

# **Protocolos de Enrutamiento basados en la Estructura de Red Jerárquica hacia la Eficiencia Energética en Redes de Sensores Inalámbricos**

Routing Protocols based on a Structure of Hierarchical Network towards Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks

Protocolos de roteamento com base na estrutura hierárquica da rede para a Eficiência Energética em Redes de Sensores Sem Fio

Jorge Eliécer Cárdenas Vargas

Docente Fundación Universitaria Juan de Castellanos

jcardenasv@jdc.edu.co

Recibido / Received: 19/06/2015 – Aceptado / Accepted: 19/09/2015

## **Resumen**

Al implantar una solución basada en redes de sensores inalámbricos, uno de los principales aspectos que se tiene en cuenta es la utilización energética del sistema, por lo que, en la fase de diseño se abordan diferentes métodos que buscan equilibrar las prestaciones de la red con su consumo energético, respecto al objetivo del sistema. En el presente artículo, metodológicamente, se describen a nivel cualitativo los protocolos de enrutamiento basados en la estructura de red jerárquica para la búsqueda de este equilibrio, donde los protocolos pretenden mejorar los algoritmos de funcionamiento, procesamiento y transmisión de la información; así mismo, busca brindar un panorama simplificado de los avances en este aspecto que es ampliamente estudiado en la actualidad, debido al auge que tiene esta tecnología. Cabe aclarar que, existen otros métodos para el ahorro energético y el aumento del tiempo de vida de este tipo de redes, métodos que se mencionan, pero que no se abordan en este escrito, estos son: el diseño e implementación de electrónica de ultra bajo consumo, la utilización de baterías de larga duración y el uso de nuevas tecnologías de generación energética.

**Palabras clave:** Red de sensores inalámbricos, redes jerárquicas, eficiencia energética.

## **Abstract**

By implementing a solution based on wireless sensor networks one of the main aspects taken into account is the system's energy use, so in the design phase covers various methods that seek to balance the benefits of the network with its energy consumption against the target system. This article describes on a qualitative level, routing protocols based on the hierarchical network structure, to find that balance, where the protocols are intended to improve the operation, processing and transmission of information algorithms, likewise seeks to provide a simplified overview of progress in this aspect that is now widely studied due to the rise

of this technology. It should be noted that there are other methods for saving energy and increasing the life time of such networks, methods that are mentioned but not addressed in this paper, which include the design and implementation of ultra low power electronics, the use of long life batteries and use of new technologies on energy generation.

**Keywords:** wireless sensor networks, hierarchical networks, energy efficiency.

## Resumo

Ao implementar uma solução baseada em redes de sensores sem fio um dos principais aspectos levados em conta é o uso de energia do sistema, de modo que na fase de projeto abrange vários métodos que procuram equilibrar os benefícios da rede com o seu consumo de energia em relação ao sistema de destino. Este artigo descreve a nível qualitativo, protocolos de roteamento com base na estrutura hierárquica da rede, para encontrar esse equilíbrio, onde os protocolos destinam-se a melhorar o funcionamento, processamento e transmissão de algoritmos de informação, da mesma forma procura fornecer uma visão simplificada dos progressos neste aspecto que é agora amplamente estudado devido ao aumento desta tecnologia. Note-se que existem outros métodos para economizar energia e aumentar o tempo de vida de tais redes, métodos que são mencionados, mas não abordados neste trabalho, que incluem a concepção e implementação de electrónica de potência ultra-baixa, o uso de baterias de longa vida e utilização de novas tecnologias na geração de energia.

## I. INTRODUCCIÓN

Este artículo describe los protocolos orientados al enrutamiento jerárquico, con miras a analizar desde una revisión bibliográfica los mejores resultados energéticos en una red de sensores [1], que permiten desarrollar protocolos eficientes para evitar colisiones, distribuyendo en varias capas el trabajo de los nodos y diferenciando funciones entre ellos. Para el desarrollo de los protocolos, hay que tener en cuenta que las redes de sensores, por su concepto, pueden tener muchos nodos que deben ser distribuidos en zonas remotas y amplias. El artículo está estructurado en dos apartados: el primero da a conocer una conceptualización de las *Wireless Sensor Networks* (WSN), enfocada al consumo de la energía por parte de los nodos sensores, y así identificar el porqué mejorar el protocolo en pro de maximizar la eficiencia energética de la red; el segundo apartado presenta los protocolos con sus características generales. El escrito presenta un cuadro comparativo de los protocolos para brindar una visión general y rápida, que permite al lector, determinar puntualmente qué protocolos pueden llegar a ser el punto de partida de su investigación.

**Concepto:** una red de sensores inalámbricos es un sistema que está compuesto por numerosos dispositivos distribuidos espacialmente, que utilizan sensores para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas, la temperatura, el sonido, la vibración, la presión y movimiento o los contaminantes [2]-[4]. Los dispositivos son unidades autónomas que constan generalmente de un microcontrolador, una fuente de energía (*batería insustituible y no recargable*), un radiotransmisor y un elemento sensor conjunto, generalmente de bajo costo [3], [5]. Debido a las limitaciones energéticas (*de la vida de la batería por la no posibilidad de tener una fuente ininterrumpida de alimentación*), los nodos se diseñan teniendo presente la conservación de la energía, por ello se construyen para que generalmente permanezcan mucho tiempo en modo ‘durmiente’ (*sleep*) de bajo consumo de potencia. Los nodos autoorganizan sus redes en una forma *ad hoc*, en lugar de tener una topología de red previamente programada, sin embargo existen soluciones que se rigen por una topología [3], [5]. De igual forma, WSN tiene capacidad de autorecuperación, es decir, si se daña un nodo, la red encuentra otras vías para encaminar los paquetes de datos. De esta forma, la

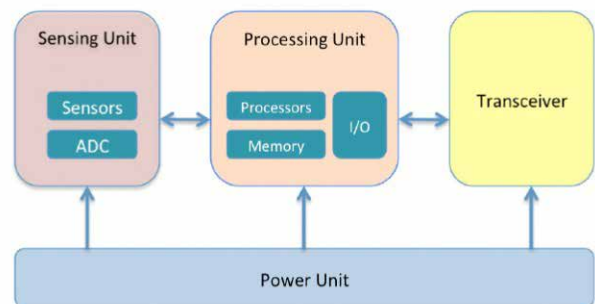
red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se dañen [5].

