicación. Los programas deben ser implementados como máquinas de estados, por lo que la programación de aplicaciones complejas puede ser bastante tediosa [21].
- **SenOS:** es un sistema operativo basado en una máquina de estados finitos [22]. Proporciona eficiencia energética a los nodos mediante esquemas

de encendido/apagado de radio, pero presenta problemas en cuanto a robustez, adaptabilidad y escalabilidad [23].

- **Nano-RK**: está orientado al ahorro de energía de aplicaciones en tiempo real para redes de sensores inalámbricas [24]. Utiliza tareas como unidades computacionales, asociando prioridades para definir el orden de ejecución. Fue diseñado para trabajar con nodos FireFly [25], por lo que no se ajusta bien al resto de familias de nodos como Telos o MicaZ.

La amplia gama de sistemas operativos disponibles para redes de sensores, hace que los administradores puedan escoger el más adecuado, dependiendo de los requerimientos de cada aplicación en particular. Sin embargo, las características propias de las redes de sensores, hacen que la implementación y prueba de nuevas propuestas sea una labor bastante compleja de llevar a cabo en redes de nodos reales, por lo que durante las fases de implementación, depuración y pruebas preliminares de algoritmos y protocolos, lo más adecuado es el uso de un simulador, que facilitará en gran medida la detección y corrección de errores de diseño y programación. El siguiente apartado detalla algunos de los simuladores que permiten experimentar con redes de sensores antes de implantar las propuestas en una red real.

2.1.5. Simuladores

La simulación es esencial para estudiar las redes de sensores inalámbricas, siendo actualmente uno de los métodos más utilizados para experimentar con nuevas aplicaciones y protocolos. Este hecho, ha favorecido la aparición de un gran número de simuladores para este tipo de redes. Las razones del uso de simuladores para llevar a cabo la experimentación con redes de sensores pueden venir derivadas de la falta de medios para adquirir un gran número de nodos, o la imposibilidad de recrear el escenario final donde será desplegada la red. Estos simuladores ayudan en gran medida a los desarrolladores a llevar a cabo la experimentación con nuevos algoritmos, protocolos y aplicaciones antes de ser implantados en el diseño final.

Los simuladores de redes de sensores deben cumplir unos requerimientos generales [26]. Estos requerimientos pueden ser funcionales o no funcionales. Entre los no funcionales cabe destacar que sean de código abierto, independientes de la plataforma y es deseable que incluyan módulos de visualización, para mostrar los resultados de forma gráfica. Los requerimientos funcionales de estos simuladores se centran en la posibilidad de desarrollar modelos de si-

mulación de hardware, de batería, energía, propagación, así como el modelado de protocolos y del entorno físico.

Algunos de los simuladores son adaptaciones de los simuladores de redes de propósito general que contienen módulos para la simulación de redes de sensores. También hay disponibles simuladores que han sido diseñados de forma específica para la simulación de este tipo de redes. La decisión sobre cuál utilizar vendrá determinada por las necesidades de precisión de los modelos (radio, canal, baterías,...), el número de nodos a simular o la precisión deseada en los resultados. A continuación se describen algunos de los simuladores más utilizados para llevar a cabo experimentos con redes de sensores inalámbricas [26, 27]:

Simuladores de propósito general. Estos simuladores se caracterizan por haber sido diseñados para la simulación de redes en general, tanto cableadas como inalámbricas, y para los que se han creado módulos que permiten llevar a cabo la simulación de redes de sensores. Entre los más populares podemos encontrar:

- **ns-2:** *Network Simulator 2* [28] es un simulador de eventos discretos desarrollado en C++. Es uno de los simuladores de redes no específicos más populares y soporta una gran cantidad de protocolos para diversos tipos de redes. Este simulador se basa en el paradigma de la reusabilidad y proporciona la colección mas completa de protocolos de comunicaciones entre los simuladores no comerciales. Incluye un módulo de aplicación llamado *Network Animator* (nam), que proporciona los resultados de forma visual.
- **Omnet++:** *Objective Modular Network Test-bed in C++* [29], al igual que ns-2, es un simulador de eventos discretos implementado en C++. Proporciona una potente GUI (*Graphical User Interface*), para llevar a cabo el seguimiento y el depurado de las aplicaciones. Comenzar a utilizarlo es muy sencillo, ya que posee un diseño bastante claro, basado en una jerarquía anidada de módulos que proporciona modelos hardware incluyendo CPU, batería y radio. Se han desarrollado una serie de módulos específicos para llevar a cabo la simulación de redes de sensores, entre los que se encuentran MiXiM [30] y Castalia [31]. Este último ha sido el simulador elegido para llevar a cabo las pruebas de esta tesis y se detalla más adelante.

- **J-Sim:** *Java Simulator* [32] es un simulador basado en componentes, y desarrollado en Java. Proporciona simulación de procesos en tiempo real. Su mayor baza es la gran cantidad de protocolos soportados, incluyendo un marco de simulación específico para redes de sensores que contiene un modelo muy detallado de estas redes y varias implementaciones para localización, enrutamiento y difusión de datos. Los modelos de J-Sim son fácilmente reutilizables e intercambiables ofreciendo máxima flexibilidad. Además, proporciona una librería GUI para mostrar los resultados de simulación y una interface que facilita la creación de *scripts* de simulación.

Simuladores específicos para redes de sensores El creciente interés por las redes de sensores, y la necesidad de realizar pruebas preliminares, previas a la implantación de las redes, han llevado al desarrollo de simuladores específicos para este tipo de redes. A continuación se comentan algunos de los más utilizados:

- **TOSSIM:** TOSSIM [33] es un simulador de eventos discretos que está incluido en TinyOS. Simula la ejecución de código nesC [34] en nodos Mica, permitiendo la emulación de nodos reales mediante el mapeado de las interrupciones hardware en eventos discretos. Los componentes de emulación de hardware son compilados junto con los componentes reales de TinyOS utilizando el compilador de nesC. De esta forma, se obtiene un programa ejecutable real de TinyOS que es ejecutado sobre una capa física simulada.
- **Atemu:** Atemu [35] es un simulador y emulador del procesador AVR incorporado en los nodos Mica. Durante el funcionamiento del simulador, el modelo de radio es simulado mientras que la operación de los nodos es emulada instrucción por instrucción, permitiendo llevar a cabo pruebas de aplicaciones, protocolos, algoritmos y sistemas operativos, además de la capacidad para simular redes heterogéneas compuestas por diferentes modelos de nodo.
- **SENS:** SENS [36] es un simulador de eventos discretos implementado en C++. Utiliza un modelo simplificado de los nodos que contiene tres capas: física, red y aplicación, más un modelo combinado de radio y entorno. También incorpora mecanismos para permitir la ejecución de código nesC.

2.1.6. Entorno de simulación utilizado en los experimentos: Omnet++ y Castalia

Ante la necesidad de llevar a cabo experimentos mediante simulación para comprobar el rendimiento de las diferentes propuestas, se seleccionó el módulo Castalia, que funciona bajo Omnet++. Castalia ha sido elegido gracias a su diseño modular, su nivel de detalle y la precisión de sus modelos. Estas características hacen que Castalia proporcione un modelo muy cercano a la realidad que permite extraer conclusiones fiables.

A continuación se detallan las características, las posibilidades y la forma de trabajar de Omnet++ y Castalia.

2.1.6.1. Omnet++

OMNet++ [29] es un simulador de redes de propósito general orientado a objetos, está dividido en módulos y su funcionamiento se basa en eventos. Está escrito en C++ y fue diseñado con diversos propósitos:

- Modelar el tráfico en redes de comunicaciones.
- Prueba de protocolos.
- Simular redes de colas.
- Modelar sistemas multiprocesador y otros tipos de dispositivos hardware.
- Validar arquitecturas hardware.
- Evaluar el rendimiento de sistemas complejos.
- y en general, modelar cualquier sistema basado en eventos.

Un modelo en OMNet++ consiste en un conjunto de módulos jerarquizados y anidados, que se comunican mediante mensajes. A continuación, se detallan los principales elementos necesarios para llevar a cabo la implementación de cualquier sistema:

- **Módulos:** son estructuras de datos jerárquicas escritas en lenguaje NED [37]. Son los encargados de describir los diferentes componentes que integran los elementos del sistema a modelar, además de definir topologías de red para llevar a cabo las simulaciones. Los módulos pueden contener

parámetros que son utilizados para intercambiar datos de configuración entre diferentes módulos. Cada módulo del sistema posee un identificador único que permite al simulador acceder a él. Pueden definirse dos tipos de módulos:

- *Módulos simples*: son elementos activos indivisibles que se estructuran de forma jerárquica para formar módulos compuestos.
 - *Módulos compuestos*: están formados por dos o más módulos simples y/o compuestos. El módulo compuesto de más nivel en el sistema es la red de simulación, que incluye todos aquellos módulos que hayan sido utilizados por el usuario en la definición del sistema.
- **Objetos**: son instancias escritas en C++ de los módulos simples que hacen uso de las librerías de simulación de Omnet++. Todo módulo simple incluirá una serie de rutinas básicas: *initialize()* será la encargada de inicializar los diferentes parámetros y variables de cada módulo, *handleMessage()* encargada del manejo de mensajes y donde se concentra toda la funcionalidad del módulo, y *finish()*, que se invoca cuando las simulaciones terminan sin problemas y suele ser utilizada para volcar los resultados de simulación a un archivo.
- **Mensajes**: son estructuras de datos incluidas en ficheros *.msg*. Los mensajes internos se utilizan para implementar temporizadores, mientras que los externos permiten el intercambio de información entre los módulos.

Omnet++ ofrece diferentes interfaces de usuario dependiendo del propósito de la simulación: depuración, demostración o ejecución en modo batch. Las interfaces de usuario más avanzadas permiten mostrar aspectos de bajo nivel al usuario, controlar la ejecución de las simulaciones y variar algunos parámetros u objetos dentro del modelo. Este comportamiento es particularmente útil en fases de desarrollo y depuración.

Tanto el simulador como las interfaces de usuario son portables, por lo que funcionan tanto en Windows como en las distintas distribuciones de Linux, usando distintos compiladores de C++.

Uno de los aspectos que hacen que este simulador sea muy utilizado en investigación, es que no tiene ningún coste para su uso dentro del ámbito académico y que existe un gran número de investigadores y desarrolladores que lo utilizan y que ofrecen sus experimentos y desarrollos a la comunidad científica. Tanto es así, que Omnet++ incorpora diferentes módulos independientes para la simulación específica de diferentes sistemas: redes locales, redes

de área amplia, redes inalámbricas, redes de sensores, etc. Entre ellos cabe destacar Castalia, un módulo de simulación específico para redes de sensores, que incorpora modelos realistas de radio y del canal inalámbrico, permitiendo así obtener resultados de simulación fiables y muy cercanos a la realidad.

2.1.6.2. Castalia

Castalia [31] es una plataforma especialmente diseñada para experimentar con algoritmos y protocolos distribuidos dentro de un marco genérico, fiable y realista que permite la ejecución de simulaciones en las primeras etapas de desarrollo, antes de llevar la implementación a una plataforma de nodos sensores específica. Sus principales características son:

- Modelos de canal inalámbrico y radio realistas, basados en mediciones empíricas.
- Detallada información de las transiciones entre diferentes estados de la radio, permitiendo múltiples niveles de potencia de transmisión.
- Modelo preciso y flexible del entorno físico.
- Gestión avanzada de recursos: consumo de energía, memoria, CPU...
- Protocolos de acceso al medio con multitud de parámetros configurables.

Además, Castalia fue diseñado desde el principio para que los usuarios pudieran importar o implementar algoritmos y protocolos que utilizaran las características proporcionadas por el simulador. La adecuada modularización y un configurable y automatizado proceso de construcción de soluciones ayudan a que los usuarios puedan adaptar sus propuestas al simulador. La fiabilidad y velocidad de Castalia se deben en parte a OMNet++, un excelente marco para simuladores basados en eventos.

El desarrollo de Castalia fue llevado a cabo por los investigadores del *Australia's Information and Communications Technology (ICT) Centre of Excellence*, ya que necesitaban probar algunos patrones de comunicación en simulaciones antes de implementarlos en los nodos reales. Para realizar esta tarea, requerían modelos precisos de radio y canal para que los resultados de sus experimentos fueran significativos y válidos. El equipo de investigadores opinaba que los simuladores actuales no ofrecían estos modelos tan precisos y que no se ajustaban a las mediciones que una red de sensores necesita.

En cuanto al diseño, Castalia ha heredado el esquema modular de Omnet++. El modelado de cualquier sistema puede ser resumido por el esquema mostrado en la Figura 2.8:

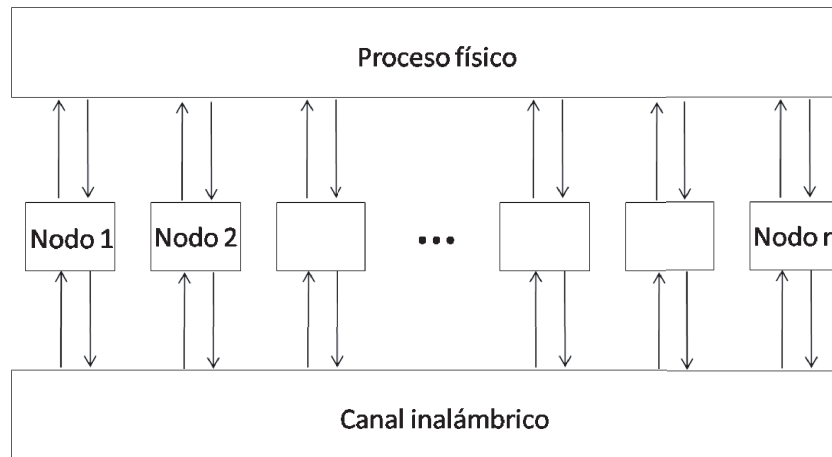


Figura 2.8: Sistema modular de simulación en Castalia

Es importante destacar, que en Castalia los nodos no se conectan de forma directa unos con otros, sino que lo hacen a través del módulo que simula el comportamiento del canal inalámbrico. Así, el canal de comunicación es modelado de forma independiente proporcionando un entorno más o menos realista, dependiendo de los requerimientos de cada experimento. Las flechas de la Figura 2.8 representan mensajes que pueden ser enviados de un módulo a otro. Cuando un nodo tiene un paquete para enviar lo manda al módulo de comunicación inalámbrica, que es el encargado de decidir qué nodos van a recibirlo. Puede haber diferentes procesos físicos, representando a los múltiples sensores que posean los nodos, así como también puede haber múltiples módulos de comunicación inalámbrica para representar las múltiples radios que incorporan los diferentes modelos de nodos sensores.

Cada nodo es representado por un módulo compuesto. La Figura 2.9 representa la estructura interna de un nodo. Las flechas continuas simbolizan envío de mensajes, mientras que las flechas discontinuas representan interfaces entre los módulos, que son utilizados con una simple llamada a una función. Por ejemplo, algunos de los módulos llaman a una función del gestor de recursos para obtener información sobre la energía consumida.

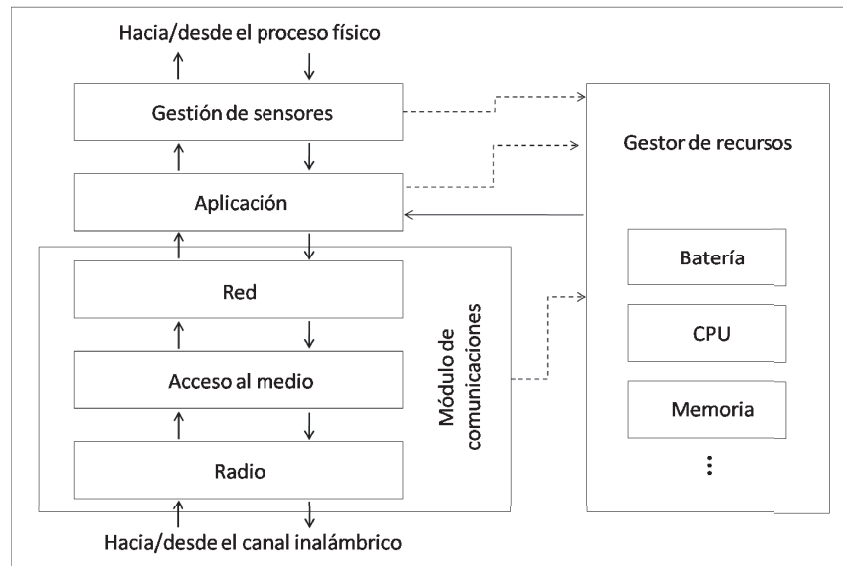


Figura 2.9: Esquema modular de un nodo sensor en Castalia

Además de los módulos de simulación, canal inalámbricos y procesos físicos, Castalia incorpora algunos módulos que implementan varios protocolos de enlace y red, así como algunos ejemplos de aplicación.

Una vez definido el entorno de simulación utilizado en los experimentos de esta tesis, a continuación se procede a detallar las diferentes aplicaciones de las redes de sensores.

2.1.7. Aplicaciones

Las redes de sensores pueden ser utilizadas en multitud de campos. La gran cantidad de parámetros medibles por los sensores, y la posibilidad de recoger los datos de forma desatendida hacen que día a día crezca el número de aplicaciones. El rango aplicación de estas redes incluye monitorización industrial, automatización de edificios, domótica, medicina, monitorización ambiental, redes de sensores urbanas, gestión de la energía o seguimiento de activos entre otros [38].

Generalmente, las aplicaciones se centran en monitorizar parámetros de forma continuada en el tiempo en aquellas zonas en la que no es factible la implantación de una red cableada, ya sea por su alto coste o por conservación

del entorno en monumentos o espacios protegidos. A continuación se muestran algunos ejemplos de aplicaciones para redes de sensores en diversos campos:



Figura 2.10: Detalle de nodo sensor utilizado en el proyecto Wisevine

- **Monitorización ambiental y agricultura de precisión:** mediante la adquisición de datos de temperatura, humedad y presión atmosférica, pueden realizarse estudios de ecosistemas y trabajos en agricultura de

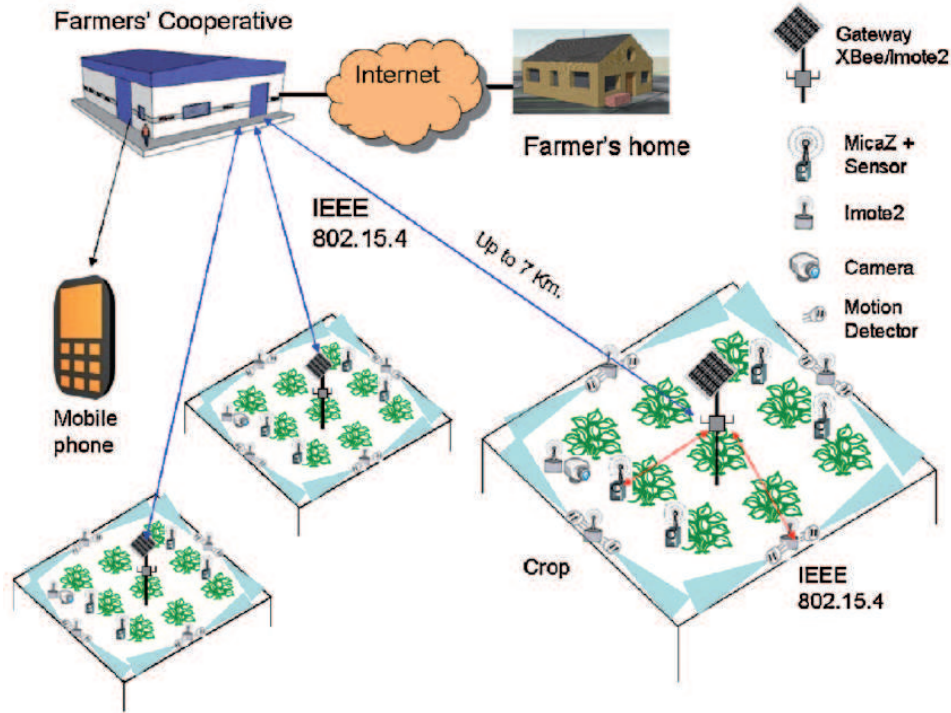


Figura 2.11: Esquema de la red de monitorización del cultivo de col [39]

precisión para, por ejemplo, conseguir maximizar la producción, controlar los sistemas de regadío o evitar la propagación de plagas. Entre estas aplicaciones se destaca el proyecto *WiseVine* [40], en el que se implantó una red de 66 nodos en un viñedo, que proporcionaba interesantes datos para los ingenieros agrónomos encargados del análisis de resultados (ver Figura 2.10). Uno de los primeros trabajos en monitorización ambiental, fue el proyecto *Great Duck Island* [41] que se encargaba de monitorizar diversa información del hábitat de la isla Great Duck en Estados Unidos, con el fin de justificar la cría de aves en esa isla y no en otras muchas con las que cuenta la costa de Maine. Otro ejemplo interesante es una red de 150 nodos en un cultivo de patatas en Holanda [42], que proporcionó importantes conclusiones a nivel investigador y que sirvió como base para posteriores desarrollos. Más recientemente, en [39] se muestra la utilización de una red de sensores encargada de monitorizar un cultivo de col (ver Figura 2.11). Otro de los proyectos más novedosos y centrado en la monitorización de especies es el presentado en [43], donde se muestra el uso de sensores inalámbricos incorporados en collares para estudiar

el comportamiento de los coyotes en las montañas de Santa Cruz en California. También en España existen proyectos como el detallado en [44], donde se lleva a cabo el seguimiento de linces ibéricos en su hábitat natural mediante la combinación de sensores y cámaras (ver Figura 2.12).

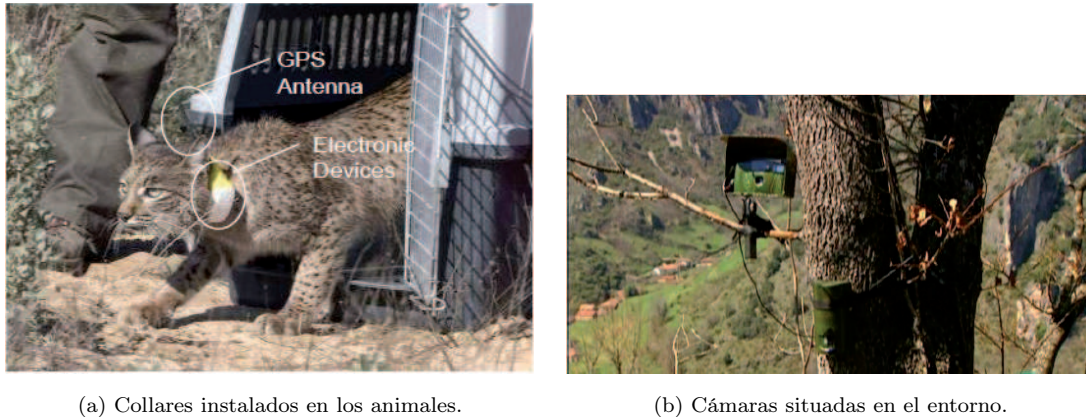


Figura 2.12: Monitorización del lince ibérico [44]

- **Prevención y monitorización de desastres naturales:** con el objetivo de prevenir, o paliar en la medida de lo posible los desastres naturales, se han desplegado diversas redes de sensores en diferentes entornos. Un ejemplo de este tipo de aplicaciones es el presentado en [46], donde se propone el uso de una red de sensores para la detección de tsunamis y para llevar a cabo el seguimiento de los mismos, con el fin de avisar en primera instancia de su presencia, e informar posteriormente de su recorrido y evolución al tocar tierra. Otros ejemplos de aplicaciones de este tipo son [45], que propone la utilización de una red de sensores para monitorizar la evolución de los glaciares (ver Figura 2.13), [47], que detalla el uso de redes de sensores para la monitorización de barreras de coral, o [48] y [49], donde se detalla el uso de redes de sensores para la monitorización de entornos volcánicos (ver Figura 2.14).
- **Monitorización de edificios:** el problema del consumo de energía y la calidad del aire dentro de los edificios es un importante tema de estudio. La obtención de datos de temperatura, humedad o CO_2 en edificios es utilizada en diversos estudios para medir la calidad del aire con el fin de intentar mejorar las condiciones ambientales y reducir el consumo



(a) Nodos sensores desplegados en el glaciar.

(b) Estación central para la recogida de datos.

Figura 2.13: Monitorización de la evolución de glaciares [45]

energético. La red *IntellBuilding* [50] permite medir las condiciones de temperatura y humedad en diferentes laboratorios del Instituto de Investigación en Informática de Albacete. Otro ejemplo de monitorización de edificios es la red desplegada en la torre Aquila en Trento, Italia, con el fin de controlar las condiciones en las que se mantienen una serie de frescos [51]. La Figura 2.15 muestra el hardware utilizado para implantar el testbed *IBASensorBed*, una de las tareas del proyecto *Ecosense* [52], centrado en la monitorización de edificios, con el objetivo de realizar una gestión eficiente de la energía. Los elementos que conforman esta red experimental se muestran en la Figura 2.16.

- **Seguridad y defensa:** desde la seguridad de una casa hasta la detección de objetos en el campo de batalla, son muchos los usos que se le pueden dar a las redes de sensores en materia de seguridad y defensa. Sensores de presencia o movimiento pueden abarcar grandes áreas en viviendas y monumentos para asegurar la ausencia de personas no deseadas [53]. En

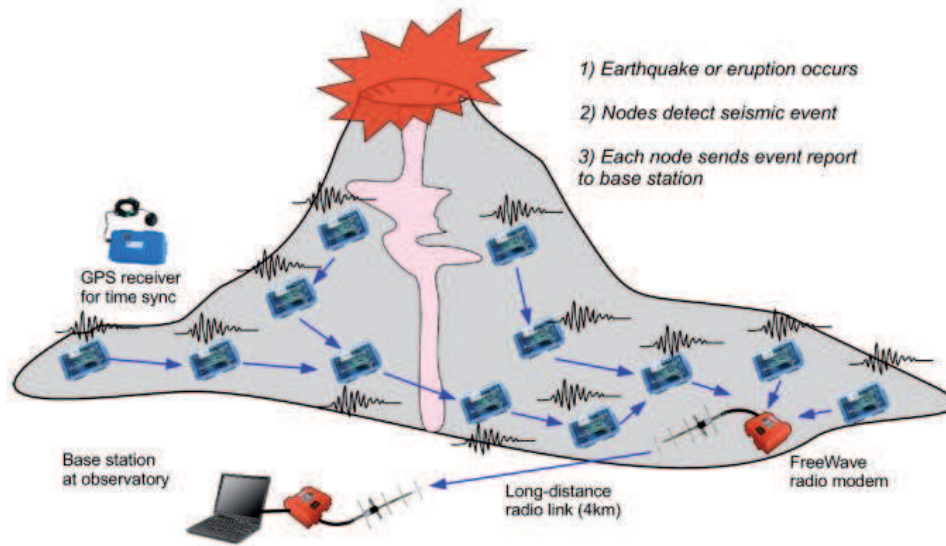


Figura 2.14: Red de sensores para la monitorización de entornos volcánicos [49]

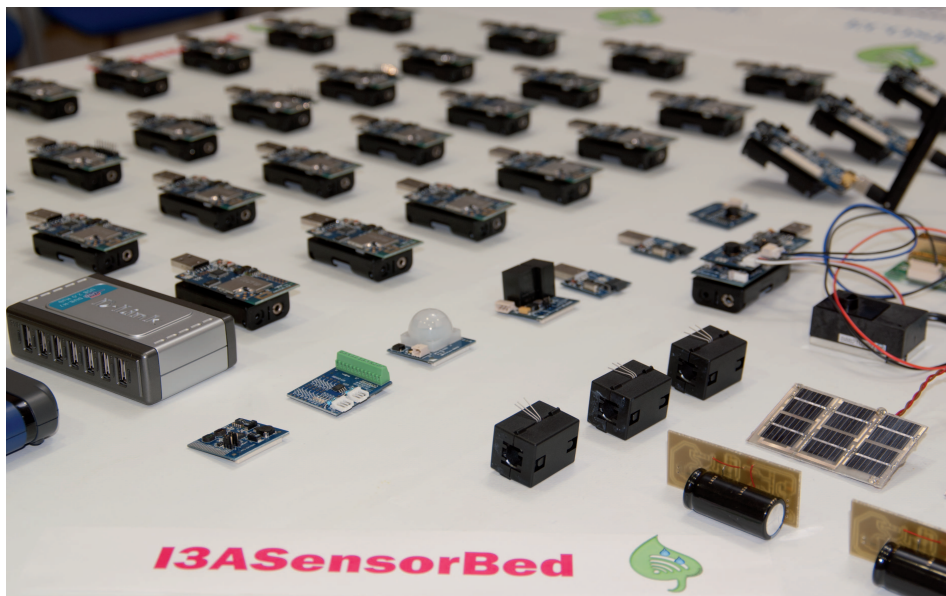


Figura 2.15: Dispositivos utilizados en el proyecto Ecosense

el campo militar uno de los proyectos más importantes es la detección de submarinos [54]. También se está estudiando la posibilidad de lanzar en

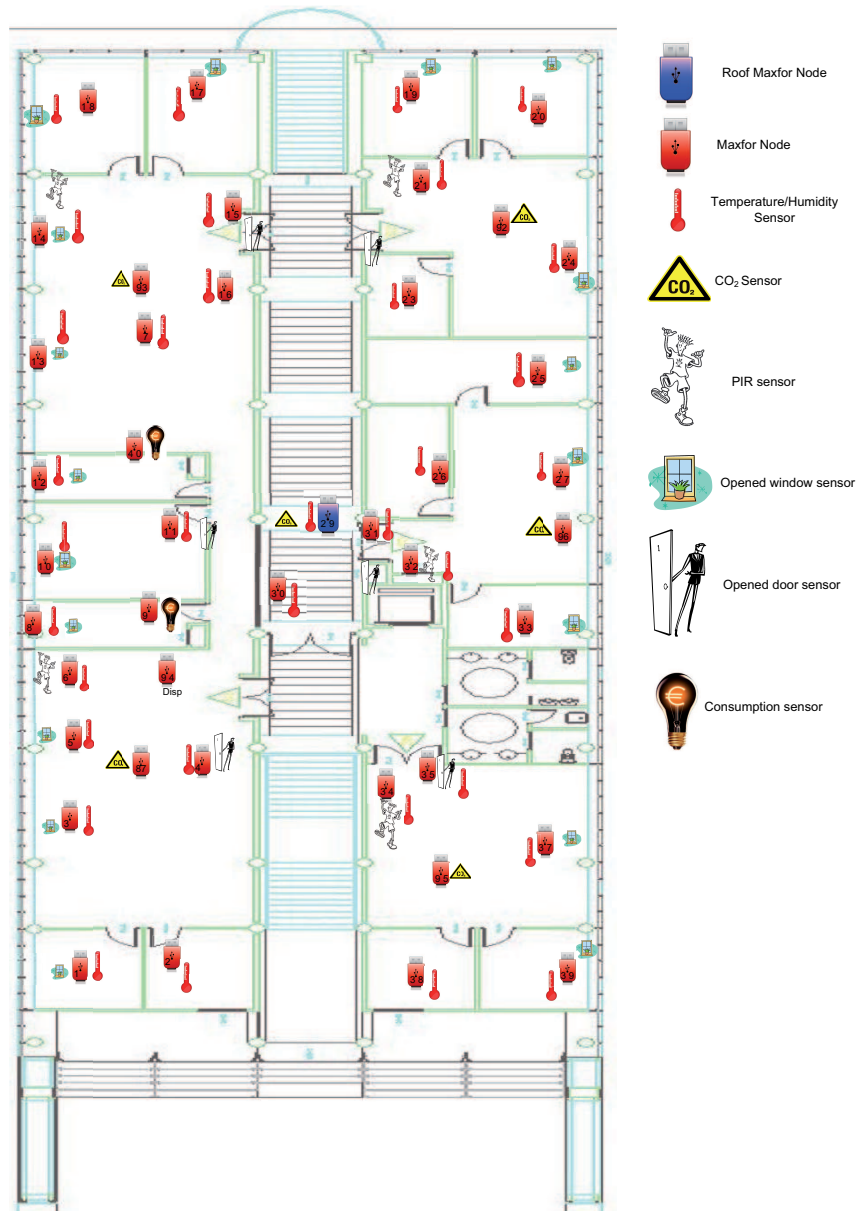


Figura 2.16: Distribución de los dispositivos de medición y comunicación en la red Ecosense

el campo de batalla miles de pequeños sensores del tamaño de una mota de polvo para obtener información del enemigo que ayude a la toma de decisiones estratégicas. Existen también proyectos dedicados a la detec-

ción de movimientos sísmicos o ataques biológicos. Uno de los estudios más sorprendentes, desarrollado por la Universidad de Vanderbilt, es la detección de la trayectoria de una bala mediante la medición del silbido que ésta produce durante su recorrido [55]. La vigilancia de estaciones militares [56] y de entornos estratégicos [57] son también dos aplicaciones que aprovechan la versatilidad de las redes de sensores (ver Figura 2.17).



Figura 2.17: Redes de sensores utilizadas para vigilar entornos estratégicos [57]

- **Control de procesos industriales:** con el objetivo de reducir costes y mejorar el rendimiento de la producción, los sensores son utilizados en el marco de la industria para supervisar el estado de la maquinaria, controlando el nivel de desgaste, lubricación o vibración [58]. Otro de los usos en la industria son los controles de calidad monitorizados por redes de sensores. La Universidad de Berkeley ha desarrollado un experimento en el que los sensores son situados a lo largo de una cadena de montaje en una factoría de automóviles para vigilar la operación de los robots, facilitando su mantenimiento y evitando problemas derivados de las redes cableadas [59]. La utilización de sensores inalámbricos para controlar tanto la seguridad de la carga como el transporte de contenedores es otra de las aplicaciones en las que las redes de sensores resultan especialmente funcionales [60] (ver Figura 2.18).
- **Medicina:** los sensores inalámbricos también pueden ser utilizados para monitorizar las constantes vitales de los pacientes, ya sea dentro del propio hospital, durante el traslado hacia el centro sanitario o en su propio domicilio en períodos de convalecencia. El proyecto *Vital Sign Monitoring* [61] ha creado un sistema que consta de cuatro componentes: un identificador de pacientes, compuesto por un nodo especial que contiene



Figura 2.18: Sensores desplegados en el interior de un contenedor de transporte [60]

los datos del paciente, sensores médicos, que miden parámetros como las pulsaciones por minuto o la presión arterial, un dispositivo de visualización de datos y otro de programación del sensor. Los datos recogidos son enviados periódicamente a una Estación Base que los almacena en una base de datos. Posteriormente, los facultativos se encargarán de realizar los diagnósticos y tratamientos oportunos en función de la información obtenida de cada paciente. La Figura 2.19 muestra el uso de una red de sensores que monitoriza de manera continua las constantes vitales [62].

Como puede apreciarse en esta lista, existe una amplia diversidad de aplicaciones para las redes de sensores. Debido a que el diseño de una red de este tipo, es en la mayoría de los casos dependiente de la aplicación, los diferentes diseños irán orientados a cumplir con los requerimientos particulares de cada aplicación. El campo de aplicación en el que se ha desarrollado esta tesis es la

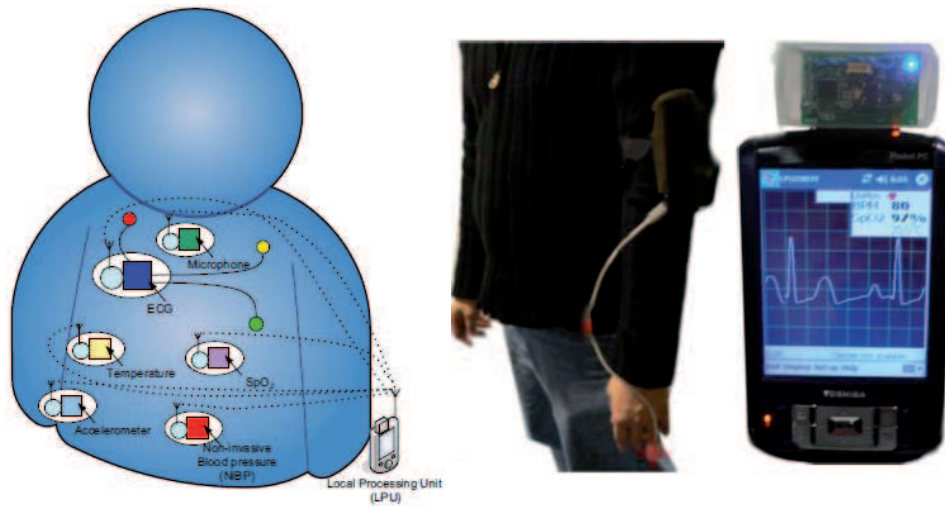


Figura 2.19: Esquema de posicionamiento de sensores (izq.) y sistema implantado en un paciente (der.) [62]

monitorización. El siguiente apartado detalla las principales características de estas aplicaciones, así como los retos de diseño más importantes.

2.1.8. Monitorización. Características principales

El trabajo de esta tesis se enmarca en entornos donde se desarrollan aplicaciones de monitorización. Por este motivo, a continuación se detallan este tipo de aplicaciones.

Las aplicaciones de monitorización se centran en la recogida continua de información relativa a distintas variables del entorno mediante la utilización de nodos inalámbricos equipados con diversos sensores, así como en el envío, almacenamiento y presentación de dicha información por parte de algún tipo de nodo central o Estación Base, con el objetivo de proporcionar datos relevantes que serán analizados posteriormente para llevar a cabo las acciones pertinentes, o sacar las conclusiones oportunas dependiendo del ámbito en el que haya sido implantada la red. Al igual que el resto de aplicaciones para redes de sensores, las aplicaciones de monitorización deben tener en cuenta las características específicas de este tipo de redes como recursos limitados, escalabilidad, auto-configuración, simplicidad y especificidad, pero también hay que tener en cuenta algunas particularidades propias de estas aplicaciones [63, 64]:

- **Densidad de nodos:** será necesario ajustar el número de nodos dependiendo de la cantidad de puntos de recogida de datos que se deseen. Por ejemplo, en una red que estudie las condiciones meteorológicas en las que se desarrolla un cultivo, será suficiente con un nodo cada algunas decenas de metros, mientras que para monitorizar las condiciones de temperatura y humedad en un edificio, se necesitará al menos un nodo en cada estancia del mismo. La densidad de nodos afectará de forma directa a los protocolos de comunicación, que deberán gestionar el acceso concurrente al canal por parte de todos los dispositivos de la red, así como asegurar el correcto envío de los datos mediante la utilización de un protocolo de enrutamiento eficiente.

- **Entorno de comunicación hostil:** para llevar a cabo la comunicación, los nodos utilizan el canal inalámbrico, que puede presentar problemas como interferencias, colisiones o falta de fiabilidad, debidos a las condiciones del medio y a las comunicaciones concurrentes de varios nodos. Para el correcto funcionamiento de la red, es necesario que tanto el acceso al medio como la gestión de las rutas en la red sean capaces de proporcionar mecanismos para hacer llegar los datos al destino de forma satisfactoria. Además, los nodos deben ser capaces de funcionar en condiciones extremas de temperatura o humedad.

- **Alimentación de los nodos:** uno de los aspectos más importantes de las redes de sensores y que es el tema central de numerosas propuestas, es la gestión de la energía. El uso de baterías para alimentar los nodos, con sus limitaciones en cuanto a capacidad y usabilidad, hacen que la mayoría de algoritmos y protocolos para aplicaciones de monitorización, sobre todo *outdoor*, se propongan reducir el consumo energético con el fin de aumentar el tiempo de vida de la red.

- **Colocación de los nodos:** los nodos son especialmente diseñados para detectar pequeñas variaciones en los parámetros que toman del medio, por lo que para asegurar la fiabilidad de los datos recogidos, será necesario situar los nodos en los lugares adecuados evitando así que éstos recojan valores extremos que no correspondan con los valores reales. Por ejemplo, a la hora de colocar un sensor de temperatura en una habitación, se intentará en la medida de lo posible, colocarlo lo más lejos posible de las fuentes de frío o calor.

- **Almacenamiento y análisis de los datos:** generalmente, las aplicaciones de monitorización proporcionan grandes cantidades de información. Estos datos debe ser almacenados y presentados de forma legible, con el fin de facilitar la tarea de análisis de los mismos.
- **Seguridad en las comunicaciones:** es un importante parámetro a considerar, sobre todo para cierto tipo de aplicaciones, como las redes de vigilancia o las aplicaciones militares. La literatura presenta una amplia gama de propuestas, estudios y experimentos sobre seguridad en redes de sensores inalámbricos que quedan fuera del alcance de esta tesis.
- **Bajo coste:** las redes de sensores orientadas a monitorización suelen estar compuestas por un gran número de nodos, por lo que es deseable, que el precio de los nodos no sea demasiado elevado. Actualmente pueden encontrarse en el mercado modelos basados en Telos cuyo coste no supera los 60€[65]. Al igual que con otras tecnologías, el auge de la utilización de redes de sensores y su fabricación en masa harán que el precio de estos dispositivos tienda a la baja.
- **Operación desatendida:** dado el tamaño de las redes orientadas a monitorización, tanto la programación de los nodos como el funcionamiento de los mismos, deben llevarse a cabo de manera desatendida. Uno de los retos más interesantes es la forma en la que los nodos se organizarán dentro de la red, para que los datos recogidos alcancen su destino de forma efectiva.

La auto-organización aprovecha el comportamiento colaborativo de los nodos de la red para crear estructuras lógicas que faciliten el transporte de los datos desde la fuente hacia el destino. Este va a ser el punto principal de estudio de esta tesis y el principal problema a resolver. A continuación, se trata a fondo la auto-organización para redes de sensores, con el fin de introducir sus principios, así como los mecanismos más utilizados.

2.2. Auto-organización en redes de sensores

Los experimentos con redes de sensores reales previos a esta tesis permitieron comprobar los principales problemas que planteaban las redes de monitorización, tanto interior (red *IntellBuilding* [50]) como exterior (red *Wisvine* [40]). A raíz de los problemas encontrados, se planteó el trabajo en un aspecto

fundamental de las redes de sensores inalámbricas, la auto-organización. Ésta fue abordada en su totalidad en una primera etapa, pero debido a la gran cantidad de tareas que debe llevar a cabo un mecanismo de auto-organización, se decidió más adelante acotar el campo de trabajo y orientarlo hacia una de las tareas más importantes de la auto-organización: el enrutamiento. Por esto, a continuación se comentan los aspectos generales relativos a la auto-organización, para después detallar el enrutamiento en este tipo de redes.

El correcto funcionamiento de las redes tanto cableadas como inalámbricas pasa por una correcta organización. La inmensa mayoría de las redes siguen algún tipo de organización, bien centralizada o bien distribuida para conseguir que los datos lleguen al destino de manera efectiva. La organización de redes cableadas se lleva a cabo mediante sistemas de conmutación y enrutado como son los switches y los routers, de forma que cualquier nodo de la red puede comunicarse con cualquier otro nodo sin importar la distancia o el número de saltos que los separan. La configuración de estos dispositivos de encaminamiento y conmutación es en la mayor parte de los casos manual, de forma que el administrador de red debe introducir las direcciones de los dispositivos manualmente. Posteriormente en determinados sistemas, estas direcciones son actualizadas de forma más o menos automática.

En redes inalámbricas en general, y para redes de sensores en particular, la necesidad de que los nodos se comuniquen unos con otros de una forma eficiente y ordenada, ha llevado a diferentes empresas y centros de investigación a la definición de algoritmos y protocolos encargados de organizar las comunicaciones entre los nodos. Esta organización permite que los datos enviados por los nodos puedan viajar por la red y llegar a su destino optimizando diversos parámetros como el tiempo de vida de la red, el retraso en las comunicaciones o la calidad de servicio, entre otros.