**Usos:** el bajo costo, debido a la producción en masa, aumenta la cantidad de nodos de sensores inteligentes en uso, por consiguiente se incrementa el uso de tecnología de redes de sensores inalámbricos. Esto brinda un nuevo tipo de alcance, que se puede aplicar a una amplia gama de posibilidades tanto comerciales, científicas e industriales [6]. Posibilidades que se dividen en tres categorías: la primera categoría incluye el monitoreo del medio ambiente y el hábitat, la agricultura de precisión [7], control de clima interior, la vigilancia, verificación de datos, y alarmas inteligentes [8]; la segunda, el monitoreo estructural, ecofisiología, el mantenimiento de equipos, diagnóstico médico y la asignación de terreno urbano [2]; y la tercera, aplicaciones complejas, hábitats de vida silvestre, manejo de desastres, respuesta ante emergencias, entornos de computación, seguimiento de activos, asistencia sanitaria, el flujo y control de procesos de fabricación [2].

**Enfoque energético:** para entender cómo se comporta energéticamente una red de sensores, se debe analizar cuál es la constitución física y el consumo energético de los elementos que la constituyen, en este caso un nodo sensor de red está compuesto por un microprocesador, un dispositivo para el almacenamiento de datos, sensor(es), un convertor analógico a digital (ADC), un transmisor-receptor de datos, los controladores que unen las piezas, y una fuente de energía [4] (ver Fig. 1). Un punto de trabajo ha surgido para adaptar todos estos componentes respecto a la eficiencia energética [3], [5], [9]. Como los circuitos semiconductores se hacen más pequeños, consumen menos energía con una velocidad de procesamiento dada, ocupando cada vez un área más pequeña.

En los microcontroladores normales, la miniaturización aumenta la eficiencia energética en lugar de añadir funcionalidad, lo que les permite operar con cerca de un milivatios, mientras corre a decenas de MHz [4]. La mayoría de los circuitos pueden ser apagados, por lo que la energía utilizada en estado de reposo puede ser alrededor de un microvatios [10]. Si el dispositivo está activo 1% del tiempo, su consumo medio de energía es solo de unos pocos

microvatios. Esta escala de energía puede obtenerse de muchas maneras. Las células solares generan aproximadamente 10 milivatios por centímetro cuadrado al aire libre y de 10 a 100 microvatios por centímetro cuadrado en interiores. Las fuentes de energía mecánica, tales como la vibración, por ejemplo el de las ventanas o conductos de aire acondicionado, puede generar cerca de 100 microvatios [5]. Una batería de un centímetro cúbico almacena cerca de 1.000 miliamperios-hora, por lo que dispositivos de un centímetro de escala pueden funcionar casi indefinidamente en muchos entornos. Sin embargo, los microprocesadores de baja potencia tienen almacenamiento limitado, por lo general menos de 10 Kbytes de memoria RAM para los datos, y menos de 100 Kbytes de ROM para el almacenamiento. Esta cantidad limitada de memoria consume la mayor parte del área del nodo sensor y gran parte de la energía [10]. Los diseñadores suelen incorporar grandes cantidades de almacenamiento flash, en un chip separado (Slot Opcional) [1], [4], [6]. Se puede concluir que, a nivel de elementos de hardware como el de procesamiento, almacenaje y generación de energía, existen grandes avances que aportan al equilibrio entre funcionalidad y gasto energético de la red, sin embargo, también se deben analizar los elementos que intervienen en la comunicación, que es el punto más crítico de esta tecnología respecto al uso eficiente de la energía [10], [11].



Fuente: Referencia [4].

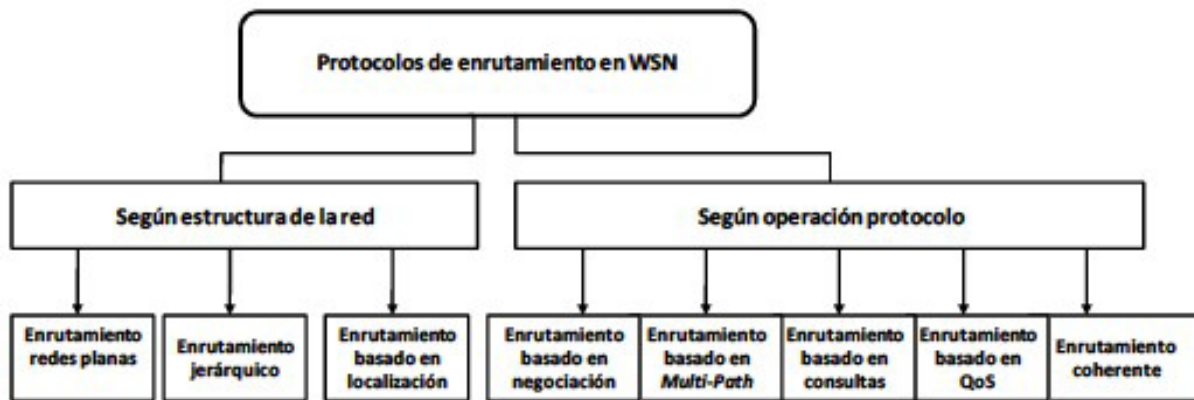
Fig. 1. Componentes de un Nodo Sensor.

Uno de los principales elementos que intervienen en la comunicación de las WSN, son los componentes de radio que ahora pueden ser fabricados utilizando la tecnología CMOS convencional, permitiendo ser configurados de tal forma que, en estado de reposo, el consumo de energía es únicamente el debido al

mantenimiento de esta funcionalidad [12]. Sin embargo, la cantidad de energía requerida para comunicarse de forma inalámbrica aumenta rápidamente con la distancia, los obstáculos y la atenuación normal de la señal. Los radios de las redes de sensores inalámbricos consumen alrededor de 20 milivatios, y su rango de alcance por lo general alcanza decenas de metros. El proceso de comunicación es la operación que demanda mayor consumo de energía en un nodo sensor; el nodo debe competir por una fracción de ancho de banda limitado, por consiguiente la pila de red trata de minimizar el consumo de energía, mediante la eliminación de la comunicación o apagando el radio [6], [13], además de buscar el mejor trayecto para realizar la comunicación entre los nodos sensores [9], [14], siendo estos los principales aspectos que se abordan en la implantación de protocolos de enrutamiento [15], [16], que son el objetivo de este artículo.

## II. PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO

En los últimos años, se han desarrollado técnicas para disminuir el consumo de energía de los nodos sensores [17]; teniendo en cuenta que uno de los factores que más influye en la limitación de consumo es el algoritmo de encaminamiento utilizado [18], se han propuesto diversas alternativas sobre qué tipo de topología de red es la óptima para minimizar el consumo energético y, por tanto, maximizar el tiempo de vida de la red. Derivados de estas propuestas, han aparecido protocolos [3], cada uno centrado en maximizar diferentes parámetros de la red. En [19], [20] se propone una clasificación, a nivel de estructura de red y de operación del protocolo, que presenta una visión global de las diferentes técnicas de encaminamiento que se contemplan en la actualidad, y que podemos ver en la Fig. 2.



Fuente: Referencia [19].

Fig. 2. Protocolos de enrutamiento en redes inalámbricas de sensores: una taxonomía.

De acuerdo a la Fig. 1, los tres grupos de protocolos definidos por la estructura de la red pueden presentarse en las redes de sensores inalámbricos, estos son: a) Redes planas (Flat Networks); b) Redes jerárquicas (Hierarchical Networks); c) Redes por ubicación (Location-basedrouting). Siendo a y c descartadas por sus pocas concordancias prestacionales respecto a las redes de sensores inalámbricos [19], además de que los principales desarrollos a nivel de protocolos se orientan a los definidos por la estructura red jerárquica, que según [21], [22], presentan las mejores prestaciones a nivel energético, y por consiguiente las investigaciones y desarrollos

están enfocados de forma creciente a este sector. De ahí que, este artículo aborde, de manera informativa, los protocolos definidos por la estructura plana; y, de manera descriptiva, los protocolos definidos por la estructura jerárquica [23], para brindar un punto de comparación sobre los beneficios energéticos de los dos grupos de protocolos.

### A. Protocolos Orientados a Redes Planas

El grupo de protocolos y sus estrategias algorítmicas orientado a redes planas, se dirigen a crear algoritmos de enrutamiento basados en consultas

(queries) obteniendo la topología de red como si fuera una gran base de datos, convirtiendo en principal problema el cómo resolver y propagar las consultas, dejando a un lado las retransmisiones y el problema del ahorro energético. Algunas soluciones se presentan descartándose directamente, debido al excesivo costo y los problemas de latencia, congestión e inviabilidad que conllevan, esto debido a que

todos los nodos de la red son vistos de igual manera, lo que no permite aprovechar los recursos de todos los sensores, por lo tanto las mejoras energéticas que ofrecen estos protocolos no son suficientes [1], [19].

Los protocolos orientados a redes planas [19], [24] se relacionan en la tabla 1:

TABLA 1. PROTOCOLOS DE REDES DE SENSORES ORIENTADOS A REDES PLANAS

	<i>Protocolo</i>
1	Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN)
2	Difusión Directa
3	Rumor Routing
4	Minimum Cost Forwarding Algorithm (MCFA)
5	Gradient-Based Routing (GBR)
6	Information-driven sensor querying (IDSQ) y CADR
7	COUGAR
8	Active Query forwarding in sensor networks (ACQUIRE)
9	EnergyAware Routing
10	RandomWalks Routing Protocols

Fuente: Referencias [21], [25].

*B. Protocolos orientados a Redes Jerárquicas*

El enrutamiento jerárquico o basado en clústeres [26], originario de las redes interconectadas por cable, es una técnica conocida y con ventajas especiales relacionadas con la escalabilidad y eficiencia en sus comunicaciones [27]. Como tal, el concepto de encaminamiento jerárquico también se ha aplicado para lograr eficiencia energética en WSN. En una arquitectura jerárquica, los nodos con gran cantidad de energía pueden ser empleados para procesar y enviar la información, mientras que los nodos de baja energía pueden ser usados únicamente para labores de sensorización en regiones cercanas al objetivo [28]. Esto quiere decir que la creación de clústeres y la asignación de tareas especiales a sus Cluster-Heads (CHs), pueden contribuir enormemente a la escalabilidad del sistema, su tiempo de vida y su eficiencia energética [12]. El encaminamiento jerárquico es una manera eficiente de disminuir el consumo de energía dentro del cluster y realizar tareas de agregación y fusión de información, con el fin de disminuir el número de mensajes transmitidos al sumidero o estación base [29], por tanto, se obtendrá

el máximo de las capacidades energéticas de la red, además de solucionar el problema de sobrecarga y escalabilidad, siendo este el principal objetivo de los siguientes protocolos a describir que se centran en soluciones jerárquicas y particionales.

**Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH).** Basado en clusters, emplea mecanismos para reducir la información transmitida, utiliza TDMC/CDMA MAC para reducir colisiones, utilizado cuando se necesita monitorizar constantemente la red de sensores, los nodos CH se alternan de acuerdo a su nivel potencia para que el consumo de energía sea uniforme en toda la red, tiene dos fases de operación set-up y steady-state, la población adecuada CH en una red es el 5% de sus nodos, no es aplicable a redes de grandes extensiones, puede darse que los nodos CH estén concentrados en una zona dejando sin CHs otras zonas y reduciendo el tiempo de vida de la red. El método del cambio de cluster CH implica un consumo extra de energía, además que el protocolo asume que cuando se hace este cambio, los nodos tienen la misma energía, no

ofrece garantías de localización y de cantidad de CHs [30].

**Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy-Centralized (LEACH-C).** Variante de LEACH que emplea un algoritmo centralizado para la formación de clusters, dispersando los CHs por la red de acuerdo a su localización y niveles de energía, descartando los nodos que no tienen el nivel de energía requerido cuando se realiza el proceso de asignación. Busca minimizar la cantidad de energía de los nodos restantes, al transmitir al CH asociado. Utiliza TDMA para determinar el slot para transmitir, y luego entra en reposo o sleep. Las desventajas que presenta son: depende de mecanismos de localización (GPS) para que el algoritmo pueda determinar la localización de los nodos, por tanto siempre deben enviar su posición y estado energético a la Estación Base, generando problemas de latencia y consumo extra de energía [27], [31].

**Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols (TEEN y APTEEN).** Estos protocolos se crearon para soluciones que necesitan una respuesta rápida frente a cambios bruscos de los parámetros medidos o sensados. En TEEN, los sensores están sensando el medio continuamente, transmitiendo a menor frecuencia únicamente cuando la medida sensada está dentro de un rango de interés, manteniendo un equilibrio entre eficiencia energética y precisión de la información, trabaja bajo el concepto de clusters. Las desventajas son: presenta las mismas desventajas de LEACH, TEEN no hace rotación de roles, sino que utiliza otros mecanismos para reducir el consumo, por lo que su viabilidad respecto a consumo es baja, además es un aspecto en contra de la escalabilidad, al aumentar el número de nodos. APTEEN, sucesor de TEEN, cambia los rangos de interés de sus medidas de acuerdo a las necesidades y al tipo de aplicación, respondiendo mejor a eventos críticos. El rendimiento está entre LEACH y TEEN, siendo mayor este último [20], [32].

**Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS).** La idea básica es formar una cadena de sensores hacia la estación base, donde cada uno recibe y transmite a un vecino cercano, la cadena la forman los mismos nodos o la estación base, que la distribuye por broadcast a todos los nodos. Cuando se quieren comunicar los nodos a la estación base, lo hace un nodo diferente cada vez, así la energía media disipada se reduce. Con PEGASIS se pretende incrementar al máximo la vida de la red, mediante técnicas de colaboración que permiten la coordinación local entre nodos, reduciendo así el ancho de banda necesario. Las desventajas son: la generación de las cadenas se complica a medida que aumenta el número de nodos, este número cuando es grande produce problemas de latencia, ya que las cadenas son de gran longitud, la escalabilidad por tanto se ve reducida o casi anulada al presentarse este aumento; cuando la cadena pierde un nodo, la reconstrucción de la cadena añade sobrecarga de energía extra. Sin embargo, PEGASIS aumenta la vida de la red el doble que el protocolo LEACH. La hierarchical PEGASIS es una extensión derivada que aumenta en un 60% el rendimiento de la PEGASIS Normal [33], [34].

**Small Minimum Energy Communication Network (MECN).** El protocolo MECN identifica una región de acción para cada nodo, computando una subred de mínima energía, lo que se traduce en que transmitir por esos nodos es más eficiente energéticamente, así se encuentran rutas de mínimo costo energético sin tener en cuenta toda la red. Se auto configura adaptándose automáticamente a fallos de los nodos o por redistribución. Para contrarrestar obstáculos entre nodos, se crea una extensión Small Minimum Energy Communication Energy o SMECN, que crea subredes más pequeñas para contrarrestar el obstáculo. El hecho con construir subredes implica una sobrecarga extra en el algoritmo [35], [19]. Una lista de protocolos orientados a redes jerárquicas, es el que se presenta en la tabla 2.

TABLA 2. PROTOCOLOS DE REDES DE SENSORES ORIENTADOS A REDES JERÁRQUICAS

	Protocolo
1	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)
2	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy-Centralized (LEACH-C)
3	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS)
4	Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols (TEEN y APTEEN)
5	Small Minimum Energy Communication Network (MECN)
6	Self Organizing Protocol (SOP)
7	Sensor Aggregates Routing
8	Virtual Grid Architecture Routing (VGA)
9	Hierarchical Power-aware Routing (HPAR)
10	Two-Tier Data Dissemination (TTDD)
11	Energy-efficient Distributed Dynamic Diffusion routing algorithm (e3D)
12	Energy efficient clustering routing (EECR)
13	IMRAFRA
14	Uniformly Distributed Adaptive Clustering Hierarchy routing protocol
15	Tree-Clustered Data Gathering Protocol (TCDGP)
16	Energy-Efficient Distributed Unequal Clustering (EEDUC)
17	HTECRP
18	Hybrid Energy-efficient Tree-based Optimized Routing Protocol (HECTOR)
19	Energy-Balancing Unequal Clustering Protocol (EB-UCP)
20	Grid-clustering Routing Protocol (GROUP)
21	Base-station Controlled Dynamic Clustering Protocol (BCDCP)
22	Dynamic Minimal Spanning Tree Routing Protocol (DMSTRP)
23	Power Efficiency Routing Protocol (PER)
24	Distributive Energy Efficient Adaptive Clustering (DEEAC)
25	Energy-efficient Adaptive hierarchical and robust Architecture (EETA)

Fuente: El autor, 2014.

**SelfOrganizingProtocol (SOP).** En este protocolo, cada nodo tiene sus propias capacidades y funciones, existiendo cuatro tipos de nodos, que son: a) Nodo base, que tiene todas las capacidades de procesamiento, almacenamiento, comunicación y conexión cableada, sin limitaciones de energía; b) Nodo especializado, monitorea parámetros como temperatura, presión, humedad y otros que se puedan definir, son móviles y están agrupados por clases; c) Nodo router, que actúa como enrutador de los datos; d) Nodo agregador, aplica funciones como compresión a los datos, antes de ser enviados entre nodos. Las actividades de obtención y de transmisión de datos se realizan de forma distribuida por intermedio de sus respectivos nodos. La comunicación entre los nodos router se realiza por medio de enlaces cortos, lo que

implica la reducción del consumo de energía, aumentando el tiempo de vida y la tolerancia a fallos de la red. Las desventajas que se presentan, básicamente, son la sobrecarga por la generación de la organización jerárquica y los problemas de latencia, al manejar la tablas de encaminamiento [36], [24].