La organización de una red de sensores puede incluir diferentes aspectos que deben ser tenidos en cuenta como el descubrimiento de la topología, el control de acceso al medio, el enrutamiento de los datos, y controles específicos de cada aplicación en particular. Para redes pequeñas que cuentan con algunas decenas de nodos, la organización puede hacerse de forma manual, pero con el creciente tamaño de las redes de sensores, que pueden llegar a estar compuestas por miles de nodos, el trabajo de organización se torna tedioso. De esta forma, cuando se trabaja con redes formadas por un alto número de nodos, se lleva a cabo una auto-organización distribuida, en la que son los nodos mismos los encargados de realizar las tareas que conlleva la organización de la red.

La auto-organización puede ser definida como *la realización de tareas locales por parte de los diferentes individuos que forman un sistema para conseguir un objetivo global sin la utilización de ningún tipo de control centralizado* [66]. La auto-organización no es un proceso novedoso, los principios en los que se basa han evolucionado en la naturaleza, y han sido analizados y aplicados a los sistemas tecnológicos. Se pueden encontrar ejemplos de auto-organización fuera del mundo tecnológico en modelos biológicos, como los organismos pluricelulares, en modelos sociales como las colonias de abejas y hormigas o en modelos económicos, donde la oferta y la demanda interactúan de manera más o menos automática.

La aplicación de la auto-organización en el mundo de la tecnología es, por tanto, fruto del estudio y observación de los sistemas auto-organizados presentes en otros campos. En [67] se puede encontrar un amplio estudio sobre los diferentes campos donde se puede utilizar la auto-organización. Entre otros cabe destacar la seguridad en redes, la computación en grid, el control de mercancías, y las redes de sensores inalámbricas.

2.2.1. Características de la auto-organización

Al igual que el resto de los sistemas auto-organizados, los diferentes componentes de las redes de sensores realizan tareas más o menos locales, interactuando con los vecinos más cercanos para conseguir un objetivo global. Estas interacciones, que en su mayor parte consisten en intercambio de información y observación del entorno, permiten a los nodos actuar de forma que se optimice un determinado aspecto del funcionamiento de la red, como puede ser el tiempo de vida, la calidad de servicio, la fiabilidad o el rendimiento de la red.

2.2.1.1. Características de los sistemas auto-organizados

Los sistemas auto-organizados poseen una serie de características que permiten distinguirlos de otros sistemas de organización utilizados en diferentes entornos [68]:

- Los sistemas auto-organizados están compuestos por unidades que son capaces de responder de forma individual a estímulos locales.
- Las unidades del sistema se reparten las tareas con el fin de conseguir un objetivo común.

- El sistema en general es capaz de adaptarse para conseguir uno o varios objetivos de forma eficiente.

A la vista de estas propiedades, los sistemas auto-organizados podrían englobarse dentro de los sistemas colaborativos, ya que cada uno de los elementos que lo forman contribuye de forma más o menos activa a la consecución de un objetivo global. Estos sistemas también deben cumplir una serie de condiciones para ser considerados auto-organizados [68]:

- El sistema debe tener una serie de entradas y una salida que debe poder ser medida o evaluada.
- Deben definirse uno o varios objetivos a cumplir por el sistema.
- Las unidades que conforman el sistema deben ser capaces de cambiar su estado interno basándose en sus entradas y en el estado de otras unidades.
- Una única unidad del sistema, o un grupo de unidades no deben ser capaces de alcanzar los objetivos globales sin contar con la ayuda del resto de unidades.
- Conforme se va ganando experiencia en un entorno específico, el sistema debe ser capaz de conseguir sus objetivos de forma más eficiente y/o precisa.

De esta forma, un sistema que cumpla estas condiciones podrá ser considerado como auto-organizado, no siendo necesario ningún tipo de control externo para que el sistema sea capaz de cumplir los objetivos para los que ha sido diseñado.

2.2.1.2. Auto-organización aplicada a redes de sensores

El concepto de auto-organización engloba una serie de cometidos que pueden ser desarrollados por los algoritmos o protocolos que pretendan ser auto-organizados. Considerando las propiedades de las redes de sensores inalámbricas, a continuación se detallan las características y tareas principales que pueden llevar a cabo los sistemas auto-organizados para este tipo de redes [69]:

- **Compartición de recursos:** los nodos de una red de sensores y en general de cualquier red inalámbrica, comparten el espectro electromagnético y, en consecuencia, el ancho de banda disponible. La compartición

de recursos no sólo se centra en aprovechar de la manera más eficiente el canal disponible, sino que también se encarga de llevar a cabo tareas relacionadas con el procesamiento de los datos. De esta forma, los nodos no sólo se centran en sus propias comunicaciones, sino que también se encargan de reenviar los datos de otros nodos para que éstos alcancen el destino deseado.

- **Formación y mantenimiento de estructuras:** normalmente, los sensores son desplegados en el área a controlar sin seguir ningún tipo de organización, de forma que son los nodos mismos los que deben llevar a cabo la construcción de estructuras lógicas que permitan la comunicación entre ellos, esto es, auto-organizarse.
- **Comportamiento de los nodos:** una vez que los nodos son desplegados, pueden llevar a cabo una serie de funciones, bien genéricas, como por ejemplo el enrutado de los datos, o bien dependientes de la aplicación e incluso dependientes de la situación actual, que deben ser contempladas por los algoritmos y protocolos de auto-organización:
 - **Enrutamiento:** es una de las tareas más importantes dentro de la auto-organización ya que permite que los datos enviados por los nodos viajen por la red entre emisor y receptor, de forma eficiente y atravesando -en caso necesario- caminos formados por un conjunto de nodos que serán elegidos en función de la métrica que utilice el protocolo de enrutamiento. Esta métrica puede estar basada en uno o varios parámetros, como por ejemplo la energía, la distancia entre fuente y destino, la densidad de nodos o la calidad de las comunicaciones.
 - **Difusión de la información:** el objetivo de esta tarea es que los datos provenientes de fuentes como pueden ser los sensores incorporados en los nodos, lleguen a un destino para el que los datos son relevantes. Por ejemplo, es deseable que la información procedente de sensores de humo y temperatura llegue de forma efectiva a un nodo que dispara una alarma de incendios.
 - **Información de consulta:** en ciertos sistemas, los usuarios pueden pedir a los nodos, información relativa al entorno que controlan. Por ejemplo, a una red de monitorización de un edificio, se le puede solicitar que proporcione los valores de temperatura y humedad actuales para una determinada estancia.

- **Asignación de tareas:** por su naturaleza colaborativa, las redes de sensores pueden requerir que un subconjunto de nodos cumpla una tarea (rol) determinada como por ejemplo, reenviar datos desde otros nodos, agregar información proveniente de varias fuentes, filtrar diversos datos, etc. Las técnicas de asignación de roles son un importante ejemplo de la asignación de tareas. Estas técnicas forman parte de una de las propuestas de este trabajo y son detalladas en la Sección 2.2.2.1.
 - **Configuración software:** las redes de sensores trabajan en entornos que pueden cambiar con el tiempo. Esto hace que en algunas ocasiones sea necesario reconfigurar el software de los nodos. Esta reconfiguración puede implicar la carga y descarga dinámica de módulos de software apropiados, así como la configuración de determinados parámetros para conseguir el rendimiento deseado.
- **Gestión de recursos:** los protocolos de auto-organización deben también considerar la correcta gestión de los recursos disponibles. Entre los diversos recursos a gestionar, cabe destacar el canal inalámbrico, que al ser compartido por los nodos de la red, obliga a definir una cierta sincronización, con el fin de evitar colisiones y pérdida de datos. Otro importante parámetro que debe gestionarse eficientemente es la energía. La reducción del consumo energético está presente en un gran número de propuestas para redes de sensores, y hoy en día continúa siendo uno de los mayores problemas de estas redes debido a que la alimentación de los nodos está basada en baterías.
 - **Flexibilidad:** dado el potencial de las redes de sensores para ser desplegadas en entornos no estables, los protocolos de auto-organización deben contar con cierta flexibilidad que les permita adaptarse a situaciones tales como el fallo o la incorporación de nuevos nodos a la red, variaciones en la topología o ataques externos.

Todas estas propiedades y tareas representan el conjunto de acciones que pueden desempeñar los protocolos de auto-organización. Dependiendo de los parámetros a optimizar o de las funciones deseadas de la red, puede ser necesario el uso de varias de estas capacidades para cumplir de forma efectiva los objetivos marcados.

2.2.1.3. Clasificación de las técnicas de auto-organización

En la literatura existen diversas técnicas de auto-organización para redes de sensores inalámbricas que serán detalladas en la sección 2.2.2. Con el propósito de entender mejor estas técnicas y saber qué propiedades tiene cada una de ellas, podemos clasificarlas de diferentes formas atendiendo bien a la información utilizada para la toma de decisiones o según en la capa de la arquitectura en la que actúan [70].

Los protocolos de auto-organización basan la toma de decisiones en una serie de datos, que bien se obtienen localmente o bien provienen de otros nodos o del entorno. A continuación se detallan los diferentes datos que pueden utilizar estos protocolos, indicando para cada uno de ellos las soluciones que se pueden implementar dependiendo de cada tipo de datos:

- **Información de localización:** la posición geográfica puede ser obtenida, entre otros métodos, utilizando localizadores GPS, triangulando con elementos que tienen una posición conocida, o mediante la definición explícita por parte del administrador del sistema. Esta información se utiliza principalmente para llevar a cabo el control de la topología, proporcionando a los nodos información sobre sí mismos y sobre sus vecinos, para que puedan seleccionar el nodo o nodos destino y para ajustar la potencia de la radio con el fin de que los datos lleguen a su destino con la calidad deseada.
- **Información de los vecinos:** durante la auto-organización de una red de sensores, y en general de cualquier red informática, el conocimiento de información relativa a los nodos vecinos es un parámetro clave a la hora de tomar las decisiones en cuanto a quién se le envía y de quién se recibe información. Para llevar a cabo el mantenimiento de la información de los vecinos, los diferentes protocolos programan el envío periódico de un tipo determinado de paquete conocido como *hello messages*, que contienen información local, de forma que los nodos vecinos conozcan, con menor o mayor precisión, el estado de sus vecinos. La información relativa a los nodos que se encuentran al alcance (están dentro del rango de cobertura de un determinado nodo), es utilizada por distintos protocolos para llevar a cabo enrutamiento basado en tablas, que mantiene información actualizada de sus posibles fuentes y destinos de datos. También es utilizada para el control de acceso al medio, permitiendo que las tareas de sincronización se lleven a cabo de forma efectiva.

- **Estado local:** la información local esta siempre disponible. En las redes de sensores, el estado interno de los nodos puede ser manipulado en función de determinados factores. Por ejemplo, la carga de la batería puede determinar la frecuencia de envío de datos. Conocer el estado actual del nodo permite a diversos protocolos de enrutamiento basados en datos, tomar las decisiones oportunas para, por ejemplo, realizar agregación de datos de forma más efectiva. La información local también es utilizada para llevar a cabo la asignación de roles. Esta técnica combina la información de los vecinos con la información local de los nodos para determinar las tareas que cada nodo desempeñará.
- **Información probabilística:** al contrario de lo que pudiera pensarse, en algunos casos resulta efectivo no tener en cuenta datos reales, y utilizar en su caso datos obtenidos con funciones probabilísticas. Existen diversas técnicas que utilizan la información probabilística para llevar a cabo la prevención de los efectos de la sincronización global que influyen en la eficiencia global del sistema. Las técnicas de prevención de colisiones también usan esta información para, por ejemplo, calcular el tiempo de espera de un reenvío tras una colisión.

Generalmente, las técnicas de auto-organización utilizan una o varias de estas fuentes de datos. Esta clasificación ayuda a entender qué información utilizan estas técnicas para tomar las decisiones oportunas.

Otra forma de clasificar los algoritmos y protocolos de auto-organización es según en la capa de la arquitectura donde trabajan:

- **Capa de acceso al medio:** los mecanismos de auto-organización utilizan esta capa para llevar a cabo tareas de sincronización, programar ciclos de trabajo reducidos, y planificar acceso concurrente al canal.
- **Capa de red:** en esta capa, las técnicas de auto-organización se centran en el enrutamiento de la información desde el origen hasta el destino.
- **Capa de aplicación:** dejando a un lado la finalidad de la aplicación, algunas tareas relativas a la auto-organización se realizan en esta capa, como por ejemplo ajustes en el comportamiento de los nodos en función de la información recogida por los sensores.

Tradicionalmente, los modelos de arquitectura de red planteaban una serie de capas independientes, dotadas de interfaces para comunicarse con las capas

adyacentes. Nuevas propuestas para redes de sensores definen arquitecturas en las que las capas pueden comunicarse de forma directa, sin utilizar capas intermedias. Es por esto que algunas de las técnicas de auto-organización que se detallan mas adelante realizan sus funciones en más de una capa, permitiendo así incrementar su eficiencia.

Las diversas técnicas de auto-organización utilizan diferentes combinaciones de las características y capacidades descritas, para completar sus tareas. A continuación se muestran las propuestas de auto-organización más relevantes encontradas en la literatura.

2.2.2. Técnicas de auto-organización

El creciente interés por las redes de sensores inalámbricas ha hecho que diversos centros de investigación y organismos de estandarización se hayan decantado por el desarrollo de técnicas de auto-organización para este tipo de redes. A continuación se resumen algunas de las propuestas más relevantes en este ámbito.

Una de las técnicas de auto-organización más recientes se presenta en [71], donde se describe un esquema de programación para sistemas masivamente distribuidos que son auto-organizados, siguiendo un conjunto de reglas simples. Este trabajo se basa en las cascadas de información que se pasan unas células a otras en los organismos biológicos. El sistema desarrollado utiliza información tanto local, como de los vecinos, así como funciones probabilísticas. La actuación del protocolo propuesto se centra en las capas de aplicación y red, aunque también realiza una sincronización básica a nivel MAC. Para ello utiliza un conjunto de reglas que permite manejar los intercambios de información de forma eficiente y efectiva. Los experimentos se centran en evaluar la eficiencia en aplicaciones con requerimientos en tiempo real y en el *overhead* generado, demostrando que el sistema es capaz de llevar a cabo acciones colaborativas y procesamiento de los datos en redes de sensores y actuadores utilizando software basado en reglas.

Hay otras propuestas que actúan en varias capas de la arquitectura. Un buen ejemplo lo encontramos en [72], en donde se propone un diseño *cross-layer* que combina acciones en las capas de red y de acceso al medio. Para el acceso al medio, propone la eliminación de los *hello messages*, sustituyéndolos por un protocolo de descubrimiento de vecinos que opera bajo demanda. En cuanto a la capa de red, propone un protocolo de enrutamiento geográfico, con el fin de minimizar el consumo de energía durante las tareas de comunicación.

Los resultados de los experimentos muestran una reducción en la longitud de los caminos, reduciendo así el consumo de energía.

También existen trabajos que centran la auto-organización en un único nivel de la arquitectura, permitiendo la utilización de otras propuestas para otros niveles. A nivel MAC, cabe destacar el trabajo presentado en [73] donde se propone el uso de un planificador que sincroniza los nodos a la vez que se lleva a cabo una auto-organización de la red en forma de árbol básico. Los experimentos con nodos reales muestran una reducción de los tiempos de escucha ociosa, reduciendo así el consumo energético.

En [74] se presenta una técnica para llevar a cabo la creación de clústers con el objetivo de reducir el consumo energético. El algoritmo propuesto, llamado *persistente* es capaz de auto-organizar la red en clústers de tamaños determinados, con el fin de no sólo reducir el consumo, sino también de que las estructuras lógicas resultantes sean eficientes a la hora de realizar las comunicaciones. Los resultados de los experimentos muestran que la ejecución del algoritmo *persistente* permite ajustar de forma eficiente el número y tamaño de los clústers creados. Otro trabajo interesante que también se centra en la capa de red es [75], que propone la integración de dos estructuras virtuales para llevar a cabo la auto-organización de la red: un *backbone* central y clústers conectados a él. El procedimiento se divide en tres fases: primero, se lleva a cabo el descubrimiento de los vecinos; entonces, se construye el *backbone* de forma que cualquier nodo se encuentre -a lo sumo- a un determinado número de saltos de los nodos que componen el *backbone*. Finalmente, basándose en el recién creado *backbone* virtual, se seleccionan los nodos cabeza de clúster, que serán la base para permitir la conectividad del resto de nodos de la red. Los resultados muestran un incremento en la conectividad global de la red, reduciendo también los tiempos de convergencia. Una vez creada la estructura lógica, se propone el uso de diferentes protocolos de enrutamiento para llevar a cabo las tareas de comunicación en la red.

El sistema LEGOS (*Low Energy Self-Organisation Scheme for WSN*) [76], es otro ejemplo de técnicas de auto-organización que trabajan en la capa de red. Esta es también una aportación para llevar a cabo la creación de clústers en la red. La novedad de esta propuesta radica en la limitación en el envío de los mensajes *hello*, que son enviados únicamente por determinados nodos. El sistema define tres roles a cumplir por los nodos: *leader*, *gateway* y *member*. Los nodos *member* únicamente se comunican con sus *leaders*, mientras que los *gateways* se encargan de intercomunicar los diferentes *leaders*. El algoritmo proporciona mecanismos para la incorporación y eliminación de nodos, así

como para gestionar la partición lógica de la red en diferentes clústers. Los experimentos realizados confirman los resultados obtenidos mediante análisis matemático, demostrando que la propuesta logra un ahorro cercano al 20% en cuanto a consumo energético se refiere, con respecto a otros esquemas que utilizan el envío periódico de mensajes *hello*. Este trabajo es completado en [77], integrando en el sistema el protocolo B-MAC, que proporciona acceso al canal eficiente, permitiendo reducir aún más el consumo energético de los nodos.

La asignación de diferentes tareas a los nodos de una red dependiendo de su estado, es conocida como asignación de roles. Esta técnica ha sido utilizada en un gran número de propuestas que combinan diferentes parámetros y procedimientos con el fin de aumentar las prestaciones de la red. A continuación se detallan algunas de las propuestas más relevantes en este campo.

2.2.2.1. Auto-organización mediante asignación de roles

La asignación de roles consiste en otorgar diferente funcionalidad a los nodos o grupos de nodos para conseguir un mejor rendimiento de la red. Estas técnicas utilizan tanto datos locales como de los vecinos. Un ejemplo sencillo de un algoritmo de asignación de roles implícito es el encaminamiento multihop en el que los datos de los nodos lejanos son reenviados por nodos intermedios hacia la estación base. Este sencillo esquema ya define tres roles: estación base, nodos recolectores de datos y nodos enrutadores que reenvían los datos de los nodos más lejanos.

Al igual que para las técnicas de auto-organización, también existen diferentes clasificaciones para las propuestas de asignación de roles. Para ilustrar de manera clara las diferentes tendencias en cuanto a asignación de roles se refiere, la siguiente clasificación muestra los diversos paradigmas basándose en la forma en que se toman las decisiones y los datos que son tenidos en cuenta para ello.

Basados en reglas. El uso de reglas para la toma de decisiones en el ámbito de las redes de sensores es ampliamente utilizado tanto a nivel de red [78] como a nivel de auto-organización global [71]. Para asignar roles siguiendo un esquema basado en reglas, los nodos almacenan las reglas y las evalúan teniendo en cuenta parámetros tanto internos como referentes a los vecinos. Cuando se satisfacen las reglas necesarias, los roles son asignados. Estas reglas utilizan bajos recursos de procesamiento, por lo que pueden ser ejecutadas en los nodos sensores sin suponer una gran carga ni consumir grandes cantidades

de energía. Un ejemplo de utilización de roles basados en reglas es el middleware TinyCubus [79], un marco flexible y adaptativo cross-layer para manejar redes de sensores basadas en TinyOS que pretende proporcionar la infraestructura necesaria para facilitar el desarrollo de aplicaciones para redes de sensores.

Basadas en la aplicación. El análisis de los parámetros de aplicación para llevar a cabo la asignación de roles utiliza las características propias de cada aplicación para decidir la funcionalidad de cada nodo o grupo de nodos. Los algoritmos ubicados dentro de este paradigma analizan los requerimientos de la aplicación que se va a ejecutar en la red para decidir los roles necesarios y qué nodos los ejecutarán. Dentro de este marco se encuentra *Role-based Middleware for Wireless Sensor Networks* [80], que está siendo desarrollado en las universidades de Arizona y Wayne. Es un marco genérico basado en roles que sirve como fundamento para la portabilidad entre plataformas y aplicaciones.

Balanceo de carga en árboles basado en roles. Dado el gran número de redes de sensores que siguen una organización en forma de árbol, han surgido técnicas de asignación de roles que permiten mejorar el funcionamiento de estas redes utilizando diversos roles para los diferentes nodos, de forma que habrá nodos que simplemente recojan datos del entorno y nodos -dedicados o no-, que reenvíen datos provenientes de otros nodos. DFuse, [81] es un ejemplo de algoritmo que organiza la red en forma de árbol y permite el balanceo de la carga a través de la migración de roles. DFuse es un marco para redes de sensores que pretende maximizar la vida de la red centrándose en el rol que desempeña cada mote mientras los datos viajan desde los nodos sensores hasta el nodo sumidero. Para ello, se utiliza una estructura de árbol en la que los nodos con más recursos actúan como recolectores de datos.

Basados en la situación de los nodos. Un aspecto importante que facilita en gran medida las comunicaciones entre los nodos, es su situación dentro de la red. Aspectos tales como qué variables del entorno se pueden detectar y con qué nodos se puede comunicar, dependen directamente del lugar en que estén situados los nodos. Para este tipo de algoritmos que basan su comportamiento en la ubicación de cada nodo o grupo de nodos, es interesante la posibilidad de incorporar capacidad de movimiento a los nodos.

Un ejemplo de algoritmo de asignación de roles basado en la ubicación de los nodos es *Sensor Placement and Role assignment for energy-efficient*

INformation Gathering (SPRING) [82], desarrollado por la NASA y por la Universidad de Maryland. Sus objetivos principales son dos: maximizar el área cubierta por la red de sensores partiendo de una especificación de las zonas de interés, y maximizar el tiempo de vida de la red. En SPRING, además del nodo root o sumidero mediante el que el administrador interactúa con la red, se definen dos tipos más de nodos, nodos sensores, encargados de recoger datos del medio, y nodos *relay*, que se encargan de reenviar los paquetes que reciben desde los nodos sensor hasta el nodo sumidero. El algoritmo desarrollado utiliza una mezcla entre asignación de roles y movimiento de los nodos, ya que deben cubrirse siempre las zonas de interés y tanto los nodos sensores como los relay deben encontrarse lo más cerca posible de aquellos otros nodos a los que deben enviarles los datos, con el fin de que la amplificación de la señal de radio sea mínima para así lograr el máximo ahorro de energía.

Todos estos algoritmos explican cómo organizar la red para conseguir unos objetivos determinados centrándose por ejemplo en maximizar su tiempo de vida, facilitar la portabilidad o maximizar la cobertura. A continuación se detallan una serie de pautas generales que deben ser tenidas en cuenta a la hora de desarrollar mecanismos de auto-organización.

2.2.3. Pautas de desarrollo para mecanismos de auto-organización en redes de sensores

Como se ha comentado anteriormente, diversos experimentos llevados a cabo por nuestro grupo con aplicaciones de monitorización ambiental reales, pusieron de manifiesto algunos problemas a la hora de realizar las comunicaciones. En primer lugar, los paquetes enviados por la red tardaban demasiado tiempo en alcanzar su destino. Tras el análisis de los resultados de las pruebas, se comprobó que los nodos erraban al decidir a qué nodo enviar sus datos. Por ello, y antes de tomar cualquier decisión sobre si desarrollar una técnica de auto-organización nueva o adoptar alguna de las disponibles en la literatura, se realizó un amplio estudio del estado del arte sobre este tipo de técnicas. Las diversas técnicas estudiadas no se ajustaban a los requerimientos de nuestra aplicación de monitorización, bien por los parámetros considerados en la toma de decisiones, como por la falta de resultados en redes compuestas por un gran número de nodos. Por esto, se determinó llevar a cabo el desarrollo propio de una técnica que resolviese los problemas encontrados (principalmente retardos

excesivos, pérdida de paquetes y consumo de energía). De esta forma, se estudiaron los principios que constituyen la base para el desarrollo de un protocolo de auto-organización [83]:

- Diseño de reglas de comportamiento locales que permitan cumplir objetivos globales: la auto-organización utiliza como base la distribución de las tareas entre las entidades individuales. De esta forma se elimina la necesidad de tener una entidad central encargada de controlar al resto, y cada entidad contribuye a completar un comportamiento colectivo. Se deben diseñar reglas que conduzcan a un comportamiento localizado que, al aplicarlas a todas las entidades del sistema, consigan completar los objetivos marcados de forma automática.
- No buscar una perfecta coordinación, explotar la coordinación implícita: este principio se centra en el ahorro de información, cuando ésta puede obtenerse mediante la observación del medio. Coordinación implícita significa que la información de coordinación no se consigue de forma explícita por mensajes especiales, sino que es inferida desde el entorno local. Por ejemplo, un nodo escucha el medio y detecta la presencia de nodos vecinos sin que éstos le hayan enviado mensajes de forma directa.
- Minimizar la información persistente: es recomendable que la información relativa a otros nodos o a aspectos de la red misma pueda ser descubierta por los nodos de manera automática. De esta forma, se evita la necesidad de ajustar parámetros manualmente, permitiendo que los nodos sean autónomos.
- Diseñar protocolos capaces de adaptarse a los cambios: los nodos pueden experimentar alteraciones en diversos aspectos como el cambio en las restricciones de recursos, movilidad o fallo de los nodos. Dado que no se cuenta con control centralizado, cada nodo debe monitorizar periódicamente su estado y el de sus vecinos con el fin de ser capaces de reaccionar ante cambios inesperados. En los protocolos de auto-organización se pueden distinguir varios niveles de auto-adaptación a los cambios:
 1. Un protocolo o algoritmo es capaz de manejar ligeros cambios como fallo de nodos y movilidad.
 2. El sistema es capaz de adaptar sus propios parámetros como una reacción ante cambios en las condiciones actuales, con el fin de optimizar el rendimiento de la red.

3. El protocolo o algoritmo de auto-organización es diseñado para identificar cambios severos que inutilicen el mecanismo empleado, y es capaz de volver a auto-organizarse de forma que el funcionamiento sea restablecido.

El amplio rango de tareas que pueden ser llevadas a cabo por las técnicas de auto-organización, las directrices que deben ser tenidas en cuenta a la hora de su desarrollo y los problemas detectados en los experimentos con redes reales, motivaron la decisión de comenzar el desarrollo de una parte importante de la auto-organización: el enrutamiento.

Las aplicaciones de monitorización con las que hemos trabajado son, por lo general, estáticas. Los nodos se distribuyen de manera uniforme en la zona a monitorizar y la Estación Base se coloca en las inmediaciones, de forma que esté y tenga al alcance, el mayor número de nodos posible. Durante la puesta en marcha de la red, los principales problemas observados fueron la pérdida de paquetes y el alto retardo de las comunicaciones extremo a extremo. Posteriormente, se comprobó que algunos nodos agotaban su batería mucho antes de lo previsto en su hoja de características. Por esta razón, se decidió que el algoritmo de enrutamiento a definir debía considerar, entre otros parámetros, la energía disponible de los nodos.

Antes de comenzar la especificación de nuestro propio algoritmo de encaminamiento, se realizó un amplio estudio de técnicas de enrutamiento, presentes en la literatura para redes de sensores, con el fin de comprender el funcionamiento de estas técnicas y así elegir el tipo de técnica de encaminamiento a desarrollar. Este estudio se resume a continuación.

2.3. Enrutamiento en redes de sensores

El enrutamiento o encaminamiento es definido por la R.A.E. como *dirigir algo hacia un punto determinado*. En el contexto de las redes de comunicación podría describirse como *los mecanismos necesarios para llevar a cabo la transmisión de datos desde una fuente a un destino*.

En el caso de las redes de sensores inalámbricas, un protocolo de encaminamiento permite que la red sea capaz de establecer por sí misma las rutas necesarias de forma correcta y eficiente, permitiendo así, que los datos sean entregados de manera fiable [84].

Las características especiales de las redes de sensores inalámbricas hacen que en el desarrollo de esquemas de encaminamiento para este tipo de redes se deban tener en cuenta diversos aspectos [85, 86]:

- **Limitación de recursos:** restricciones en cuanto a recursos como la energía disponible y las capacidades de procesamiento y memoria.
- **Heterogeneidad de los nodos:** es posible que dentro de la misma red coexistan diferentes tipos de nodos. En este caso, el protocolo de encaminamiento debe ser capaz de solventar los problemas que pudieran presentarse al coexistir nodos con diferente hardware o distintas interfaces de radio.
- **Medio de transmisión:** se deben considerar los problemas asociados al medio inalámbrico como las interferencias, la atenuación de la señal, o las posibles colisiones.
- **Cobertura y conectividad:** dada la limitada cobertura de los nodos, debe asegurarse la conectividad de toda la red, evitando el aislamiento de nodos.

La consideración de estos factores asegurará el éxito de los protocolos de encaminamiento desarrollados.

2.3.1. Requisitos para el encaminamiento en WSN

Las características anteriormente descritas, distinguen a las redes de sensores del resto de redes inalámbricas. Para que el enrutamiento de los datos se lleve a cabo de manera eficiente, los protocolos deben cumplir una serie de requisitos [87, 88]:

- Convergencia rápida de rutas, libre de bucles y eficientes.
- Eficiencia en cuanto a ancho de banda, potencia de transmisión y computación.
- Escalabilidad: los protocolos de encaminamiento deben ser capaces de crear rutas en redes formadas por un gran número de nodos.
- Tolerancia a fallos: la eliminación e incorporación de nuevos nodos, así como el posible fallo de algunos de ellos deben ser manejados de forma efectiva.

- **Calidad de servicio:** para determinadas aplicaciones, es recomendable la implementación de mecanismos que aseguren la llegada de los datos al destino.

Estos requisitos deben ser satisfechos con la menor sobrecarga posible, tanto en el número de mensajes como en el procesamiento de la información y en el uso de memoria. Esto asegurará el éxito de la propuesta.

2.3.2. Principios de diseño

A la hora de diseñar un protocolo de encaminamiento, deben tenerse en cuenta las características anteriormente descritas, así como las siguientes pautas de diseño [89, 87]:

- **Simplicidad y facilidad de implementación:** de esta forma, se asegurará el buen funcionamiento y la eficiencia del protocolo diseñado.
- **Naturaleza distribuida:** con el fin de que los nodos sean capaces de encontrar las rutas de manera automática, debe diseñarse un comportamiento individual que colabore a la consecución de los objetivos colectivos.
- **Bajo consumo de recursos:** con el objetivo de aumentar, en la medida de lo posible, el tiempo de vida de la red.
- **Evitar la pérdida de precisión:** los datos deben llegar íntegros al destino.

El cumplimiento de estas pautas facilitará la creación de un protocolo de enrutamiento eficiente a la vez que efectivo. La variedad de aplicaciones de las redes de sensores, ha propiciado la creación de gran cantidad de protocolos de encaminamiento. A continuación se muestra una taxonomía (de entre las muchas disponibles), que pretende ilustrar los diferentes tipos de protocolos de encaminamiento que se pueden encontrar en la literatura.

2.3.3. Características de los protocolos de enrutamiento

Los diferentes aspectos a considerar y las diversas formas de actuar, han propiciado el desarrollo de una gran diversidad de protocolos de enrutamiento

para redes de sensores. Con el objetivo de encuadrar las diferentes propuestas, a continuación se detallan las diferentes características que pueden serle atribuidas a estos protocolos, clasificadas en diversas categorías [86, 87, 89]. La Figura 2.20 ilustra esta clasificación.



Figura 2.20: Clasificación de las características de los protocolos de enrutamiento para redes de sensores

Por lo general, los protocolos de enrutamiento para redes de sensores presentes en la literatura pueden encuadrarse en una o varias de estas categorías. A continuación se detallan las diferentes formas de clasificar estos protocolos atendiendo a la clasificación mostrada en la Figura 2.20.

Según el servicio prestado. La seguridad de que los datos llegarán al destino es uno de los requisitos de algunas aplicaciones como las de vigilancia, en la que un aviso de intrusismo o un mensaje que avise de la detección de un incendio debe ser entregado en el destino asegurando que no haya ningún fallo en la comunicación. Por lo tanto dependiendo del tipo de servicio que ofrezcan, podemos distinguir:

- *Best effort*: el protocolo hará todo lo posible por entregar los datos en el destino, pero no proporciona mecanismos para asegurarlo.
- *QoS*: en este caso, el protocolo asegura que los datos llegarán al destino con cierto nivel de calidad de servicio.

Según el modo de planificación. Otra forma de clasificar los protocolos de enrutamiento para redes de sensores es la forma en la que llevan a cabo el descubrimiento de las rutas.

- *Proactivo*: las rutas son creadas antes de ser necesitadas, de forma que los nodos tienen las rutas disponibles en el momento que desean enviar datos. Este tipo de enrutamiento requiere información actualizada de los vecinos con el fin de tener siempre lista cualquier ruta eventual.
- *Reactivo*: en este caso, las rutas son creadas bajo demanda, es decir, si el nodo no dispone de la ruta hacia el destino deseado, llevará a cabo el proceso de descubrimiento necesario. Este esquema no necesita llevar a cabo un mantenimiento de la información de los vecinos tan exhaustivo como en el caso del enfoque proactivo, pero por contra, posee un mayor retardo.
- *Híbrida*: puede darse una combinación entre los dos tipos anteriores de enrutamiento. Por ejemplo, pueden definirse previamente los caminos desde cualquier nodo hasta la Estación Base, y descubrir bajo demanda los posibles caminos entre los nodos.

Modo de actualización de la información. Para llevar a cabo el descubrimiento y mantenimiento de las rutas, los nodos necesitan conocer información relativa a los vecinos. Existen varias formas de mantener esta información actualizada.

- *Periódica*: los nodos envían cada cierto tiempo mensajes *Hello* que contienen información local, permitiendo así a los vecinos actualizar sus tablas.
- *Bajo demanda*: en este caso, el nodo que desee obtener algún tipo de información de sus vecinos será el encargado de solicitarla.
- *Híbrida*: pueden combinarse los dos tipos de actualización ya definidos. De esta forma se podría actualizar la información importante de forma periódica y ocasionalmente, obtener otro tipo de información.

Según el cálculo de rutas. Dependiendo de quién sea el encargado o encargados de calcular las rutas, los protocolos de enrutamiento para redes de sensores se dividen en:

- *Centralizado*: un administrador del sistema o un dispositivo con mayor capacidad de procesamiento que los nodos es el encargado de llevar a cabo el descubrimiento y mantenimiento de rutas. Debido al tamaño de las redes de sensores este método es el menos utilizado, ya que requiere un conocimiento completo de la red.
- *Descentralizado*: cada nodo mantiene información global y completa sobre todos los dispositivos de la red, de forma que puede computar en cualquier momento una ruta hacia cualquier destino.
- *Distribuido*: es el método de cálculo de rutas más utilizado en redes de sensores, ya que los nodos sólo necesitan mantener información de sus vecinos. Cuando un nodo necesita descubrir un camino hacia un destino, varios nodos colaboran para descubrir la ruta.

Conforme al modo de transmisión El modelo de transmisión define qué destinatarios recibirán los paquetes. Existen varias posibilidades:

- *Unicast*: consiste en la comunicación entre dos nodos, es decir, entre un nodo fuente y un único nodo destino.
- *Broadcast*: es el modo de comunicación básico en un canal inalámbrico. Los mensajes enviados por un nodo son escuchados por todos sus vecinos. Este modo suele utilizarse en el descubrimiento de vecinos.
- *Multicast*: permite a un nodo enviar la misma información a varios destinos. Permite la definición de grupos *multicast*, y es utilizado por los protocolos de inundación.
- *Geocast*: es un caso particular del modo *Multicast* en el que los paquetes son entregados a un grupo de nodos situados dentro de un área geográfica determinada.

Según el esquema de direccionamiento. El direccionamiento se centra en la organización de la red en niveles jerárquicos lógicos. Se pueden definir dos tipos de direccionamiento que influirán de forma directa en el esquema de encaminamiento:

- *Plano*: todos los nodos de la red se encuentran al mismo nivel y no existe jerarquía.
- *Jerárquico*: los nodos están estructurados en diferentes niveles. Este esquema de direccionamiento suele usarse en los protocolos de enrutamiento basados en clúster, en los que los nodos de nivel superior son los cabeza de clúster, y los de nivel inferior están asociados a algún cabeza de clúster.

Atendiendo al número de caminos. Normalmente los protocolos de encaminamiento para redes de sensores se limitan al descubrimiento de una única ruta entre una fuente y un destino. Otros llevan a cabo el descubrimiento de varios caminos hacia el mismo nodo destino, permitiendo al nodo origen seleccionar la ruta que más convenga en cada momento.

- *Camino único*: la búsqueda de un único camino permite el ahorro de memoria, ya que es necesario almacenar menos datos que si se tienen varios caminos para un mismo destino. Esto simplifica la obtención de la información así como el algoritmo de búsqueda.
- *Caminos múltiples*: los protocolos que descubren varios caminos son más robustos y confiables, ya que los nodos disponen de varias alternativas para realizar envíos a un mismo destino. Los protocolos que ofrecen calidad de servicio suelen implementar este sistema con el fin de asegurar la recepción de los datos por parte del destinatario.

Esta clasificación será de gran ayuda a la hora de identificar los diferentes aspectos de las propuestas presentes en la literatura.

2.3.4. Propuestas de enrutamiento más utilizadas en redes de sensores

Existe gran variedad en cuanto a las propuestas de enrutamiento para redes de sensores. Algunas de ellas son adaptaciones de las técnicas de enrutamiento tradicionales a las propiedades de estas redes, y otras en cambio, han sido desarrolladas desde cero.

Prácticamente todos los protocolos se centran en una de las tres topologías principales: malla, árbol/estrella y clúster. En este trabajo nos vamos a centrar en las dos primeras, ya que las redes basadas en clúster, por sus propiedades

y características diferenciadoras, constituyen un enfoque que queda fuera del alcance de esta tesis.

Con el fin de hacer corresponder cada protocolo con la clasificación mostrada en la Figura 2.20, se distinguirán las diferentes propuestas siguiendo los diferentes criterios de planificación: proactivo, reactivo e híbrido. Cabe destacar que la mayoría de los protocolos que se detallan a continuación son de código abierto, es decir, su especificación es de dominio público encontrándose disponible en los RFC (*Request For Comments*) publicados por la IETF (*Internet Engineering Task Force*) [90].

2.3.4.1. Protocolos de encaminamiento proactivos

Para llevar a cabo el cálculo de rutas antes de ser necesitadas, y para gestionar su mantenimiento, los protocolos proactivos envían información de enrutamiento de forma periódica, para que en cualquier momento cualquier nodo pueda comunicarse con cualquier otro de la red. De esta forma, se obtiene una rápida respuesta ante solicitudes de ruta, aunque debe controlarse el nivel de sobrecarga introducido en el sistema. Las propuestas de enrutamiento detalladas en los Capítulos 3 y 4 están basadas en este tipo de protocolos.

Destination Sequence Distance Vector. En DSDV [91], los nodos mantienen tablas de enrutamiento que contienen todos los posibles destinos, así como información relativa a la distancia a cada uno de ellos. Utiliza números de secuencia para evitar el uso de rutas obsoletas. Para asegurar la consistencia de las tablas, éstas son actualizadas gracias al envío periódico de mensajes de información. Para contener la sobrecarga, se utilizan dos tipos de paquetes: *full dump*, que contienen toda la información relativa al encaminamiento y paquetes *incremental* que únicamente contienen la información actualizada desde el envío del último *full dump*. El rendimiento de este protocolo en redes de sensores es analizado en [92], presentando buenos resultados en términos de retardo extremo a extremo y cantidad de paquetes descartados, pero no se muestran resultados sobre el consumo de energía ni sobre la calidad de las rutas creadas.

Optimized Link State Routing. El protocolo OLSR se encuentra definido en el RFC 3626. Utiliza como base información sobre el estado de los enlaces, que es mantenida gracias a mensajes *Hello* y un tipo de mensaje especial llamado *Topology Control*, que permiten llevar a cabo el descubrimiento

y mantenimiento de las rutas. Los nodos utilizan esta información para computar el siguiente salto utilizando como métrica el número de saltos. En [93] se compara este rendimiento con el del protocolo AODV, que será detallado más adelante, obteniendo un notable ahorro de energía.

Tree Routing. Este protocolo es implementado en la capa de red del estándar ZigBee [1] para topologías en árbol. Se centra en la creación de un árbol de comunicaciones, en el que todos los nodos de la red se van a comunicar con una Estación Base. Para llevar a cabo la creación de este árbol, la Estación base anuncia su presencia mediante el envío de un mensaje de descubrimiento. Los nodos que reciben este aviso, envían un mensaje de descubrimiento propio e inician un temporizador. Cuando el temporizador expira, cada nodo decide su nodo padre basándose en el número de saltos y en información de estado del enlace. Este proceso se propaga por todos los nodos de la red. Este protocolo será detallado en el Capítulo 3 ya que será comparado con la primera propuesta de esta tesis.

2.3.4.2. Protocolos de encaminamiento reactivos

En los protocolos reactivos, las rutas son establecidas bajo demanda, es decir, las rutas son establecidas cuando los nodos fuente necesitan enviar los datos al destino y no antes, como es el caso de los protocolos proactivos. Estos protocolos suelen presentar problemas en cuanto a sobrecarga de mensajes y tiempo de descubrimiento de rutas.

Ad hoc On demand Distance Vector routing. AODV es definido en el RFC 3561, y es el protocolo utilizado por defecto en el estándar ZigBee para enrutar datos en redes en malla. Utiliza tablas de enrutamiento tradicionales y mantiene números de secuencia para prevenir bucles y evitar rutas obsoletas. El descubrimiento de rutas está basado en ciclos de petición y respuesta, y la métrica utilizada es el número de saltos desde la fuente hacia el destino. En términos generales, cuando un nodo desea enviar datos a un destino, envía mediante *broadcast* un mensaje de petición de ruta. Este mensaje es propagado a través de la red, y cualquier nodo que conozca el camino hacia el destino, o el mismo destino, contestarán esta petición con la ruta solicitada. Una vez que la fuente ha recibido esta respuesta, puede enviar los datos hacia el destino. Si algún error ocurre durante el tiempo de vida de las rutas, AODV está dotado de mecanismos para avisar a los posibles usuarios de esas rutas para evitar su

uso. Este protocolo es detallado en el Capítulo 5 donde se proponen diversas mejoras para mejorar la toma de decisiones.

Dynamic Source Routing (DSR). Este protocolo es descrito en el RFC 4728 [94]. Permite a la red auto-organizarse y auto-configurarse. Se basa en el concepto de encaminamiento en origen y lleva a cabo dos procesos básicos: *descubrimiento de rutas*, en el que se utiliza una técnica de inundación para descubrir nuevas rutas, y el *mantenimiento de rutas*, que permite detectar y notificar cambios en la topología de la red de forma periódica. Ambos procesos se ejecutan de forma concurrente para permitir a los nodos descubrir y mantener rutas hacia los caminos deseados. En [95] se lleva a cabo una comparación de rendimiento que demuestra la superioridad de DSR con respecto a AODV al ser ejecutados en redes de sensores inalámbricos.