**Sensor AggregatesRouting.** En este protocolo, los nodos se añaden a la red para monitorear de una forma conjunta un fenómeno o actividad en un determinado medio, estos nodos se dividen en clusters de acuerdo a la potencia de la señal. De allí, se escogen los nodos líderes [19], [37].

**Virtual GridArchitectureRouting (VGA).** Protocolo que implementa la agregación de la informa-

ción y procesamiento dentro de la red para aumentar la vida de la misma. Puede tener nodos estáticos o nodos en movilidad reducida, se puede organizar en clusters cuadrados los que poseen previa selección, un CH individual. La agregación se realiza en dos niveles o por dos actores, los local aggregators (LAs) que agregan la información a nivel local; y los Master Aggregators (MAs), que lo realizan a nivel global en la red [38].

**Hierarchical Power-aware Routing (HPAR).** El protocolo HPAR divide la red en grupos de nodos sensores que están geográficamente cercanos, configurados como un cluster zonal y tratados como una entidad, autónomos en el enrutamiento jerárquico por medio de las demás zonas. De esta manera, se consigue una disminución del consumo de energía, siendo la ruta escogida entre nodos la que presenta mínimo costo de energía, y la mejor entre varias rutas de mínimo consumo. El algoritmo selecciona la ruta en equilibrio con la mejora del consumo de energía. Otras mejoras se presentan pero sobrecargan los mensajes y, por consiguiente, aumenta la latencia, por lo tanto es evidente el detrimento de la eficiencia de su desempeño [38], [39].

**Two-Tier Data Dissemination (TTDD).** Ofrece una entrega escalable y eficiente a múltiples estaciones base o sumideros móviles, cada emisor genera una malla para diseminar y recibir su información a los sumideros mediante consultas por inundación, esto presenta un inconveniente que es asumir el conocimiento de la posición de los demás nodos, además de que a pesar de que tiene maneras de limitar la sobrecarga, no la elimina. La escalabilidad se ve reducida, añade problemas de congestión y pérdida de paquetes, por tanto este modelo tiene una aplicabilidad reducida. Comparando entre difusión directa y TTDD, este último puede alcanzar mayores tiempos de vida en la red, pero el posicionamiento y la sobrecarga asociada al recálculo de las mallas y su mantenimiento, disminuyen el rendimiento energético. Aunque este sea un poco eficiente, tiene poca aplicabilidad [19].

**Energy-efficient Distributed Dynamic Diffusion-routing algorithm (e3D).** Este protocolo pretende aumentar el tiempo de vida de la red, distribuyendo de manera más eficiente la carga energética en

tre todos los sensores, teniendo en cuenta que si se aplica sincronización entre los nodos, incurre en sobrecarga extra, debido a los mensajes de sincronización. La distribución de la disipación de la energía se hace a todos los nodos de la red, aumentando su tiempo de vida. Además, de lo que se realiza en el protocolo básico, cada nodo genera una lista de posibles vecinos y los ordena por preferencia; cuando el nodo cambia de vecinos, hace un escaneo verificando los nuevos vecinos y los que ya no están hábiles, se eliminan los nodos que tienen baja energía eliminando intentos fallidos de comunicación al futuro. Este protocolo tiene posibilidades de mejora, adicionando clustering con agregación, aumentando de esta forma su rendimiento energético [19], [40].

**Energy efficient clustering routing (EECR).** Desarrolla un enfoque jerárquico similar a los anteriores, se evidencia una mejora en el ahorro energético, propone la creación de clusters y la elección de los CHs en conjunto por la estación base y los nodos miembros del clúster. Los nodos operan en dos modos: a) Modo de sensorización, donde los nodos sensan y envían la información al líder de nodo o CH; b) Modo de CH, el nodo recoge información de los nodos del clúster, la trata, la comprime y la transmite a la estación base. Así mismo, opera en dos fases: a) fase de configuración, donde se forman los clusters y se eligen los CHs. La estación base divide en dos sucesivamente todos los nodos, creando subclústeres hasta el número deseado; b) Fase de comunicación de la información, se divide en tres partes: 1. Adquisición de datos; 2. Fusión de la información; 3. Transmisión. Cada nodo deja de transmitir durante los slots de tiempo que no le pertenece, para ahorrar energía. Las fases anteriores son similares a las del protocolo LEACH, por tanto presenta las mismas ventajas de agrupamiento, asignación y rotación de roles, sin embargo, podría ser necesario incluir mecanismos distribuidos para crear los clusters y elegir los CHs [19], [41].

**IMRAFRA.** Este protocolo combina encaminamiento jerárquico con geográfico, similar a LEACH, utiliza compresión para minimizar el consumo de energía. La retransmisión de paquetes entre los nodos líderes y la estación base, consiste en dos fases: a) inter-clusterrouting; b) intra-clusterrouting,



se implanta un algoritmo voraz para el encaminamiento inter-clúster y un algoritmo de enrutamiento multi-hop. Como ventajas se tiene que, alivia el problema de cuello de botella en el CH, ya que minimiza el trabajo del CH. Las largas distancias de transmisión se reducen a pequeños saltos, por lo que la comunicación puede llegar a ser inmune a las interferencias. Una desventaja al eliminar el cuello de botella es la adición de latencia en el proceso de adquisición de datos, por tanto, aumenta el consumo de energía lo cual disminuye la vida de la red. Ya que los nodos intermedios son elegidos por medio de criterios geográficos, puede suceder que estos tengan poca energía. Cuando hay un alto número de nodos en un clúster, las cadenas son grandes, lo cual aumenta el problema de latencia, que trae como consecuencia la congestión y, por tanto, el gasto energético se incrementa [42].

**Uniformly Distributed Adaptive Clustering Hierarchy routing protocol (UDACH).** Es un protocolo distribuido y de selección de los CHs con base en criterios de distribución uniforme de energía por la red, los CHs se distribuyen de manera uniforme por toda la red con un código único CDMA para cada uno. UDACH se divide en tres etapas: a) Construcción de clusters, se designan los clusters bajo ciertos criterios donde se incluye la energía del nodo; b) Construcción del árbol de CHs, organizados de acuerdo a la distancia de la estación base, con el fin de ahorrar energía; c) Envío de datos, es el envío de la información de manera periódica de los nodos a los CHs para que estos la fusionen y la remitan a la estación base. Como desventajas, se puede mencionar que, los nodos están fijos, por cuanto, se mueva un nodo se desestabiliza la red. A diferencia de la estación base, todo nodo usa la misma potencia de transmisión al formar los clusters, la localización de nodos es desconocida, no presenta mecanismos para tolerar fallos. En cuanto a las ventajas se puede afirmar que, la creación de un árbol de clusters para enrutar paquetes a la estación base, se traduce en un gasto menor y una mayor disipación de energía a través de la red. Otro factor a favor del manejo eficiente de energía, es la elección de los CHs de acuerdo a criterios de energía que posee [41], [43].

**Tree-Clustered Data Gathering Protocol (TCDGP).** Aplica otro tipo de estructura en árbol jerárquico para obtener buenos resultados en la eficiencia energética de la red. La operación del protocolo se desarrolla en tres etapas: a) Establecimiento de clusters, la estación base construye los clusters por medio del cálculo de las distancias entre nodos, actualizando esta información periódicamente; b) Construcción de árbol, la estación base construye un árbol de expansión mínima; c) Agregación de datos en TCDGP, los datos se envían entre niveles previamente fusionados, llegando al nodo raíz. Como ventajas, se puede decir que, cada nodo o la estación base tienen la capacidad de enviar mensajes a otro nodo de forma directa teniendo control propio de la energía utilizada para este proceso, aportando al consumo eficiente. De forma negativa, se asume que cada nodo tiene la misma energía inicial, y que los nuevos nodos poseen la misma energía que los antiguos [44].

**Energy-Efficient Distributed Unequal Clustering (EEDUC).** Se presenta como otra forma de crear nuevos clusters distribuidos, donde cada nodo configura un tiempo de espera que se determina de acuerdo a la energía residual y el número de nodos vecinos, ayudando a realizar la distribución de los nodos líderes CHs. Los CHs se escogen por competición local y sin iteración. Se presenta como solución al problema del hotspot presentado en redes de sensores inalámbricos. Su desempeño mejora significativamente respecto a LEACH [43].

**Hierarchical Tree based Energy efficient and Congestion aware Routing Protocol (HTECRP).** Se presenta como un protocolo eficiente a nivel energético, al igual que en el manejo de la congestión y distribución en la red, se buscan las mejores rutas para los datos de alta prioridad, previniendo de cierta manera la congestión. Las fases del proceso de encaminamiento en esta propuesta, son tres: a) Establecimiento de clusters, los nodos son particionados en clusters y se asigna un CH a cada clúster; b) Creación de árbol, determinando el camino desde cada nodo a la estación base, evaluado con respecto al menor costo posible, que es traducido en menor consumo de energía para el tráfico, se aclara que no siempre el camino menos costoso es el mejor cami-

no [19]. Se definen dos tipos de tráfico, de alta prioridad y de baja prioridad; c) Intercambio de datos, todos los nodos tienen una tabla de enrutamiento, descifrando el siguiente salto para cada paquete que entra. Como aspecto negativo, descuida la eficiencia energética, por consiguiente el tiempo de vida de la red es indeterminado [45].

**Hybrid Energy-efficient Tree-based Optimized Routing Protocol (HECTOR).** Es un protocolo híbrido basado en árbol, eficiente a nivel energético, basado en dos conjuntos de coordenadas virtuales, el primero basado en coordenadas raíz del árbol y el segundo basado en distancias de salto a lo largo de marcas. Estas coordenadas virtuales se utilizan para determinar la localización geográfica. HECTOR está pensado para ser escalable, basado en energía que garantice la entrega de la información en los sensores sin tener en cuenta su posicionamiento. Su diseño se basa en cuatro aspectos básicos: a) el ser escalable; b) libre de bucles; c) garantizar la entrega fiable; d) eficiente energéticamente, seleccionando el nodo que minimiza el costo a medida que la comunicación atraviesa los nodos hasta el destino. Es el primer protocolo de enrutamiento geográfico basado en coordenadas virtuales que genera valor respecto a la eficiencia energética como a la garantía de la entrega de la información [46].

**Energy-Balancing Unequal Clustering Protocol (EB-UCP).** Este protocolo obtiene un buen rendimiento en el tiempo de vida de los sensores, mediante el clustering desigual probabilístico, equilibrando el consumo energético entre todos los nodos. Así, los nodos CHs más cercanos ahorran más energía en su función de encaminamiento inter-clúster. La distribución de los sensores se define por medio de un algoritmo de balanceo energético por capas, por lo que su consumo de energía es el mismo en cada capa, mejorando energéticamente el mecanismo de transmisión respecto a EEUC y LEACH [43].