Temporally Ordered Routing Algorithm. TORA se define en [96]. Basa su funcionamiento en un algoritmo de tipo *link reversal*, que mantiene un grafo dirigido y sin ciclos. La idea es asignar pesos a los nodos dependiendo de su localización con respecto al destino. A la hora de enrutar los datos, éstos son enviados al vecino con un menor peso. Así, los datos encontrarán un camino al destino atravesando cada vez nodos de menor peso. Las rutas creadas por TORA no siempre son las más cortas, pero minimiza la sobrecarga asociada al enrutamiento. Además, soporta la creación de múltiples rutas, envíos *multicast* y nodos móviles.

Geographical Multicast routing. GMR [97] es una propuesta de enrutamiento geográfico para redes de sensores, que además incorpora soporte para el envío de datos a múltiples destinos. Este protocolo basa sus decisiones en una métrica acumulativa que considera el coste del envío de datos a través de nodos intermedios para entregar los datos a un grupo de nodos determinado.

Geographic and Energy Aware Routing. GEAR [98], es un protocolo de encaminamiento geográfico para redes de sensores cuyo objetivo es el ahorro de energía. Utiliza una combinación de la energía restante y la distancia a la zona de destino para llevar a cabo la selección de rutas. Los experimentos llevados a cabo con esta propuesta muestran una reducción del consumo energético de los nodos en cuanto a comunicaciones se refiere, pero no se proporcionan resultados sobre el coste asociado al cálculo de la posición, que los nodos han de llevar a cabo antes de comenzar a recoger los datos del entorno.

Sensor Protocol for Information via Negotiation. SPIN [99], es una familia de protocolos orientados a datos. El funcionamiento general se basa el siguiente intercambio de datos: petición de envío por parte del nodo fuente, respuesta del destino anunciando que está listo para recibir, envío de datos por parte de la fuente y confirmación por parte del destino. Los protocolos SPIN poseen mecanismos para evitar la redundancia de los datos, y ajustan las tareas de cada nodo a la cantidad de energía disponible. Los experimentos muestran buenos resultados en términos de consumo energético y tasa de envío de datos, pero no consideran la sobrecarga que provoca el intercambio de paquetes entre la fuente y el destino, previo al envío de datos.

2.3.4.3. Mejoras de protocolos de enrutamiento existentes y análisis de rendimiento

Existen diversos trabajos donde se plantean mejoras del funcionamiento de algunos de los protocolos de enrutamiento anteriormente mencionados, así como diversas adaptaciones de los mismos a determinadas necesidades de red o de aplicaciones particulares. Por ejemplo, en [100, 101] se plantea el uso de las tablas de enrutamiento definidas en el estándar ZigBee para mejorar el rendimiento del protocolo *Tree Routing*, llevando a cabo los envíos según estas tablas sin ser necesario seguir la forma del árbol definida por la topología. Otra mejora relativa al encaminamiento de ZigBee se presenta en [102], donde se proponen dos soluciones: primero, el uso de una nueva métrica basada en el número de nodos *router* existentes entre el nodo origen y el destino, y segundo, un mecanismo para elegir el canal más adecuado en nodos que posean varias interfaces de radio.

El uso de las tablas de enrutamiento para el *Tree Routing* de ZigBee es también propuesto en [103], donde también se proponen mecanismos para reducir el número de comunicaciones necesarias al ejecutar AODV. Los resultados de simulación muestran mejoras en cuanto al retardo extremo a extremo y en el número de paquetes entregados con éxito al destino.

En cuanto a comparación de rendimiento se refiere, en [104] se lleva a cabo un estudio comparativo entre AODV, DSDV y una versión mejorada de este último, Improved-DSDV (I-DSDV). Los resultados muestran que I-DSDV funciona mejor que DSDV cuando crece el tamaño de la red. I-DSDV mejora a AODV, en cuanto a la tasa de recepción de paquetes, pero el retardo extremo a extremo es mayor para I-DSDV, convirtiéndolo en un protocolo no válido para determinadas aplicaciones que requieren rapidez en sus comunicaciones.

AODV, DSR y TORA son comparados en [105]. Los resultados, basados en simulación muestran que AODV funciona bien en todos los escenarios utilizados. También se demuestra el buen comportamiento de DSR en redes con un bajo ratio de movilidad. Por su parte, TORA funciona bien en grandes redes móviles con alta densidad de nodos gracias al soporte multicamino y *multicast*.

Como se ha comentado, existen gran cantidad de técnicas que se pueden aplicar para mejorar los protocolos de enrutamiento para redes de sensores. Una de las mejoras más comunes consiste en cambiar o mejorar la métrica para, por ejemplo, determinar el mejor camino entre origen y destino, reducir el número de paquetes enviados o disminuir el retardo extremo a extremo.

Para este trabajo se optó por utilizar la inteligencia artificial, ya que es una de las técnicas de combinación y evaluación de datos más interesantes, que permite llevar a cabo la evaluación de diversas características de forma eficiente. Además, algunas de estas técnicas tienen un bajo consumo de recursos, por lo que son adecuadas para ser ejecutadas en los nodos de las redes de sensores. A continuación se detallan algunas de las propuestas más relevantes.

2.4. Técnicas de inteligencia artificial aplicadas al enrutamiento en redes de sensores

Durante el desarrollo del algoritmo de enrutamiento que se detallará en el Capítulo 3, se encontraron algunas referencias en la literatura que utilizaban técnicas de inteligencia artificial, como redes neuronales, colonias de hormigas o lógica difusa, para ayudar en la toma de decisiones. Ante los buenos resultados obtenidos por estas técnicas, se decidió la incorporación de estas técnicas, tanto al algoritmo de enrutamiento propuesto, como a los protocolos de encaminamiento utilizados por el estándar ZigBee. Por ello, a continuación se detallan algunas técnicas de inteligencia artificial aplicada a redes de sensores presentes en la literatura.

La inteligencia artificial es utilizada en áreas tan dispares como la minería de datos, robótica, videojuegos, procesamiento del lenguaje natural y en general, en cualquier tarea que incluya toma de decisiones. Aquellas técnicas de inteligencia artificial que requieran baja capacidad de procesamiento y memoria, y que no constituyan un excesivo gasto energético, podrán ser implementadas en los nodos de las redes de sensores para ayudar a lograr ciertos objetivos.

La toma de decisiones relacionadas con las transmisiones de información desde una fuente hacia un destino es uno de los aspectos más importantes en las redes de sensores, por lo que la inteligencia artificial puede ayudar en gran medida a la toma de estas decisiones de forma eficiente, mejorando el rendimiento de la red y extendiendo su tiempo de vida.

A la hora de aplicar estas técnicas a las redes de sensores, hay que tener en cuenta la limitada capacidad de almacenamiento y procesamiento de los nodos, por lo que las técnicas de inteligencia artificial implementadas en éstos deben ahorrar al máximo en cuanto a memoria utilizada y uso de procesador, para que las mejoras proporcionadas no sean una lacra a la hora de ser ejecutadas. Otro factor a tener en cuenta es la sobrecarga que se introduce en el sistema, tanto en tiempo de procesamiento como en número de mensajes de control adicionales, que también debe ser considerado al incorporar las técnicas de inteligencia artificial a los procesos de decisión de los nodos.

En la literatura se pueden encontrar diversas propuestas para llevar a cabo el enrutamiento de los datos en redes de sensores que utilizan en mayor o menor medida técnicas de inteligencia artificial. A continuación se detallan algunos ejemplos, clasificados según la técnica utilizada.

2.4.1. Redes Neuronales

Las redes neuronales constituyen una potente herramienta para ayudar en la toma de decisiones en el funcionamiento de las redes de sensores. Una red neuronal consiste en un conjunto de componentes de procesamiento paralelo o distribuido denominados neuronas que se encuentran conectadas siguiendo una topología determinada. Las neuronas están unidas entre sí mediante conexiones conocidas como sinapsis, que consisten en vectores de pesos que conectan las entradas con las salidas del sistema. De esta forma, el conocimiento de la red neuronal es almacenado en forma de pesos en las conexiones, sin necesitar ningún otro tipo de almacenamiento adicional [106]. En otras palabras, las redes neuronales artificiales son algoritmos aritméticos que son capaces de aprender relaciones complejas entre las entradas y las salidas del sistema, aprendidas mediante entrenamiento supervisado o no supervisado.

Un ejemplo del uso de redes neuronales para la organización de redes de sensores se ve plasmado en [107], dónde se propone SIR (*Sensor Intelligence Routing*), un algoritmo de enrutamiento que hace uso de las redes neuronales para medir la calidad de servicio (QoS) soportada por la red. La definición de QoS está basada en tres parámetros: tiempos de entrega, precisión y exactitud

y para medirlos, se utilizan valores de latencia, tasa de errores, ciclo de trabajo y productividad, que son proporcionados por la red. La implementación está basada en una red neuronal no supervisada. La ejecución del sistema consta de dos fases: una primera fase de aprendizaje, de alto coste computacional (debe ejecutarse en un computador externo), en el que se definen las conexiones entre las neuronas y sus correspondientes pesos. Posteriormente, la fase de ejecución, que demanda menos recursos y puede ser ejecutada en los nodos de la red, se encargará de proporcionar las salidas correspondientes teniendo en cuenta lo aprendido durante la fase anterior. De esta forma, en la fase de aprendizaje el sistema va aprendiendo a reaccionar ante los acontecimientos que se produzcan en la red, para tomar las decisiones correctas en la fase de ejecución.

Otro ejemplo de uso de redes neuronales para llevar a cabo la organización de la red es [108], donde se propone la construcción de una red neuronal para cada nodo de la red, con el fin de obtener mayor rapidez a la hora de realizar el enrutamiento. Al entrenar estas redes neuronales, cada nodo es capaz de seleccionar de manera efectiva el siguiente nodo donde enviar un mensaje dado, reduciendo el consumo de energía y prolongando así el tiempo de vida de la red.

2.4.2. Colonias de hormigas

La Optimización basada en Colonia de Hormigas (ACO) es una técnica de búsqueda inteligente de caminos mínimos cimentada sobre el comportamiento de un grupo de hormigas artificiales que se centran en buscar el camino más corto desde una fuente hacia un destino [109]. Estas hormigas artificiales imitan a las hormigas reales en busca de comida desde el hormiguero hasta el destino. Las hormigas depositan unas sustancias químicas llamadas feromonas, que otras hormigas pueden detectar en su búsqueda del destino. Es necesario el reemplazo periódico de las feromonas, ya que con el tiempo van desapareciendo. De esta forma, los caminos más largos van perdiendo feromonas haciendo que las hormigas vayan por los caminos más cortos, cuya concentración de esta sustancia será mayor.

En la literatura existen diversas técnicas que utilizan la optimización basada en colonia de hormigas para redes ad hoc. Un ejemplo es *AntHocNEt* [110], una propuesta basada en ACO que plantea un algoritmo de enrutamiento para redes ad-hoc. Este algoritmo se centra en encontrar una ruta desde una fuente hasta un destino dado. Las tablas de enrutamiento son mantenidas de forma proactiva, de forma que cuando un nodo desea encontrar la ruta hacia un des-

tino, se va solicitando el siguiente salto a los nodos por los que va pasando el paquete hasta llegar al nodo deseado.

Otra propuesta muy novedosa en cuanto al uso de colonia de hormigas se refiere es HOPNET [111], que pretende paliar importantes problemas de las redes ad-hoc como el descubrimiento de rutas, escalabilidad y fallos en los enlaces utilizando colonias de hormigas para manejar dinámicamente los cambios topológicos y encontrar caminos múltiples de forma eficiente. HOPNET organiza la red en vecindarios, y lleva a cabo descubrimiento proactivo de rutas dentro de los vecindarios así como descubrimiento de rutas bajo demanda para la comunicación entre vecindarios.

2.4.3. Machine Learning

Machine Learning (ML) engloba un conjunto de técnicas que llevan a cabo el estudio de los algoritmos de computación que mejoran automáticamente con la experiencia [112]. ML puede ser dividido entre aprendizaje supervisado, en el que se proporcionan ejemplos para que el sistema aprenda, y aprendizaje no supervisado, en el que no se dan ejemplos y el sistema debe aprender mediante ensayo y error.

Uno de los métodos no supervisados más utilizados es el aprendizaje reforzado (RL: *Reinforcement Learning*), que basa el aprendizaje del sistema en la interacción con el entorno. El sistema está formado por agentes, que tratarán de aprender del entorno que les rodea llevando a cabo ciertas acciones o cambios de estado, que son situaciones específicas que el agente puede observar, y políticas, que permiten al agente actuar de una forma determinada ante eventos observados en el entorno. Durante la ejecución de un algoritmo basado en aprendizaje reforzado, se intentará maximizar el número de recompensas conseguidas, por lo que el sistema irá poco a poco aprendiendo hasta tener la experiencia suficiente para garantizar un funcionamiento correcto.

Las técnicas de aprendizaje reforzado pueden ser extendidas para que sean varios agentes los que realizan el aprendizaje de una tarea en lugar de uno solo. En [113] se propone dividir las técnicas multiagente de aprendizaje reforzado en dos clases principales: aprendizaje en equipo, donde únicamente existe un agente encargado de aprender y que además representa al resto de agentes, de forma que todos los agentes del sistema llevarán a cabo la misma acción en cada paso del aprendizaje, y aprendizaje concurrente, donde cada agente se encarga de aprender de forma independiente al resto.

Las redes de sensores, debido a sus características de procesamiento, capacidad de almacenamiento y tiempos de respuesta imponen ciertas restricciones a la hora de aplicar algoritmos basados en ML para la toma de decisiones. Así, un aprendizaje en equipo no puede ser aplicado debido a que esta técnica obliga a los agentes (nodos) a tener conocimiento de toda la topología de la red, y además el espacio de estados se incrementa drásticamente al crecer el tamaño de la red.

Un ejemplo de aprendizaje concurrente es el presentado en [114], donde se considera que cada nodo está compuesto por un conjunto de variables internas, que pueden ser configuradas por el nodo, como por ejemplo la potencia de transmisión, y un conjunto de variables externas no modificables por el nodo como el número de vecinos o la cantidad de energía restante. El aprendizaje puede ser formulado de dos formas distintas: *dado el estado actual de un nodo, qué variables internas han de ser cambiadas y a qué valor para cumplir el objetivo marcado*, o *dado el estado externo a un nodo, cuál es el estado interno óptimo*. En esta implementación, una acción consiste en asignar un valor a cada uno de los parámetros del estado interno del nodo. Para medir el rendimiento de este sistema, se utilizan dos métricas: la calidad de servicio y la energía usada. En las pruebas se utilizan 15 nodos situados de forma aleatoria en una intersección entre dos calles. Se asume que los nodos conocen a todos sus vecinos así como a la estación base. La tarea de los nodos es monitorizar objetos que se mueven a través de la intersección. Cuando un nodo detecta un objeto, envía un mensaje a la estación base. Los nodos se organizan siguiendo el esquema clúster del protocolo LEACH [115] y la inteligencia es utilizada para decidir el papel que juega cada nodo (cabeza de clúster u hoja).

2.4.4. Lógica difusa, nuestra elección para la evaluación conjunta de variables

La lógica difusa [116] es una técnica de decisión que funciona de forma similar a lógica de control humana. Es una técnica sencilla e intuitiva, ya que utiliza el lenguaje natural para describir las características y sus asociaciones, proporcionando un método simple para llegar a una conclusión partiendo de datos imprecisos, ambiguos o equívocos. Los posibles valores de las variables a considerar son definidas mediante conjuntos difusos. También se define un conjunto de reglas que determinan la relación entre las variables de entrada y salida. Por ejemplo, un sistema que represente la idoneidad del peso de una persona, podría clasificar la altura y el peso mediante los conjuntos difusos

bajo, medio y alto, mientras que la salida podría representarse mediante los conjuntos difusos *bajo peso, peso ideal y sobrepeso*. De esta forma, las reglas serían del tipo:

IF Altura == alto AND Peso == medio THEN Salida = peso ideal

Los sistemas de lógica difusa utilizan un motor de inferencia que toma los datos de entrada y los combina utilizando las reglas difusas para proporcionar un valor de salida. Los más comunes son Mamdani [117] y TSK [118]. La ejecución de los sistemas de lógica difusa requiere menos potencia computacional que algunos métodos matemáticos convencionales [119]. Además, unos pocos datos pueden proporcionar resultados bastante precisos.

La lógica difusa es utilizada en [120] para llevar a cabo la estimación de la calidad de los enlaces. El sistema toma como entrada información sobre la capacidad de los enlaces para transportar información, asimetría, estabilidad y calidad del canal. Los experimentos con una red en la que todos los nodos se encontraban a un salto de la estación base muestran mejoras en términos de fiabilidad y estabilidad.

En [121] se presenta un método basado en lógica difusa e implementado en nodos ZigBee, para reducir la frecuencia de encendido/apagado de un sistema de aire acondicionado. Para ello, utiliza como variables de entrada la temperatura, humedad, velocidad del ventilador y velocidad del motor de aire acondicionado. Los experimentos muestran buenos resultados comparados con un sistema de control tradicional basado en valores discretos de temperatura.

La gestión de la calidad de servicio es el tema central de [122], donde se utiliza la lógica difusa para ajustar de forma dinámica la frecuencia de muestreo y envío de datos desde los sensores hasta los actuadores, para mantener el flujo de información en el nivel deseado. Los experimentos con redes de pocos nodos obtienen buenos resultados en términos de tiempo de respuesta, fiabilidad y robustez.

Un ejemplo de uso de lógica difusa para enrutamiento en redes de sensores es LEACH-FL [123], donde se propone la selección de cabezas de clúster mediante la combinación de tres variables: el nivel de batería del nodo, la densidad de nodos y la distancia hasta la Estación Base. Los experimentos muestran que el uso de lógica difusa permite reducir el consumo energético, prolongando así el tiempo de vida de la red. Otro ejemplo del uso de lógica difusa en redes basadas en clúster es [124], donde se combinan diversas variables para determinar el coste de los enlaces entre los nodos, permitiendo seleccionar como cabeza de clúster aquel que minimice dicho coste. Los experimentos, en los que no se detalla el número de nodos sino el número de paquetes estudiados,

obtienen buenos resultados, reduciendo el número de paquetes descartados y aumentando el tiempo de vida de la red.

Otra propuesta de enrutamiento basado en lógica difusa, es la presentada en [125], donde se pretende extender el tiempo de vida de la red mediante la optimización distribuida de las rutas. Los resultados obtenidos al combinar mediante lógica difusa datos relativos a energía restante, distancia entre nodos y carga de tráfico obtienen mejores resultados que el mismo experimento considerando únicamente la energía restante.

Dada la efectividad y los bajos requerimientos computacionales de la lógica difusa, este método fue el seleccionado para llevar a cabo la combinación y evaluación de variables en las propuestas de esta tesis. Así, la definición de conjuntos, reglas difusas y los diferentes motores de inferencia disponibles, serán detallados en el Capítulo 4.

2.5. Primeras conclusiones

Diversas instituciones, empresas y centros de investigación han propuesto y continúan proponiendo algoritmos y protocolos para permitir a los nodos comunicarse de forma correcta y ordenada. Debido a las condiciones y características especiales de las redes de sensores inalámbricas, ha sido y continúa siendo necesaria, la definición de protocolos y algoritmos de encaminamiento para proporcionar comunicaciones eficientes en este tipo de redes. Estas propuestas deben tener en cuenta, entre otras, las limitaciones de los nodos en cuanto a capacidad de procesamiento, memoria y energía.

El correcto funcionamiento de la red depende en gran parte del correcto encaminamiento de los datos desde la fuente hasta el destino. Esto facilita las comunicaciones entre los nodos permitiendo intercambios de información eficientes y con bajo consumo energético.

Los desarrollos presentados en esta tesis se centran en la capa de red, concretamente en el enrutamiento.

La bibliografía ofrece un amplio abanico de propuestas para la creación de rutas en la red, pero muchas de ellas presentan limitaciones en cuanto a escalabilidad, parametrización o adaptabilidad. Además, algunos resultados no muestran latencias o consumo de energía, parámetros esenciales en el correcto desarrollo de las redes de sensores inalámbricas.

Habiendo realizado un estudio del estado del arte sobre redes de sensores inalámbricas en general, y sobre propuestas de organización y encaminamiento

to en particular, el siguiente capítulo presenta NORA, un algoritmo de enrutamiento proactivo para redes de sensores. En una primera implementación NORA utilizará un conjunto de reglas para crear los caminos en la red y en la siguiente versión se le incorporará inteligencia artificial, en concreto lógica difusa, para llevar a cabo la toma de decisiones de forma más eficiente. Se pretende que NORA proporcione fiabilidad, precisión, exactitud, baja latencia, creación de caminos eficientes, adaptabilidad y escalabilidad en redes densas compuestas por un gran número de nodos, y que trabaje de forma óptima para aplicaciones de monitorización.

Capítulo 3

Primera propuesta de enrutamiento: NORA

RESUMEN:

Este capítulo presenta NORA, la primera propuesta de enrutamiento para redes de sensores de esta tesis. Se trata de un algoritmo basado en roles, que considera el número de saltos hasta la Estación Base y la energía restante de los nodos como parámetros fundamentales a la hora de tomar las decisiones para crear el árbol de enrutamiento. También se detallan los experimentos llevados a cabo para evaluar el rendimiento de NORA, comparándolo con otras propuestas presentes en la literatura.

Dentro de los objetivos de esta tesis, se encuentra el desarrollo de un algoritmo de enrutamiento que permita encaminar los datos en redes orientadas a la monitorización. Las aplicaciones de monitorización se centran en la recogida de datos por parte de los nodos sensores para ser analizados posteriormente. En esta propuesta, la red se organiza en forma de árbol, para que los datos de todos los nodos de la red sean recogidos por la estación base. El diseño del algoritmo está basado en el uso de reglas, la asignación de roles y la colaboración de los nodos de la red para conseguir un objetivo común.

Tomando como base estas premisas se ha desarrollado NORA (Network rOle-based Routing Algorithm), cuya principal motivación es la obtención de caminos eficientes, para redes con topología en árbol, que comienza en la Estación Base y termina en los nodos más alejados de ésta. Además, con el objetivo de equilibrar el gasto energético, los nodos con más recursos son los encargados del reenvío de los datos desde el resto de nodos de la red hacia la

Estación Base, permitiendo así que cualquier nodo pueda enviar datos hasta ésta, bien directamente, o a través de otros nodos de la red que reenvíen sus datos.

NORA es un algoritmo de baja complejidad, que ha sido desarrollado con el objetivo de no suponer una sobrecarga para los nodos que forman las redes de sensores. De esta forma, la ejecución de NORA permite la creación de caminos energéticamente eficientes, sin suponer una carga extra al sistema que pudiera degradar el rendimiento de las prestaciones de la red.

Para comprobar el rendimiento de NORA, se detallarán los experimentos realizados en los que se compara con Tree Routing, detallado en el capítulo anterior, cuya métrica está basada en el número de saltos hasta la estación base y en la fuerza de la señal recibida. Por su parte, NORA basa las decisiones de encaminamiento en el número de saltos hasta la estación base y en la batería restante de los nodos, dos parámetros clave en las redes de sensores inalámbricas.

3.1. Definiciones previas

El funcionamiento de NORA se basa en un conjunto de reglas que son ejecutadas por los nodos para llevar a cabo el descubrimiento de vecinos y la creación de rutas en la red, desviando la carga hacia los nodos con mejores recursos (batería restante y cercanía a la estación base). Estos nodos son utilizados para, además de enviar sus propios datos, reenviar los mensajes de sus vecinos hacia la Estación Base creando, de esta forma, caminos energéticamente eficientes.

A continuación se detallan diversos parámetros y características que son clave para la definición del algoritmo:

- **Tipos de nodo:** NORA organiza la red en forma de árbol en el que los nodos con mejor estado reenvían los datos de aquellos nodos cuyos recursos se encuentran más agotados o que tienen a la Estación Base fuera del alcance. Para llevar a cabo la especificación del algoritmo, se deben definir diversos tipos de nodo dependiendo de la tarea que vayan a cumplir dentro de la red:
 - **Estación base:** es la encargada de iniciar el proceso de descubrimiento, así como de recoger los datos provenientes de todos los nodos de la red para su posterior análisis.

- **Nodo Máster:** además de recoger datos del entorno y enviarlos hacia la Estación Base, los nodos Máster se encargan de reenviar los datos del resto de nodos. Los nodos Máster son seleccionados por el algoritmo debido a que disponen de más recursos que sus vecinos, no sólo en términos de energía restante, sino también en cuanto a distancia a la Estación Base. De esta forma se equilibra el consumo de energía entre los nodos de la red, aumentando el tiempo de vida y evitando el agotamiento prematuro de recursos por parte de algunos nodos.
- **Nodos Hoja:** su función es la más básica de la red. Únicamente se encargan de tomar datos del entorno y mandarlos a la Estación Base, bien directamente o a través de nodos Máster.

Los tipos de nodos definidos facilitan la creación de caminos de nodos Máster, que cubren una buena parte de la red permitiendo a los nodos Hoja encaminar sus datos hacia la Estación Base.

- **Tabla de vecinos:** para poder ejecutar el algoritmo, los nodos necesitan ciertos parámetros referentes a los nodos vecinos como identificador, rol, nivel de batería restante o número de saltos hasta la estación base. En la Tabla 3.1 se muestra un ejemplo de los datos que cada nodo almacena de cada uno de sus vecinos:

Tabla 3.1: Ejemplo de tabla de vecinos utilizada por NORA

ID	Rol	Batería	NumSaltos	<i>Countdown</i>
1	Master	63 %	1	5
5	Leaf	70 %	2	5
6	Leaf	67 %	2	5

- **ID:** almacena el identificador del nodo vecino. Suele ser un número entero que se corresponde con el identificador de nodo, fijado al cargar la aplicación, y debe ser único para cada uno de los nodos de la red.
- **Role:** es el papel que ha adoptado cada uno de los vecinos, Estación Base, Máster u Hoja.

- **Bateria:** el nivel de batería restante es almacenado para cada uno de los vecinos, ya que es tenido en cuenta a la hora de decidir los roles y el nodo padre. Se expresa en %.
- **NumHops:** es un número entero que almacena el número de saltos de cada vecino hasta la Estación Base. Es crucial para llevar a cabo la formación de caminos eficientes y reducir el número de reenvíos de paquetes dentro de la red.
- **CountDown:** entero positivo inicializado a un valor determinado por cada aplicación particular, que permite controlar la presencia de nodos vecinos. Cuando se recibe un mensaje de un nodo vecino, su valor de CountDown se asigna al valor más alto establecido. Si en el tiempo estimado (configurable y dependiente de la aplicación) no se reciben mensajes de un nodo vecino, se decrementa su CountDown, de forma que si éste llega a 0, el nodo es borrado de la tabla de vecinos. De esta forma, los nodos caídos son eliminados de la tabla de vecinos tras el número de intentos predeterminado para cada aplicación, suavizando de esta forma, los posibles fallos debidos a colisiones o interferencias en el canal de comunicación.

Todos estos parámetros almacenados en la tabla de vecinos, se actualizan periódicamente gracias a que todos ellos (salvo el CountDown) son encapsulados en los mensajes de datos, de modo que los nodos siempre tiene información actualizada para tomar las decisiones de una forma eficiente.

- **Tipos de mensaje:** NORA incorpora una serie de mensajes específicos, que dispararán diversos comportamientos en los nodos que los reciban. Se definen tres tipos de mensajes:
 - **Information Propagation Message (IPM):** este tipo de mensaje incorpora toda la información local de un nodo (ID, Role, Batería y NumHops) y son enviados mediante broadcast. Los mensajes IPM informan a los vecinos del estado local del nodo. Esta información será tenida en cuenta por los vecinos para tomar sus propias decisiones. Cada vez que se reciba un mensaje de este tipo, se actualizará la entrada correspondiente en la tabla de vecinos.
 - **Role Decision Message (RDM):** estos mensajes incorporan la misma información que los mensajes IPM, pero son interpretados de

forma diferente. Todos aquellos nodos que reciban un RDM, comenzarán la evaluación de reglas para decidir su nodo padre y su propio rol, además de actualizar la tabla de vecinos con la información recibida. Estos mensajes se envían mediante *broadcast*.

- **Master Request Message (MRM):** un nodo que no encuentre a su alcance a ningún nodo Máster y que necesite enviar sus datos a través de un nodo Hoja, le enviará a éste un mensaje MRM para que cambie su rol de Hoja a Máster. El nodo que reciba un MRM, cambiará su rol a Máster y enviará un IPM para informar a sus vecinos del cambio de rol efectuado.

Estas definiciones previas sirven de base para explicar el funcionamiento de NORA. A continuación, se detallan las acciones orientadas a crear la estructura de árbol de la red, así como los efectos que tienen en los nodos la recepción de determinados mensajes.

3.2. Funcionamiento

Para llevar a cabo las tareas de encaminamiento, NORA ejecuta las siguientes acciones: la Estación Base insta a sus vecinos a comenzar el proceso de descubrimiento, el cual se propaga hasta llegar a los nodos más alejados. Una vez completado este proceso, la red es totalmente operativa ya que cualquiera de los nodos es capaz de enviar datos hacia la Estación Base.

3.2.1. Descubrimiento de vecinos y creación de rutas

Una vez que los nodos han sido desplegados en el área a monitorizar, se encuentran a la espera de que la Estación Base inicie el proceso de descubrimiento y creación de rutas mediante el envío de un RDM. Los nodos que reciban este tipo de mensaje por primera vez, llevarán a cabo las siguientes acciones:

1. Cada nodo actualiza su tabla de vecinos.
2. Cada nodo que ha recibido un RDM, envía un mensaje IPM que contiene información local (identificador, número de saltos hasta la estación base, batería restante...) y espera a recibir esta información de los nodos circundantes, actualizando la tabla de vecinos cada vez que se recibe un

mensaje IPM. El tiempo de espera es configurable dependiendo de la aplicación que vayan a ejecutar los nodos.

3. Una vez que se han intercambiado mensajes IPM con los vecinos, los nodos seleccionan a su padre, que se encargará de reenviar sus datos hacia la Estación Base.
4. Si el nodo seleccionado como padre no es un nodo Máster, el nodo interesado le enviará un MRM para que pase de ser un nodo Hoja a ser un nodo Máster.
5. Una vez seleccionado el nodo que reenviará los datos, es el propio nodo el que escoge su rol -Máster u Hoja- dependiendo de la información de los nodos vecinos que se encuentran a la misma distancia de la Estación Base (nodos de su mismo nivel).
6. El nodo manda en este momento un mensaje RDM para que los nodos del siguiente nivel comiencen también la evaluación de las reglas. Una vez comunicado el rol elegido a los nodos vecinos, comienza el proceso de recogida y envío de datos (tareas de la aplicación) al nodo seleccionado como padre, el cual lo reenviará, en caso necesario, hacia la Estación Base.

Cada nodo lleva a cabo estos pasos una única vez, ya que pueden recibirse varios RDMs provenientes de varios nodos del nivel superior. El siguiente pseudo-código detalla este proceso:

```
1 when receive(RDM) then
2   update_neighbors_table(RDM)
3   send(IPM, BROADCAST)
4   temp_neighbors = wait_to_receive(x seconds)
5   foreach message in temp_neighbors do
6     update_neighbor_table(message)
7   end foreach
8   temp_master = select_master()
9   if get_role(temp_master) == Leaf then
10    send(MRM, temp_master)
11  end if
12  set_master(temp_master)
13  RDM_local_role = calculate_role()
```

```
14 send(RDM_local_role, BROADCAST)
15 //comienzo del envío de datos recogidos del entorno
```

Las funciones utilizadas en este proceso se detallan a continuación:

- **receive(message_type)**: esta función se encarga de manejar los mensajes recibidos por los nodos.
- **wait_to_receive(secs)**: es utilizada para darle tiempo a los nodos vecinos a anunciar su presencia. Esta función permite esperar durante el tiempo que se desee la llegada de mensajes de los vecinos. Los mensajes recibidos durante este tiempo son tratados por orden de llegada, actualizando la tabla de vecinos con la información recibida.
- **update_neighbors_table()**: además de incorporar la información en la tabla de vecinos, esta función también resetea el campo Countdown, encargado de controlar la presencia de los nodos.
- **select_master()**: esta función selecciona el mejor candidato para ser seleccionado como padre. En primera instancia, sólo tiene en cuenta a los nodos Máster del siguiente nivel más cercano a la Estación Base, pero si no se encuentra ninguno disponible, se seleccionará al mejor nodo Hoja, al que se le instará a convertirse en Máster mediante un MRM. El pseudo-código de esta función es el siguiente:

```
1 function select_master(): returns masterID
2   temp_master_ID = NULL
3   temp_master_numhops = INFINITY
4   temp_master_bat = 0
5   foreach row in neighbors_table do
6     if row[role] == MASTER then
7       if row[numhops] < temp_master_numhops then
8         temp_master_ID = row[ID]
9         temp_master_numhops = row[numhops]
10        temp_master_bat = row[bat]
11      else if row[numhops] == temp_master_numhops then
12        if row[bat] > temp_master_bat then
13          temp_master_ID = row[ID]
14          temp_master_numhops = row[numhops]
15          temp_master_bat = row[bat]
16    end foreach
```

```

17  if temp_master_id == NULL then
18    foreach row in neighbors_table do
19      //Select the best leaf node following lines 7-15
20    end foreach
21  return temp_master_ID
22 end function

```

- **get_role(nodeID)**: comprueba en la tabla de vecinos y devuelve el rol del nodo pasado como parámetro.
- **calculate_role()**: esta función selecciona el rol del nodo teniendo en cuenta información relativa al tiempo de vida propio y al de sus vecinos. A continuación se muestra el pseudo-código de esta función:

```

1 function calculate_role(): returns role
2  temp_role = LEAF
3  temp_greatest_bat = local_bat
4  foreach row in neighbors_table do
5    if row[numhops] == local_num_hops then
6      if row[bat] > temp_greatest_bat
7        temp_greatest_bat = row[bat]
8    end foreach
9  if temp_greatest_bat == local_bat then
10 temp_role = MASTER
11 return temp_role
12 end function

```

- **set_master(nodeID)**: una vez completada la selección del mejor candidato para ser el padre, esta función asigna como padre el nodo pasado como parámetro, que se encargará del reenvío de los datos del nodo o nodos que lo asignen.

Así, la red realiza de forma automática el descubrimiento de caminos, creando rutas eficientes desde cualquier nodo hasta la Estación Base.

La figura 3.1 muestra la secuencia de intercambio de mensajes y las acciones que lleva a cabo un nodo desde que recibe un RDM de algún nodo vecino. Cuando un nodo recibe un mensaje RDM, actualiza su tabla de vecinos y envía un mensaje IPM para informar a sus vecinos de su presencia. En este punto, se inicia un temporizador. Durante este tiempo, se escuchan los mensajes IPM de aquellos vecinos que se encuentren en el mismo nivel (misma distancia hasta la Estación Base). De esta forma, los nodos dispondrán de la información

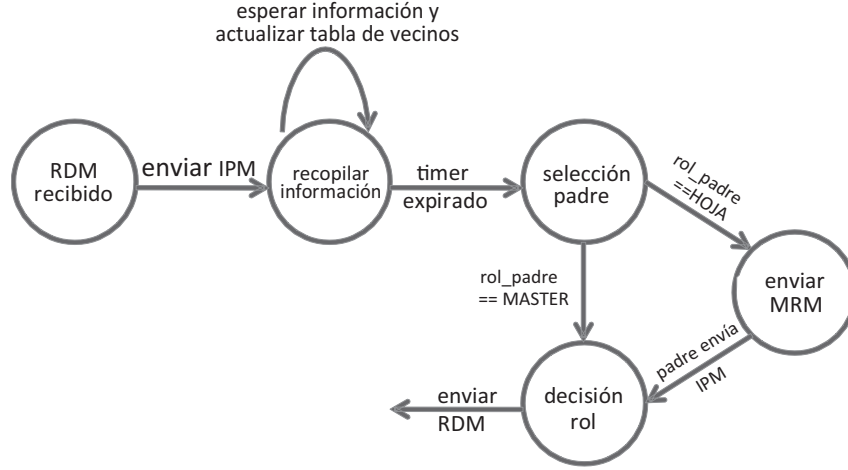


Figura 3.1: Transiciones del algoritmo NORA durante el descubrimiento de la red

necesaria para llevar a cabo la decisión del rol. Una vez que el temporizador ha expirado, cada nodo se dispone a elegir un nodo padre, normalmente de nivel inferior (menos saltos hasta la Estación Base), que será el encargado de reenviar los datos. En el caso de que no haya ningún nodo Máster al alcance para ser elegido como padre, se enviará un mensaje MRM al nodo Hoja de nivel inferior que mejores prestaciones tenga. Este nodo se convertirá automáticamente en Máster.

Formalmente, considerando $H_{\{u,v\}}$ como el número de saltos entre los nodos u y v , y V como el conjunto de nodos de la red, la Ecuación 3.1 define el conjunto de los vecinos del nodo n que se encuentran en el mismo nivel (mismo número de saltos hasta la Estación Base, EB), σ_n .

$$\sigma_n = \sigma_n \cup i \ / \ H_{\{i,n\}} = 1 \ \text{AND} \ H_{\{i,EB\}} = H_{\{n,EB\}} \ , \ \forall i \in V \quad (3.1)$$

De forma similar, la Ecuación 3.2 define τ_n como el conjunto de nodos vecinos del nodo n que tienen un menor número de saltos (nivel inferior) hasta la Estación Base.

$$\tau_n = \tau_n \cup i \ / \ H_{\{i,n\}} = 1 \ \text{AND} \ H_{\{i,EB\}} < H_{\{n,EB\}} \ , \ \forall i \in V \quad (3.2)$$

Si consideramos R_i como el rol del nodo i , el conjunto de vecinos de menor nivel, cuyo rol es igual a Máster, Γ_n , se define mediante la Ecuación 3.3.

$$\Gamma_n = \Gamma_n \cup i / R_i = MASTER, \forall i \in \tau_n \quad (3.3)$$

Análogamente, Υ_n (Ecuación 3.4) representa el conjunto de vecinos de menor nivel cuyo rol es igual a Hoja.

$$\Upsilon_n = \Upsilon_n \cup i / R_i = HOJA, \forall i \in \tau_n \quad (3.4)$$

Una vez definidos los conjuntos de vecinos de igual y menor distancia a la Estación Base, se procede a la definición formal de los procesos de decisión del nodo padre, y del rol. Tomando B_n como el nivel de batería restante del nodo n , el nodo padre del nodo n en tiempo t , $P(n, t)$ es definido en la Ecuación 3.5.

$$P(n, t) = i \in \Gamma_n / H_{\{i, EB\}} = \min\{H_{\{\Gamma_n, EB\}}\} \\ AND B_i = \max\{B_{\Gamma_n}\}, \forall k \in \Gamma_n \quad (3.5)$$

En caso de que un nodo n no sea capaz de encontrar ningún nodo Máster, se utilizará para seleccionar al nodo padre la Ecuación 3.6.

$$P(n, t) = i \in \Upsilon_n / H_{\{i, EB\}} = \min\{H_{\{\Upsilon_n, EB\}}\} \\ AND B_i = \max\{B_{\Upsilon_n}\}, \forall k \in \Upsilon_n \quad (3.6)$$

De esta forma, las reglas definidas para la selección de padre evalúan la tabla de vecinos y seleccionan como padre al nodo vecino con mayor nivel de batería y rol igual a Máster, de entre los vecinos con menor número de saltos hasta la EB. Si no se encuentra ningún nodo Máster, se selecciona el nodo hoja que cumpla las condiciones anteriores y se le envía un MRM para que cambie su rol de Hoja a Máster.

Para la selección del propio rol, cada nodo compara su nivel de batería con los nodos de su mismo nivel presentes en su tabla de vecinos. Si el nivel de batería restante es el mayor, se asigna el rol Máster. El rol Hoja es asignado en caso contrario. La Ecuación 3.7 define este proceso.

$$R(n, t) = \begin{cases} MASTER, & \text{si } B_n = \max\{B_k\}, \forall k \in \{\sigma_n \cup n\} \\ HOJA, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.7)$$

3.2.2. Incorporación y eliminación de nodos

Para soportar pequeños cambios en la topología de la red, NORA cuenta con mecanismos para añadir nuevos nodos a la red y eliminar aquellos que hayan dejado de funcionar o sea imposible comunicar con ellos.

En primer lugar, la incorporación de nuevos nodos se realiza de la siguiente forma:

- El nuevo nodo se dedica a escuchar el canal.
- En el momento que recibe un paquete de datos, inicia un temporizador a la espera de mensajes de descubrimiento. Este temporizador permitirá al nodo recibir mensajes RDM en caso de que el descubrimiento de la red no se haya completado todavía.
- Durante el tiempo en el que está activo este temporizador, el nodo actualiza su tabla de vecinos con los datos de los mensajes escuchados, aunque no vayan dirigidos a él. En caso de que el nodo reciba un RDM, si éste es el primero, procederá a ejecutar los pasos descritos en la Sección 3.2.1 asociados a la recepción de un RDM.
- Si el temporizador termina sin haber recibido ningún RDM, el nuevo nodo seleccionará al mejor padre entre los nodos Máster que haya escuchado, informando de ello con un IPM. Su rol por defecto será Hoja.
- En caso de que no se hayan recibido paquetes desde ningún nodo Máster, el nuevo nodo seleccionará al nodo Hoja con mejores condiciones y le enviará un MRM, para que cambie su rol.

Siguiendo estos pasos, cualquier nuevo nodo puede incorporarse a la red en cualquier momento. Este mecanismo es utilizado también en caso de que un nodo ya organizado pierda la conectividad con su nodo padre, asegurando así la estabilidad de la red ante el posible fallo de nodos.

Las aplicaciones de monitorización suelen programar un envío de datos periódico. En base a esta premisa se ha diseñado el sistema de control de vecinos de NORA. Cuando se recibe un paquete de datos de un nodo vecino, el campo *CountDown* correspondiente a ese vecino es inicializado. Cada vez que un nodo envía un paquete de datos, decrementa el campo *CountDown* en todas las entradas de su tabla de vecinos, y si alguna de ellas llega a 0, se elimina el vecino correspondiente. Este mecanismo permite controlar en todo momento los vecinos activos, tolerando fallos ocasionales como colisiones, pero siendo tajante con fallos reiterados como el agotamiento de la batería. Además, evita que la tabla contenga datos no actualizados, que podrían causar errores en las comunicaciones.

Para completar la definición del algoritmo, a continuación se muestra un ejemplo que ilustra la creación de caminos llevada a cabo por NORA, después

de la cual, la red queda totalmente organizada y lista para el transporte de los datos desde cualquier nodo hasta la Estación Base.

3.3. Ejemplo de funcionamiento

Para ilustrar este ejemplo vamos a tomar como topología de partida la mostrada en la figura 3.2, en la que se indica, para cada nodo, su identificador y el porcentaje de batería restante. Las líneas discontinúas entre nodos representan las posibles comunicaciones inalámbricas que pueden realizarse de tal forma que, por ejemplo los nodos 1 y 2 pueden comunicarse entre ellos de forma directa, pero los nodos 1 y 3 o 3 y 4 no pueden hacerlo.

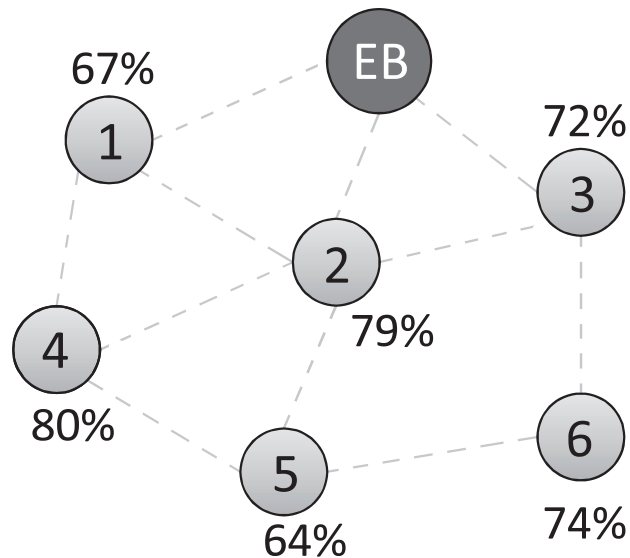


Figura 3.2: Topología ejemplo

La Figura 3.3 muestra un diagrama temporal en el que aparecen los paquetes enviados por los nodos. En primer lugar, la Estación Base (EB) envía un RDM que es escuchado por los nodos 1, 2 y 3, los cuales envían su correspondiente IPM. Una vez intercambiados los IPMs, los tres nodos eligen como padre a la Estación Base. A continuación, cada nodo decide su rol; los nodos 1 y 3 se convierten en Hojas y el nodo 2 elige ser Máster, debido a que su nivel de batería restante es mayor que el de sus vecinos. Una vez escogidos los roles, se informa de ello a los vecinos mediante mensajes RDM. El mensaje RDM del

nodo 1 es escuchado por el nodo 4; el RDM del nodo 2 llega hasta los nodos 4 y 5; y por último, el mensaje RDM del nodo 3 llega hasta el nodo 6. Conforme los nodos del segundo nivel (dos saltos hasta la estación base) van recibiendo los RDMs, responden a ellos con mensajes de información (IPM). Los nodos 4 y 5 escogen al nodo 2 como padre y comienzan el proceso de decisión del rol. Por su parte, el nodo 6 no tiene al alcance a ningún nodo Máster, por lo que insta al nodo 3 (nodo de nivel inferior que mayor nivel de batería tiene) a convertirse en Máster mediante un MRM. Cuando el nodo 3 recibe este mensaje, automáticamente se convierte en Máster informando de ello mediante un IPM. Una vez decididos los padres, los nodos se disponen a elegir los roles. El nodo 4 compara su nivel de batería restante con el nodo 5, y decide convertirse en Máster, ya que su nivel de batería es mayor que el del nodo 5. De forma análoga, el nodo 6 se compara con el nodo 5, y también se convierte en Máster ya que su nivel de batería es mayor que el del nodo 5. Por su parte, el nodo 5 se compara con sus dos nodos vecinos del mismo nivel (nodos 4 y 6) y se convierte en Hoja, ya que su nivel de batería restante es inferior al de los nodos 4 y 6.

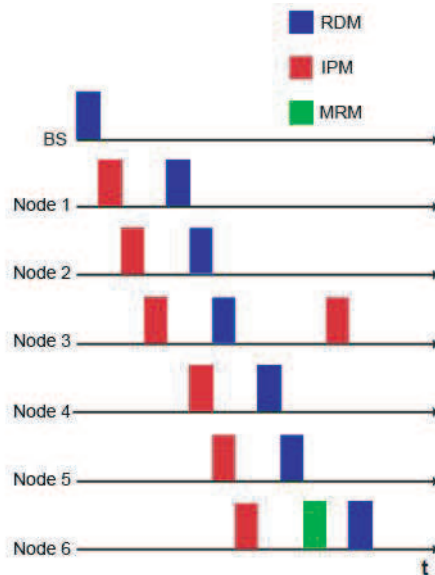


Figura 3.3: Mensajes enviados por los nodos a lo largo del tiempo

Cuando termina este proceso, la red se encuentra organizada de una forma eficiente y equilibrada, en la que los nodos con más recursos son los encargados de reenviar los datos desde los nodos Hoja hasta la Estación Base.

Cabe resaltar que tanto los parámetros a considerar, como las reglas a utilizar, pueden ser ajustadas a los requerimientos de las diversas aplicaciones en las que NORA vaya a ser utilizado.

3.4. Experimentos con NORA

Con el fin de comprobar el rendimiento y la eficiencia del algoritmo de enrutamiento propuesto, se han llevado a cabo diversos experimentos encaminados a demostrar de forma empírica las mejoras aportadas por NORA. Debido a que era necesario probar la propuesta en redes compuestas por un gran número de nodos, se optó por modelar el comportamiento de NORA en un simulador, facilitando así la tarea de evaluación del mismo. A continuación se detalla el simulador utilizado, así como la configuración empleada, los experimentos realizados y los resultados obtenidos.

3.4.1. Entorno utilizado

Para llevar a cabo las pruebas, se ha utilizado el entorno de simulación Castalia, que funciona sobre el simulador Omnet++. Las características principales de ambos fueron detalladas en el Capítulo 2.

Castalia, es un entorno específico para la simulación de redes de sensores, y ha sido el elegido para realizar las pruebas de este trabajo gracias a su diseño modular, su nivel de detalle y la precisión de sus modelos. Estas características hacen que Castalia proporcione un modelo muy cercano a la realidad que permite extraer conclusiones fiables.

A continuación se detallan los diferentes escenarios utilizados en la evaluación NORA.

3.4.2. Escenarios

Para llevar a cabo los experimentos con NORA, se definen dos escenarios principales:

- **Evaluación de NORA:** en este escenario se pretende evaluar el correcto funcionamiento de NORA, de forma que se estudiarán los caminos

formados, así como el número de mensajes necesario para organizar la red y el comportamiento del algoritmo al trabajar con redes con diferente densidad de nodos.

- **Comparación con *Tree Routing* (TR) en redes de gran tamaño:** una vez completado el estudio de NORA, se procederá a la comparación de resultados con el protocolo TR incorporado en ZigBee [1]. El funcionamiento de TR puede definirse de la siguiente manera: la Estación Base anuncia su presencia mediante el envío de un mensaje de descubrimiento. Los nodos que reciben este anuncio, envían sus propios paquetes de descubrimiento e inician un temporizador. Cuando éste expira, cada nodo decide su nodo padre basándose en el número de saltos hasta la Estación Base y en información relativa a la calidad del canal. Este procedimiento se propaga salto a salto hasta llegar a todos los nodos de la red. Como se puede deducir, el propósito de TR es el mismo que el de NORA, crear una estructura de comunicaciones en forma de árbol. Las diferencias entre ambos radican en la ausencia de roles en TR y en la información considerada a la hora de tomar las decisiones.

Estos dos escenarios permitirán por un lado, examinar el modo de operación de NORA, y por otro, comparar su rendimiento con la propuesta de enrutamiento utilizada en el estándar ZigBee para redes con estructura de árbol.

3.4.2.1. Nodos utilizados

Para la realización de todas las pruebas, se utilizaron en el simulador redes homogéneas compuestas por nodos TelosB [126], ya que el modelo de radio (CC2420) que se encuentra especificado en Castalia es muy preciso y se acerca en gran medida a las características del modelo real. Ésto sumado al modelo de canal incorporado en el simulador, asegura que los resultados sean muy similares a los que se obtendrían si se trabajase con una red real. Para el caso del chip de radio CC2420, el modelo define una cobertura elíptica con un radio medio de 50m. La tabla 3.3 detalla los parámetros específicos más relevantes del canal de comunicaciones utilizado en los experimentos. *Path Loss at D0* representa el radio de cobertura de los nodos, el valor utilizado especifica que el radio medio de cobertura sea de 50m. El parámetro *D0* define el valor mínimo de distancia utilizado en el modelo de propagación de la señal, para este caso 1m. De esta forma, para llevar a cabo los cálculos relativos a la degradación de la señal con respecto a la distancia, la unidad mínima de distancia considerada

Tabla 3.2: Parámetros relativos al canal de comunicaciones utilizado en los experimentos

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Path Loss at D0	53.52 dbm
D0	1 m
Collision Model	No Collisions
Bi-directional Links	True

Tabla 3.3: Parámetros relativos al chip de radio utilizado en los experimentos

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Data Rate	250 kbps
Noise Bandwidth	194 kHz
Noise Floor	100 dbm
Encoding Type	NRZ
Receiver Sensitivity	-95 dBm
Reception Power	62 mW
Listen Power	62 mW
Sleep Power	1.4 mW

será 1m. El modelo de acceso al canal utilizado permite obviar las colisiones que se produzcan durante el intercambio de mensajes, de forma que éstas no interfieran en el funcionamiento de la red. También se han considerado enlaces bidireccionales, de forma que sin un nodo A puede comunicarse con un nodo B, el nodo B también podrá comunicarse con el nodo A.

Por su parte, la Tabla 3.2 muestra los parámetros relativos al chip de radio CC2420 incorporado de serie en los nodos TelosB. Estos parámetros fijan la tasa de envío de datos en 250kbps. También se definen parámetros relativos al ruido, el tipo de codificación (NRZ, *non-return-to-zero*), la sensibilidad del receptor y los niveles de consumo del nodo dependiendo del estado de la radio: recepción, escucha y desactivada (*sleep*).

Con objeto de probar el comportamiento de NORA en diferentes situaciones, se utilizó primero una red en la que se fijaba un área determinada, y en ella se iban incorporando nodos (desde 3 hasta 21), de forma que la den-

Tabla 3.4: Número de nodos según el radio de la red

<i>Radio</i>	<i>Número de nodos</i>
R (50m)	21
2R (100m)	81
3R (150m)	177
4R (200m)	317
5R (250m)	489
6R (300m)	709
7R (350m)	973
8R (400m)	1257
9R (450m)	1597
10R (500m)	1959

sidad de los mismos se fuera incrementando. En segundo lugar, con objeto de comprobar la escalabilidad de la propuesta, se incrementó el área de la red manteniendo la densidad de nodos, hasta llegar a 1959 nodos.

3.4.2.2. Localización y despliegue de los nodos

Inicialmente, la red se despliega en un área circular de 50m de radio con la Estación Base situada en el centro. La densidad máxima de nodos viene fijada por la densidad que se obtendría al colocar los nodos en las intersecciones de una cuadrícula de 20m de lado. De esta forma, el área circular de 50m de radio estaría compuesta por 21 nodos. Como la Estación Base está situada en el centro, y su radio medio de cobertura son 50m, ésta puede comunicarse (salvo casos extremos) de forma directa con todos los nodos. Manteniendo esta densidad de nodos por unidad de área, la Tabla 3.4 resume la cantidad de nodos utilizados en los experimentos.

En la realización de las diversas pruebas los nodos se distribuyen en forma de grid regular e irregular:

- Grid regular:** los nodos están situados en las intersecciones de una cuadrícula siguiendo una distribución regular (ver Figura 3.4). Dado que NORA está centrado en aplicaciones de monitorización, se ha definido un tamaño de cuadrícula de 20m, ya que las pruebas llevadas a cabo en el proyecto Wisevine [40] demostraron que esa distancia entre nodos per-

mitía que los datos recogidos del entorno, reflejasen las variables medidas con suficiente precisión, sin llegar a ser redundantes.

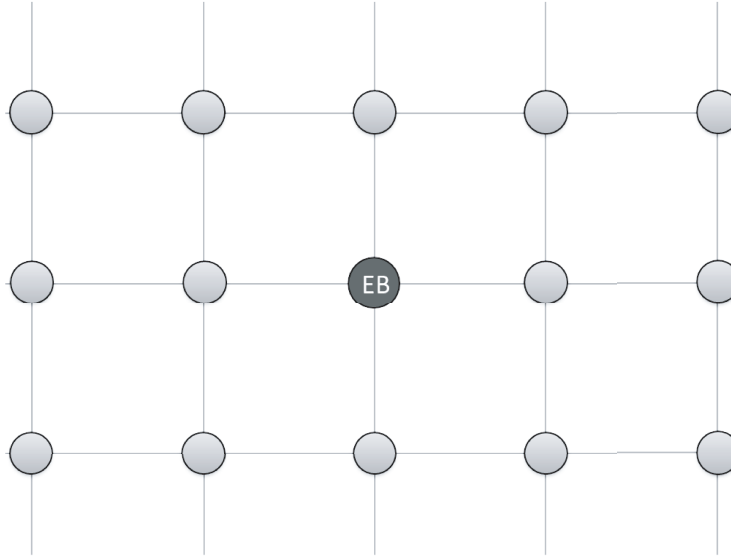


Figura 3.4: Ejemplo de topología grid regular

- **Grid irregular:** los nodos se sitúan de forma aleatoria sobre las intersecciones de una cuadrícula (ver Figura 3.5).

3.4.3. Parámetros estudiados

Las simulaciones se centran en el proceso de creación de un árbol de comunicación con raíz en la Estación Base. Dado que los experimentos se dividen en evaluación de NORA y comparación con TR, a continuación se detallan los parámetros estudiados para cada uno de los escenarios:

Evaluación de NORA. El estudio analiza resultados relativos al número de paquetes y tiempo necesario para definir la estructura en árbol, mostrando algunos ejemplos de árboles de comunicación construidos. Entre los parámetros estudiados, también se encuentran el número de MRMs enviados y la cantidad de nodos Hoja y Máster definidos tras la ejecución de NORA.

Comparación con TR en redes de gran tamaño. En este escenario se analizan los resultados relativos a tiempo de creación de caminos y profundidad

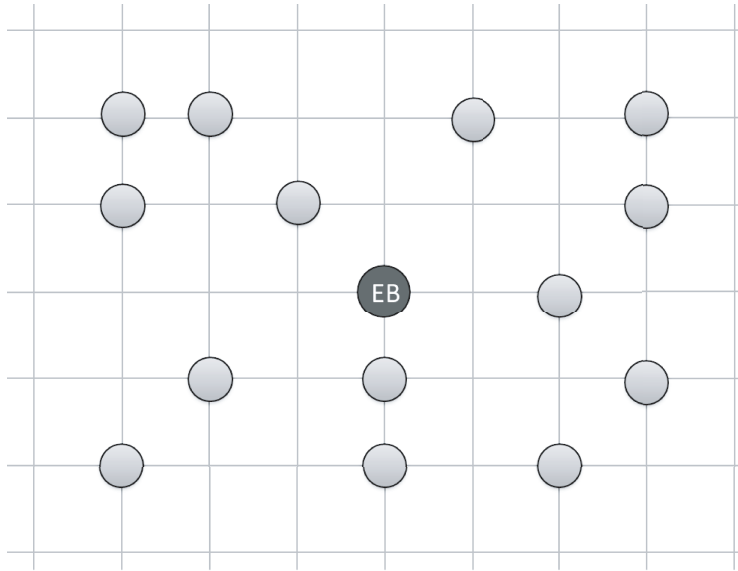


Figura 3.5: Ejemplo de topología grid irregular

de las rutas para NORA y TR sobre redes densas formadas por un gran número de nodos.

Debido a la cantidad de opciones disponibles, tanto escenarios como topologías utilizadas y parámetros a medir, se definen a continuación varios casos de estudio que facilitarán el análisis de los resultados. En primer lugar, los casos A y B pretenden estudiar el comportamiento de NORA al aumentar la densidad de nodos por unidad de área. Para ello se utilizan redes en las que todos los nodos están al alcance de la Estación Base con el fin de verificar la correcta selección de la Estación base como padre y revisar el intercambio de mensajes realizado.

Una vez fijada una densidad máxima de nodos por unidad de área (como se explicó en la Sección 3.4.2.2), se definen los casos C y D, que permitirán estudiar el comportamiento de NORA en redes multsalto, densas y con un gran número de nodos, hasta llegar a un tamaño de red cercano a los 2000 nodos.

- **Caso A:** árbol de un nivel (todos los nodos están a 1 salto de la Estación Base) con topología irregular e incremento de la densidad de los nodos. Los nodos se desplegarán de forma aleatoria en un área circular de 50m de radio. La Estación Base está situada en el centro y el número de nodos varía de 3 a 21.

- **Caso B:** árbol de un nivel con topología regular e incremento de la densidad de nodos. Los nodos se sitúan en las intersecciones de una cuadrícula de 20m de lado. La Estación Base se sitúa en el centro y el número de nodos varía de 3 a 21.
- **Caso C:** árbol con múltiples niveles, topología irregular e incremento del área de la red. Una vez fijada la densidad máxima, ésta se mantendrá al aumentar el área de la red, por lo que se incrementará proporcionalmente el número de nodos. Los tamaños de red se detallan en la Tabla 3.4. Al igual que los dos casos anteriores, para este caso, la Estación Base también está situada en el centro.
- **Caso D:** árbol con múltiples niveles, topología regular e incremento del área de la red. La Estación Base se sitúa en el centro y el resto de nodos se disponen alrededor de ella en las intersecciones de una cuadrícula de 20m de lado. El resto de parámetros (número de nodos, tamaños de red, etc.) son los mismos que para el Caso C.

Al trabajar con estos casos, los experimentos permiten estudiar el comportamiento de NORA al incrementar la densidad de nodos, considerando el mismo tamaño de red y con los nodos distribuidos aleatoria y uniformemente (Casos A y B), mientras que los Casos C y D permiten comprobar el rendimiento de NORA al incrementar el tamaño de la red. Además, para estos dos casos, se han realizado los mismos experimentos con el protocolo Tree Routing, la propuesta de enrutamiento basado en árboles utilizada en el estándar ZigBee, con el fin de comparar los resultados y poder hacer una valoración del rendimiento del algoritmo propuesto.

3.4.4. Metodología y parámetros de simulación

Los resultados mostrados a continuación representan los valores medios obtenidos al repetir los experimentos 100 veces, con el fin de obtener resultados fiables y concluyentes. Para la representación de algunos resultados, se muestran intervalos de confianza del 95 %.

Con objeto de probar y comparar el rendimiento de NORA y TR, se supone un canal sin interferencias y libre de colisiones. En algunos de los experimentos del Capítulo 5, se ha utilizado CSMA/CA, que es el mecanismo utilizado por el estándar ZigBee para realizar el acceso al medio.

El tiempo de simulación se ha medido desde que la Estación Base envía el primer mensaje de descubrimiento, hasta que todos los nodos de la red

completan el proceso de creación de caminos. Por su parte, la longitud de los caminos desde cualquier nodo hasta la Estación Base se mide en número de saltos, es decir, número de enlaces que un paquete deberá atravesar desde que es enviado por la fuente hasta que alcanza el destino.

Dado que únicamente se desea recopilar información relativa al proceso de creación de rutas, la aplicación instalada en los nodos, simplemente se encarga de disparar el proceso de descubrimiento y de recopilar los datos necesarios como por ejemplo tiempo de simulación, profundidad de las rutas creadas, etc., mientras que es la capa de red la encargada de establecer las rutas necesarias.

3.4.5. Resultados

Tras llevar a cabo los experimentos detallados anteriormente, este apartado muestra y analiza los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios.

3.4.5.1. Evaluación de NORA

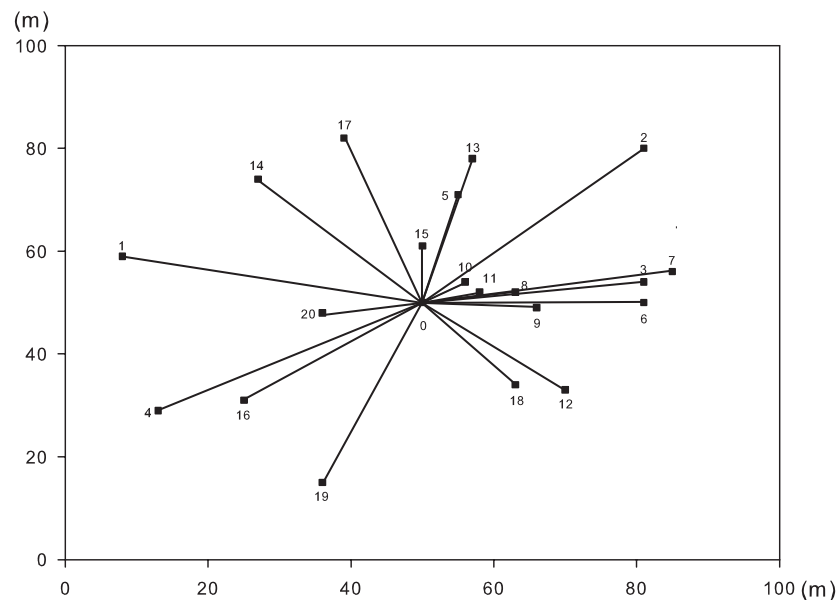


Figura 3.6: Árbol creado por NORA para una red de 21 nodos

En primer lugar, se analizan los resultados de la ejecución de NORA en diversos ejemplos de red, con el fin de verificar que los árboles de comunicación

creados son correctos. La Figura 3.6 muestra el árbol creado por NORA para una red de 21 nodos desplegados de forma aleatoria, en la que todos los nodos están al alcance de la Estación Base (Caso A), por lo que todos ellos la han seleccionado como padre con el fin de minimizar el número de saltos y así, ahorrar energía en las comunicaciones.

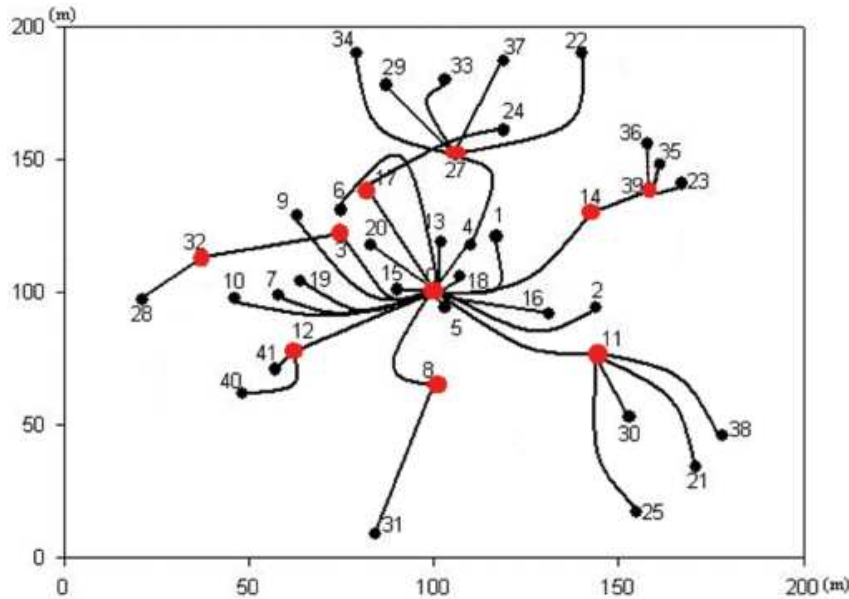


Figura 3.7: Árbol creado por NORA para una red de 41 nodos

Para el caso de redes grid irregulares la Figura 3.7 muestra un ejemplo de árbol generado por NORA para una red aleatoria de 41 nodos (Caso C), en la que ya se aprecian caminos de más de un salto desde algunos nodos hasta la Estación Base. Los círculos rojos representan nodos Máster, mientras que los nodos Hoja son representados por círculos negros. Se ha utilizado un tamaño de red intermedio entre R y $2R$ que permite apreciar caminos de más de un salto sin sobrecargar la figura.

Otro ejemplo de árbol de comunicaciones creado por NORA es el mostrado en la Figura 3.8, cuya red está formada por 81 nodos dispuestos en grid (Caso D). Los árboles obtenidos demuestran que NORA es capaz de crear caminos desde cualquier nodo hasta la Estación base de forma que no haya ningún bucle.

El tiempo de creación de caminos es muy importante para determinadas aplicaciones en las que se desea que tras el despliegue de la red, los nodos comiencen a enviar datos a la mayor brevedad posible. La Figura 3.9 muestra

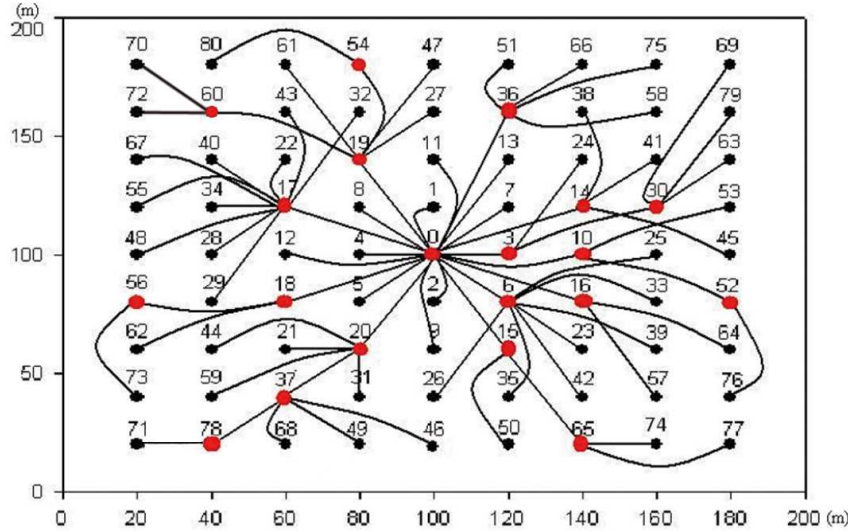


Figura 3.8: Árbol creado por NORA para una red de 81 nodos

el tiempo de creación del árbol de comunicaciones llevado a cabo por NORA al incrementar el número de nodos dentro del mismo área (Casos A y B). El tiempo necesario para crear el árbol en topologías irregulares es alrededor del 10-15 % mayor que para una topología regular. Esto es debido a la variación de la densidad de nodos en las topologías irregulares, la cual ocasiona que todos los nodos no reciban el mismo número de mensajes, como ocurre en la topología regular.

El número de paquetes necesario para completar la creación de los caminos, es un indicador de la cantidad de energía que requiere esta tarea. De forma teórica, puede calcularse el número de mensajes necesario para crear los caminos con NORA si se conocen algunos parámetros. Considerando k como el número de nodos de la red (sin contar con la Estación Base), y δ como la probabilidad de que un nodo no pueda alcanzar a ningún nodo Máster (tendrá que solicitar un cambio de rol mediante el envío de un MRM), la Ecuación 3.8 expresa el número de mensajes necesarios para organizar la red (M_k), utilizando NORA.

$$M_k = 2k(1 + \delta) + 1 \quad (3.8)$$

Cabe destacar que $\delta = [0, 1)$, ya que al menos un nodo debe ser capaz de poder comunicarse con la Estación Base. Para evaluar (3.8) en términos de δ , es posible calcular el mejor y el peor caso:

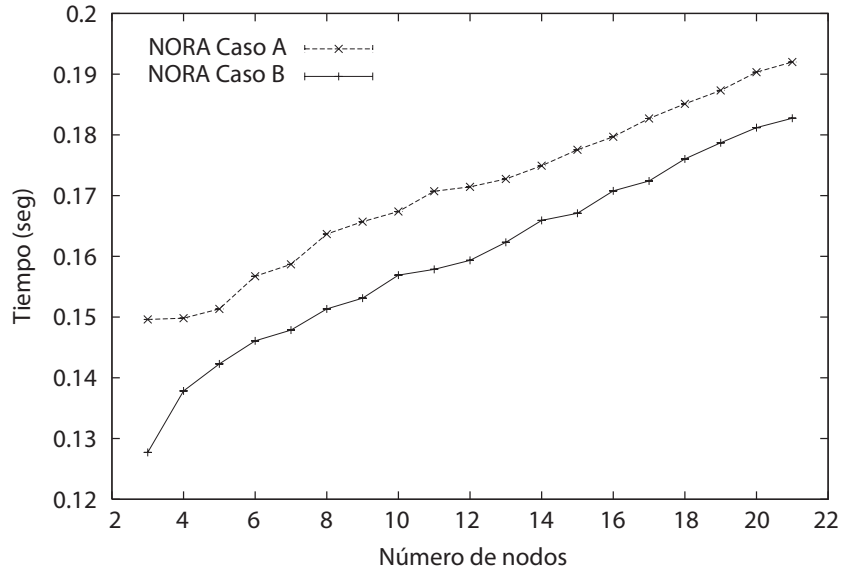


Figura 3.9: Tiempo de creación de caminos en NORA con respecto al número de nodos

- Mejor caso ($\delta = 0$): todos los nodos tienen dentro del alcance a un nodo Máster que puede ser seleccionado como padre (3.9):

$$M_{best} = 2k + 1 \quad (3.9)$$

- Peor caso (teórico) ($\delta \rightarrow 1$): sólo un nodo encuentra un nodo *master* y el resto de nodos de la red tiene que enviar MRMs para solicitar el cambio de rol (3.10):

$$M_{worst} = 4k - 1 \quad (3.10)$$

La figura 3.10 muestra el número de paquetes máximo y mínimo necesario para organizar la red, así como la media de los paquetes enviados durante la simulación de la fase de creación de caminos de NORA como una función del número de nodos de la red para los Casos C y D.

Para ambas topologías, regular e irregular, el número de paquetes necesarios para organizar la red, se acerca al mínimo teórico, ya que únicamente entre el 5 y el 10% de los nodos no pueden encontrar un nodo Máster y tienen que

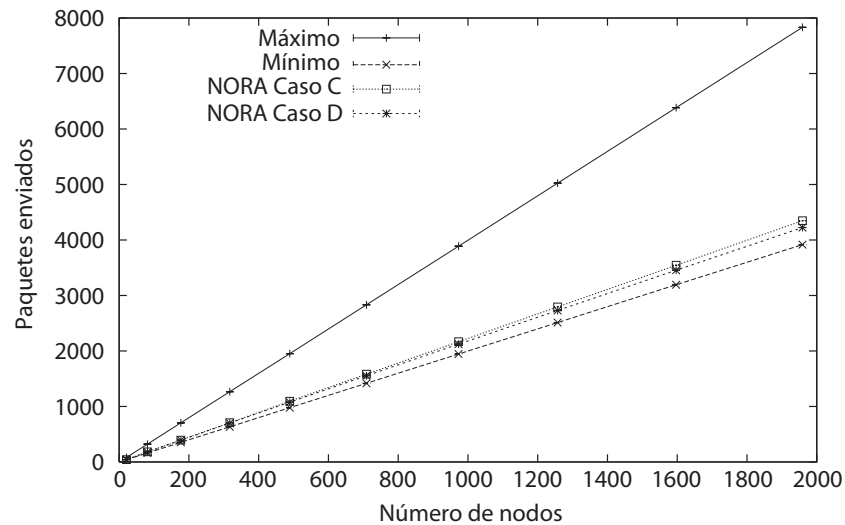


Figura 3.10: Número de paquetes para crear los caminos con NORA.

enviar un MRM al mejor nodo Hoja que tienen al alcance para que realice un cambio de rol.

Estos resultados muestran que NORA es capaz de crear una estructura en forma de árbol de manera correcta, en un tiempo relativamente bajo y utilizando una cantidad de mensajes muy cercana al mínimo teórico necesario. Una vez completada esta evaluación de NORA, se procedió a la experimentación con redes compuestas por un número mayor de nodos, y se realizaron los mismos experimentos utilizando el protocolo TR especificado por ZigBee, con el objetivo de comparar el rendimiento de ambas propuestas.

3.4.5.2. Comparación con TR en redes densas

El aumento en el número de nodos de la red permitirá evaluar la escalabilidad de NORA, mientras que la comparación con TR permitirá cotejar el rendimiento obtenido, con el alcanzado por la técnica propuesta en el estándar para este tipo de redes.

En primer lugar se va a analizar el tiempo de creación del árbol de comunicaciones para los Casos C y D. La Figura 3.11 muestra el tiempo necesario para crear las rutas desde cualquier nodo hasta la Estación Base, para NORA y TR en función del número de nodos de la red. Esta figura muestra un inter-

valo de confianza del 95 % debido a la variabilidad que presentan los resultados obtenidos por TR al trabajar con topologías irregulares.

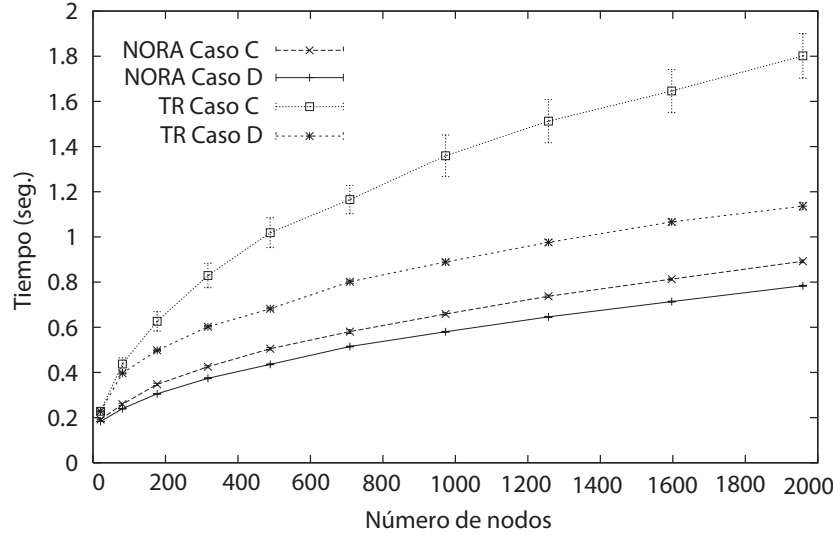


Figura 3.11: Tiempo de creación de caminos en NORA y TR.

Los resultados mostrados en la Figura 3.11 confirman la rapidez de NORA en la creación de caminos frente a TR, mejorando el tiempo de creación de caminos de este último hasta en un 50 % para topologías irregulares, y sobre el 30 % en topologías grid. En menos de 1 segundo, NORA es capaz de organizar casi 2000 nodos. Estos resultados avalan el uso de NORA en entornos en los que el usuario necesite una respuesta rápida de la red. Además, en caso de ser necesario recalcular todas las rutas, la red que utilice NORA será capaz de terminar este proceso con mayor rapidez.

A la hora de evaluar propuestas para redes de sensores encargadas de crear una estructura en árbol, es importante tener en cuenta la *profundidad* de las rutas, es decir, el número de reenvíos (saltos) necesarios para que un paquete alcance su destino. Este parámetro está directamente relacionado con el consumo de energía, de forma que una mayor longitud en las rutas indica un mayor consumo de energía global, ya que será necesario un mayor número de reenvíos. La Figura 3.12 muestra la longitud media y máxima de los caminos para los Casos C y D.

La profundidad media de las rutas para NORA es entorno al 40 % menor que para el caso de TR. Esto es debido a que en TR se seleccionan los caminos

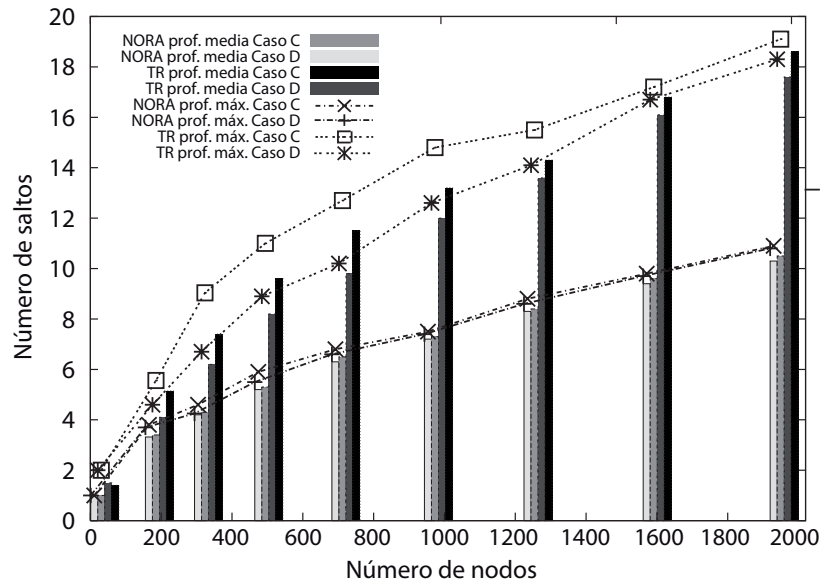


Figura 3.12: Longitudes máximas y mínimas de los caminos para NORA y TR

con menor número de saltos, pero los enlaces entre los nodos tienen que tener un RSSI superior al 60 %, de forma que habitualmente se crean rutas más largas. Por su parte, NORA primero se centra en minimizar el número de saltos, utilizando la energía restante de los nodos para desempatar en caso de tener que elegir entre dos rutas con el mismo número de saltos.

Para demostrar el efecto que el número de saltos tiene sobre el consumo de energía, consideremos la red compuesta por 1959 nodos. Según mediciones hechas con nodos TelosB reales en nuestro laboratorio, la energía necesaria para enviar un paquete del tamaño utilizado por NORA es 7×10^{-5} Julios (J). De esta forma, el coste de enviar un paquete desde alguno de los nodos más alejados será de media $72,8 \times 10^{-5}$ J ($10,4 \times 7 \times 10^{-5}$) en la red que ha utilizado NORA (siendo 10,4 el número medio de saltos para el Caso C según la Figura 3.12), mientras que en la que ha utilizado TR será $126,7 \times 10^{-5}$ J ($18,1 \times 7 \times 10^{-5}$, siendo 18,1 el número medio de saltos para el Caso C según la Figura 3.12). De esta forma, si consideramos el envío de 1000 paquetes, utilizando NORA se consumirán 0,73 J, mientras que si se utiliza TR se consumirían 1,27 J, lo que supone un ahorro de energía de más del 40 %.

Todos estos resultados sugieren que NORA es un algoritmo de enrutamiento capaz de crear caminos desde cualquier nodo de la red hasta la Estación Base de forma eficiente, rápida y fiable. Además, la comparación de NORA con TR ha

demostrado el buen comportamiento de NORA frente a una propuesta similar. Este estudio se verá completado en el Capítulo 4, donde se le añade a NORA un mecanismo basado en lógica difusa para mejorar la toma de decisiones.

3.5. Conclusiones

NORA es una técnica sencilla, rápida, escalable y eficiente para crear esquemas de encaminamiento basados en árbol para redes de sensores inalámbricas. Los resultados de las simulaciones muestran un buen comportamiento de NORA, mejorando el rendimiento obtenido por *Tree Routing*, que es la propuesta utilizada por el estándar ZigBee.

Tras esta primera propuesta, se decidió emplear una métrica que combinase las dos variables consideradas en la toma de decisiones. Para ello, se procedió al estudio de diversas técnicas para evaluar y combinar las diferentes variables (número de saltos, nivel de batería, fuerza de la señal, número de hijos, etc.). De entre las técnicas estudiadas, la lógica difusa destaca por su rendimiento, simplicidad, facilidad de uso y bajos requerimientos computacionales, por lo que es apropiada para ser implementada en los nodos sensores.

El siguiente capítulo propone el uso de un esquema basado en lógica difusa para tomar las decisiones de enrutamiento. El sistema, que ha demostrado ser un método eficaz para la definición, evaluación y combinación de parámetros, servirá de base para tomar las decisiones de enrutamiento.

Capítulo 4

Propuesta de enrutamiento basado en lógica difusa: NORIA

RESUMEN:

NORIA es un algoritmo de enrutamiento inteligente para redes de sensores, que utiliza un sistema de lógica difusa para llevar a cabo la evaluación de los nodos. Este valor de evaluación servirá como base para las decisiones de enrutamiento. Los experimentos realizados, en los que se compara NORIA con otras propuestas, muestran muy buenos resultados para el algoritmo propuesto, en términos de tiempo de creación de rutas y consumo energético.

Con el objetivo de mejorar el rendimiento de NORA, se decidió la incorporación de alguna técnica de evaluación de parámetros que permitiese combinar de forma rápida y eficiente las variables a considerar durante la toma de decisiones. La técnica utilizada es la lógica difusa, una técnica de inteligencia artificial que permite la evaluación conjunta de variables de una forma sencilla y eficaz, y además se ajusta muy bien a las características de las redes de sensores y a los requerimientos de las aplicaciones de monitorización.

4.1. Inteligencia artificial aplicada al encaminamiento

Tras un amplio estudio de la literatura, se optó la incorporación de un sistema de lógica difusa, para ser aplicado en la toma de decisiones de NORA,

de forma que éstas se lleven a cabo de forma sencilla y eficaz. Para redes de sensores, la lógica difusa se presenta como un método fácilmente adaptable, rápido y que no necesita, para ser ejecutado, gran potencia de cómputo, incrementando así el potencial de decisión de los protocolos que basen sus decisiones en ella. De este modo nace NORIA (Network rOle-based Routing Intelligent Algorithm), una evolución de NORA que basa su toma de decisiones en la evaluación de variables mediante un sistema de lógica difusa.

A continuación se definen en profundidad los sistemas de lógica difusa, que serán la base para la definición del módulo de decisión de NORIA.

4.1.1. Definiciones previas

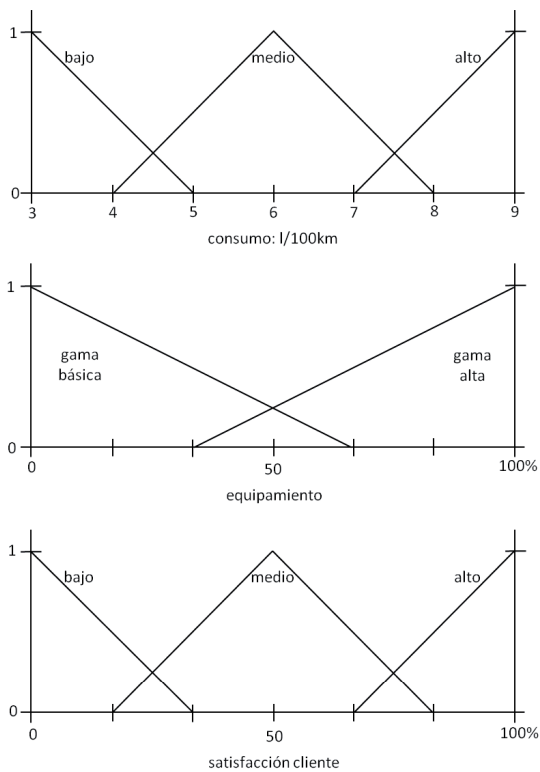


Figura 4.1: Ejemplo de conjuntos difusos

Como se comentó en el Capítulo 2, la lógica difusa es una técnica de decisión que funciona de forma similar a la lógica de control humana. En un sistema de este tipo, los estados de las variables son definidos mediante conjuntos

difusos. Mientras que la teoría de conjuntos clásica, únicamente contempla la pertenencia o no de un elemento a un conjunto, la lógica difusa considera la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto [127]. De esta forma, cada elemento del conjunto difuso puede tomar cualquier valor entre 0 y 1. Este valor es calculado mediante la función de pertenencia asociada a cada conjunto. Por ejemplo, la temperatura puede definirse como baja, media y alta, sin necesidad de ser precisada mediante un valor numérico. La interpretación de los conjuntos difusos dependerá en gran parte de las características de cada aplicación.

Normalmente, se definen uno o varios conjuntos difusos de entrada y uno o varios de salida. Por ejemplo, si se quiere modelar la satisfacción de un comprador de un coche, el sistema puede tomar como entrada el consumo de combustible y las prestaciones del coche, y como salida el nivel de conformidad de dicho comprador. La Figura 4.1 muestra un ejemplo de definición de los conjuntos de entrada (consumo y equipamiento) y salida (satisfacción cliente) del sistema. El nivel de consumo se ha dividido en *bajo*, *medio* y *alto*, mientras que las prestaciones representan la cantidad de opciones extra incluidas en el coche, desde los modelos básicos hasta los de gama alta. El conjunto de salida, por su parte, representa el grado de satisfacción del cliente y se divide en *bajo*, *medio* y *alto*.

De esta forma puede modelarse cualquier sistema en el que sus variables puedan ser definidas como conjuntos que definen los posibles estados. La función de pertenencia, por su parte, es la encargada de definir el valor de pertenencia de un determinado valor a los conjuntos definidos. Así por ejemplo, para las variables de la Figura 4.1, un consumo de 6 litros/100km. pertenecería al conjunto *medio* con valor 1, y a los conjuntos *bajo* y *alto* con valor 0.