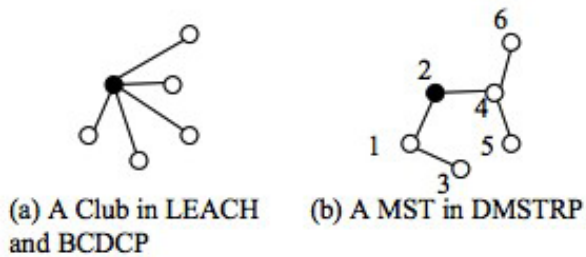
**Grid-clustering Routing Protocol (GROUP).** Protocolo de enrutamiento en malla, basado en clusters orientados a brindar escalabilidad. La estación base construye la malla con CHs de forma dinámica y aleatoria, distribuyendo positivamente los CHs que enrutan los datos hacia las estaciones base por caminos escogidos con base en la energía

y el equilibrio de carga de los nodos, posee mecanismos para recuperarse en una eventual pérdida de nodos buscando nuevos caminos de transmisión, sin embargo esta reconstrucción de la malla implica un gran consumo de energía. Con este protocolo se obtienen buenos resultados energéticos respecto a la distribución, pero respecto a la media las mejoras son mínimas. Por otro lado, en cuanto más nodos tenga la red el delay (retraso) punto a punto tiene muy malos resultados [12], [19].

**Base-station Controlled Dynamic Clustering Protocol (BCDCP).** Está enfocado a solucionar el inconveniente de la gestión de los recursos cuando se crean los clusters, y distribuye la planificación para realizar el enrutamiento. Se desarrolla bajo tres puntos principales: a) Se asume que la estación base posee gran cantidad de recursos a nivel de procesamiento, de comunicación y energéticos; b) Se parte de que la estación base conoce la posición y localización de todos los nodos de la red; c) Se define que todos los nodos tienen el control total sobre la potencia de transmisión, para así controlar el consumo de este proceso en los nodos teniendo en cuenta el rol que esté jugando. La estación base recoge los niveles de energía de los nodos, lo que puede sobrecargar las comunicaciones, crea planificaciones TDMA y las distribuye, agrupa los nodos en clusters, forma el árbol de CHs [12], [43].

**Dynamic Minimal Spanning Tree Routing Protocol (DMSTRP).** Es una mejora de BCDCP por medio de implementar MSTs (MinimumSpanningTrees), puede ser una buena solución para redes amplias. Con este mecanismo, los CHs recolectan toda la información del árbol de la red, a diferencia de BCDCP que lo hace la estación base. Sin embargo, los árboles incrementan la disipación de energía en la recepción y la fusión de la información; por otro lado, agrega más saltos dentro del clúster, pero si la distancia media de transmisión es reducida por el MST es más eficiente a nivel energético que sus predecesores. Sin embargo, el aumento de la complejidad de la estructura disminuye la tolerancia a fallos, lo que implica reconstrucción de la estructura y, por consiguiente, es costoso en términos energéticos, al igual no se distribuyen roles disminuyendo energéticamente el tiempo de vida de la red. El in-

cremento por el nivel de complejidad de la capacidad de cómputo atenta en contra del bajo consumo y bajo costo, lo que va en contravía de la filosofía de las redes de sensores inalámbricos [39], [43], [47]. Una comparativa de las dos últimas topologías es la que se presenta en la Fig. 3.



Fuente: Referencia [47]

Fig. 3. Comparación topología BCDCP y DMSTRP.

**Power Efficiency Routing Protocol (PER).** Enfocado a disminuir el consumo de los nodos mediante tres formas de abordar el problema: a) Creación de un algoritmo clusterizado para redes heterogéneas; b) Estrategia matemática de optimización de consumo; c) Solución para cubrir agujeros en la red. Está basado en una estructura jerárquica, los nodos CHs están dotados de buenas baterías, capacidad de procesamiento y una mejor antena, los nodos normales son económicos, con batería limitada y con poco rango de transmisión, los nodos no se mueven, la gran diferencia de este frente a los anteriores es la organización de los clusters en forma de anillo. El concepto de EOR pretende satisfacer el principio de mínimo consumo energético, que implica usar el mínimo número de saltos en la retransmisión de paquetes. En este sentido, se presenta el problema de la congestión en zonas donde la red presenta un agujero [21].

**Hybrid Grid Routing Protocol (HGRP).** La idea principal de HGRP es dividir correctamente la zona de despliegue de red en redes de acuerdo a la ubicación, cada una de las cuales contiene un esquema de enrutamiento de nodo y algunos nodos comunes. Los resultados de la simulación indican que, en comparación con la adopción de protocolos AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol) [50] y ZRP (Zone Routing Protocol) [10] directamente para el encaminamiento en heterogéneas redes inalámbricas, la aplicación de este protocolo

ofrece un costo de enrutamiento menor y, así mismo, menor consumo de energía [51].

**Q-LEACH.** Es una amalgama generada entre los protocolos de enrutamiento basados en la localización, y protocolos de enrutamiento basados en enrutamiento jerárquico. El Concepto explotado es el de inundación restringida, donde los nodos que se encuentran más cerca del destino o en una zona de la promoción, difunde el paquete. La distancia y la zona de reenvío de información se calculan en los nodos individuales para decidir su avance hacia el destino. En cada nodo se muestran los paquetes, el proceso se repite en cada nodo durante el camino hasta que llegue a su destino. Se utilizan procedimientos de agrupación en la que los nodos son organizados en cluster y cluster head, la información se distribuye a cada grupo para ejecutar la combinación de datos con el fin de disminuir la energía consumida por los nodos del cluster [52].

**Distributive Energy Efficient Adaptive Clustering (DEEAC).** Este protocolo es adaptativo hacia la tasa de entrega de datos y la energía residual en los nodos de la red. Trabaja con el modelo de clusters que son elegidos mediante un modelo estocástico, este distribuye un 50% mejor la energía que LEACH, mejorando el tiempo de vida de la red. Para optimizar el consumo de energía, se asegura que los nodos tengan una alta propabilidad para ser CHs. Un punto caliente se presenta cuando en una región se da una frecuente transmisión de datos, por lo tanto en estos casos se define la transmisión por medio de saltos cortos, consiguiendo así equilibrio en el consumo energético. El CH se selecciona de acuerdo a su nivel de actividad de transmisión o punto caliente y su energía residual [20].