Para combinar los posibles estados de las variables de entrada, y asociarlos con las variables de salida, se definen una serie de reglas del tipo *IF Entrada₁ == X AND Entrada₂ == Y THEN Salida = Z*. Estas reglas normalmente son definidas por un experto, que conoce el funcionamiento deseado del sistema. La Tabla 4.1 muestra las posibles reglas para las variables de ejemplo de la Figura 4.1.

Para este ejemplo se han definido reglas como:

$$\begin{aligned} &IF \textit{Consumo} == \textit{Alto} \textit{ AND } \textit{Prestaciones} == \textit{Básico} \\ &THEN \textit{Satisfacción} = \textit{Baja} \end{aligned}$$

Para llevar a cabo el proceso de decisión, el motor de inferencia es el encargado de tomar los valores de entrada del sistema y combinarlos mediante la aplicación de las reglas, para proporcionar un valor de salida. Los dos tipos

Tabla 4.1: Ejemplo de reglas difusas

Consumo	Prestaciones	Satisfacción
Bajo	Básico	Media
Medio	Básico	Baja
Alto	Básico	Baja
Bajo	Gama alta	Alta
Medio	Gama alta	Alta
Alto	Gama alta	Media

de motor de inferencia mas utilizados en la literatura son Mamdani [117] y TSK [118]. La forma de proceder de ambos es similar y consta de cuatro fases: *fuzzificación*, evaluación de reglas, combinación o agregación de reglas y *defuzzificación* (ver Figura 4.2). La principal diferencia radica en la etapa de *defuzzificación*, donde TSK permite definir los consecuentes de las reglas mediante funciones matemáticas, sin hacer uso de atributos cualitativos, perdiendo así interpretabilidad [128]. Además, TSK lleva a cabo la agregación de salidas de diferente naturaleza mediante medias ponderadas. Por su parte, Mamdani define los consecuentes de las reglas como variables difusas independientes.

En la propuesta que será detallada a continuación, se desea que el módulo de lógica difusa produzca salidas independientes, con el fin de servir como base para la toma de decisiones. Por lo tanto, el motor de inferencia que utilizaremos en los experimentos será Mamdani.

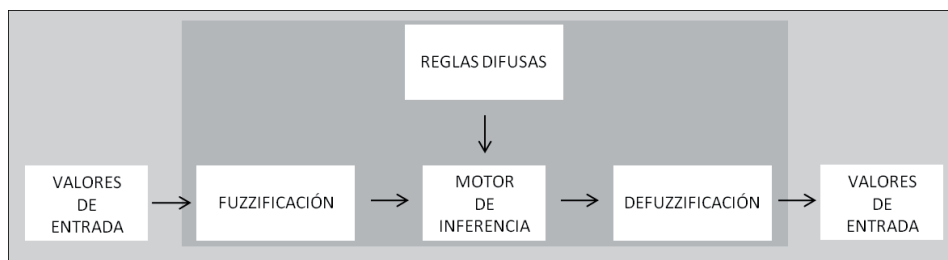


Figura 4.2: Diagrama de evaluación de datos en Mamdani y TSK

A continuación se detallan las etapas del funcionamiento de un motor de inferencia Mamdani como el que será utilizado en los experimentos:

- **Fuzzificación:** en esta primera etapa, los datos de entrada se convierten al lenguaje natural. Estos valores difusos representan los valores de pertenencia de las variables de entrada a los correspondientes conjuntos difusos.
- **Evaluación de reglas:** el motor de inferencia toma los valores difusos de la etapa anterior y evalúa las reglas correspondientes. Si alguna regla tiene más de un antecedente o elemento condicional, se utilizan operadores *AND* u *OR* para estimar el valor de salida de la evaluación.
- **Combinación o agregación de reglas:** en esta etapa se combinan las salidas de las diferentes reglas para formar un nuevo valor difuso que representará el valor de pertenencia al correspondiente conjunto de salida.
- **Defuzzificación:** para finalizar, se convierte a un valor numérico el valor difuso obtenido en la etapa anterior.

Para calcular los valores de pertenencia a los conjuntos difusos, Mamdani utiliza la técnica centroide, que consiste en determinar el punto en el que una línea vertical divide el conjunto de salida combinado en dos partes iguales.

Tomando como base estas definiciones, la siguiente sección detalla la propuesta de un módulo de decisión basado en lógica difusa, para ayudar a la toma de decisiones en el enrutamiento en redes de sensores.

4.2. Módulo de decisión basado en lógica difusa

Para definir un nuevo módulo de decisión, se van a tomar como base las variables consideradas por NORA para llevar a cabo las decisiones de enrutamiento: nivel de batería restante y número de saltos hasta la Estación Base. Como se comentó en el capítulo anterior, estas variables representan dos parámetros clave en los procesos de decisión de las redes de sensores. Por su parte, la variable de salida del sistema representa, en un rango de 0 a 1, la calidad de un nodo para convertirse en Máster y/o para ser seleccionado como padre.

Para seleccionar los conjuntos difusos de cada variable, se llevaron a cabo diversos experimentos con diferentes particiones difusas, con el fin de determinar aquellos que mejor se ajustasen a los requerimientos de las aplicaciones de

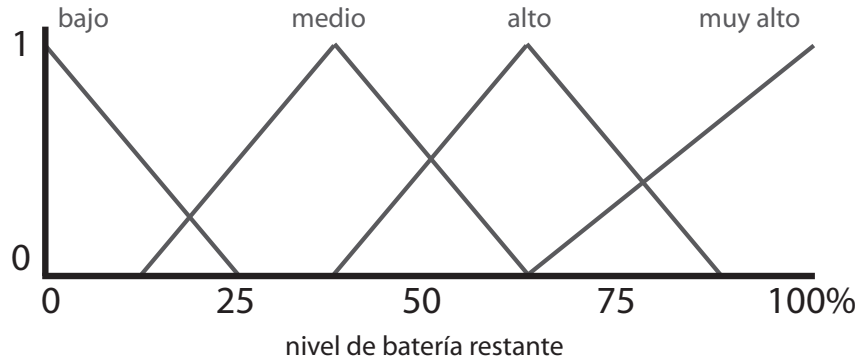


Figura 4.3: Conjuntos difusos para el nivel de batería restante

monitorización. La Figura 4.3 muestra los conjuntos difusos que definen el estado del nivel de batería restante de los nodos. Estos conjuntos son: *bajo*, *medio*, *alto* y *muy alto*, representando cada uno de ellos incrementos aproximados al 25% del valor máximo que puede tomar la variable.

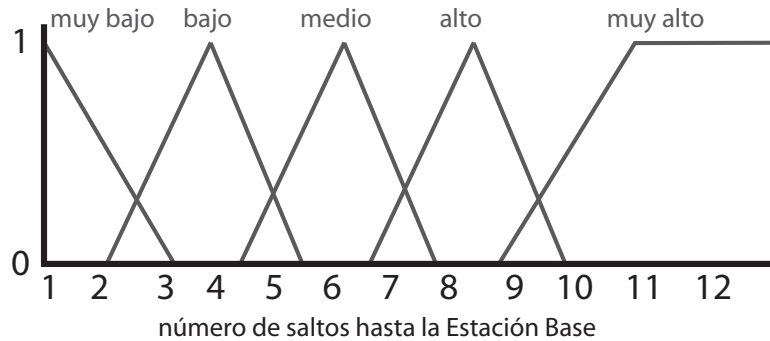


Figura 4.4: Conjuntos difusos para el número de saltos hasta la Estación Base

Los conjuntos para la otra variable a considerar, el número de saltos hasta la Estación Base, se muestran en la Figura 4.4. Dado que en los experimentos se van a considerar redes de hasta 2000 nodos, y teniendo en cuenta las cantidades y densidad de nodos descritas en la Sección 3.4.2.2, el número de saltos máximo hasta la Estación Base se estableció en 12, ya que en los experimentos realizados con NORIA, ningún camino superó esa longitud. Considerando la importancia que tiene el número de saltos en el consumo energético, se decidió declarar cinco conjuntos difusos para representar esta variable, proporcionando así una alta granularidad al evaluarla.

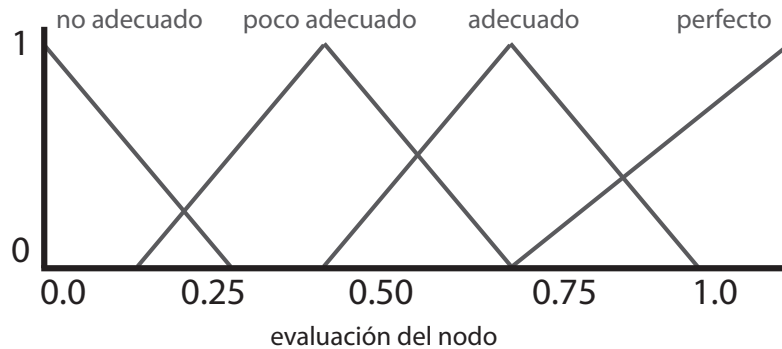


Figura 4.5: Conjuntos difusos para la variable de salida

La variable de salida proporciona una combinación de las dos variables de entrada, y permite la evaluación de los nodos en términos de batería restante y distancia hasta la Estación Base. Esta variable de salida, está definida en un rango de 0 a 1. Los conjuntos difusos en los que se ha dividido este rango se muestran en la Figura 4.5.

Estos conjuntos muestran una de las posibles definiciones que pueden realizarse, siempre dependiendo de los requerimientos de la aplicación y del objetivo buscado. Por ejemplo, en redes orientadas a la monitorización de pacientes, la frecuencia cardíaca o la presión sanguínea podrían modelarse con tres conjuntos difusos: *baja*, *normal* o *alta*, mientras que la salida del sistema podría indicar la probabilidad de sufrir o estar sufriendo una crisis cardiovascular.

Para combinar los conjuntos difusos especificados, se han definido un conjunto de reglas que representan las diversas posibilidades de combinación de los estados de las variables de entrada y las salidas asociadas. Estas reglas se resumen en la Tabla 4.2.

Las reglas difusas permiten relacionar cualquier combinación de los valores de entrada con la variable de salida. El operador por defecto que se utiliza para combinar los antecedentes de las reglas es *AND*. Como se comentó en el apartado anterior, el motor de inferencia utilizado es Mamdani. De esta forma, el sistema proporciona un valor de salida entre 0 y 1 que representa la evaluación combinada de las variables de entrada para un nodo dado. Este valor de evaluación será utilizado para decidir el rol y el nodo padre de cada nodo de la red (excepto la Estación Base).

Tabla 4.2: Conjunto de reglas difusas de NORIA

Batería	Número de saltos	Evaluación del nodo
Bajo	Muy bajo	Poco adecuado
Bajo	Bajo	No adecuado
Bajo	Medio	No adecuado
Bajo	Alto	No adecuado
Bajo	Muy alto	No adecuado
Medio	Muy bajo	Poco adecuado
Medio	Bajo	Poco adecuado
Medio	Medio	Poco adecuado
Medio	Alto	Poco adecuado
Medio	Muy alto	No adecuado
Alto	Muy bajo	Adecuado
Alto	Bajo	Adecuado
Alto	Medio	Adecuado
Alto	Alto	Poco adecuado
Alto	Muy alto	Poco adecuado
Muy alto	Muy bajo	Perfecto
Muy alto	Bajo	Perfecto
Muy alto	Medio	Adecuado
Muy alto	Alto	Adecuado
Muy alto	Muy alto	Poco adecuado

Una vez definido el módulo de decisión basado en lógica difusa, a continuación se detalla su incorporación a la toma de decisiones de NORA, dando como resultado el nacimiento de NORIA.

4.3. NORIA

NORIA es un algoritmo de enrutamiento inteligente para redes de sensores que, al igual que su predecesor, NORA, considera el nivel de batería restante y el número de saltos hasta la Estación Base para tomar las decisiones. La diferencia radica en la forma de evaluar las variables, para lo que NORIA

utiliza un sistema basado en lógica difusa que permite definir y combinar las variables de entrada y salida de una forma sencilla y eficaz.

El objetivo de NORIA es el mismo que el de NORA, la construcción de un árbol de enrutamiento en el que los nodos desempeñan diversos papeles para llevar a cabo el encaminamiento de forma distribuida y totalmente desatendida.

Dado que NORIA es una evolución de NORA, se utilizarán los mismos tipos de nodo (Estación Base, Máster y Hoja) y tipos de mensaje (RDM, IPM y MRM) definidos en la Sección 3.1. La tabla de vecinos se verá modificada ligeramente al incorporar para cada vecino el valor de salida del módulo de evaluación basado en lógica difusa, de forma que esté en todo momento disponible. Este valor será recalculado al recibir cualquier mensaje desde cualquier nodo vecino, con el fin de mantenerlo actualizado.

La forma en que se intercambian los diferentes mensajes en NORIA es la misma que en NORA (ver Sección 3.2). La modificación principal realizada en NORIA con respecto a su predecesor es la información tenida en cuenta a la hora de tomar las decisiones de enrutamiento, las cuales están ahora basadas en la salida del sistema de lógica difusa (valor de evaluación):

- **Decisión del nodo padre:** se seleccionará como padre aquel nodo que se encuentre en la tabla de vecinos, que tenga rol Máster y cuyo valor de evaluación sea el mayor de entre los posibles candidatos de nivel inferior (menor número de saltos hasta la Estación Base). En caso de no encontrarse ningún nodo Máster que cumpla estas características, se seleccionará a un vecino de menor nivel, con rol Hoja, y cuyo valor de evaluación sea el mayor de entre los posibles candidatos. Formalmente, si representamos el valor de evaluación del nodo u como E_u , y tomamos Γ_n y Υ_n , según fueron definidos en la Sección 3.2.1, la Ecuación 4.1 permite calcular el nodo padre del nodo n en tiempo t . Si n no tiene ningún vecino Máster de menor nivel se aplicará la Ecuación 4.2.

$$P(n, t) = i \in \Gamma_n / E_i = \text{máx}(E_k), \forall k \in \Gamma_n \quad (4.1)$$

$$P(n, t) = i \in \Upsilon_n / E_i = \text{máx}(E_k), \forall k \in \Upsilon_n \quad (4.2)$$

- **Decisión del rol:** para seleccionar el rol a desempeñar, cada nodo comparará su valor de evaluación con los de los vecinos que se encuentren en el mismo nivel (mismo número de saltos hasta la Estación Base). El nodo que tenga el mayor valor, se declarará Máster. En caso contrario el

rol a desempeñar será Hoja. Formalmente, la Ecuación 4.3 define el rol del nodo n en tiempo t .

$$R(n, t) = \begin{cases} MASTER, & \text{si } E_n = \text{máx}\{E_k\}, \forall k \in \{\sigma_n \cup n\} \\ HOJA, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.3)$$

Una vez que todos los nodos hayan seleccionado un nodo padre y hayan definido su rol, la red estará lista para comenzar a operar, pudiendo así los nodos, comenzar a recoger datos del entorno y a enviarlos hacia la Estación Base, según los requerimientos de la aplicación.

Con el objetivo de comprobar la eficiencia del uso del sistema de lógica difusa, así como su impacto en el rendimiento del enrutamiento, a continuación se detallan las pruebas realizadas y los resultados obtenidos.

4.4. Pruebas realizadas

Las pruebas realizadas se centran en la comparación de los resultados obtenidos para NORA y NORIA, con los proporcionados por *Tree Routing* (TR, incluido en ZigBee, detallado en la Sección 3.4.2) y *Connected Dominating Sets based routing* (CDS) [129], una propuesta de enrutamiento basado en los conjuntos conexos dominantes, cuyo funcionamiento se detalla a continuación.

4.4.1. Comparación de rendimiento

El rendimiento de NORIA va a ser comparado con NORA y TR, que fueron detallados en el Capítulo 3, y con CDS, que se basa en la aplicación de los conjuntos dominantes conexos para crear un árbol de comunicaciones. Según la teoría de conjuntos, un conjunto es dominante si todos los nodos del sistema pertenecen al conjunto o son vecinos de al menos un nodo del conjunto. Para utilizar CDS como base con la que se compararán el resto de propuestas, se ha implementado el enfoque de enrutamiento que aparece en [130]. Durante la creación de caminos, primero se lleva a cabo un proceso de marcado, mediante el cual se calcula un conjunto conexo dominante entre todos los nodos de la red. De esta forma, todos los nodos de la red se encuentran en el CDS o a un salto de algún nodo del conjunto. Los nodos que pertenecen al conjunto dominante se denominan *Gateways*, mientras que el resto son considerados nodos Hoja. El proceso de enrutamiento basado en CDS consta de tres pasos:

1. Si el nodo fuente es un nodo Hoja, enviará sus datos a un nodo *Gateway* vecino.
2. El *Gateway* que reciba un paquete de datos actuará como fuente para encaminar los paquetes en el grafo generado por el conjunto dominante.
3. Eventualmente, los paquetes llegarán hasta el *Gateway* de destino, que bien es el nodo destino, o tiene al nodo destino como vecino. En este último caso, el paquete será reenviado directamente al nodo destino.

4.4.2. Experimentos

Al igual que en los experimentos del capítulo anterior, para llevar a cabo las pruebas pertinentes, se ha utilizado el simulador Omnet++ y el módulo de simulación para redes de sensores Castalia, que fueron detallados en el Capítulo 2. También se consideran las mismas configuraciones, parámetros de simulación, de red y repeticiones de ejecución que en los experimentos del Capítulo 3.

Dado que en los experimentos realizados con NORA experimentos y como se comenta en [131], los peores resultados se obtienen para las topologías irregulares, con el fin de experimentar con el peor caso posible (en cuanto a topologías se refiere) y de simplificar la representación de resultados, los experimentos de esta sección se llevaron a cabo utilizando únicamente topologías grid irregulares, como las detalladas en la Sección 3.4.2.2.

Los parámetros medidos son:

- **Número de paquetes:** representa la cantidad de paquetes enviados, necesarios para completar la creación de rutas desde cualquier nodo hasta la Estación Base. Este parámetro es un indicador de las necesidades de comunicación de cada propuesta para completar la creación del árbol de comunicaciones. Cuanto menor sea la cantidad de paquetes enviados, mayor será la eficiencia en términos de energía.
- **Energía consumida:** es un parámetro clave en el desarrollo y funcionamiento de las redes de sensores. A menor consumo medio de energía, mayor tiempo de vida de la red.
- **Tiempo de creación de rutas:** representa el tiempo necesario para crear el árbol de comunicaciones, y es medido desde que se manda el primer paquete de descubrimiento hasta que todos los nodos tienen un camino hasta la Estación Base.

- **Número de nodos *forwarder***: este parámetro representa el número de nodos que van a reenviar datos de otros nodos, gastando así más energía que el resto. En las aplicaciones de redes de sensores es muy común el uso de técnicas de agregación de datos [132], que permiten de manera eficiente, reducir la cantidad de información que viaja por la red. De esta forma, un menor número de nodos *forwarder*, implicará un menor consumo de energía global, siempre asegurando que la cantidad de nodos *forwarder* permitirá la conectividad total de la red.

Estos parámetros permitirán realizar un análisis de la efectividad alcanzada por NORIA.

4.4.3. Resultados

En primer lugar, se van a estudiar el número de mensajes empleado en la creación del árbol de comunicaciones para NORA, NORIA, TR y CDS. Este parámetro es una medida de la cantidad de información que los nodos necesitan intercambiar para completar la creación de rutas. Además, cuanto menos mensajes se utilicen para esta tarea, mayor ahorro energético. La Figura 4.6 muestra el número de mensajes utilizados en el descubrimiento de rutas para las cuatro propuestas en función del número de nodos de la red.

En esta comparación, TR es capaz de crear las rutas hasta la Estación Base enviando el menor número de paquetes, seguido de cerca por NORIA, que a su vez utiliza menos paquetes que NORA. Estos resultados muestran que la utilización del sistema de decisión basado en lógica difusa, no supone el envío de un número extra de mensajes.

La comunicación entre nodos es la tarea que más consumo energético demanda, ya que el chip de radio debe utilizar una cierta cantidad de energía para poder transmitir los datos por el canal inalámbrico. La Figura 4.7 muestra el porcentaje medio de consumo energético de los nodos durante la creación del árbol de comunicaciones. Dado que el consumo energético de los nodos al utilizar CDS es el mayor de todos, se han normalizado el resto de consumos con respecto a él. Esta figura confirma que el ahorro en el número de mensajes necesarios en la etapa de descubrimiento de rutas se traduce en una reducción del consumo energético de los nodos. Los resultados al utilizar NORIA confirman que la ejecución del módulo de decisión no supone un mayor consumo energético.

Al igual que la energía, el tiempo de creación de rutas es un parámetro clave para algunas aplicaciones. La Figura 4.8 muestra el tiempo empleado por

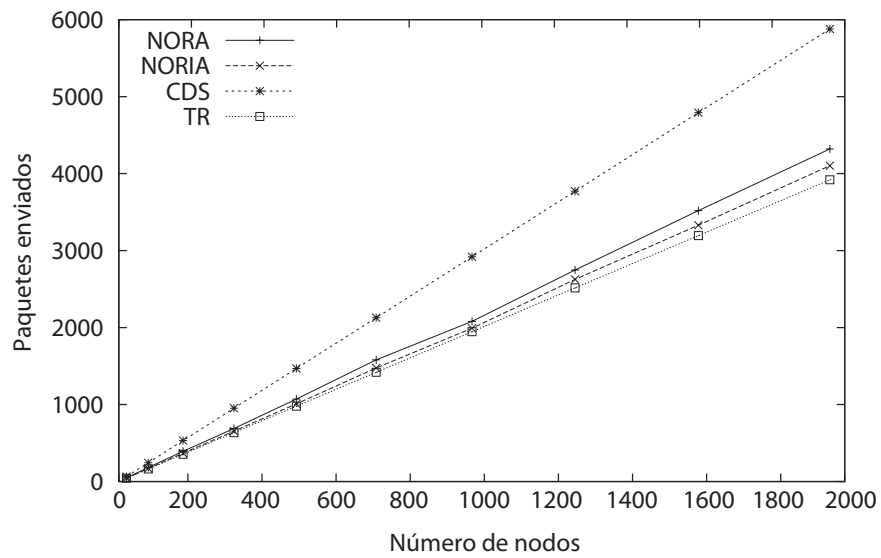


Figura 4.6: Paquetes enviados en la creación de rutas

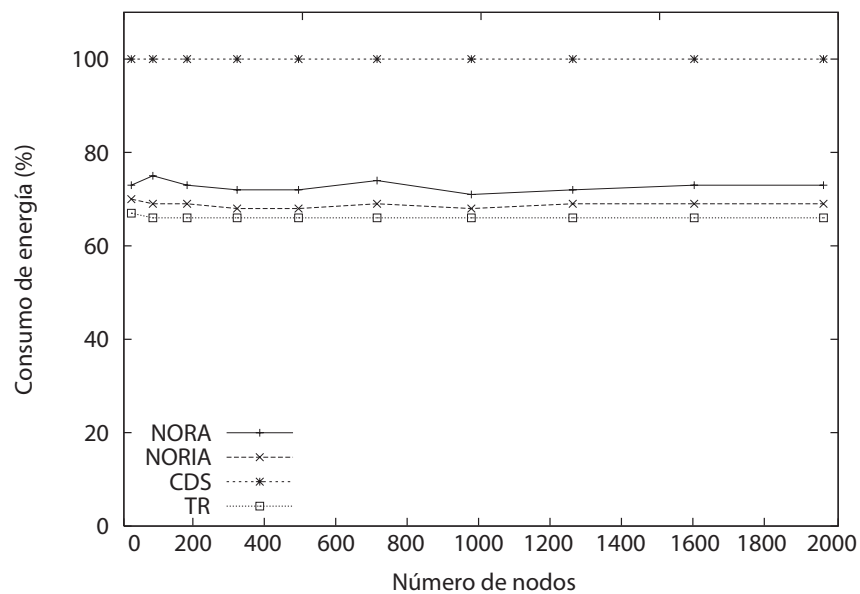


Figura 4.7: Consumo medio de energía para NORA, NORIA y TR con respecto a CDS

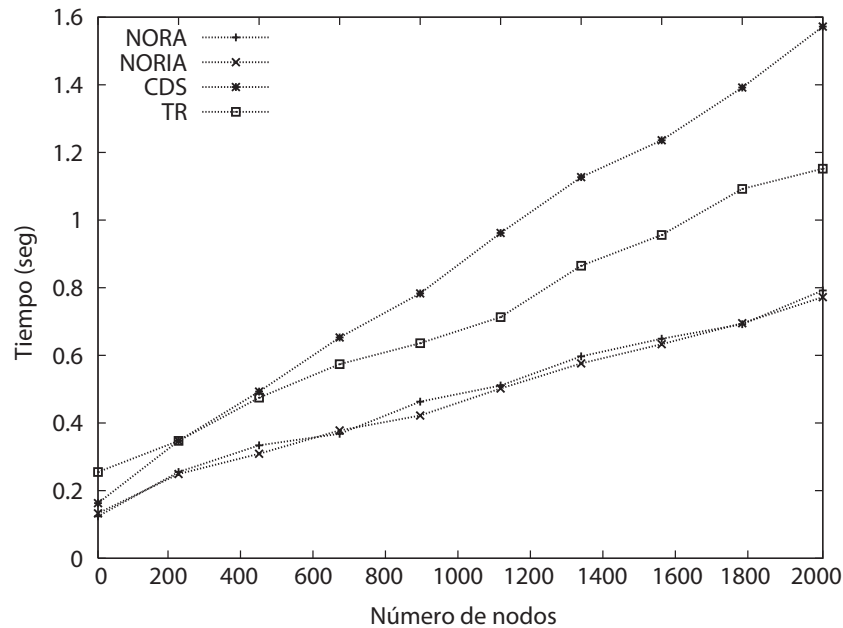


Figura 4.8: Tiempo de creación del árbol de comunicaciones

cada una de las propuestas para crear el árbol de comunicaciones. El tiempo empleado por NORIA es el más bajo en todos los experimentos, lo que significa que la ejecución del sistema de decisión basado en lógica difusa no implica un aumento en el tiempo de decisión de creación de caminos. CDS, por su parte, emplea un tiempo de descubrimiento superior debido al tiempo empleado en la selección de los nodos que formarán parte del conjunto dominante.

La agregación de datos, que consiste básicamente en agrupar mediante operaciones estadísticas, los valores recogidos por los sensores con el fin de reducir la cantidad de datos a enviar, proporciona en sí misma, un ahorro de energía. Considerando que aquellos nodos encargados de reenviar los datos de otros nodos (*forwarders*) llevan a cabo la agregación de datos, cuanto menor sea la cantidad de estos nodos, menor será el consumo medio. La Figura 4.9 muestra el número de *forwarders* para NORIA, NORIA, TR y CDS, como una función del número de nodos que componen la red. TR consigue crear los caminos con un número mínimo de *forwarders*, asegurando así un consumo mínimo al llevar los datos desde los nodos más alejados hasta la Estación Base. El número de *forwarders* obtenido al ejecutar NORIA es muy cercano al de TR, proporcionando así un importante ahorro de energía, aunque para el caso

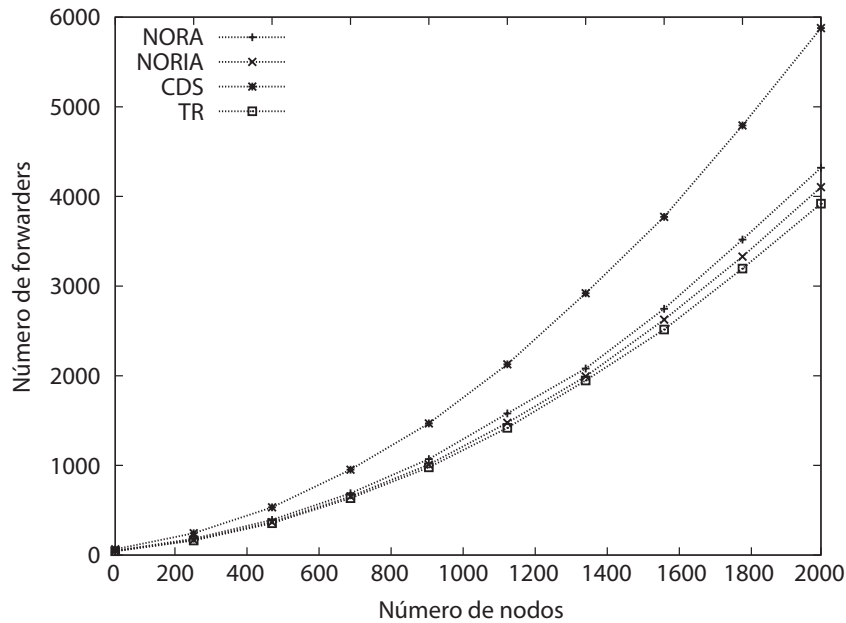


Figura 4.9: Número de nodos que reenvían datos desde otros nodos

de 21 nodos, su tiempo es significativamente inferior debido a que el conjunto dominante está formado únicamente por la Estación Base.

De esta forma, los resultados muestran que NORIA es un protocolo eficiente en términos de energía consumida y tiempo de creación de caminos en la red. Además, la lógica difusa permite la definición y combinación de más datos de entrada de una forma simple y eficaz.

4.5. Conclusiones

La necesidad de mejorar la toma de decisiones en NORA ha llevado a la definición de un módulo de decisión basado en lógica difusa. Este módulo permite definir mediante el lenguaje humano, las variables a considerar en los procesos de decisión. Se han tomado los parámetros utilizados por NORA y se han definido para ellos una serie de conjuntos difusos que los definen de forma cualitativa. Además, se ha definido una variable de salida del sistema que combina las variables de entrada y que permite conocer de forma precisa el estado de un nodo en función de los valores de las variables de entrada.

El módulo de decisión se ha incorporado a NORA, dando lugar a NORIA, cuyo funcionamiento es similar, salvo que utiliza la lógica difusa para obtener un valor de salida que define el estado del nodo a evaluar y permite la combinación de distintas variables de entrada.

Se han ampliado los experimentos realizados en el capítulo anterior mediante la implementación de un protocolo de enrutamiento basado en conjuntos dominantes, que ha sido usado como base para llevar a cabo la evaluación de NORIA. Los resultados de estos experimentos muestran que el uso del módulo de decisión basado en lógica difusa es un método eficaz de definición y evaluación de variables, ya que ha conseguido buenos resultados en términos de consumo energético y tiempo de creación de rutas. Además, el módulo de decisión permite añadir más variables al sistema, para de esta forma, hacer que la evaluación de los nodos sea todavía más completa.

En el siguiente capítulo, se añadirá la fuerza de la señal recibida (RSSI) a la lista de variables consideradas y, debido a los buenos resultados obtenidos, se incorporará el módulo de decisión de lógica difusa a las propuestas incluidas en el estándar ZigBee para redes en malla y basadas en árboles, y se estudiará el impacto de esta incorporación en el rendimiento de estos protocolos.

Capítulo 5

Incorporación del módulo de inteligencia artificial al estándar ZigBee

RESUMEN:

Este capítulo se centra en la capa de red del estándar ZigBee. Se detallan los dos protocolos de enrutamiento utilizados por este estándar para redes en árbol y en malla: TR y AODV, y se propone el uso de una versión mejorada del sistema de evaluación de nodos basado en lógica difusa de NORIA, que fue detallado en el capítulo anterior, para ser usado como métrica en dichos protocolos. Finalmente, se muestran los resultados de los experimentos con ambas propuestas, que confirman la mejora de rendimiento conseguida al utilizar la lógica difusa en la toma de decisiones.

Actualmente, la mayor parte de las propuestas para redes de sensores se basan en la arquitectura ZigBee [1]. Con el objetivo de mejorar el rendimiento de los protocolos de enrutamiento utilizados en este estándar, se propone a continuación la incorporación del sistema de evaluación basado en lógica difusa, a los protocolos de encaminamiento utilizados en ZigBee para redes con topologías en árbol y malla.

Los resultados obtenidos con el módulo de evaluación de lógica difusa de NORIA confirman que el uso de lógica difusa para llevar a cabo el enrutamiento, permite mejorar el rendimiento de la red. Con el fin de efectuar una mejor evaluación de los nodos que la llevada a cabo por parte del sistema prop-

uesto en el capítulo anterior, se ha añadido la fuerza de la señal (RSSI) a las otras dos variables consideradas (número de saltos hasta el destino y nivel de batería restante). Este módulo de evaluación, que contempla tres parámetros de entrada es incorporado a los protocolos de enrutamiento utilizados por la arquitectura ZigBee para redes en árbol y en malla. En primer lugar se detalla la arquitectura ZigBee, prestando especial atención a la capa de red, para después pormenorizar la incorporación del módulo de evaluación a los protocolos *Tree Routing* y AODV. Por último, se analizan los resultados obtenidos en los experimentos.

5.1. La arquitectura ZigBee

ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas definido por la ZigBee Alliance, una comunidad internacional de mas de 100 compañías, entre las que se incluyen empresas como Philips, Samsung, Motorola y Siemens. ZigBee no es una tecnología en sí, sino que se trata de un conjunto estandarizado de soluciones, que pueden ser implementadas por cualquier fabricante para ser utilizadas en aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos, con el fin de maximizar el tiempo de vida de las baterías que alimentan los dispositivos.

La especificación de ZigBee se apoya en el estándar IEEE 802.15.4 [14], que define las capas física y MAC. Por su parte, ZigBee define la capa de red y un marco para la programación de aplicaciones. La Figura 2.6 resume los diferentes componentes de la arquitectura ZigBee.

El objetivo principal de ZigBee es la creación de redes inalámbricas de área personal, con capacidades de monitorización y control, que puedan comunicarse de forma segura, con bajo consumo energético y bajo coste. Todo esto basado en un estándar público y global que permita a los desarrolladores y fabricantes crear productos que sean compatibles entre sí.

Por sus características, ZigBee puede ser utilizado en la mayoría de las aplicaciones descritas en la Sección 2.1.7, pero resulta especialmente funcional en redes estáticas, escalables, formadas por un gran número de dispositivos, con bajos requisitos de ancho de banda, que lleven a cabo un uso poco frecuente del canal y que además requieran una gestión eficiente de las baterías. Es por esto que ZigBee resulta de gran utilidad en aplicaciones de monitorización para redes de sensores inalámbricos.

5.1.1. ZigBee en detalle

ZigBee soporta redes multi-salto, de forma que se puede establecer la comunicación entre dos dispositivos incluso cuando éstos se encuentren fuera del rango de transmisión, siempre que existan nodos intermedios que puedan interconectarlos, permitiendo de esta forma ampliar el área donde la red puede ser desplegada [133].

La baja tasa de envío de paquetes hace que ZigBee pueda operar en redes con gran densidad de nodos. Además, ZigBee otorga un identificador único a cada red, de forma que pueden coexistir varias redes en un mismo canal de comunicación.

La capa física implementada en ZigBee opera en las bandas libres de 2.4 GHz y 868 MHz en Europa, y en la banda de 915 MHz en Estados Unidos. Este espectro es conocido como ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). El rango de cobertura de los dispositivos puede ser de hasta 100m, con una velocidad de transmisión de 250kbps.

A nivel MAC, ZigBee utiliza CSMA/CA [14] para llevar a cabo el acceso al canal, permitiendo la utilización de *beacons* para planificar las comunicaciones entre los nodos. En este nivel se definen dos tipos principales de dispositivos:

- **Dispositivo de funcionalidad completa (FFD, *Full Function Device*)**: implementan la funcionalidad completa de la capa MAC, y pueden comunicarse con cualquier dispositivo de la red.
- **Dispositivos de funcionalidad reducida (RFD, *Reduced Function Device*)**: su funcionalidad y capacidad son limitadas con el objetivo de conseguir simplicidad y bajo coste, y únicamente pueden comunicarse con FFDs.

La capa de red es la encargada de la gestión de rutas en la red. Para ello, define una serie de roles que pueden ser llevados a cabo por los nodos en este nivel:

- **Coordinador**: se trata de un FFD que cumple el rol más completo, pudiendo actuar como sumidero en las redes con topologías en árbol para almacenar los datos recogidos por la red, o servir de enlace para la comunicación con otras redes.
- **Router**: son FFDs que además de las tareas de recogida y envío de datos programadas en la aplicación, pueden actuar como enlace de interconexión entre dispositivos separados dentro de una misma red.

- **End Device:** generalmente son RFDs que poseen la funcionalidad necesaria para comunicarse únicamente con su nodo padre, que puede ser el Coordinador o un Router. De esta forma, este tipo de nodos pueden estar *dormidos* (chip de radio desactivado) la mayor parte del tiempo, permitiendo así aumentar su tiempo de vida.

Dado que este capítulo presenta una propuesta de mejora para los protocolos utilizados en la capa de red, a continuación se estudia en detalle este nivel de la arquitectura ZigBee.

5.2. La capa de red en ZigBee

La capa de red de ZigBee, se encarga de la creación y mantenimiento de caminos en la red. Además proporciona mecanismos para iniciar la operación de la red, gestionar la incorporación y eliminación de nodos, garantizar la entrega de paquetes al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos [134, 135]. De entre todas estas tareas, este trabajo va a centrarse en la creación y mantenimiento de caminos. Para ello, ZigBee distingue entre tres tipos de topologías de red: estrella, árbol y malla (ver Figuras 2.1 y 2.2). Dado que el encaminamiento de las redes con topología en estrella puede resolverse mediante esquemas de planificación de nivel MAC [73], nos centraremos en las topologías en árbol y malla.

Además, estas dos topologías se ajustan muy bien a las aplicaciones de monitorización, para las que están orientadas principalmente las propuestas de esta tesis: las topologías en árbol permiten llevar a cabo la recogida de datos de red por parte de un nodo sumidero o Estación Base en aplicaciones de monitorización ambiental, mientras que las redes en malla son ideales para las comunicaciones de las redes de monitorización de edificios, ya que permiten a los nodos comunicarse con los actuadores, que llevarán a cabo tareas concretas en función de los datos recogidos por los sensores.

Dependiendo del tipo de topología de la red, árbol o malla, ZigBee utiliza diferentes algoritmos de enrutamiento.

5.2.1. Enrutamiento en topologías en árbol

Para la topología en árbol, ZigBee utiliza el protocolo *Tree Routing* (TR) [1], en el cual el coordinador comanda la red y los nodos Router son utilizados como enlace para hacer llegar los datos desde todos los nodos de la red hasta

el Coordinador. De esta forma, los nodos (ya sean Router o End Device) únicamente pueden comunicarse con su nodo padre, de forma que cualquier nodo de la red es capaz de hacer llegar sus datos al Coordinador. Además, se define un esquema de direccionamiento para que cada Router pueda encaminar los datos de forma rápida y efectiva una vez que se ha completado la construcción del árbol de comunicaciones.

El proceso de creación de rutas mediante TR es iniciado por el Coordinador, el cual envía (*broadcast*) un mensaje de descubrimiento. Los nodos que reciben este mensaje se asocian al Coordinador y envían sus propios mensajes de descubrimiento. Aquellos nodos que reciban estos mensajes, seleccionarán al mejor nodo como padre tomando como base para ello información relativa al número de saltos y a la calidad de los enlaces. Así, aquellos nodos que hayan sido seleccionados como padre por algún otro nodo, pasarán a actuar como Routers. Este proceso se propaga por la red, hasta que todos los nodos de la red han seleccionado un nodo padre.

TR presenta ciertos problemas relacionados con la métrica utilizada, ya que al no contemplar ciertos parámetros, el rendimiento de la red puede caer en picado [101, 136]. Por ejemplo, el no considerar la energía restante de los nodos al ser seleccionados como padre puede llevar a importantes sobrecargas que provoquen fallos en los nodos, causando así pérdida de datos.

5.2.2. Enrutamiento en topologías en malla

Por su parte, ZigBee utiliza AODV (descrito en el RFC 3561 [2]) para llevar a cabo el encaminamiento en las redes en malla. AODV es un protocolo de enrutamiento bajo demanda, que basa el descubrimiento de caminos en un ciclo de petición/respuesta de ruta y utiliza el número de saltos desde la fuente hasta el destino como métrica para tomar las decisiones. En términos generales, cuando un nodo necesita enviar datos hacia un nodo destino, la fuente envía mediante *broadcast* un paquete de petición de ruta, con el objetivo de descubrir un camino hasta el destino. Los nodos intermedios reenviarán ese paquete y cualquier nodo que tenga un camino válido hasta el destino, o el mismo nodo destino, contestará a la fuente de forma *unicast* con un paquete de respuesta de ruta. Cuando la fuente haya recibido este paquete de respuesta, podrá iniciar el envío de datos hacia el destino. Las rutas son mantenidas y si ocurre algún error durante el tiempo de validez de las rutas, se propaga un mensaje de error para que los nodos implicados eliminen las rutas afectadas.

Los mensajes utilizados durante el descubrimiento de rutas son:

- **Petición de ruta (*Route Request*, RREQ)**: estos mensajes se utilizan para descubrir las rutas. Un RREQ contiene: ID del RREQ, direcciones de la fuente y el destino, número de secuencia (*Sequence Number*, SN), número de saltos, tiempo de vida del RREQ (*Time To Live*, TTL) y algunos *flags* de control. El identificador de RREQ combinado con el número de secuencia, permite identificar de manera inequívoca un RREQ.
- **Respuesta de ruta (*Route Reply*, RREP)**: aquellos nodos que conocen un camino hacia el destino, o el nodo destino de un RREQ, responden a éste con un RREP, que contiene las direcciones fuente y destino, tiempo de vida de la ruta, número de secuencia, número de saltos y algunos flags de control.
- **Error de ruta (*Route Error*, RRER)**: este tipo de mensajes es utilizado para notificar fallos en los enlaces y así evitar su uso. Contienen las direcciones y números de secuencia de los correspondientes destinos implicados. Cualquier nodo que reciba un RRER, invalidará las correspondientes entradas en su tabla de vecinos.

El proceso de descubrimiento de ruta se inicia cuando un nodo fuente quiere enviar un paquete a un nodo destino. Si la ruta es desconocida, el paquete es almacenado en un *buffer* y el nodo fuente enviará mediante *broadcast* un RREQ hacia el nodo destino. Cualquier nodo que reciba un RREQ comprobará la dirección de destino para ver si él mismo es el nodo destino, o si conoce un camino hacia él. En este caso, enviará un mensaje RREP (*unicast*) hacia el nodo origen. En caso contrario, el nodo intermedio almacenará el RREQ (para recuperar información en caso de recibir un RREP) y lo reenviará, si su TTL -que es inicializado en el nodo origen y decrementado en cada salto- no ha llegado a cero. La Figura 5.1 representa las acciones llevadas a cabo por los nodos de la red ante la recepción de un RREQ.

Con el fin de controlar posibles *tormentas* de envíos de RREQs, el nodo fuente utiliza una técnica de búsqueda de expansión en anillo, que permite incrementar en cada intento, el área de búsqueda en caso de no encontrarse el camino hacia el destino. Para evitar bucles y reenvíos múltiples, los paquetes son reenviados una única vez, a no ser que un nodo intermedio reciba primero un RREQ o RREP con la misma información pero con un número de saltos inferior. En este caso, el paquete será reenviado para descubrir la ruta con el menor número de saltos.

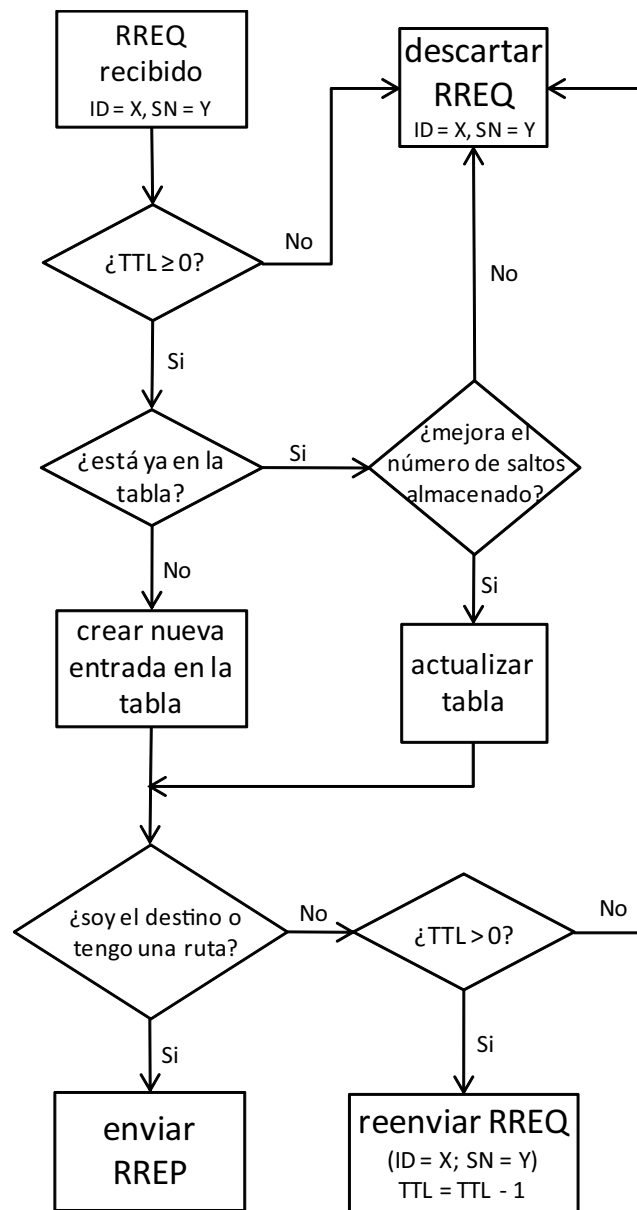


Figura 5.1: Acciones ante la recepción de un RREQ en AODV

De esta forma, el nodo fuente recibirá en algún momento un RREP, si existe una ruta hacia el destino. Es entonces cuando podrán ser enviados los datos previamente almacenados. La Figura 5.2 muestra un ejemplo de los mensajes enviados durante el descubrimiento de ruta desde el nodo fuente (A) hasta el

nodo destino (D). Para ello, el nodo A envía un RREQ que es recibido por B, el cual lo reenvía después de almacenar su información, para reenviar el RREP en caso necesario. El nodo C por su parte, realiza la misma tarea que el nodo B, es decir, almacena la información del RREQ y lo reenvía. Es entonces cuando el nodo D recibe el RREQ y genera un RREP destinado a A. Los nodos C y B reenvían este RREP, a la vez que almacenan la ruta hasta el nodo D por si fuera necesaria en un futuro. Cuando A recibe el RREP, ya puede enviar los datos hacia D a través del nodo del que recibió el RREP, en este caso, B.

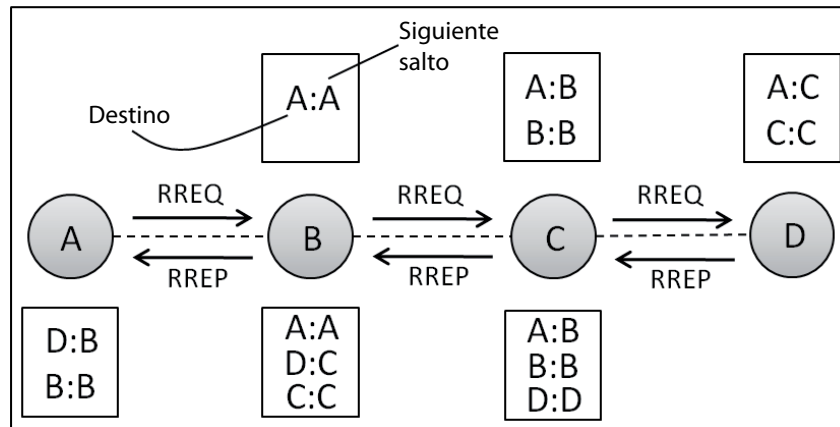


Figura 5.2: Ejemplo de descubrimiento de ruta en AODV

En caso de detectarse un error en algún enlace, los nodos implicados generarán paquetes RRER con el fin de notificar el fallo a los nodos cuyas rutas atravesasen esos enlaces.

Debido a su naturaleza de operación bajo demanda, AODV presenta varios problemas, principalmente relacionados con la sobrecarga ocasionada por la gran cantidad de reenvíos de paquetes [137]. Estos problemas generan entre otros, pérdidas de paquetes, colisiones, retrasos en las comunicaciones y alta latencia. A continuación se enumeran los problemas principales que pueden darse al utilizar AODV:

1. **Sobrecarga:** AODV requiere una gran cantidad de paquetes para completar las tareas de descubrimiento de caminos y enrutamiento [138, 139]. Los reenvíos de RREQs suponen una gran carga para la red, y esta carga se incrementa cuando los paquetes tienen que ser reinyectados en la red debido a colisiones, o a que el canal se encuentra ocupado en el momento del envío. Conforme aumenta la densidad de nodos en la red, el número

de mensajes enviados y recibidos por cada nodo se incrementa de manera cuadrática [139]. Esto ocurre porque cuando los nodos reenvían los RREQs, éstos son recibidos por más nodos, que a su vez los reenvían. De esta forma, cuantos más nodos lleven a cabo este proceso, peor será el rendimiento de la red.

2. **Descubrimientos redundantes:** los enlaces se ven frecuentemente saturados causando bloqueos en las rutas, lo que provoca el descubrimiento de nuevas rutas, incrementando así la sobrecarga y agravando el problema [102]. Además, los descubrimientos redundantes causan importantes retrasos y provocan un mayor consumo de energía.
3. **Retrasos en el descubrimiento de rutas:** al ser un protocolo que descubre las rutas bajo demanda, AODV presenta una clara debilidad: la latencia. El tiempo de descubrimiento de rutas puede aumentar debido a problemas relativos al acceso al medio, como canal ocupado y colisiones. El tiempo de creación de rutas muestra un crecimiento cúbico en relación al número de nodos [139]. Por su parte, el retraso extremo a extremo en AODV también se incrementa cuando un gran número de nodos intentan comunicarse a la vez, principalmente debido a las colisiones que se producen [140].
4. **Requerimientos de memoria:** la cantidad de memoria utilizada es otro parámetro a tener en cuenta ya que AODV requiere que todos los nodos reserven suficiente memoria para almacenar todas las posibles rutas que vayan a pasar por cada nodo [138, 141]. Este problema limita la escalabilidad en redes de sensores debido a la limitación de recursos de los dispositivos que forman este tipo de redes [142].
5. **Mensajes duplicados:** es posible que un nodo que acaba de reenviar un RREQ, reciba de nuevo el mismo RREQ (mismo ID y número de secuencia) con menor número de saltos, de forma que tendrá que ser reenviado (o contestado con un RREP) nuevamente, incrementando así la carga de la red y el consumo de energía.
6. **Métrica deficiente:** otro problema en AODV es la métrica utilizada para llevar a cabo las decisiones de enrutamiento. AODV utiliza únicamente el número de saltos como métrica para seleccionar las rutas, de forma que siempre se seleccionará la ruta más corta [143], pero no considera otros parámetros importantes como por ejemplo la energía disponible en los nodos, el tráfico en la ruta o la calidad de la señal.

Ante los problemas presentados por los protocolos de enrutamiento utilizados por ZigBee, TR y AODV, para topologías en árbol y en malla respectivamente, a continuación se plantea el uso de una métrica basada en la combinación de diferentes parámetros mediante un sistema de lógica difusa, como el propuesto en el Capítulo 4. Con el fin de llevar a cabo una propuesta consistente y completa para ser aplicada al estándar, además de las dos variables utilizadas en el módulo de evaluación de NORA (energía restante y número de saltos), se añadirá la fuerza de la señal recibida al conjunto de parámetros, que serán combinados para ser utilizados como métrica.

5.3. Uso del módulo de inteligencia artificial de NORIA

Como se vio en el Capítulo 4, el uso de lógica difusa para combinar los parámetros considerados en la toma de decisiones es una técnica eficiente que proporciona un buen rendimiento, permitiendo ahorrar energía y reducir la sobrecarga, sin aumentar el tiempo de creación de rutas.

Al utilizar la métrica calculada mediante lógica difusa, se pretenden acotar algunos de los problemas principales de TR y AODV. En TR se busca desviar la carga hacia los nodos con mejor estado, para intentar extender el tiempo de vida de la red lo máximo posible. Para AODV, lo que se persigue es reducir la sobrecarga que supone el descubrimiento de rutas bajo demanda, acotando así el consumo de energía y los tiempos, tanto de descubrimiento de rutas, como de comunicación extremo a extremo.

La métrica que se va a detallar a continuación, va a ser la misma para las dos propuestas TR y AODV, y está basada en la definición y combinación, mediante un sistema de lógica difusa, de tres importantes parámetros:

- **Número de saltos:** en TR representa el número de saltos desde cualquier nodo hasta el Coordinador, mientras que en AODV representa el número de saltos desde el nodo fuente hasta el nodo destino. En general, un menor número de saltos representa una mejor ruta, pero puede no ser así ya que es posible que algunos nodos presenten poca batería restante, o que haya enlaces de datos que ofrezcan poca calidad, por lo que es importante combinar el número de saltos con otras variables para asegurar una correcta comunicación. El tamaño de las redes será diferente para los experimentos con FL-TR y con AODV-FL. Para FL-TR, se utilizarán las mismas configuraciones que en el Capítulo 4, con redes de hasta 1959

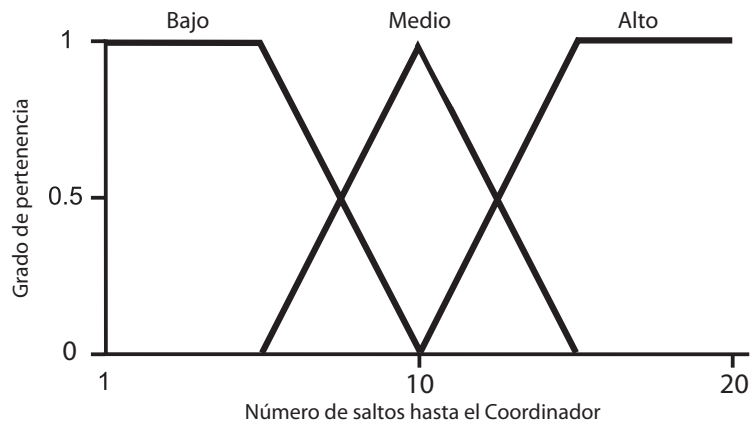


Figura 5.3: Conjuntos difusos para número de saltos en FL-TR

nodos, mientras que para AODV-TR, como se justificará más adelante, el tamaño máximo de las redes será de 200 nodos. Así, la Figura 5.3 muestra los conjuntos difusos definidos para el número de saltos en FL-TR, mientras que la Figura 5.4 muestra los conjuntos difusos definidos para el número de saltos en AODV-FL. El número máximo de saltos utilizado en los conjuntos definidos para ambas propuestas se corresponde con el mayor número de saltos observado en los experimentos para TR.

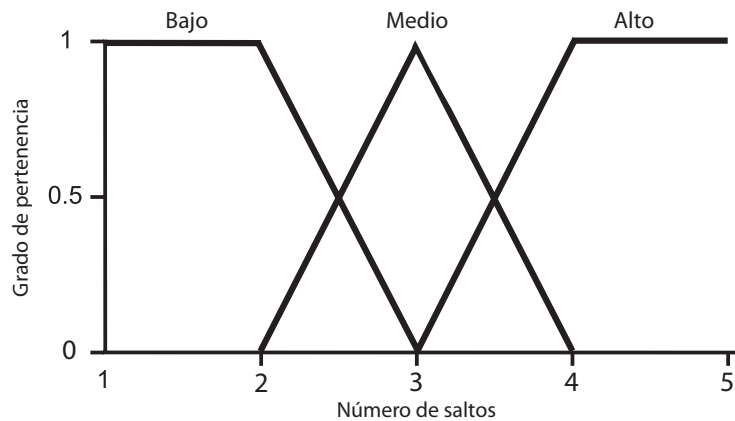


Figura 5.4: Conjuntos difusos para número de saltos en AODV-FL

- **Nivel de batería restante:** este parámetro debe ser considerado con el fin de evitar que los nodos con batería baja formen parte de las rutas,

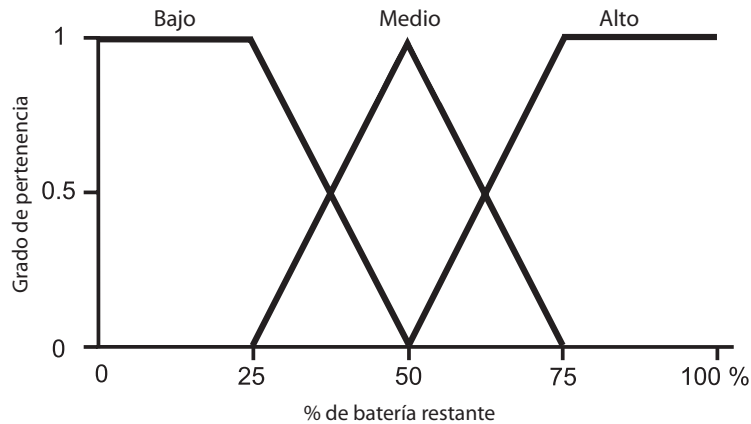


Figura 5.5: Conjuntos difusos para el nivel de batería restante

ya que serán más propensos a causar fallos en las comunicaciones. La construcción de rutas considerando nodos con altos niveles de batería -cuando sea posible-, ayudará a mantener activos aquellos nodos cuyas baterías se encuentren más agotadas, permitiendo así equilibrar el tiempo de vida de todos los nodos de la red. Los conjuntos difusos definidos para el nivel de batería se muestran en la Figura 5.5, donde el eje X representa (en tanto %) el nivel de batería restante del nodo.

- Fuerza de la señal recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*):** es un indicador de la calidad de las comunicaciones entre dos nodos. Para asegurar una comunicación efectiva y prevenir pérdidas de datos, la fuerza de la señal también será tomada en cuenta a la hora de decidir qué nodos formarán parte de las rutas. La Figura 5.6 muestra los conjuntos difusos para este parámetro. El eje X representa (en tanto %) el nivel de fuerza de la señal recibida, tomando como valor máximo (100 %) aquel en el que dos nodos se encuentran uno junto al otro.

La salida del sistema de lógica difusa (ver Figura 5.7), que será incorporada como métrica, la denominaremos valor de evaluación y representará las

capacidades de un nodo. Se utilizará en TR para seleccionar el nodo padre, y en AODV para elegir a los nodos que formarán parte de las rutas.

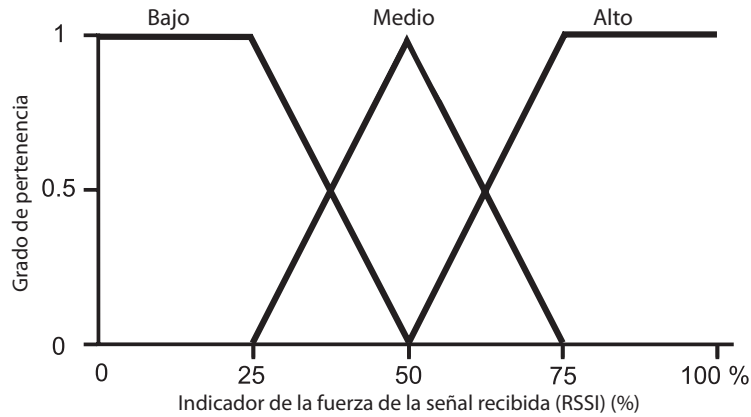


Figura 5.6: Conjuntos difusos para la calidad de la señal recibida

Para la definición de los conjuntos difusos se ha utilizado un patrón de triángulos, ya que facilita tanto la definición como el posterior tratamiento de dichos conjuntos, ofreciendo un rendimiento prácticamente similar al obtenido cuando se utilizan conjuntos más complejos [121].

Además se han definido una serie de reglas que permiten relacionar los diferentes conjuntos de las variables de entrada, con el correspondiente conjunto de salida. La Tabla 5.1 resume estas reglas. Un ejemplo de regla que está incluido en el sistema sería el siguiente:

$$\begin{aligned} IF \text{ Número de saltos} == \text{Bajo} \text{ AND } \text{ Nivel de batería} == \text{Bajo} \\ \text{ AND } \text{ RSSI} == \text{alto} \text{ THEN } \text{ Salida} = \text{Medio} \end{aligned}$$

Al igual que en el sistema de lógica difusa propuesto en el Capítulo 4, se desea que el sistema proporcione salidas independientes, por lo que el motor de inferencia utilizado será Mamdani, que ya fue detallado en ese mismo capítulo.

Cabe resaltar que tanto los parámetros a considerar, como los conjuntos difusos y las reglas definidas, constituyen un ejemplo de especificación adaptado a aplicaciones de monitorización, y pueden ser acomodados a los requerimientos específicos de cada aplicación en particular, de tal forma que, por ejemplo, en aplicaciones de vigilancia, el tiempo de respuesta o la calidad de servicio pueden ser dos variables interesantes para ser consideradas en la toma de decisiones.

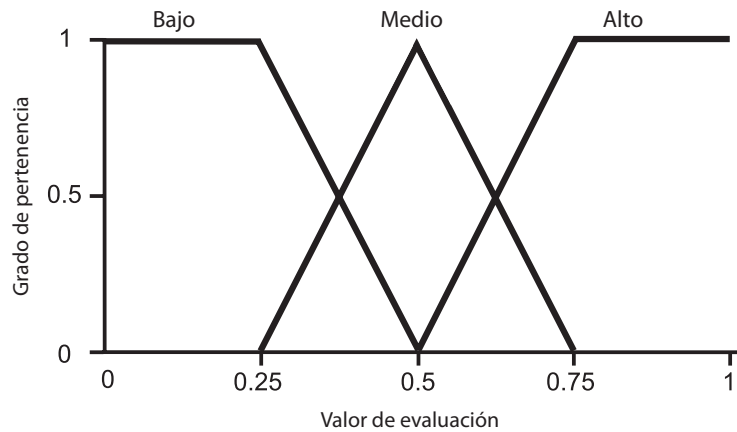


Figura 5.7: Conjuntos difusos para el valor de evaluación (salida)

A continuación se detalla la forma en que la métrica ha sido incorporada a cada uno de los protocolos de enrutamiento utilizados en ZigBee, dando lugar a FL-TR (*Fuzzy-Logic-based Tree Routing*) y AODV-FL (*Ad Hoc on Demand Distance Vector routing with Fuzzy Logic*).

5.3.1. Enrutamiento inteligente en árboles: FL:TR

En TR, la métrica basada en lógica difusa será utilizada para llevar a cabo la decisión de elegir al nodo padre, de forma que aquellos nodos que sean seleccionados como padre por algún otro nodo, se convertirán automáticamente en Routers.

El intercambio de mensajes en TR-FL será el mismo que el especificado en la Sección 5.2.1 para TR, mientras que para llevar a cabo la selección del nodo padre en TR-FL, si un nodo tiene al alcance al Coordinador, éste

Tabla 5.1: Reglas difusas para FL-TR y AODV-FL

N. saltos	Nivel de Bat.	RSSI	Salida
Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Bajo	Bajo	Medio	Bajo
Bajo	Bajo	Alto	Medio
Bajo	Medio	Bajo	Medio
Bajo	Medio	Medio	Medio
Bajo	Medio	Alto	Alto
Bajo	Alto	Bajo	Medio
Bajo	Alto	Medio	Alto
Bajo	Alto	Alto	Alto
Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Medio	Bajo	Medio	Bajo
Medio	Bajo	Alto	Medio
Medio	Medio	Bajo	Bajo
Medio	Medio	Medio	Medio
Medio	Medio	Alto	Medio
Medio	Alto	Bajo	Bajo
Medio	Alto	Medio	Medio
Medio	Alto	Alto	Alto
Alto	Bajo	Bajo	Bajo
Alto	Bajo	Medio	Bajo
Alto	Bajo	Alto	Bajo
Alto	Medio	Bajo	Bajo
Alto	Medio	Medio	Bajo
Alto	Medio	Alto	Medio
Alto	Alto	Bajo	Bajo
Alto	Alto	Medio	Medio
Alto	Alto	Alto	Medio

será seleccionado como padre; en caso contrario, los nodos calcularán el valor de evaluación para cada uno de los posibles candidatos y seleccionarán como padre a aquél que obtenga un mayor valor. De esta forma, únicamente actuarán como Router aquellos nodos cuyo valor de evaluación sea el mejor de entre sus vecinos.

Así, los caminos hasta el Coordinador, al utilizar TR-FL, estarán formados por aquellos nodos que tengan mejores condiciones, previniendo así posibles fallos debidos a nodos Router bajos de recursos. Además se proponen diversos mecanismos para hacer frente a determinadas situaciones que pueden degradar el rendimiento de la red:

- **Router con bajos recursos:** para prevenir fallos en los nodos Router y evitar divisiones en la red, cuando el nivel de batería de un nodo Router desciende por debajo de cierto umbral, envía un mensaje a sus hijos para que intenten buscar otro Router por el que enviar sus datos, para de esta forma, equilibrar la carga y preservar la conectividad de la red.
- **Fallo de nodos Router:** los nodos Router mandan mensajes de reconocimiento (ACK) cuando reciben datos desde sus nodos hijo con el fin de informarles de que los datos han sido recibidos. Si un nodo no recibe el ACK desde su nodo padre dos veces consecutivas, procederá a seleccionar otro nodo padre de entre los candidatos disponibles.
- **Incorporación de nuevos nodos:** una vez que la red ya está en funcionamiento (ya se ha formado el árbol de comunicaciones) y un nuevo nodo quiere unirse a ella, este nuevo nodo escucha el canal. Si recibe un mensaje desde el Coordinador o desde un nodo Router, lo seleccionará como padre de forma automática. En caso contrario, seleccionará al nodo *End Device* que mejor valor de evaluación obtenga de entre los posibles candidatos.

De esta forma, tras aplicar la métrica a TR, se espera mejorar el proceso de formación del árbol de comunicaciones con el objetivo de obtener un árbol más robusto que permita incrementar el tiempo de vida de la red. En la Sección 5.4 se detallan todos los experimentos realizados y se analizarán los resultados obtenidos.

5.3.2. Enrutamiento inteligente en mallas: AODV-FL

Para el caso de AODV, además de incorporar la métrica para seleccionar los nodos que formarán parte de las rutas, también se proponen ligeros cambios en la forma de actuar del protocolo, para así evitar en la medida de lo posible, la sobrecarga provocada por los reenvíos de paquetes RREQ.

En AODV-FL, un nodo que reciba un RREQ, calculará el valor de evaluación asociado al nodo del cual se recibió ese RREQ, y si es el primer RREQ (no

se ha recibido otro con igual ID y número de secuencia), se iniciará un temporizador. Este temporizador será proporcional al número de RREQs recibidos en un determinado lapso de tiempo, de forma que tenga relación con el nivel actual de congestión de la red, con el fin de evitar colisiones y re-inyecciones de paquetes en la red. Durante la duración del temporizador, si el nodo recibe más RREQs con el mismo ID y número de secuencia, el RREQ almacenado será actualizado si el valor de evaluación para el nuevo RREQ recibido es mayor que el del RREQ almacenado. Cuando el temporizador expire, el nodo reenviará el RREQ almacenado, que será aquel cuyo remitente haya obtenido un mayor valor de evaluación por parte del sistema de lógica difusa.

En caso de que el nodo conozca una ruta hacia el destino solicitado por el RREQ, o que él mismo sea el nodo destino, se generará un RREP que será enviado al nodo remitente del RREQ que mayor valor de evaluación haya alcanzado. La Figura 5.8 muestra mediante un diagrama de flujo las acciones llevadas a cabo por los nodos ante la recepción de un paquete RREQ en AODV-FL.

AODV-FL presenta dos claras diferencias frente a AODV. Primero el cambio de métrica: el número de saltos en AODV por el valor de evaluación de las capacidades del nodo mediante lógica difusa en AODV-FL, que combinan número de saltos, nivel de batería restante y RSSI. Y segundo, la incorporación de un temporizador que permite seleccionar el mejor RREQ para ser reenviado, evitando así múltiples reenvíos para un mismo RREQ.

El envío múltiple de un mismo RREQ es frecuente en AODV ya que en algunas ocasiones, un nodo reenvía un RREQ con un determinado número de saltos y después reenvía el mismo RREQ (mismo ID y número de secuencia) con un número de saltos menor.

Con estas premisas se pretende reducir en primer lugar, el número de paquetes enviados, reduciendo así el consumo global de la red y en segundo, mejorar la formación de los caminos, seleccionando en cada salto el mejor nodo disponible para asegurar la estabilidad de las rutas y prevenir así la pérdida de datos.

A continuación se detallan los experimentos llevados a cabo con FL-TR y AODV-FL, con el fin de comprobar el rendimiento de los cambios propuestos.

5.4. Experimentos

En esta sección se detallan los experimentos realizados con objeto de verificar si los cambios propuestos en el apartado anterior son capaces de mejorar

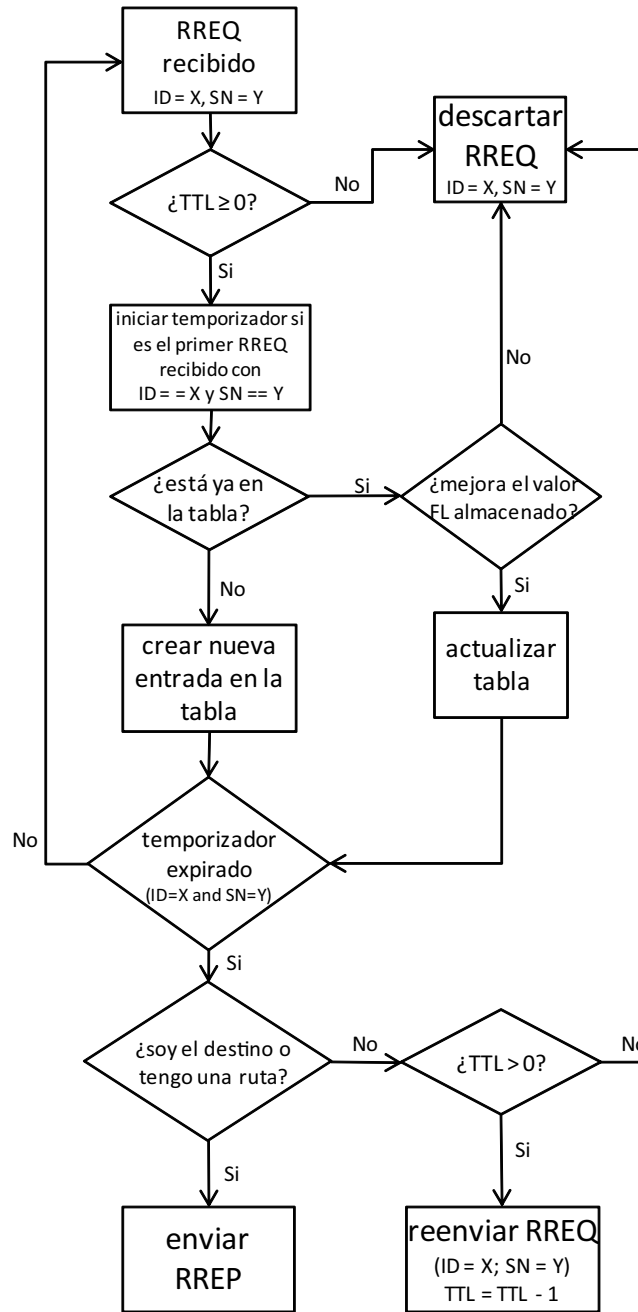


Figura 5.8: Acciones ante la recepción de un RREQ en AODV-FL

Tabla 5.2: Parámetros MAC utilizados en los experimentos con TR, FL-TR, AODV, AODV-FL y AODV-ETX

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
max MAC Frame Size	80 bytes
MAC Frame Overhead	14 bytes
MAC Buffer Size	32 frames
min Exponential Backoff	3
max Exponential Backoff	5
max CSMA Backoffs	4
max Frame Retries	3

el rendimiento de los protocolos utilizados en la capa de red de ZigBee para redes en árbol y en malla.

En la capa MAC se ha incorporado el protocolo CSMA/CA [14], que es el utilizado por el estándar IEEE 802.15.4 para llevar a cabo el acceso al medio. Se ha utilizado la versión no ranurada, en la cual no se utilizan *beacons*, para que ambos protocolos, FL-TR y AODV-FL, operen sobre el mismo mecanismo de acceso al medio, ya que AODV no soporta el uso de *beacons* [134]. Los parámetros MAC utilizados se resumen en la Tabla 5.2, en la que se detallan el tamaño máximo de *frame* y los datos de control necesarios, el tamaño máximo de la cola, los valores máximos y mínimos de *backoffs* para controlar los reenvíos, el número máximo de dichos reenvíos en caso de que el canal se encuentre ocupado, y el número máximo de reintentos que se llevan a cabo para intentar enviar el paquete. Cuando el paquete se descarta a nivel MAC, por haber alcanzado el número máximo de retransmisiones o el número máximo de *backoffs*, debido a que el canal se encuentra ocupado, son las capas superiores (red y aplicación) las que toman la decisión de volver a encolar el paquete para asegurar así su entrega en el destino.

El simulador utilizado, al igual que para el resto de pruebas de este trabajo ha sido Omnet++, cuyo funcionamiento y principales componentes fueron detallados en el Capítulo 2. En cuanto a los parámetros de radio y canal, se han utilizado los especificados en el Capítulo 3.

A continuación se detallan los experimentos realizados para cada una de las mejoras propuestas, y se analizan los resultados obtenidos.

5.4.1. FL-TR

El rendimiento de FL-TR va a ser comparado con el obtenido por el protocolo TR original. Para ello, se van a utilizar las mismas configuraciones de red que se utilizaron para la evaluación de NORIA (ver Sección 4.4.2), es decir, redes de hasta 1959 nodos desplegados de forma irregular, con la Estación Base, Coordinador en este caso, situado en el centro.

Los experimentos han sido repetidos 100 veces con el fin de obtener resultados fiables y apodícticos.

Los parámetros evaluados son:

- **Tiempo de *set-up* de la red:** es el tiempo que tarda la red en completar el proceso de creación de rutas desde cualquier nodo hasta el Coordinador (creación del árbol de comunicaciones). Esto es, el tiempo que tardan todos los nodos en seleccionar su nodo padre.

- **Número de Routers tras la creación del árbol:** es el número de Routers necesarios para conectar todos los nodos de la red. Como se comentó en la Sección 4.4.2, la agregación de datos permite reducir la cantidad de información que transita por la red. De esta forma, cuanto menor sea el número de nodos que reenvían, menor será la cantidad de datos a transmitir, ya que la información estará más condensada, propiciando así un notable ahorro de energía. El peor caso para este experimento (red de 1959 nodos) será detallado con el fin de analizar los árboles construidos por ambas propuestas.

- **Longitudes media y máxima de los caminos hasta el Coordinador:** representa el número de reenvíos que un paquete necesita para llegar al Coordinador. Los resultados muestran los valores para los nodos situados en el anillo más externo, es decir, los nodos más alejados del Coordinador, con el objetivo de mostrar la longitud de los caminos en el peor caso.

- **Número medio de hijos por cada Router:** muestra el número medio de nodos que dependen de cada Router. Al llevar a cabo agregación de datos, se limitará la sobrecarga de aquellos Routers que tengan un elevado número de hijos.

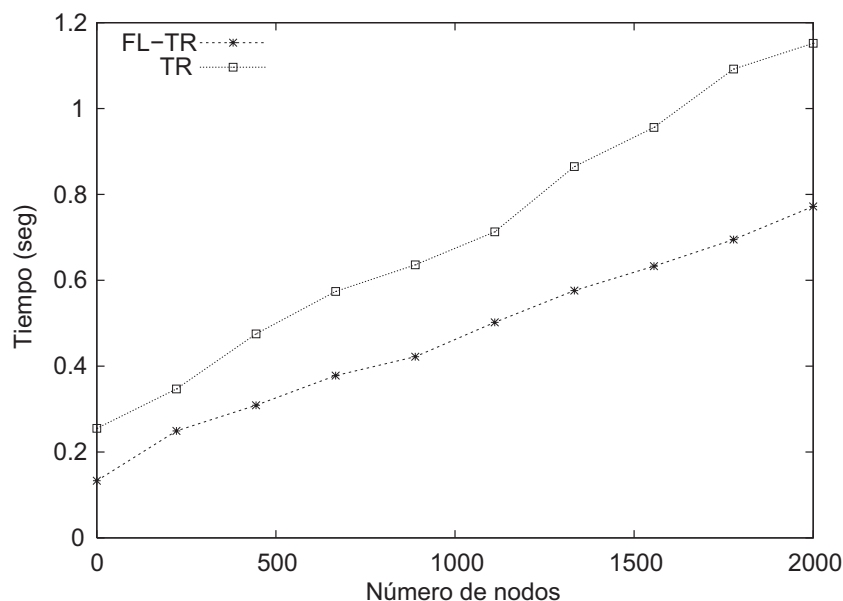


Figura 5.9: Tiempo de set-up de la red

5.4.1.1. Resultados

Los siguientes resultados corresponden a los parámetros anteriormente descritos. En primer lugar, los valores medios para el tiempo de *set-up* de la red, es decir, el tiempo de creación del árbol de comunicaciones para TR y FL-TR, son mostrados en la Figura 5.9 en función del número de nodos de la red. La reducción en tiempo que supone la utilización del sistema de evaluación basado en lógica difusa en FL-TR (aproximadamente del 30 %), muestra la eficiencia con respecto a la propuesta original (TR). Esta reducción en el tiempo de creación de rutas de FL-TR con respecto a TR se debe principalmente al uso de la lógica difusa, la cual, gracias a la combinación de parámetros emplea menos tiempo que las comparaciones utilizadas en TR, permitiendo así a los nodos comenzar antes las tareas de recogida y envío de datos hasta el Coordinador.

Como se ha comentado anteriormente, la agregación de datos permite reducir la cantidad de paquetes a transmitir, manteniendo la información incluida en ellos y evitando en muchas ocasiones el envío de información duplicada recogida por nodos vecinos. ZigBee especifica que únicamente los nodos Router pueden reenviar datos desde End Devices u otros Routers hacia el Coordinador. De esta forma, el número de Routers en la red determinará el número de re-

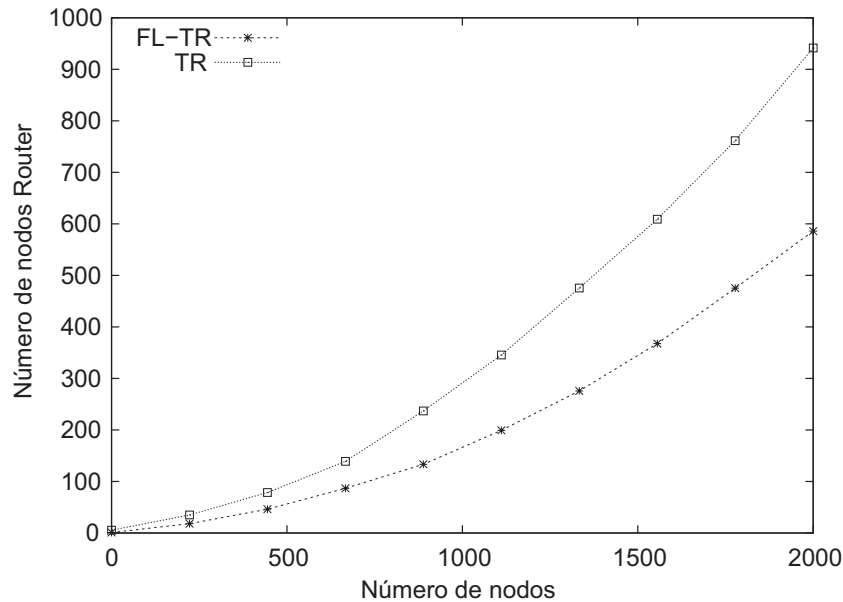


Figura 5.10: Número de Routers tras crear el árbol de comunicaciones

transmisiones en la red, y jugará un importante papel en el consumo de energía global de la red.

La Figura 5.10 muestra el número medio de Routers en la red, en función del tamaño de la misma. El uso de FL-TR reduce en hasta un 30 % el número de Routers en la red, gracias a la métrica basada en lógica difusa. En TR un nodo puede seleccionar a cualquier otro nodo como nodo padre, ya que únicamente se considera el número de saltos y el RSSI. Sin embargo, FL-TR tiene en cuenta además el nivel de batería, de forma que sólo serán seleccionados como padres aquellos nodos que tengan un mejor estado al combinar las tres variables consideradas. Esta reducción en el número de routers, junto con el uso de técnicas de agregación permite una reducción de la cantidad de paquetes que son enviados por los nodos de la red, propiciando así un ahorro de energía global, con el consecuente aumento en el tiempo de vida de la red.

La longitud de los caminos representa el número de reenvíos necesarios para que un paquete llegue desde el nodo origen hasta el Coordinador. La Figura 5.11 muestra las longitudes media y máxima de los caminos desde los nodos más alejados de la red hasta el Coordinador, como una función del número de nodos de la red. La reducción en la longitud de las rutas obtenida al utilizar FL-TR lleva a una importante disminución de el número de reenvíos necesarios para que los datos de los nodos más alejados sean llevados hasta

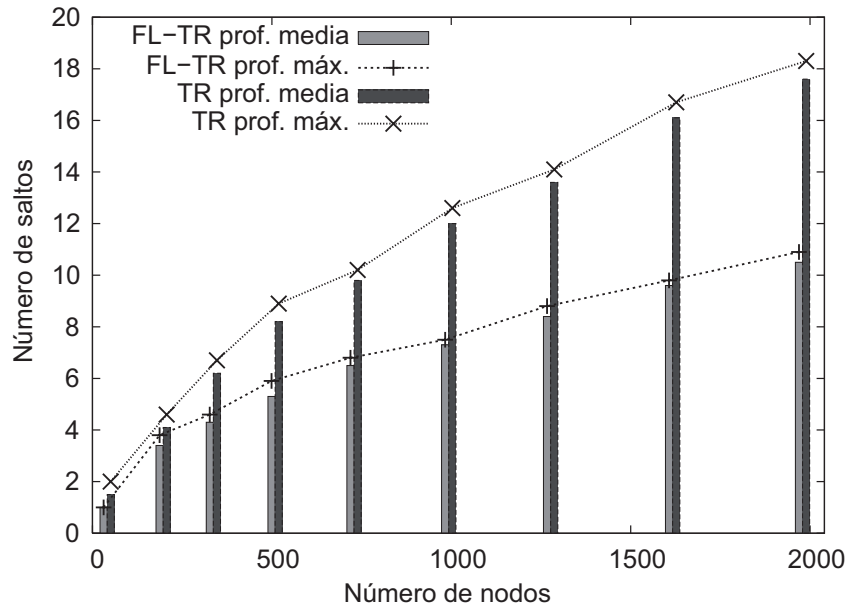


Figura 5.11: Longitud de los caminos para los nodos más alejados

el Coordinador. Esta reducción en la longitud de los caminos se debe a que TR es muy exigente en cuanto a la calidad de los enlaces (requiere que el RSSI sea superior al 60%), mientras que FL-TR permite crear caminos cuyos enlaces tengan un menor RSSI, ya que en los experimentos llevados a cabo, los mensajes eran entregados de forma correcta al destinatario aunque el valor de RSSI fuera inferior al 60%.

Existen estudios [144, 145] que demuestran que los nodos que forman las redes de sensores consumen aproximadamente la misma cantidad de energía para enviar un sólo bit de información por radio, que para ejecutar 1000 instrucciones [146], por lo que el número de reenvíos puede ser considerado como la cantidad necesaria de energía para enviar un paquete desde una fuente hacia un destino, ya que el tamaño de los paquetes asegura que el mayor consumo venga dado por las comunicaciones y no por el procesamiento de los datos. De esta forma, atendiendo a los resultados mostrados en la Figura 5.11 el ahorro de energía al enviar los datos desde los nodos más alejados al Coordinador utilizando FL-TR, será en los casos más favorables, de hasta el 40% con respecto a TR.

Tomando como base el experimento en el que se utiliza una red de mayor tamaño (1959 nodos), la Figura 5.12 muestra la función de densidad de

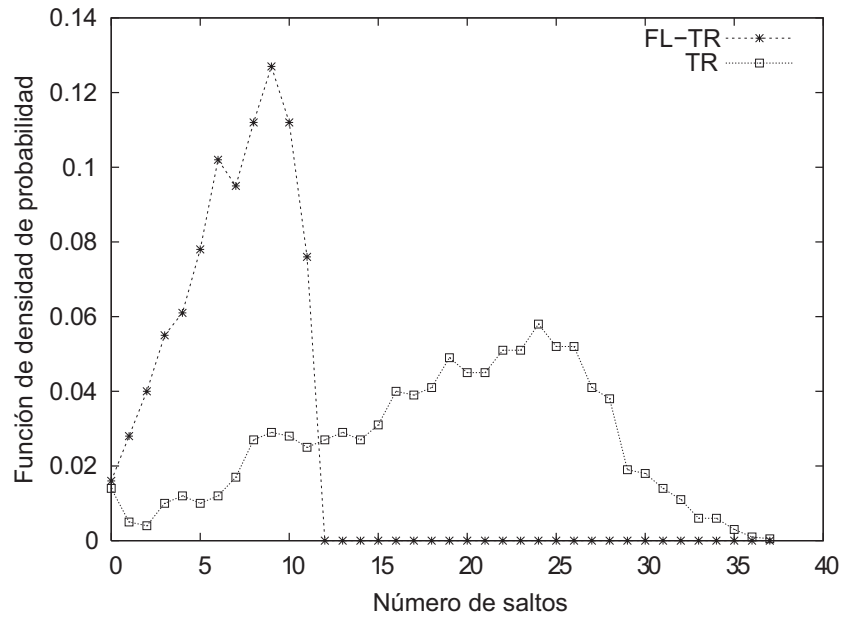


Figura 5.12: Función de densidad de probabilidad para la longitud de los caminos

probabilidad para el número de saltos hasta el Coordinador. Como puede observarse, al igual que en el caso de la Figura 5.11, la longitud de los caminos es notablemente inferior en el caso de FL-TR, lo que propicia un notable ahorro en el número de reenvíos, disminuyendo así no solo el gasto energético global de la red, sino también el tiempo que tardan los datos en llegar al Coordinador desde que son enviados por los nodos.

En resumen, el sistema de evaluación de nodos basado en lógica difusa muestra un buen comportamiento al ser incorporado a TR, mejorando el rendimiento del mismo en términos de tiempo de creación del árbol de comunicaciones, número de nodos Router y longitud de los caminos hasta el Coordinador. Además, la incorporación de este mecanismo no supone un gasto extra de energía, demostrando así su eficiencia y validez para ser utilizado en aplicaciones de monitorización ambiental con redes de sensores.

5.4.2. AODV-FL

Con el fin de comprobar el rendimiento de AODV-FL, se llevará a cabo un estudio para comparar los resultados obtenidos al ejecutar AODV-FL con los

obtenidos por la versión original de AODV, y por AODV-ETX, una versión de AODV que utiliza la métrica ETX [147], la cual se basa en la cantidad de transmisiones requeridas para que un paquete sea entregado correctamente a su destinatario. Dados los buenos resultados obtenidos al utilizar esta métrica en diversos estudios [148, 149], se añadirá a este trabajo para servir como referencia de rendimiento.