**Energy-efficient aDaptative hiErarchical and robusT Architecture (EDETA).** Este protocolo combina técnicas derivadas de los protocolos existentes para obtener la máxima eficiencia energética, escalabilidad, fiabilidad, seguridad y tiempos acotados (QoS) en redes de sensores inalámbricas. La arquitectura jerárquica organiza la red en clústeres y árboles para implementar mecanismos de encaminamiento con estrategias de alta eficiencia energética. La arquitectura de clusters sencilla permite operaciones de reconfiguración automáticas ante

cambios de la estructura de la red sin una gran sobrecarga. Para maximizar el tiempo de vida de la red, se utilizan medios convencionales y sencillos, como la rotación de roles, o con mecanismos más complejos, como el uso de tareas de planificación y TDMA polling, que además de repartir tiempos ayudan a disminuir el consumo [22].

**Position Responsive Routing Protocol (PRRP).**

Este enfoque se basa en la distribución justa en la selección de gateways\cluster, orientado a minimizar al máximo la distancia posible entre los nodos y gateways\cluster con el objetivo de utilizar menos energía. Este protocolo de enrutamiento por posición sensible, muestra una mejora significativa del 45% en la eficiencia de energía de la red de sensores inalámbrica, mediante el aumento de la vida de la batería en los nodos individuales, respecto a otros protocolos de la misma índole. Además, el protocolo PRRP aumenta drásticamente la transferencia de datos y proporciona una mejor solución al problema de enrutamiento enfocado a la eficiencia energética, debido a la selección y distribución eficiente de gateways [48].

**Energy-Efficient data Routing Protocol for wireless sensor networks (EERP).** Este protocolo

selecciona un conjunto de buenos caminos, y elige uno basado en el estado de nodo y la función de costo del camino. En EERP, cada nodo tiene un número de vecinos a través del cual se puede enrutar paquetes a la estación base. Un nodo basa su decisión de enrutamiento en dos métricas: estado y la función de costo. Busca la información de los nodos vecinos respecto al vecino concerniente según la función de costo mínimo. El protocolo EERP minimiza y equilibra el consumo de energía, entre todos los nodos sensores, y logra una mejora evidente en la vida útil de la red [49].

*C. Características Generales Comparativas de los Protocolo-Enrutamientos Basados en Topologías de Redes Planas y Jerárquicas.*

En el encaminamiento jerárquico (ver Tabla 3), se destaca la capacidad de evitar colisiones y la agregación de datos frente a las redes planas (ver Tabla 4), además de dos puntos muy importantes como son la uniforme disipación de energía, alargando consecuentemente el tiempo de vida de la red, y la planificación por reserva del tiempo, aspecto principal en el que se enfocan principalmente los protocolos orientados a las redes de sensores inalámbricos [19] [22].

TABLA 3. CARACTERÍSTICAS ENRUTAMIENTO JERÁRQUICO

Enrutamiento Jerárquico
Planificación basada en reserve
Se evitan colisiones
Ciclo de trabajo reducido, debido a los modos periódicos de bajo consumo
Agregación de datos, realizada por cluster head
Mecanismos de enrutamiento permiten implementaciones de complejidad razonable
Requiere sincronización
Sobrecarga de formación de clústeres
Bajas latencias en los multiples saltos através de cluster heads
Consumo de energía uniforme y Reparto adecuado del canal

Fuente: Referencias [21], [25]

TABLA 4. CARACTERÍSTICAS ENRUTAMIENTO PLANO

Enrutamiento Plano
Planificación basada en contienda.
Sobrecarga por colisiones.
Ciclo de trabajo variable.
Los nodos en las rutas multisalto agregan los datos que reciben de los vecinos.
Mecanismos de enrutamiento complejos de implementar.
Los enlaces se forman sobre la marcha.
Las rutas se forman solo en regiones que tienen datos para transmitir. Sobrecarga cuando se necesita.
Latencias mientras se despiertan nodos intermedios y se configuran las rutas.
Consumo de energía en función de los patrones de tráfico. No se garantiza reparto óptimo del canal.

Fuente: Referencias [21], [25]

### III. COMPARACIÓN GENERAL

Se puede observar en la Tabla 5, cómo en la columna correspondiente a Consumo de Energía (Power Usage), los mejores desempeños en cuanto a clasificación del protocolo a usar corresponden a la de un protocolo jerárquico, ya que en estos

casos el ahorro energético es máximo. En LEACH y TEEN-APTEEN tenemos la posibilidad de agregación de la información y buena escalabilidad. La diferencia entre la elección de protocolos planos frente a protocolos jerárquicos es clara, en términos de ahorro energético.

TABLA 5. CLASIFICACIÓN Y COMPARACIÓN DE PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO EN LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

P	C	M	PU	CP	BN	AD	L	QoS	Cj	E	M	BC
SPIN	Plano	Posible	Limitada	No	Sí	Sí	No	No	Baja	Limitada	Sí	Sí
Directed Difussion	Plano	Limitada	Limitada	No	Sí	Sí	Sí	No	Baja	Limitada	Sí	Sí
Rumor Routing	Plano	Muy limitada	N/A	No	No	Sí	No	No	Baja	Buena	No	Sí
GBR	Plano	Limitada	N/A	No	No	Sí	No	No	Baja	Limitada	No	Sí
MCFA	Plano	No	N/A	No	No	No	No	No	Baja	Buena	No	No
CADR	Plano	No	Limitada	No	No	Sí	No	No	Baja	Limitada	No	No
CAOUGAR	Plano	No	Limitada	No	No	Sí	No	No	Baja	Limitada	No	Sí
ACQUIRE	Plano	Limitada	N/A	No	No	Sí	No	No	Baja	Limitada	No	Sí
EAR	Plano	Limitada	N/A	No	No	No		No	Baja	Limitada	No	Sí
LEACH	Jerárquico	BS fijo	Máxima	No	No	Sí	Sí	No	CHs	Buena	No	No
TEEN & APTEEN	Jerárquico	BS fijo	Máxima	No	No	Sí	Sí	No	CHs	Buena	No	No
PEGASIS	Jerárquico	BS fijo	Máxima	No	No	No	Sí	No	Baja	Buena	No	No
MECN & SMECN	Jerárquico	No	