ETX (*Expected Transmission Count*) busca caminos que requieran el menor número de transmisiones (incluyendo retransmisiones) esperadas, para entregar un paquete a su destinatario. Esta métrica predice el número de retransmisiones requeridas utilizando mediciones de la pérdida de paquetes en las dos direcciones de cada enlace inalámbrico. Al utilizarlo como métrica en AODV, cada nodo calcula el valor de ETX para cada uno de sus vecinos. Para ello, antes de comenzar el descubrimiento de caminos, se envían una serie de paquetes especiales, que permiten a los nodos calcular la cantidad de transmisiones necesarias para comunicarse con cada uno de sus vecinos. A la hora de decidir las rutas, se seleccionarán aquellos nodos cuyo valor de ETX sea menor, ya que ello indicará que serán necesarias menos retransmisiones para hacer llegar los datos al nodo destino.

Los resultados relativos a AODV-ETX, han sido extraídos después de llevar a cabo el cálculo de la métrica ETX, el cual se realiza anteriormente al envío del primer RREQ.

Debido a que AODV funciona bajo demanda, y al elevado número de paquetes enviados en la red, las simulaciones con un gran número de nodos son bastante complejas y emplean gran cantidad de tiempo en su ejecución, por lo que para este estudio se han tomado redes de hasta 200 nodos desplegados de forma irregular, en las que cada nodo está separado de sus vecinos por una distancia variable de entre 1 y 50 m. Cada experimento se ha repetido 50 veces con objeto de obtener resultados fiables y concluyentes.

En los experimentos para las tres propuestas (AODV, AODV-ETX y AODV-FL), únicamente el 25 % de los nodos seleccionarán un destino aleatorio y le enviarán un paquete de datos, llevando a cabo previamente el descubrimiento de la ruta hasta el nodo destino elegido. Se ha seleccionado esta cantidad de nodos fuente con el fin de evitar la inundación de la red que se produciría en caso de que todos los nodos intentaran descubrir caminos al mismo tiempo. Las rutas se establecen bajo demanda de acuerdo a los esquemas detallados en la Sección 5.2.2 para AODV y AODV-ETX (sustituyendo para este caso el número de saltos por la métrica ETX) y en la Sección 5.3.2 para AODV-FL.

Al igual que para el caso de TR y FL-TR, el acceso al canal será llevado a cabo por el protocolo CSMA/CA utilizado en el estándar, a fin de evitar las posibles colisiones.

En los experimentos se han evaluado los siguientes parámetros:

- **Energía consumida:** representa el ahorro de energía logrado al utilizar AODV-ETX y AODV-FL con respecto a la versión original de AODV.
- **Número de colisiones:** muestra el número de colisiones ocurridas en la red al ejecutar cada una de las propuestas.
- **Paquetes enviados en la fase de descubrimiento de rutas:** detalla el número de paquetes RREQ y RREP enviados en la fase de descubrimiento de las rutas al utilizar cada una de las propuestas.
- **Retardo de comunicación extremo a extremo:** este parámetro representa el tiempo medio transcurrido desde que se envía el primer RREQ para descubrir la ruta, hasta que el paquete de datos llega al nodo destino.
- **Longitud de las rutas:** representa el número medio de saltos de las rutas descubiertas, al ejecutar cada una de las propuestas.

5.4.2.1. Resultados

En primer lugar, como se ha comentado anteriormente, el consumo de energía es un elemento clave en las redes de sensores, por lo que el ahorro de energía suele ser el objetivo principal de una buena parte de los protocolos diseñados para ser utilizados en estas redes. La Figura 5.13 muestra el ahorro de energía conseguido por AODV-ETX y AODV-FL, normalizado con respecto al consumo de AODV. El notable ahorro de energía conseguido por AODV-FL se debe principalmente a la reducción en el número de paquetes enviados durante el descubrimiento de las rutas. El número de RREQs y RREPs enviados afecta de manera directa en el consumo global de la red y es un factor de gran importancia, por lo que debe ser considerado en la evaluación de las diferentes propuestas.

La Figura 5.14 muestra el número de mensajes de descubrimiento (RREQs y RREPs) enviados al utilizar AODV (a), AODV-ETX (b) y AODV-FL (c).

La evaluación de los nodos de los cuales se ha recibido algún RREQ, llevada a cabo por AODV-FL antes de reenviar el paquete reduce de forma drástica

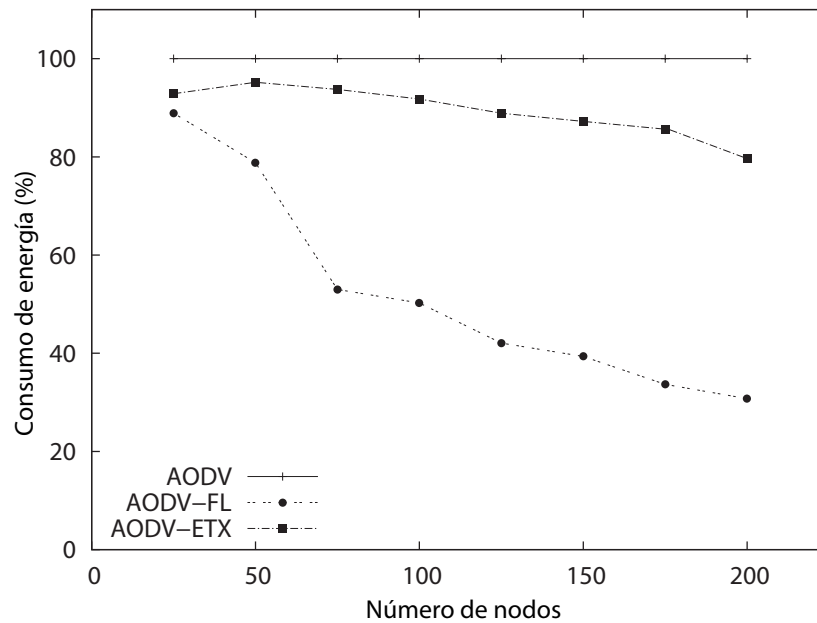


Figura 5.13: Ahorro de energía conseguido por AODV-ETX y AODV-FL con respecto a AODV

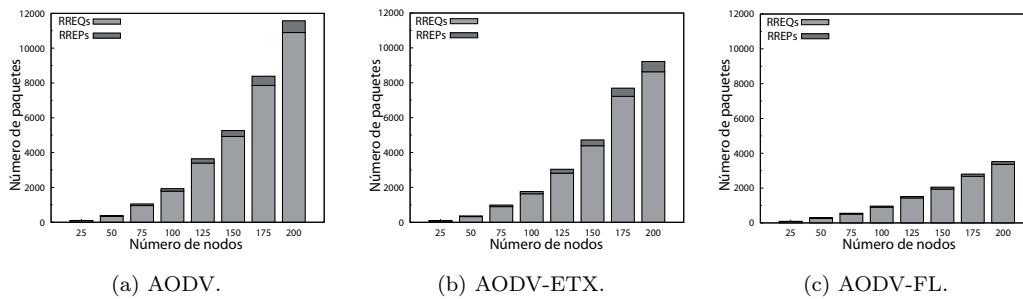


Figura 5.14: Mensajes enviados durante el descubrimiento de rutas

el número de mensajes necesarios para llevar a cabo el descubrimiento de las rutas. Por su parte, la gran cantidad de mensajes enviados por AODV y AODV-ETX, no sólo provoca un mayor consumo de energía, sino también un gran número de colisiones. La Figura 5.15 muestra el número de colisiones que han tenido lugar al ejecutar cada propuesta en función del número de nodos de la red. Los resultados mostrados en esta figura confirman que la reducción en

el número de mensajes enviados lleva consigo una reducción en el número de colisiones que se producen en la red.

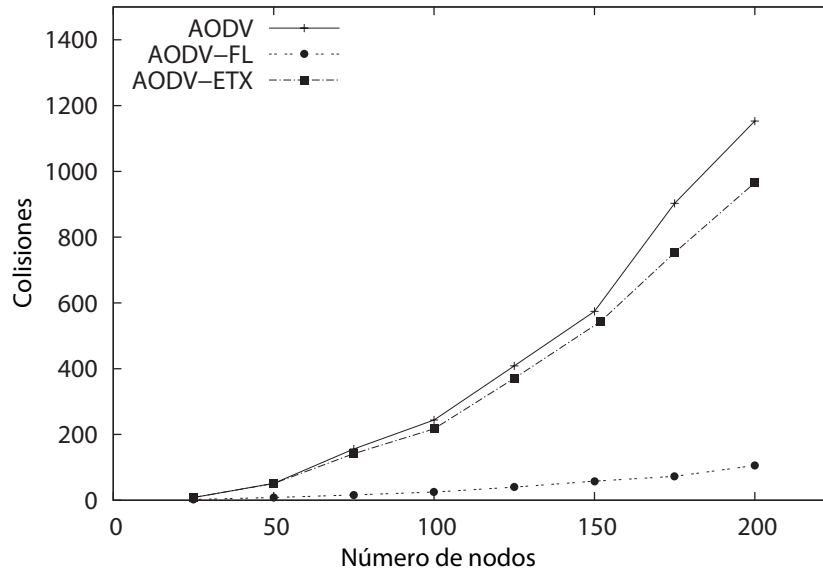


Figura 5.15: Número de colisiones para AODV, AODV-ETX y AODV-FL

Las colisiones afectan de manera directa al tiempo de comunicación entre los nodos, ya que los paquetes colisionados tienen que volver a ser reinyectados en la red. Las redes con requerimientos de tiempo real como la monitorización de industrial, de edificios, o redes de vigilancia, requieren bajos tiempos de comunicación extremo a extremo. La Figura 5.16 muestra el retardo medio de comunicación extremo a extremo (desde que se manda el primer RREQ hasta que el paquete de datos llega al destinatario), para los experimentos con AODV, AODV-ETX y AODV-FL.

El retardo introducido mediante el temporizador que se incluye en AODV-FL, lejos de ser una lacra, favorece la reducción del número de paquetes de descubrimiento necesarios y el número de colisiones, acelerando así el tiempo necesario para llevar a cabo el descubrimiento de rutas y el envío de datos. Tanto es así que AODV y AODV-ETX gastan gran cantidad del tiempo en reinyectar paquetes colisionados en la red, en concreto, tardan entre el 40 y el 60 % más de tiempo que AODV-FL en completar el descubrimiento de rutas y el envío de datos.

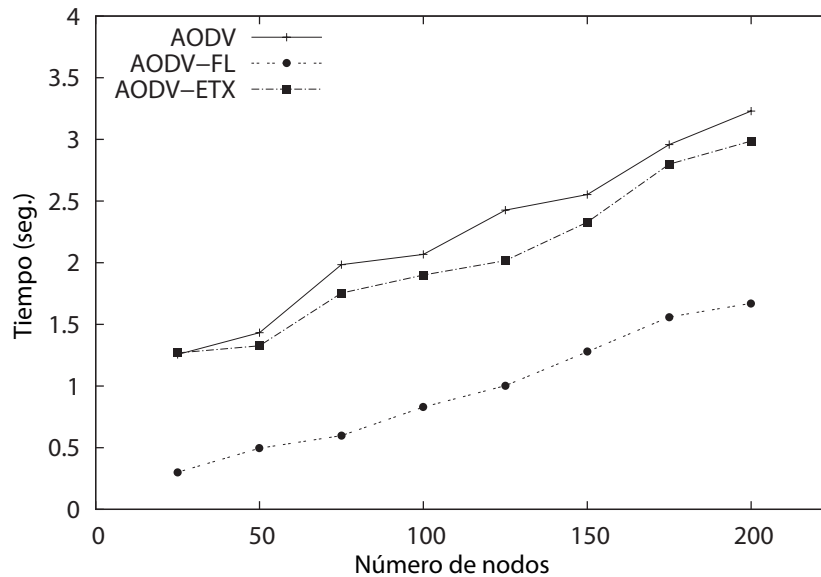


Figura 5.16: Retardo extremo a extremo

Otro importante resultado es la longitud de las rutas. La Figura 5.17 muestra la longitud media de las rutas creadas al recibir el nodo fuente el primer RREP, para AODV, AODV-ETX y AODV-FL.

Dado que AODV no siempre crea el camino más corto a la primera (ver Sección 5.2.2), la longitud de las rutas creadas cuando el nodo fuente recibe el primer RREP es mayor para AODV con respecto a AODV-FL, el cual selecciona en cada salto el mejor RREQ/RREP para reenviar, asegurando así la creación de la ruta óptima, mientras que en AODV, los nodos fuente pueden recibir primero un RREP que indique un camino no óptimo, y más adelante, otro RREP con un número de saltos inferior. Cabe resaltar que para redes pequeñas (hasta alrededor de 50 nodos), los resultados son similares para ambas propuestas, pero conforme crece el tamaño de la red, también lo hace el número de posibles rutas alternativas y la probabilidad de que al utilizar AODV no se cree, en primera instancia, la ruta de menor longitud.

Este hecho puede ser un factor de desventaja para AODV al ser utilizado en redes con requerimientos de tiempo real, ya que los nodos fuente tendrían que esperar la recepción de un RREP que indique una ruta óptima, o enviar los datos utilizando una ruta no óptima.

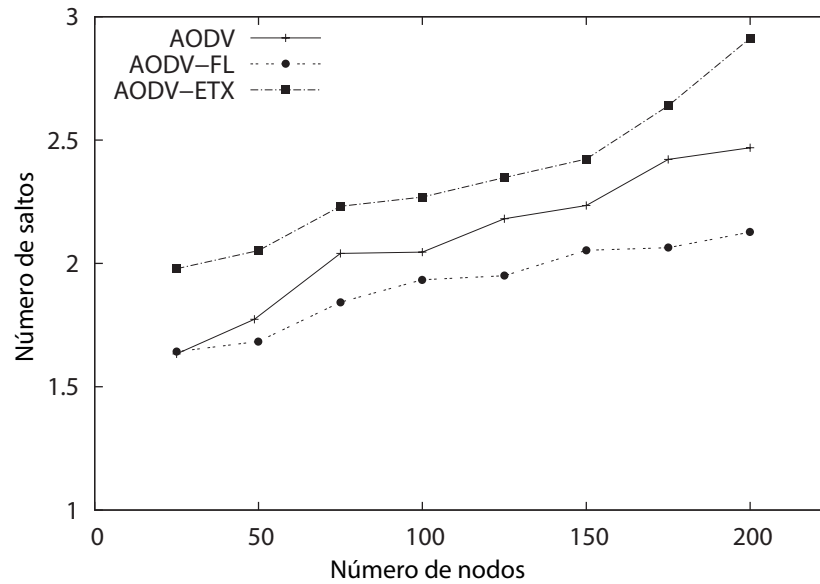


Figura 5.17: Longitud media de las rutas

Por su parte, el número de saltos para AODV-ETX es significativamente mayor que para AODV y AODV-FL, ya que selecciona los caminos basándose en la métrica ETX sin considerar la longitud de las rutas resultantes.

Estos resultados muestran que AODV-FL es más eficiente que la versión original de AODV y también que la propuesta basada en ETX, reduciendo el consumo de energía hasta un 70%. El rendimiento del descubrimiento de rutas también ha sido mejorado, no sólo en cantidad de paquetes enviados, cuyo número ha sido reducido entorno al 60-70%, sino también en la longitud de las rutas (reducida alrededor del 20%) y el retardo extremo a extremo que se ha reducido entorno al 40-50% con respecto a AODV.

5.5. Conclusiones

Tras el estudio de los resultados relativos al uso de una métrica que combina diversos parámetros de los nodos mediante un sistema de lógica difusa en el capítulo anterior, en este capítulo se ha propuesto la integración de un nuevo parámetro a dicho sistema, así como la incorporación de la métrica a los protocolos de red utilizados en el estándar ZigBee.

El estudio de estos protocolos, *Tree Routing* (TR) para redes en árbol y AODV para redes en malla, sacó a la luz diversos problemas que se debían en parte al uso de una métrica que no contemplaba todos los parámetros necesarios, por lo que se ha propuesto el cambio de las métricas originales utilizadas en cada uno de estos protocolos, por la métrica proporcionada por el sistema de lógica difusa, que combina tres importantes parámetros: número de saltos, nivel de batería restante y fuerza de la señal recibida (RSSI).

Esta métrica permite evaluar de forma rápida y eficiente la calidad de los nodos de forma que aquellos que mejor valor de evaluación obtengan, sean los seleccionados para formar parte de las rutas.

La métrica ha sido incorporada de forma directa en TR, mientras que en AODV se han propuesto además ligeros cambios en el modo de operación del protocolo con el fin de evitar la sobrecarga de la red.

Los resultados de los experimentos realizados muestran el buen comportamiento de las propuestas que utilizan la métrica basada en lógica difusa, creando caminos robustos y eficientes.

En términos generales se ha reducido el tráfico de la red, el número de colisiones, el tiempo de creación de rutas y la longitud de las mismas. También se ha llevado a cabo un importante ahorro de energía, que sin duda supone un aumento en el tiempo de vida de la red.

Además, el sistema de evaluación puede ser ajustado a los requerimientos de diversas aplicaciones, ya que permite la incorporación de nuevas variables para ser consideradas en la toma de decisiones. De esta forma, tanto los conjuntos como las reglas difusas pueden ser diseñados para modelar el comportamiento deseado del protocolo en el que sea incorporado.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

RESUMEN:

Para finalizar, este capítulo resume las conclusiones extraídas de este trabajo. Se resumen brevemente las contribuciones realizadas y se proponen diversas líneas para continuar el trabajo realizado. Por último, se presentan las publicaciones que se han generado durante la realización de esta tesis, tanto en congresos nacionales como en revistas y conferencias internacionales.

Las redes de sensores inalámbricas, aunque son una tecnología relativamente nueva, constituyen la base de multitud de aplicaciones donde es necesaria una monitorización continuada en el tiempo de determinadas variables. En los últimos años, el desarrollo de estas redes ha hecho que su uso sea cada vez más común, no sólo en el entorno empresarial y científico, sino también en el ámbito doméstico.

Las restricciones propias de este tipo de redes como la limitada capacidad de procesamiento y almacenamiento o la reducida capacidad de memoria, han de ser tenidas muy en cuenta la hora de llevar a cabo el desarrollo de algoritmos y protocolos que vayan a ser ejecutados por los nodos que componen las redes de sensores inalámbricas.

Al utilizar el medio inalámbrico para llevar a cabo las comunicaciones, las redes de sensores tienen que lidiar con los problemas derivados del mismo. Mientras que todos los nodos de la red comparten el mismo canal, los protocolos que rigen las comunicaciones deben ser capaces de enrutar los datos desde la fuente hasta el destino de los mismos.

A nivel de red, es muy importante que los nodos sean capaces de encaminar los datos seleccionando aquellas rutas que optimizan los parámetros deseados. El ahorro de energía por parte de los nodos es el tema central de numerosas propuestas de enrutamiento, sin dejar de lado la eficiencia y la fiabilidad de las comunicaciones.

Esta tesis detalla la propuesta acumulativa de un algoritmo de enrutamiento para redes de sensores, cuyo sistema de evaluación de variables es mejorado mediante el uso de un sistema de lógica difusa, que permite definir de manera clara y sencilla los estados de las variables de entrada, y que proporciona un valor de salida que permite evaluar la idoneidad de los nodos para ser considerados parte de las rutas. Más adelante, este módulo de evaluación es ampliado y utilizado como métrica en los protocolos de enrutamiento adoptados por el estándar ZigBee para redes con topologías en árbol y en malla.

6.1. Conclusiones obtenidas

Cuando se inició esta tesis, las redes de sensores constituían una tecnología completamente nueva para el doctorando, por lo que el primer paso fue un estudio exhaustivo del estado del arte sobre esta tecnología. Este estudio continuó con las principales propuestas en materia de auto-organización, para después centrarse en las principales técnicas de enrutamiento.

En un principio, se estudiaron en detalle los nodos reales, llevando a cabo diversos experimentos preliminares con nodos *MicaZ* y *TelosB* utilizando el sistema operativo *TinyOS* para llevar a cabo la programación de los nodos. Posteriormente, se estudiaron diversos simuladores, tanto de propósito general como específicos para redes de sensores, con el fin de utilizar la simulación como una herramienta de experimentación, que facilitase el estudio previo del rendimiento de los protocolos y algoritmos propuestos en redes densas compuestas por un gran número de nodos. El entorno seleccionado fue Castalia, un módulo de simulación específico para redes de sensores, que utiliza como base el conocido simulador Omnet++.

Los resultados obtenidos en estos experimentos preliminares pusieron de manifiesto la carencia de un mecanismo de enrutamiento eficaz para aplicaciones de monitorización en redes de sensores inalámbricas, que considerase, entre otros parámetros, la el nivel de batería disponible en los nodos. Por ello, se decidió en primera instancia, definir un nuevo algoritmo de enrutamiento que considerase éste y otros aspectos de los nodos a la hora de crear las rutas

en la red, y que minimizase la sobrecarga en el proceso de encaminamiento, para que los datos fueran entregados al destino de manera rápida y eficiente.

Una vez completada la propuesta de un primer algoritmo de enrutamiento (NORA), se estudió entonces la posibilidad de combinar los parámetros considerados en la toma de decisiones. Entre las diversas técnicas disponibles se decidió la creación de un método de evaluación basado en lógica difusa, que permite combinar las variables a evaluar y proporciona un único valor de salida, que es utilizado para tomar las decisiones de enrutamiento. Este esquema fue aplicado a NORA, dando lugar a NORIA, el cual proporciona mejores resultados que NORA en términos de tiempo de creación de rutas y eficiencia de éstas.

Los buenos resultados obtenidos al utilizar el módulo de evaluación basado en lógica difusa motivaron su implantación en los protocolos de enrutamiento utilizados por el estándar ZigBee. De esta forma, se sustituyó la métrica de los protocolos TR y AODV por el resultado de la evaluación de parámetros basada en lógica difusa, dando lugar a FL-TR y AODV-FL, dos propuestas que mejoran notablemente el rendimiento de los protocolos originales, permitiendo así llevar a cabo la creación de rutas eficientes que permitan extender el tiempo de vida de los nodos de la red.

A continuación, se relatan las contribuciones al mundo científico que han sido aportadas durante el desarrollo de esta tesis.

6.2. Contribuciones de la tesis

NORA, Network rOle-based Routing Algorithm

Un protocolo de de enrutamiento basado en roles, que utiliza para tomar las decisiones el número de saltos hasta la Estación Base y el nivel restante de las baterías. Su modo de operación, iniciado por la Estación Base, y la creación de caminos energéticamente eficientes convierten a NORA en un mecanismo de encaminamiento eficaz, capaz de crear rutas robustas que permiten recoger los datos de todos los nodos de la red. Se han detallado los aspectos más relevantes de este algoritmo, como son la asignación de roles, los diferentes tipos de mensajes utilizados y el proceso de creación de rutas. Asimismo, se han mostrado los experimentos llevados a cabo con NORA, primero, para evaluar el funcionamiento del algoritmo, y segundo, para comparar su rendimiento al de TR, el protocolo utilizado en el estándar ZigBee para llevar a cabo el enrutamiento en redes en árbol. Esta comparación demostró que NORA reduce

el tiempo de creación de caminos entre un 30 y un 50 % con respecto a TR, y reduce la longitud de las rutas en un 40 %.

NORIA, *Network rOle-based Routing Intelligent Algorithm*

NORIA es la evolución de NORA y sus mejoras de rendimiento radican en la utilización de un sistema de lógica difusa que permite definir y combinar los datos de forma sencilla para obtener un valor de evaluación que representa la idoneidad de los nodos para ser incluidos en las rutas hacia la Estación Base. Se ha detallado el sistema de lógica difusa, así como la creación de los conjuntos difusos correspondientes y el motor de inferencia utilizado. Los experimentos llevados a cabo con NORIA muestran una disminución del consumo energético de entorno al 30 % y en el tiempo de creación del árbol de comunicaciones entre el 30 y el 50 % con respecto a TR y CDS (enrutamiento basado en conjuntos dominantes conexos). Además, el módulo de decisión basado en lógica difusa permite la incorporación de nuevas variables para ser consideradas en la toma de decisiones, así como la definición de los conjuntos y reglas difusos acorde a la aplicación particular para la que la red haya sido diseñada.

Incorporación del módulo de decisión inteligente al estándar ZigBee

Con el objetivo de mejorar el funcionamiento de los protocolos de enrutamiento utilizados en el estándar ZigBee, se incorporó el módulo de decisión basado en lógica difusa al protocolo TR en primera instancia, y más adelante a AODV, dando lugar a FL-TR y AODV-FL, incluyendo así soluciones de encaminamiento para redes en malla, además de las propuestas para redes con topologías en árbol. El sistema de lógica difusa utilizado en este caso incluye la fuerza de la señal recibida (RSSI), además del número de saltos hasta el destino y el nivel de batería restante. Esta vez, los resultados fueron si cabe más contundentes que los obtenidos con NORA y NORIA, mejorando notablemente el rendimiento de TR y AODV, proporcionando una reducción no sólo de la energía consumida, sino también del tiempo de creación de rutas y de la longitud de las mismas. Más concretamente, se reduce el consumo de energía entorno al 30 % para el caso de FL-TR y hasta el 70 % para el caso de AODV-FL. También se han obtenido mejoras en la longitud de las rutas, reduciendo así el número de reenvíos necesarios para entregar los datos al destino. De esta forma, se contribuye a la prolongación del tiempo de vida de la red.

6.3. Trabajos futuros

Una vez completado el trabajo detallado en esta tesis, surgen varias líneas de trabajo interesantes para continuar con el mismo:

- **Implementación en el testbed I3ASensorBed:** la tarea más inminente consiste en la implementación de las propuestas en el *testbed* que se está desplegado en nuestro laboratorio, el *I3ASensorBed*, con el objetivo de comprobar el rendimiento de las mismas en una red real. Actualmente este testbed cuenta con alrededor de 40 nodos, y está prevista su ampliación hasta los 100 nodos, por lo que la implementación de las propuestas resultará más interesante en una red real compuesta por el mayor número de nodos posible.
- **Nuevas variables de entrada al sistema de evaluación basado en lógica difusa:** una de las ventajas de las redes de sensores es la gran variabilidad de entornos y aplicaciones en las que pueden ser utilizadas. Las mejoras introducidas con la evaluación de nodos basada en lógica difusa permiten definir y combinar otras variables de entrada al sistema como la calidad de servicio, la cantidad de rutas que pasan por un nodo o la congestión de la red, entre otras, para llevar a cabo las decisiones de enrutamiento.
- **Incorporación de lógica difusa en las capas física y MAC:** la lógica difusa también puede ser utilizada para controlar otros elementos de la red. Por ejemplo, puede utilizarse un sistema de lógica difusa para dirigir la lógica de control que maneja la gestión de la energía, en los nodos que incorporan abastecimiento extra mediante energía solar, eólica o vibraciones. En este caso, el sistema de lógica difusa podría controlar el uso de una u otra fuente de energía o el ciclo de trabajo de los nodos. Otro ejemplo de utilización de la lógica difusa podría ser a nivel de control de acceso al medio, donde se pueden combinar diferentes parámetros de los nodos para favorecer el acceso al canal a ciertos nodos, que por sus características o circunstancias de la red, deban utilizar el canal de forma preferente.
- **Uso de técnicas de agregación y estudios de frecuencia de transmisión de datos:** también es de gran interés experimentar con algunas de las técnicas de agregación presentes en la literatura, para reducir la cantidad de datos que viajan por la red, manteniendo la cantidad de

información, así como llevar a cabo experimentos relacionados con la frecuencia de recogida y envío de datos. Estos dos estudios permitirían reducir notablemente la cantidad de paquetes que viajan por la red.

- **Incorporación de mecanismos de seguridad durante el enrutamiento de los datos:** otra importante línea para continuar este trabajo, consiste en incorporar mecanismos de seguridad a los esquemas de enrutamiento propuestos, con el fin de proteger los datos mientras viajan por la red y asegurar su entrega al destino.

Estas líneas de trabajo futuro constituyen interesantes caminos por donde continuar los desarrollos propuestos en esta tesis.

A continuación se resumen las publicaciones generadas, que representan las aportaciones al mundo científico, derivadas del trabajo realizado para completar esta tesis.

6.4. Publicaciones realizadas

Con objeto de clasificar las diferentes publicaciones conseguidas, éstas se van a enmarcar dentro de tres apartados principales: revistas indexadas, aportaciones a congresos internacionales y a conferencias nacionales. Asimismo, serán mostradas por orden cronológico, comenzando con las más antiguas de cada apartado.

Publicaciones en revistas internacionales

1. Título: *Fuzzy-Logic based Routing for Dense Wireless Sensor Networks.*

Autores: Antonio M. Ortiz, Fernando Royo, Teresa Olivares, Jose C. Castillo, Luis Orozco-Barbosa y Pedro J. Marrón.

Publicado en: *Telecommunication Systems Journal.* Editorial Springer, 2011 (aceptada, pendiente de publicación). Índice de impacto JCR: 0.286.

Resumen: este artículo muestra la evolución llevada a cabo para incorporar a NORA el sistema de decisión basado en lógica difusa, dando lugar a NORIA. Los experimentos comparan el rendimiento de estas dos propuestas con el de otras propuestas presentes en la literatura relativas a enrutamiento basado en árboles. Los resultados muestran las mejoras alcanzadas por NORA y NORIA en términos de consumo energético, tiempo de creación de rutas y paquetes enviados.

2. Título: *AODV-FL: an Intelligent Routing Approach for Wireless Sensor Networks.*

Autores: Antonio M. Ortiz, Fernando Royo, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa.

Publicado en: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.* Editorial Hindawi, 2011 (en proceso de revisión). Índice de impacto JCR: 0.732.

Resumen: el artículo relata la incorporación a AODV del sistema de evaluación basado en lógica difusa, dando lugar a AODV-FL, y se proponen ligeros cambios en el modo de proceder del protocolo, orientados a mejorar su rendimiento. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando el protocolo CSMA/CA para realizar el acceso a medio y además incluyen resultados de AODV con la métrica ETX, con el fin de completar la evaluación de la propuesta. Los resultados muestran el buen comportamiento de AODV-FL con respecto al AODV original y a AODV-ETX en términos de consumo energético, número de paquetes enviados, número de colisiones ocurridas en la red, tiempo de creación de rutas y longitud de las mismas.

Comunicaciones en congresos internacionales

1. Título: *A Heterogeneous Role-based Sensor Network.*

Autores: Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa.

Publicado en: *2nd ACM Workshop on Performance Monitoring, Measurement and Evaluation of Heterogeneous Wireless and Wired Networks (PM2HW2N)*, 2007.

Tipo de publicación: artículo.

ISBN:978-1-59593-805-3.

Fecha y lugar de celebración: Octubre de 2007. Chania, Grecia.

Resumen: este artículo analiza diversos problemas de las redes de sensores como la tasa de pérdida de paquetes y el tiempo de vida de la red, y propone una arquitectura *cross-layer* básica que servirá para la integración de los diferentes desarrollos llevados a cabo por nuestro grupo. Los experimentos se centran en el consumo de energía de los nodos MicaZ y TmoteSky en diversas pruebas en el laboratorio.

2. Título: *ROBA: a ROle-Based Architecture with cross-layer services and multichemistry hardware supply.*

Autores: Fernando Royo, Antonio M. Ortiz, Pedro Díaz, Teresa Olivares, Vicente López y Luis Orozco-Barbosa.

Publicado en: *5th European conference on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, 2008. Ranking CORE A.

Tipo de publicación: póster.

ISSN: 0302-9743.

Fecha y lugar de celebración: Enero-Febrero de 2008. Bolonia, Italia.

Resumen: este póster presenta ROBA, una arquitectura *cross-layer* que utiliza la asignación de roles a nivel de la organización de la red, un protocolo síncrono de acceso al medio y alimentación de los nodos basada en la combinación de baterías y placas solares.

3. Título: *Measurements with Different Role-based Wireless Sensor Network Organizations.*

Autores: Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa.

Publicado en: *3rd ACM Workshop on Performance Monitoring, Measurement and Evaluation of Heterogeneous Wireless and Wired Networks (PM2HW2N)*, 2008.

Tipo de publicación: artículo.

ISBN: 978-1-60558-239-9.

Fecha y lugar de celebración: Octubre de 2008. Vancouver, Canadá.

Resumen: en este artículo se estudian en profundidad diversas técnicas de auto-organización para redes de sensores, así como la asignación de roles. Se experimenta con diferentes topologías de red llegando a la conclusión que la topología que mejor funciona en los experimentos realizados es aquella en la que la Estación Base se encuentra en el centro, y que un número elevado de nodos a su alrededor aseguran la correcta recepción de datos para ser analizados posteriormente.

4. Título: *WiseObserver: a Real Experience with Wireless Sensor Networks.*

Autores: Juan A. Castillo, Antonio M. Ortiz, Vicente López, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa.

Publicado en: *3rd ACM Workshop on Performance Monitoring, Measurement and Evaluation of Heterogeneous Wireless and Wired Networks (PM2HW2N)*, 2008.

Tipo de publicación: artículo.

ISBN: 978-1-60558-239-9.

Fecha y lugar de celebración: Octubre de 2008. Vancouver, Canadá.

Resumen: este artículo presenta *WiseObserver*, una herramienta de visualización para redes de sensores desarrollada en nuestro grupo, que permite la selección y representación de los datos recogidos por los sensores. Asimismo, también permite la incorporación de datos externos y la generación de informes.

5. Título: *A Cross-Layer Integration Prototype for Wireless Sensor Networks.*

Autores: Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares, Fernando Royo, Pedro Díaz y Luis Orozco-Barbosa

Publicado en: *Annual conference of the Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*, 2009. Ranking CORE: A.

Tipo de publicación: póster.

ISBN: 978-1-60558-594-9.

Fecha y lugar de celebración: Agosto de 2009. Barcelona, España.

Resumen: en este trabajo se presenta la integración cross-layer de los diferentes desarrollos llevados a cabo por nuestro grupo de investigación en el campo de las redes de sensores. Los diferentes desarrollos, *ATON* a nivel físico, *SA-MAC* a nivel de acceso al medio y *NORIA* a nivel de red, trabajan unidos para conseguir una red energéticamente eficiente.

6. Título: *Integrated Operation of a Cross-layer Architecture for Wireless Sensor Networks.*

Autores: Fernando Royo, Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares, Pedro Díaz y Luis Orozco-Barbosa.

Publicado en: *IEEE 29th Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2010. Ranking CORE: A.

Tipo de publicación: demo.

ISBN: 978-1-4244-5837-0.

Fecha y lugar de celebración: Marzo de 2010. San Diego, Estados Unidos.

Resumen: esta demo muestra el funcionamiento conjunto de la arquitectura *cross-layer* que integra diferentes elementos para gestionar la operación de una red de sensores: un revolucionario mecanismo de alimentación solar que permite a los nodos operar sin necesidad de baterías, un protocolo de acceso al medio simple y efectivo, y un protocolo de enrutamiento inteligente. Estos elementos trabajan juntos para optimizar el rendimiento de la red, proporcionando fiabilidad, ahorro de energía y eficiencia.

7. Título: *The EcoSense Project: An Intelligent Energy Management System with a Wireless Sensor and Actor Network.*

Autores: Pedro Díaz, Teresa Olivares, Raúl Galindo, Antonio M. Ortiz, Fernando Royo y Tomás Clemente.

Publicado en: *International Conference on Sustainability in Energy and Buildings (SEB)*, 2010.

Tipo de publicación: artículo.

ISBN: 978-3-642-17386-8.

Fecha y lugar de celebración: Mayo de 2010. Brighton, Reino Unido.

Resumen: este artículo presenta el proyecto *Ecosense*, un proyecto que pretende llevar a cabo la implantación de una red de sensores para la gestión de energía en edificios inteligentes. En un primer desarrollo se desplegará una red que únicamente incluye nodos sensores, para ser completada con la incorporación de actuadores.

8. Título: *Intelligent role-based Routing for dense Wireless Sensor networks.*

Autores: Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares, José C. Castillo, Luis Orozco-Barbosa, Pedro J. Marrón y Fernando Royo.

Publicado en: *3rd Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, 2010.

Tipo de publicación: artículo.

ISBN: 978-963-8111-73-9.

Fecha y lugar de celebración: Octubre de 2010. Budapest, Hungría.

Resumen: en este artículo se presenta NORIA, un algoritmo de enrutamiento inteligente y basado en roles para redes de sensores inalámbricos, que utiliza un motor basado en lógica difusa para llevar a cabo la toma de decisiones. Los resultados al utilizar NORIA muestran mejoras en cuanto al tiempo de creación del árbol de comunicaciones y número de nodos encargados de reenviar datos, a la vez que se mantiene el consumo de energía.

9. Título: *Enhancing Collision Resolution for Large-Scale IEEE 802.15.4 Networks.*

Autores: Fernando Royo, Teresa Olivares, Miguel Lopez-Guerrero, Luis Orozco-Barbosa y Antonio M. Ortiz.

Publicado en: *3rd Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, 2010.

Tipo de publicación: artículo.

ISBN: 978-963-8111-73-9.

Fecha y lugar de celebración: Octubre de 2010. Budapest, Hungría.

Resumen: este artículo presenta un robusto protocolo de resolución de colisiones en redes con un número elevado de nodos. Los resultados de los experimentos muestran mejoras en términos de rendimiento y fiabilidad de la propuesta, asegurando así la escalabilidad de la red.

10. Título: *Protocol Integration for Intelligent Monitoring Applications in Wireless Sensor Networks.*

Autores: Antonio M. Ortiz, Fernando Royo, Teresa Olivares, Luis Orozco-Barbosa, José Carlos Castillo y Antonio Fernández-Caballero.

Publicado en: *4th International Work-Conference on the Interplay between Natural and Artificial Computation (IWINAC)*, 2011.

Tipo de publicación: artículo.

Fecha y lugar de celebración: Mayo-Junio de 2011, La Palma, Islas Canarias, España.

Resumen: este artículo detalla la integración de dos protocolos de diferentes niveles: SA-MAC para el control de acceso al medio y NORIA para llevar a cabo un enrutamiento basado en lógica difusa. Los resultados de los experimentos ponen de manifiesto mejoras en cuanto al tiempo de creación de

caminos y una reducción del consumo que implica un aumento en el tiempo de vida de la red.

11. Título: *Intelligent Route Discovery for ZigBee Mesh Networks.*

Autores: Antonio M. Ortiz, Fernando Royo, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa.

Publicado en: *3rd IEEE Workshop on Hot Topics in Mesh Networking (HotMesh)*, 2011.

Tipo de publicación: artículo.

Fecha y lugar de celebración: Junio de 2011. Lucca, Italia.

Resumen: en este artículo se detalla la propuesta de incorporar el módulo de evaluación basado en lógica difusa al protocolo AODV, la propuesta utilizada por el estándar ZigBee para llevar a cabo el encaminamiento de los datos en redes en malla. Los experimentos comparan esta propuesta con el AODV original, obteniendo importantes resultados que muestran una reducción en el consumo de energía, el tiempo de comunicación extremo a extremo, el número de colisiones y la longitud de las rutas.

12. Título: *Smart Routing Mechanism for Green ZigBee-based Wireless Sensor Networks.*

Autores: Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa.

Publicado en: *16th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2011. Ranking CORE: B.

Tipo de publicación: artículo.

Fecha y lugar de celebración: Junio-Julio de 2011. Kerkyra, Grecia.

Resumen: este artículo presenta FL-TR, una propuesta que incluye el módulo de evaluación basado en lógica difusa en TR, el protocolo de enrutamiento utilizado por ZigBee para crear caminos en redes en árbol. La comparación de ambos enfoques llevada a cabo en los experimentos muestra que FL-TR reduce, con respecto a TR, el tiempo de creación del árbol de comunicaciones y la longitud de las rutas, sin provocar un aumento del consumo energético.

Artículos en congresos nacionales

1. Título: *Experiencias reales con la nueva generación de nodos sensores basados en Telos.*

Autores: Antonio Ortiz, Teresa Olivares, Luís Orozco y Fernando Royo.

Publicado en: *2º Congreso Español de Informática (CEDI)*, 2007.

Tipo de publicación: artículo.

ISBN: 978-84-97326728.

Fecha y lugar de celebración: Septiembre de 2007. Zaragoza.

Resumen: este artículo detalla los diversos experimentos llevados a cabo con nodos MicaZ y TmoteSky, un modelo de nodo compatible con TelosB. Se ha utilizado B-MAC para llevar a cabo el acceso al medio, y los experimentos muestran su buen rendimiento frente a otras propuestas.

2. Título: *Asignación de Roles para la Configuración de Redes Inalámbricas de Sensores.*

Autores: Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares, Luis Orozco-Barbosa, Fernando Royo y Pedro Díaz.

Publicado en: *XIX Jornadas de Paralelismo*, 2008.

Tipo de publicación: artículo.

ISBN: 978-84-8021-676-0.

Fecha y lugar de celebración: Septiembre de 2008. Castellón.

Resumen: este artículo estudia diversos problemas de las redes de sensores, y propone el uso de la asignación de roles, es decir, que los nodos -dependiendo de su estado- cumplan diferentes tareas dentro de la red.

3. Título: *WISEOBSERVER: Una Herramienta de Visualización y Generación de Informes para Redes de Sensores.*

Autores: Juan A. Castillo, Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares, Vicente López-Camacho y Luis Orozco-Barbosa.

Publicado en: *XIX Jornadas de Paralelismo*, 2008.

Tipo de publicación: artículo.

ISBN: 978-84-8021-676-0.

Fecha y lugar de celebración: Septiembre de 2008. Castellón.

Resumen: en este artículo se detalla WiseObserver, una herramienta de visualización para redes de sensores, que proporciona gráficas e informes re-

lativos a los datos recogidos por los nodos de una red. Además permite la incorporación de información externa que puede ser combinada con los datos de la red.

4. Título: *Técnicas de asignación de roles en redes de sensores inalámbricas.*

Autores: Antonio Manuel Ortiz Torres.

Publicado en: *Curso de verano Redes inalámbricas de sensores: arquitecturas y aplicaciones". Universidad de Castilla-La Mancha, 2008.*

Tipo de publicación: artículo.

ISBN: 978-84-691-4665-1.

Fecha y lugar de celebración: Julio de 2008. Albacete.

Resumen: este artículo resume las principales propuestas de asignación de roles presentes en la literatura, así como diversas arquitecturas en las que se utilizan estas técnicas.

5. Título: *Estudios preliminares para dotar de seguridad un protocolo de encaminamiento en redes de sensores inalámbricos.*

Autores: Cristobal Stable, Teresa Olivares y Antonio M. Ortiz.

Publicado en: *5ª Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información (CISTI), 2010.*

Tipo de publicación: póster.

ISBN: 978-989-96247-3-3.

Fecha y lugar de celebración: Junio de 2010. Santiago de Compostela.

Resumen: en este póster se resume un amplio estudio de las principales propuestas de seguridad en redes de sensores inalámbricos, detallando cada una de ellas, los ataques que contrarrestan y sus características principales. Este trabajo también sienta las bases para proporcionar a NORIA un mecanismo de seguridad que permita entregar los datos de manera confiable.

Apéndice A

PhD Summary

The main objective of this PhD thesis is the proposal of intelligent mechanisms to improve the operation of current routing approaches for wireless sensor networks. The experience with previous proposals in role-based configuration mechanisms led us to explore techniques for the evaluation of node and network characteristics. Our experiments have showed that the integration of different parameters through fuzzy logic efficiently enhances the routing decisions. The results with the fuzzy-logic-based node evaluation module motivated its incorporation to the routing protocols within ZigBee standard for tree and mesh networks, improving their performance and reducing the energy consumption, extending consequently the overall network lifetime.

A.1. Introduction and motivation

Nowadays, the use of Wireless Sensor Networks (WSNs) is becoming more and more familiar due to the wide range of possible applications of this technology. Our interest is focused on the improvement of routing protocols for indoor and outdoor monitoring applications.

WSNs present several problems derived from the inherent node limitations in terms of processing, storage, available energy, bandwidth, communication range and so on. Consequently, protocols and algorithms designed for WSNs must be as efficient as possible. These approaches are usually focused on the optimization of parameters such as response time, QoS, or neighbor connectivity, whereas, in most cases, the energy consumption is considered.

The preliminary experiments performed in the laboratory consisted on monitoring sensor networks and revealed several failures in the operation of the

communication protocols utilized. The failures were mainly related to energy consumption and communication performance. In the test scenarios, all nodes sent data to a central node (called base station). After the initial network deployment, and when the network was operating, the first sensed data packets suffered a high delay to reach the base station and, moreover, high packet loss rate was detected.

From the results of the experiments, it was demonstrated that the routing approach lacked the required efficiency to handle data sent by nodes and to deliver them to the base station.

In the literature there exists several routing proposals for WSNs, but either the procedures or the parameters considered did not satisfy the requirements of our monitoring application, so we decided to develop our own routing approach: NORA (Network rOle-based Routing Algorithm), that is able to efficiently routing data from all nodes in the network to the base station, considering the energy consumption as the main optimization parameter, with the aim of extending the network lifetime whilst performing efficient and reliable communications in monitoring applications.

This first proposed approach considers just the number of hops to the base station and the remaining battery level as decision parameters. With the aim of extending that model with the addition of new decision parameters to the system (keeping low the overload and high the efficiency) diverse parameter evaluation techniques were studied. A fuzzy logic approach was selected to perform the combination of node and network parameters during the route-creation process.

Fuzzy logic is a decision system paradigm clearly inspired on to the human control logic. It has low computational requirements while it is an efficient technique to perform parameter definition, combination and evaluation. For this reason, fuzzy logic was incorporated to NORA resulting in NORIA (Network rOle-based Routing Intelligent Algorithm), which decisions are based on the output of a fuzzy-logic module that evaluates node parameters considered during route creation.

The promising results obtained in the experiments with NORIA led us to the incorporation of a fuzzy-logic-based decision module to the routing approaches used in the ZigBee standard, due to the problems presented mainly in the metrics of these protocols. Hence, the use of an improved version of the NORIA's fuzzy-logic-based module in the Tree Routing and AODV (Ad hoc On Demand distance Vector routing) protocols is proposed. The improvements

implemented showed good performance through the diverse experiments in terms of energy consumption, route length, and end-to-end delay.

A.2. Objectives

The main objectives of this PhD thesis are **the specification of an intelligent routing technique and the use of the intelligent module in the routing mechanisms of the ZigBee standard**. Next, some partial objectives defined to achieve the main one are described:

- Design a tree-based routing algorithm that optimizes energy consumption.
- Specify a fuzzy-logic-based parameter evaluation module to be used in the routing decision-making processes.
- Incorporate a fuzzy-logic-based module to our tree-based routing approach.
- Improve the fuzzy-logic-based module by considering more parameters.
- Incorporate the improved version of the fuzzy-logic-based module to the routing approaches of the ZigBee standard, Tree Routing and AODV.

A.3. Tasks

The tasks completed in order to accomplish the detailed objectives are summarized as follows:

- Review of the state-of-the-art in WSNs.
- Analyze in depth the state-of-the-art in monitoring applications, self-organization mechanisms, routing approaches and artificial-intelligence-based techniques for WSNs.
- Develop a tree-based routing algorithm that optimizes energy consumption. Perform experimental evaluation and comparison.
- Implement a fuzzy-logic-based parameter evaluation module to be used in the routing decision-making processes.

- Perform in depth experimental evaluation and comparison of the proposed tree-based intelligent routing.
- Extend the fuzzy-logic-based module by considering more parameters. Definition of new fuzzy sets and rules.
- Study the ZigBee standard in order to incorporate the fuzzy-logic-based module to the Tree Routing protocol.
- Evaluate the performance of the proposed intelligent Tree Routing.
- Study of the viability of the incorporation of the fuzzy-logic-based module to the AODV routing protocol.
- Incorporate the fuzzy-logic-based module to AODV and define minor changes in the protocol operation.
- Test the intelligent AODV proposed and its comparison to the original AODV and the ETX-based AODV.

A.4. Chapter Summary

Chapter 1. Introduction.

The introduction chapter briefly describes the motivation and objectives of the PhD thesis, as well as the main contributions and the organization of the document.

Chapter 2. State-of-the-art.

This chapter summarizes the state of the art in wireless sensor networks, briefly describing devices, architectures, operating systems, simulators, and applications, focusing on monitoring approaches. Not only self-organization and routing topics are also detailed in this chapter but also the use of artificial intelligence techniques in wireless sensor networks.

Chapter 3. First routing proposal: NORA.

In this chapter, the first routing proposal, NORA is presented. NORA is an algorithm capable of creating a communication tree routed to a base station in

a wireless sensor network. It considers both parameters, the number of hops to the base station and the remaining battery level, to perform routing decisions. The operation of the proposed approach is also detailed, including mechanisms to perform neighbor discovery, route creation and node management. Moreover, a detailed example is offered to illustrate the operation of the protocol, indicating the message exchange proposed for route discovery.

The experiments section briefly describes Omnet++, the simulation environment used. Simulation scenarios, parameters and methodology are also detailed.

The experimental results show the appropriate operation of the proposal as well as a performance comparison with Tree Routing protocol, where NORA obtains better values in terms of route creation time and path length.

Chapter 4. Fuzzy-logic-based routing approach: NORIA.

The need to improve the decision making process of NORA led us to the definition of a new decision module based on fuzzy logic.

This chapter firstly details the main features of fuzzy logic systems and their application for wireless sensor networks. Furthermore, a fuzzy-logic-based system is proposed to combine node parameters considered in routing decisions.

This fuzzy logic module is incorporated to NORA resulting in NORIA, which works similarly to NORA, except for the decision making process in which NORIA utilizes the output of the fuzzy-logic module.

The experiments compare the performance of NORIA to NORA, Tree Routing and Connected Dominating Sets, CDS-based routing.

Experimental results show the good performance of NORIA in terms of energy consumption and route creation time, while maintaining low the number of forwarding nodes.

The aim of this chapter is not only to propose the described fuzzy-logic-based evaluation mechanism, but also to create a generic framework in which new variables can be added to the system in order to provide a specific decision module for a wide range of WSN applications.

Chapter 5. Incorporation of the artificial intelligence module to the ZigBee standard.

In order to evaluate the use of the fuzzy-logic-based module on other existing protocols, this chapter details the incorporation of the proposed evaluation

approach to the routing protocols used in the ZigBee standard: Tree Routing and AODV.

Firstly, ZigBee architecture in general and routing in ZigBee in particular are briefly described. A new variable, the Received Signal Strength Indicator (RSSI) have been added to the fuzzy-logic-based module to obtain a more complete evaluation mechanism. This improved version of the fuzzy-logic-based module is then incorporated to the ZigBee's Tree Routing protocol resulting in Fuzzy Logic Tree Routing (FL-TR). On the other hand, since some monitoring applications are implemented over mesh networks, the improved fuzzy-logic-based module is also incorporated into the AODV protocol resulting in AODV-FL (AODV with Fuzzy Logic). Minor changes are also proposed in order to reduce the number of packets being transmitted in AODV.

The experiments are divided in tree and mesh-based networks. For tree-based networks, the proposed Fuzzy-Logic Tree Routing obtains better results than the original Tree Routing in terms of network set-up time, number of router nodes and path length while maintaining energy consumption.

For the evaluation of the mesh-based approach, the CSMA MAC protocol is used in simulations in order to obtain accurate results as close as possible to real world conditions. AODV-FL is compared to the original AODV and to the expected transmission count based AODV (ETX-AODV). The experimental results for AODV-FL show a reduction in the number of packets sent what is translated into a reduction of the energy consumption with respect to AODV and AODV-FL. Moreover, the number of collisions, end-to-end delay, and path length are also reduced when used AODV-FL.

Chapter 6. Conclusions and future work.

This final chapter presents the conclusions obtained during the development of this PhD thesis. Proposals of this work are summarized and diverse lines for future work are exposed. Finally, scientific contributions, that is, international journal, and international and national conference publications are enumerated.

A.5. Contributions

Some scientific-technical contributions have arisen as a result of the work carried out in this PhD thesis. Such contributions are summarized as follows:

- NORA (Network rOle-based Routing Algorithm) is a tree-based routing approach that assigns roles to network nodes in order to create a communication tree in which nodes with better resources act as data forwarders. Decisions in NORA consider the number of hops to the base station to ensure minimum length routes and remaining battery level to allow low-battery nodes to save as much energy as possible, thus extending global network lifetime.
- NORIA (Network rOle-based Routing Intelligent Algorithm) is the evolution of NORA and uses fuzzy logic to perform parameter evaluation during the route-creation process. The fuzzy logic module used in NORIA will serve as a basis for the development of parameter evaluation modules since it is able to combine diverse node and network parameters, providing a simple output that can be used as a metric in protocols for wireless sensor networks.
- FL-TR (Fuzzy-Logic-based Tree Routing) incorporates an improved version of the NORIA's fuzzy-logic-based decision module in order to enhance the performance of the Tree Routing protocol used in the ZigBee standard. The RSSI value is added to the fuzzy-logic module to consider the signal strength during the construction of the communication tree.
- AODV-FL (Ad hoc On demand Distance Vector with Fuzzy Logic) is the improved version of AODV routing protocol that incorporates the enhanced version of the fuzzy-logic-based decision module in order to reduce the number of packets necessary to create routes in mesh networks, reducing energy consumption and extending network lifetime.

A.6. Publications

The work developed in this PhD thesis has been presented in several journals and conferences. The scientific publications derived from the thesis are summarized in chronological order and type of contribution:

International Journals

- Antonio M. Ortiz, Fernando Royo, Teresa Olivares, Jose C. Castillo, Luis Orozco-Barbosa y Pedro J. Marrón. **Fuzzy-Logic based Routing for Dense Wireless Sensor Networks**. Telecommunication Systems Journal, Springer 2011. Impact: 0.286 (JCR 2009), accepted, publication pending.

This work reports the evolution from NORA to NORIA. The latter includes a decision system based on parameter evaluation through fuzzy logic. The experiments compare the performance of these two approaches with some other relevant tree-routing proposals. The results show good behavior for NORA and NORIA in terms of energy consumption, route-creation time and packets sent.

- Antonio M. Ortiz, Fernando Royo, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa. **AODV-FL: an Intelligent Routing Approach for Wireless Sensor Networks**. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011. Hindawi. Impact: 0.732 (JCR 2009), under revision process.

This paper reports the integration of the fuzzy-logic-based system into AODV, and minor changes in the operation of the protocol, resulting in AODV-FL. The experiments included the overall evaluation of a protocol stack including the CSMA/CA protocol (MAC level). With the aim of performing extensive analysis, experimental results include comparison between AODV, AODV-FL and AODV-ETX. The results show good performance for AODV-FL compared to AODV and AODV-ETX in terms of energy consumption, number of packets used to create routes, collisions, end-to-end delay and route length.

International Conferences

- Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa. **A Heterogeneous Role-based Sensor Network**. 2nd ACM Workshop on Performance Monitoring, Measurement and Evaluation of Heterogeneous Wireless and Wired Networks (PM2HW2N), 2007.

This paper analyses several problems in wireless sensor networks, such as, packet loss rate and network lifetime, and proposes a simple cross-layer architecture setting the basis for the integration of our proposals. The experiments

are focused on the energy consumption in MicaZ and TmoteSky (TelosB compliant) nodes.

- Fernando Royo, Antonio M. Ortiz, Pedro Díaz, Teresa Olivares, Vicente López y Luis Orozco-Barbosa. **ROBA: a ROle-Based Architecture with cross-layer services and multichemistry hardware supply** (poster). 5th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN), 2008. CORE rank 2007: A.

This work presents ROBA, a cross-layer architecture that uses role assignment for networks organization, a synchronous protocol for medium access, and node energy supply based on a combination of batteries and solar cells.

- Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa. **Measurements with Different Role-based Wireless Sensor Network Organizations**. 3rd ACM Workshop on Performance Monitoring, Measurement and Evaluation of Heterogeneous Wireless and Wired Networks (PM2HW2N), 2008.

In this paper, diverse self-organization and role-assignment techniques for wireless sensor networks are studied. Several experiments, under different network operation conditions, conclude that a tree topology with the sink node located at the center and surrounded by a high number of nodes ensures correct data reception in the related experiments.

- Juan A. Castillo, Antonio M. Ortiz, Vicente López, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa. **WiseObserver: a Real Experience with Wireless Sensor Networks**. 3rd ACM Workshop on Performance Monitoring, Measurement and Evaluation of Heterogeneous Wireless and Wired Networks (PM2HW2N), 2008.

This paper presents WiseObserver, a visualization tool for wireless sensor networks developed in our laboratory, enabling the selection and representation of data collected by network nodes. Moreover, it also allows the incorporation of external data and report generation.

- Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares, Fernando Royo, Pedro Díaz y Luis Orozco-Barbosa. **A Cross-Layer Integration Prototype for Wireless Sensor Networks** (poster). Annual conference of the Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM), 2009. Ranking CORE A.

This work presents the cross-layer integration of the different approaches for wireless sensor networks developed in our group, showing that different approaches: ATON at physical level, SA-MAC in medium access and NORIA at network level, work together in order to obtain an energy efficient network.

- Fernando Royo, Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares, Pedro Díaz y Luis Orozco-Barbosa. **Integrated Operation of a Cross-layer Architecture for Wireless Sensor Networks** (demo). IEEE 29th Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2010. Ranking CORE A.

This work shows the joint operation of different elements to manage the operation of a wireless sensor network: a revolutionary solar-based power-supply mechanism that allows nodes to operate without batteries, a simple and effective medium access protocol, and an intelligent routing approach. All these elements work together to optimize the network performance, providing reliability, efficiency and energy saving.

- Pedro Díaz, Teresa Olivares, Raúl Galindo, Antonio M. Ortiz, Fernando Royo y Tomás Clemente. **The EcoSense Project: An Intelligent Energy Management System with a Wireless Sensor and Actor Network**. International Conference on Sustainability in Energy and Buildings (SEB), 2010.

This paper overviews the Ecosense project, which is focused on the implementation of a wireless sensor network for energy management in intelligent buildings. The first stage of the project focuses on the deployment of a wireless sensor network that will be completed with the addition of actuators that will work according to sensed data.

- Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares, José C. Castillo, Luis Orozco-Barbosa, Pedro J. Marrón y Fernando Royo. **Intelligent role-based Routing for dense Wireless Sensor networks**. 3rd Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2010.

In this paper, NORIA, an intelligent routing algorithm for wireless sensor networks is presented. It is role-based and uses a fuzzy-logic-based mechanism to perform routing decisions. Experimental results show good performance for NORIA in terms of route creation and forwarding nodes while maintaining energy consumption.

- Fernando Royo, Teresa Olivares, Miguel Lopez-Guerrero, Luis Orozco-Barbosa y Antonio M. Ortiz. **Enhancing Collision Resolution for Large-Scale IEEE 802.15.4 Networks**. 3rd Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2010.

This paper presents a robust collision resolution protocol for networks composed of a large number of nodes. Experimental results show improvements in terms of reliability and performance, thus ensuring network scalability.

- Antonio M. Ortiz, Fernando Royo, Teresa Olivares, Luis Orozco-Barbosa, José Carlos Castillo y Antonio Fernández-Caballero. **Protocol Integration for Intelligent Monitoring Applications in Wireless Sensor Networks**. 4th International Work-Conference on the Interplay between Natural and Artificial Computation (IWINAC), 2011.

This work reports the integration of two protocols belonging to two layers: SA-MAC for medium access control and NORIA for fuzzy-logic-based routing. Experimental results show improvements in terms of route creation and a reduction in energy consumption that extends network lifetime.

- Antonio M. Ortiz, Fernando Royo, Teresa Olivares y Luis Orozco-Barbosa. **Intelligent Route Discovery for ZigBee Mesh Networks**. 3rd IEEE Workshop on Hot Topics in Mesh Networking (HotMesh), 2011. Accepted, publication pending.

This article details the integration of the fuzzy-logic-based evaluation module to the AODV protocol, the routing approach used by ZigBee standard to perform routing tasks in mesh networks. The experiments compare this proposal with the original AODV, obtaining important results that show the reduction in energy consumption, end-to-end delay, collisions and route length.

- Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares y Luis Orozco Barbosa. **Smart Routing Mechanism for Green ZigBee-based Wireless Sensor Networks**. 16th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), 2011. CORE rank: B. Accepted, publication pending.

This paper presents Fuzzy-Logic-based Tree Routing (FL-TR), a routing mechanism incorporating a fuzzy-logic-based node evaluation module to the Tree Routing protocol, the routing approach used in ZigBee tree networks. The experimental comparison with the original version of Tree Routing shows that FL-TR reduces route-creation time and the path length, without increasing energy consumption.

Spanish conferences:

- Antonio Ortiz, Teresa Olivares, Luís Orozco y Fernando Royo. **Experiencias reales con la nueva generación de nodos sensores basados en Telos**. 2  Congreso Español de Informática (CEDI), 2007.

This paper details the experiments performed with nodes MicaZ and TmoteSky. B-MAC has been used to perform medium access and results show its good performance in comparison with other proposals.

- Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares, Luis Orozco-Barbosa, Fernando Royo y Pedro Díaz. **Asignación de Roles para la Configuración de Redes Inalámbricas de Sensores**. Jornadas de Paralelismo (JJPP), 2008.

This work studies several problems in wireless sensor networks, and propose the use of role assignment, that is, nodes fulfill different tasks depending on their capabilities.

- Juan A. Castillo, Antonio M. Ortiz, Teresa Olivares, Vicente López-Camacho y Luis Orozco-Barbosa. **WISEOBSERVER: Una Herramienta de Visualizaci n y Generación de Informes para Redes de Sensores**. Jornadas de Paralelismo (JJPP), 2008.

This work details WiseObserver, a visualization tool for wireless sensor networks that provides graphical representation of data sensed by network

nodes. External data can be added and combined with data sent by nodes in order to create reports that will be used for latter analysis.

- Antonio Manuel Ortiz Torres. **Técnicas de asignación de roles en redes de sensores inalámbricas**. Curso de verano Redes inalámbricas de sensores: arquitecturas y aplicaciones". Universidad de Castilla-La Mancha, 2008.

This work analyses the main role assignment techniques for wireless sensor networks, as well as the architectures that use these techniques.

- Cristobal Stable, Teresa Olivares y Antonio M. Ortiz. **Estudios preliminares para dotar de seguridad un protocolo de encaminamiento en redes de sensores inalámbricos** (póster). 5ª Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información (CISTI), 2010.

This work summarizes the main proposals related to security in wireless sensor networks, and lays down the foundation to provide security mechanisms to the routing protocol NORIA.

Bibliografía

- [1] ZigBee Specification, ZigBee Alliance. <http://www.zigbee.org/>, consultado en Enero de 2011.
- [2] RFC 3561 - Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc3561.html>, consultado en Enero de 2011.
- [3] I. F. Akyildiz and W. Su and Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002.
- [4] F. Zhao and L. Guibas. *Wireless Sensor Networks, an Information Processing Approach*. Elsevier, 2004.
- [5] P. Rentala, R. Musunnuri, S. Gandham, and U. Saxena. Survey on Sensor Networks. In *Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2001.
- [6] H. Karl and A. Willig. A short survey of wireless sensor networks. Technical report, Technische Universität Berlin, 2003.
- [7] F. L. Lewis. Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications. Ed. D.J. Cook and S.K. Das, John Wiley, New York, 2004.
- [8] L. Cui, F. Wang, H. Luo, H. Ju, and T. Li. A Pervasive Sensor Node Architecture. In *Network and Parallel Computing*, Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2004.
- [9] F. Royo, A. M. Ortiz, T. Olivares, P. Garcia, and L. Orozco-Barbosa. Smart Cross-layer Framework for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2010.

-
- [10] J. Polastre, R. Szewczyk, and D. Culler. Telos: enabling ultra-low power wireless research. In *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks (IPSN)*, 2005.
- [11] Crossbow Technology Inc. <http://www.xbow.com>, consultado en Enero de 2011.
- [12] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. <http://www.libelium.com>, consultado en Enero de 2011.
- [13] B. A. Forouzan. *Transmisión de datos y redes de comunicaciones*. Mc. Graw Hill, 2006.
- [14] IEEE Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANS). <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4c-2009.pdf>, consultado en Enero de 2011.
- [15] Z. Shelby and C. Bormann. *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*. Wiley, 2009.
- [16] A. D. V. Reddy, A.V.U. Kumar, D. Janakiram, and G. A. Kumar. Wireless sensor network operating systems: a survey. *International Journal of Sensor Networks*, 5:236–255, 2009.
- [17] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. E. Culler, and K. S. J. Pister. System architecture directions for networked sensors. *SIGPLAN Notices*, 35:93–104, 2000.
- [18] TinyOS website, <http://www.tinyos.net/>, consultado en Enero de 2011.
- [19] S. Bathi et al. MantisOS: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Platforms. *Mobile Networks and Applications*, 10:563–579, 2005.
- [20] The Contiki Operating System website. <http://www.sics.se/contiki/>, consultado en Enero de 2011.
- [21] A. Dunkels, B. Gronvall, and T. Voight. Contiki - A Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors. In *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 2004.

-
- [22] S. Hong and T. Kim. SenOS: State-driven Operating System Architecture for Dynamic Sensor Node Reconfigurability. In *Proceedings of the International Conference on Ubiquitous Computing (UBICOMP)*, 2003.
- [23] W. L. Lee, A. Datta, and R. Cardell-Oliver. *Handbook of Mobile Ad Hoc and Pervasive Communications*, chapter Network Management in Wireless Sensor Networks. American Scientific Publishers, 2011.
- [24] A. Eswaran, A. Rowe, and R. Rajkumar. Nano-RK: An Energy-aware Resource-centric RTOS for Sensor Networks. *Real-Time Systems Symposium, IEEE International*, pages 256–265, 2005.
- [25] A. Rowe R. Mangharam and R. Rajkumar. FireFly: A Cross-Layer Platform for Wireless Sensor Networks. *Real Time Systems Journal, Special Issue on Real-Time Wireless Sensor Networks*, 2007.
- [26] I. Khemapech, A. Miller, and I. Duncan. Simulating Wireless Sensor Networks. School of Computer Science, University of St Andrews, 2005.
- [27] E. Egea, J. Vales, A.S. Martinez, P. Pavon, and J. Garcia. Simulation Tools for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS)*, 2005.
- [28] The Network Simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, consultado en Enero de 2011.
- [29] Omnet++ Network Simulation Framework. <http://www.omnetpp.org/>, consultado en Enero de 2011.
- [30] MiXiM project. <http://mixim.sourceforge.net/>, consultado en Enero de 2011.
- [31] Castalia: A simulator for WSNs. <http://castalia.npc.nicta.com.au/>, consultado en Enero de 2011.
- [32] J-Sim. <http://nsr.bioeng.washington.edu/jsim/>, consultado en Enero de 2011.
- [33] P. Levis, N. Lee, M. Welsg, and D. Culler. TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications. In *Proceedings of the First ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, 2003.

-
- [34] E. Brewer, D. Culler, D. Gay, P. Levis, R. von Behren, and M. Welsh. nesC: A Programming Language for Deeply Networked Systems. *UC Berkeley WEBS Project*, <http://nesc.sourceforge.net/>. Consultado en Enero de 2011.
- [35] J. Polley, D. Blazakis, J. McGree, D. Rusk, J. S. Baras, and M. Karir. ATEMU: A Fine-grained Sensor Network Simulator. In *Proceedings of the First IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communication Networks (SECON)*, 2004.
- [36] S. Sundresh, W. Kim, and A. Agha. SENS: A Sensor, Environment and Network Simulator. In *Proceedings of the 37th ACM Annual Symposium on Simulation*, 2004.
- [37] NED language overview. <http://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1999/18/ned.htm>, consultado en Enero de 2011.
- [38] J. P. Vasseur. Terminology in Low power And Lossy Networks. Internet draft, Networking Working Group. <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-roll-terminology-04> consultado en Enero de 2011,.
- [39] J. A. López Riquelme, F. Soto, J. Suardíaz, P. Sánchez, A. Iborra, and J. A. Vera. Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain. *Computer and Electronics in Agriculture*, 68:25–35, August 2009.
- [40] Proyecto Wisevine, <http://www.wisevine.info/>, consultado en Enero de 2011.
- [41] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In *Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, (WSNA)*, 2002.
- [42] K. Lagendoen, A. Baggio, and O. Visser. Murphy Loves Potatoes. Experiences from a Pilot Sensor Network Deployment in Precision Agriculture. In *Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, 2006.
- [43] M. Rutishauser, V. Petkov, T. Williams, and C. Wilmers. CARNIVORE: A Disruption-Tolerant System for Studying Wildlife. In *Proceedings of*

- the 19th International Conference on Computer Communications and Networks*, 2010.
- [44] F. Losilla P. Kulakowski J. Garcia-Haro A. Rodríguez J. V. López-Bao A. J. Garcia-Sanchez, F. Garcia-Sanchez and F. Palomares. Wireless Sensor Network Deployment for Monitoring Wildlife Passages. *Sensors*, 10, 2010.
- [45] K. Martinez, R. Ong, and J. Hart. Glacsweb: a Sensor Network for Hostile Environments. In *Proceedings of the First IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2004.
- [46] K. Caseyn, A. Lim, and G. Dozier. A Sensor Network Architecture for Tsunami Detection and Response. *International Journal on Distributed Sensor Networks*, 4, 2008.
- [47] M. Bromage, K. Obraczka, and D. Potts. SEA-LABS: A Wireless Sensor Network for Sustained Monitoring of Coral Reefs. In *NETWORKING 2007. Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet*, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2007.
- [48] G. Varaprasad. Wireless sensor network for volcano environments. *ACM SIGBED Review Journal*, 6(3), 2009.
- [49] Harvard Sensor Networks Lab, Volcano Monitoring. <http://fiji.eecs.harvard.edu/Volcano>, consultado en Enero de 2011.
- [50] T. Olivares, P. J. Tirado, F. Royo, J. C. Castillo, and L. Orozco-Barbosa. IntellBuilding: A Wireless Sensor Network for Intelligent Buildings. In *Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, 2007.
- [51] M. Cerotti et al. Monitoring Heritage Buildings with Wireless Sensor Networks: The Torre Aquila Deployment. In *Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2009.
- [52] The Ecosense Project, <http://www.i3a.uclm.es/ecosense/>, consultado en Enero de 2011.

-
- [53] I. Krontiris, Z. Benenson, T. Giannetsos, F. Freiling, and T. Dimitriou. Cooperative Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks. In Utz Roedig and Cormac Sreenan, editors, *Wireless Sensor Networks*, volume 5432 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin / Heidelberg, 2009.
- [54] Z. Shengli and P. Willet. Submarine Location Estimation Via a Network of Detection-Only Sensors. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(6), 2007.
- [55] A. Ledeczi et al. Multiple simultaneous acoustic source localization in urban terrain. In *Proceedings of the 4th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2005.
- [56] K. Hughes M. Winkler, K.-D. Tuchs and G. Barclay. Theoretical and Practical aspects of military wireless sensor networks. *Telecommunications and Information Technology*, 2008.
- [57] H. Deliç E. Onur, C. Ersoy and L. Akarun. Surveillance Wireless Sensor Networks: Deployment Quality Analysis. *IEEE Network*, 21, 2007.
- [58] S. Gupta, S. Varma, G. S. Tomar, and R. K. Abrol. Wireless Sensor Network Based Industrial Monitoring and Diagnostic System. In *Proceedings of the First International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, 2009.
- [59] A. Bonivento, L. P. Carloni, and A. Sangiovanni. Platform-based design of wireless sensor networks for industrial applications. In *Proceedings of Design Automation and Test in Europe (DATE)*, 2006.
- [60] R. Laur R. Jedermann, C. Behrens and W. Lang. *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics. The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow*.
- [61] H. Baldus, K. Klabunde, and G. Muesch. Reliable Set-up of Medical Body-Sensor Networks. In *Proceedings of the First European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, 2004.
- [62] R. King B. Lo, S. Thiemjarus and G. Z. Yang. Body Sensor Network - A Wireless Sensor Platform for Pervasive Healthcare Monitoring. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Pervasive Computing (PERVASIVE)*, 2005.

-
- [63] E. Romero, A. Araujo, P. Malagon, J. C. Vallejo, J. M. Moya, and O. Nieto. Patients Monitoring System based on a Wireless Sensor Network Adaptive Platform. In *Proceedings of the 5th Health Workshop on Wearable, Micro and Nano Systems for Personalized Health*, 2008.
- [64] A. H. Kabashi, K. Walker, J. Underwood, N. Wirastuti, and J. Elmighani. Wireless Sensing for Development: An Integrated Design Approach. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Next Generation Mobile Applications*, 2009.
- [65] Maxfor Technology INC. <http://www.maxfor.co.kr>, consultado en Enero de 2011.
- [66] A. Zvikhachevskaya and L. Mihaylova. Self-organisation in wireless sensor networks for assisted living. In *Proceedings of the IET Assisted Living Conference*, 2009.
- [67] G. Di Marzo et al. Self-organisation: Paradigms and applications. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2004.
- [68] T. C. Collier and C. E. Taylor. Self-organization in sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 64(7):866–873, July 2004.
- [69] K. L. Mills. A brief survey of self-organization in wireless sensor networks: Research Articles. *Journal of Wireless Communications on Mobile Computing*, 7:823–834, September 2007.
- [70] F. Dressler. A study of self-organization mechanisms in ad hoc and sensor networks. *Journal of Computer Communications*, 31:3018–3029, August 2008.
- [71] F. Dressler, I. Dietrich, R. German, and B. Krüger. A rule-based system for programming self-organized sensor and actor networks. *International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 53:1737–1750, July 2009.
- [72] T. Watteynel. Energy-efficient self-organization in wireless sensor networks. In *Proceedings of the Rescom Summer School*, 2007.
- [73] F. Royo, T. Olivares, and L. Orozco-Barbosa. A Synchronous Engine for Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor and Actor Networks*, 248:107–118, 2009.

-
- [74] R. Krishnan and D. Starobinski. Message-efficient self-organization of wireless sensor networks. In *In: IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1603–1608. IEEE Press, 2003.
- [75] F. Theoleyre and F. Valois. A self-organization structure for hybrid networks. *Ad Hoc Networks*, 6:393–407, May 2008.
- [76] J. L. Lu, F. Valois, and D. Barthel. Low-Energy Self-organization Scheme for Wireless Ad Hoc Sensor Networks. In *In: 4th Annual Conference on Wireless on demand Network Systems and Services (WONS)*, 2007.
- [77] J. L. Lu, F. Valois, D. Barthel, and M. Dohler. FISCO: a Fully Integrated Scheme of self-Configuration and self-Organization for WSN. In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2007.
- [78] J. C. Castillo, T. Olivares, and L. Orozco-Barbosa. Implementation of a rule-based routing protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks (PM2HW2N)*, 2007.
- [79] P. J. Marrón, A. Lachen Mann, D. Minder, J. Hähner, R. Sauter, and K. Rothermel. TinyCubus: A Flexible and Adaptative Framework for Sensor Networks. In *Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, 2005.
- [80] M. Kochhal, L. Schwiebert, and S. Gupta. Role-based middleware for sensor networks. *Technical Report, Wayne State University*, 2004.
- [81] R. Kumar, M. Wolenetz, B. Agarwalla, J. Shin, P. Hutto, A. Paul, and U. Ramachandran. DFuse: a framework for distributed data fusion. In *Proceedings of the first International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, 2003.
- [82] K. Dasgupta, M. Kukreja, and K. Kalpakis. Topology-aware placement and role assignment for energy-efficient information gathering in sensor networks. In *Proceedings of the eight IEEE International Symposium on Computers and Communications*, 2003.
- [83] C. Prehofer and C. Bettstetter. Self-Organization in Communication Networks: Principles and Design Paradigms. *IEEE Communications Magazine*, pages 78–85, 2005.

-
- [84] E. Royer and C. K. Toh. Self-Organization in Communication Networks: Principles and Design Paradigms. *IEEE Personal Communications*, 6(2):46–55, 1999.
- [85] Z. Yang and A. Mohammed. A survey of routing protocols of wireless sensor networks. In *Proceedings of the Sustainable Wireless Sensor Networks*, 2010.
- [86] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, and Dimitrios D. V. Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks for health communication systems. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, PETRA, pages 34:1–34:8, 2009.
- [87] M. E. Gil. Estudio de la eficiencia de encaminamiento del protocolo AODV en redes ad hoc inalámbricas de gran escala. *Proyecto Fin de Carrera, Universidad Rey Juan Carlos*, 2009.
- [88] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Wireless Communications*, 11(6):6–28, December 2004.
- [89] M. Saleem, G. A. Di Caro, and M. Farooq. Swarm intelligence based routing protocol for wireless sensor networks: Survey and future directions. *Information Sciences*, 2010.
- [90] Internet Engineering Task Force. <http://www.ietf.org>, consultado en Enero de 2011.
- [91] C. E. Perkins and P. Bhagwat. DSDV Routing over a Multihop Wireless Network of Mobile Computers, Ad Hoc Networking. Addison-Wesley, 2001.
- [92] Tulika . Agarwal K. Tripathi and S. D. Dixit. Performance of DSDV Protocol over Sensor Networks. *International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN)*, 2, 2010.
- [93] M. Ikeda F. Khafa T. Yang, L. Barolli and A. Durresi. Performance Analysis of OLSR Protocol for Wireless Sensor Networks and Comparison Evaluation with AODV Protocol. In *Proceedings of the International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS)*, 2009.

-
- [94] The Dynamic Source Routing Protocol (DSR), <http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt>, consultado en Enero de 2011.
- [95] G. De Marco L. Barolli A. Duressi T. Yang, M. Ikeda and F. Xhafa. Routing Efficiency of AODV and DSR Protocols in Ad-Hoc Sensor Networks. In *Proceedings of The 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW)*, 2008.
- [96] V. D. Park and M. S. Corson. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In *Proceedings of the 16th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Driving the Information Revolution (INFOCOM)*. IEEE Computer Society, 1997.
- [97] J. A. Sanchez, P. M. Ruiz, and I. Stojmenovic. GMR: Geographic multicast routing for wireless sensor networks. In *Proceedings of the Third Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, 2006.
- [98] Y. Yu and 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, 2001.
- [99] J. Kulik, W. Heinzelman, and H. Balakrishnan. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 8:169–185, 2002.
- [100] T. Kim, D. Kim, N. Park, S. Yoo, and T. S. Lopez. Shortcut Tree Routing in ZigBee Networks. In *Proceedings of International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC)*, 2007.
- [101] M. Al-Harbawi, M. F. A. Rasid, and N. K. Noordin. Improved Tree Routing (ImpTR) Protocol for ZigBee Networks. *International Journal of Computer Science and Network Security(IJCSNS)*, 9, 2009.
- [102] A. A. Pirzada and M. Portman. High performance AODV routing protocol for hybrid wireless mesh networks . In *Proceedings of The Fourth Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (MobiQuitous)*, 2007.

-
- [103] X. Xu, D. Yuan, and J. Wan. An Enhanced Routing Protocol for Zig-Bee/IEEE 802.15.4 Wireless Networks. In *Proceedings of the Second International Conference on Future Generation Communication and Networking*, 2008.
- [104] A. Hadi and Z. A. Zukarnian. Performance Comparison of AODV, DSDV and I-DSDV Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks. *European Journal of Scientific Research*, 4, 2009.
- [105] A. K. Gupta, H. Sadawarti, and A. K. Verma. Performance analysis of AODV, DSR and TORA Routing Protocols. *International Journal of Engineering and Technology*, 2, 2010.
- [106] N. Enami, R. A. Moghadam, K. Dadashtabar, and M. Hoseini. Neural Network Based Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks: a Survey. *International Journal of Computer Science and Engineering Survey (IJCSES)*, 1(1), 2010.
- [107] J. Barbancho, C. Leon, F. J. Molina, and A-Barbancho. Using artificial intelligence in routing schemes for wireless networks. *Computer Communications Magazine*, 30:2802–2811, 2007.
- [108] W. Zhao, D. Liu, and Y. Jiang. Application of Neural Networks in Wireless Sensor Network Routing Algorithm. In *Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops*, 2007.
- [109] M. Gunes, U. Sorges, and I. Bouazzi. ARA - the ant colony based routing algorithm for MANETs. In *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW)*, 2002.
- [110] G. Dicaro, F. Ducatelle, and L. M. Gambardella. AntHocNEt: an adaptive nature inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks. *European Transactions on Telecommunications (Special Issue on self-Organization in Mobile Networking)*, 16, 2005.
- [111] J. Wang, E. Osagie, P. Thulasiraman, and R. K. Thulasiram. HOPNET: a hybrid ant colony optimization routing algorithm for mobile ad-hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2008.
- [112] T. Mitchell. *Machine Learning*. McGraw-Hill, 1997.

-
- [113] L. Panait. Cooperative Multi-agent Learning: The state of art. Technical Report GMU-CS-TR2003-1, Department of Computer Science, George Mason University, 2003.
- [114] N. Wirström. Optimization of Wireless Sensor Networks using Machine Learning. Master of Science Thesis. KTH School of Computer Science and Communication, Estocolmo, 2006.
- [115] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000.
- [116] L. Reznik. Fuzzy Controllers. Newnes Publishing, Oxford, UK. 1997.
- [117] J. S. R. Jang, C. T. Sun, and E. Mizutani. *Neuro-Fuzzy and soft Computing: a computational approach to learning and machine intelligence*. Prentice-Hall, Inc., 1997.
- [118] T. Takagi and M. Sugeno. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15(1), 1985.
- [119] W. Su and T. C. Bougiouklis. Data Fusion Algorithms in Cluster-based Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Logic Theory. In *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Communications (ICC)*, 2007.
- [120] N. Bacour, A. Koubaa, H. Youssef, M. B. Jamaa, D. do Rosario, M. Alves, and L. B. Becker. F-LQE: A Fuzzy Link Quality Estimator for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, 2010.
- [121] T. M. Wang, I. J. Liao, J. C. Liao, T. W. Suen, and W. T. Lee. An Intelligent Fuzzy Controller for Air-Condition with ZigBee Sensors. *International Journal in Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2, 2009.
- [122] F. Xia, W. Zhao, Y. Sun, and Y. C. Tian. Fuzzy Logic Control Based QoS Management in Wireless Sensor/Actuator Networks. *Sensors Journal*, 7, 2007.
- [123] G. Ran, H. Zhang, and S. Gong. Improving on LEACH Protocol of Wireless Sensor Networks Using Fuzzy-Logic. *Journal of Information and Computational Science*, 7(3), 2010.

-
- [124] T. Haider and M. Yusuf. A Fuzzy Approach to Energy Optimized Routing for Wireless Sensor Networks. *International Arab Journal of Information Technology*, 6(2), 2009.
- [125] S. Y. Chiang and J. L. Wang. Routing Analysis Using Fuzzy Logic Systems in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 12th International Conference on Knowledge-based and Intelligent Information and Engineering Systems*, 2008.
- [126] Crossbow Technology Inc. Telosb datasheet. http://www.willow.co.uk/TelosB_Datasheet.pdf, consultado en Enero de 2011.
- [127] Rossana Pérez Puello. *Procesado y Optimización de Espectros Raman mediante Técnicas de Lógica Difusa: Aplicación a la identificación de Materiales Pictóricos*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [128] J. J. Jassbi, P. J. A. Serra, R. A. Ribeiro, and A. Donatti. A Comparison of Mamdani and Sugeno Inference Systems for Space Fault Detection Application. In *Proceedings of the World Automation Congress (WAC)*, 2006.
- [129] J. Wu, F. Dai, M. Gao, and I. Stojmenovic. On Calculating Power-Aware Connected Dominating Set for Efficient Routing in Ad Hoc Networks. *Journal of Communications and Networks*, 4(1), 2002.
- [130] I. Stojmenovic. *Handbook of Wireless Networks and Mobile Computing*. Wiley, 2002.
- [131] I. K. Savvas, D. C. Tselios, and G. Kakarontzas. Quality Interplay in Regular vs. Irregular Grid Topologies. In *Proceedings of the Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE)*, 2008.
- [132] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, and D. Ganessan. Building Efficient Wireless Sensor Networks with Low-Level Naming. In *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles*, 2001.
- [133] S. Arun. ZigBee. Proyecto fin de carrera. School of Engineering, Cochin University of Science and Technology, 2008.

-
- [134] P. Baronti, P. Pillai, V. W. C. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu. Wireless Sensor Networks: A survey on the state of the art and the IEEE 802.15.4 and ZigBee standards. *Computer Communications*, 30, 2007.
- [135] A. Kumar. ZigBee: Next Generation Wireless Network. Master Thesis. Department of Computer Science, Cochin University of Science and Technology, 2005.
- [136] A. Sivagami, K. Pavai, D. Sridharan, and S. A. V. S. Murty. Energy and Link Quality Based Routing for Data Gathering Tree in Wireless Sensor Networks Under TINYOS - 2.X. *International Journal of Wireless and Mobile Networks (IJWMN)*, 2, 2010.
- [137] A. M. Alshanyour and U. Baroudi. Bypass AODV: Improving Performance of Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing Protocol in Wireless Ad Hoc Networks. In *Proceedings of the First International Conference on Ambient Media and Systems (Amby-Sys)*, 2008.
- [138] C. Lin. AODV Routing Implementation for Scalable Wireless Ad-Hoc Network Simulations (SWANS). JIST/SWANS, <http://jist.ece.cornell.edu/>, 2005.
- [139] G. Sklyarenko. AODV Routing Protocol. Seminar Technische Informatik. Institute für Informatik, Freie Universität Berlin, 2006.
- [140] B. Nefzy and Y. Song. Performance Analysis and Improvement of ZigBee Routing Protocol. In *Proceedings of the 7th IFAC International Conference on Fieldbuses and Networks in Industrial and Embedded Systems*, 2007.
- [141] K. N. Ramachandran, M. M. Buddhikot, G. Chandranmenon, S. Miller, E. M. Belding-Royer, and K. C. Almeroth. On the Design and Implementation of Infrastructure Mesh Networks. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh)*, 2005.
- [142] S. H. Manjula, C. N. Abhilash, K. Shaila, K. R. Venugopal, and L. M. Patniak. Performance of AODV Routing Protocol using Group and Entity Mobility Models in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*, 2008.

-
- [143] N. Boughanmi and Y. Song. Improvement of ZigBee Routing Protocol Including Energy and Delay Constraints. In *Proceedings of the Junior Research Workshop on Real-Time Computing*, 2007.
- [144] N. Reijers and K. Langendoen. Efficient Code Distribution in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the International Workshop on Wireless Sensor Network Architecture*, 2003.
- [145] V. Shnayder, M. Hempstead, R. Chen, G. W. Allen, and M. Welsh. Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Network Applications. In *Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, 2004.
- [146] W. Li, Y. Zhang, J. Yang, and J. Zheng. UCC: Update-Conscious Compilation for Energy Efficiency. In *Proceedings of the ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI)*, 2007.
- [147] D. D. 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 Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, 2003.
- [148] X. Ni, K. Lan, and R. Malaney. On the Performance of Expected Transmission Count (ETX) for Wireless Mesh Networks. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (VALUETOOLS)*, 2008.
- [149] J. Zhu, H. Zhao, and J. Xu. An Energy Balanced Reliable Routing Metric in WSNs. *Wireless Sensor Networks*, 1(1), 2009.

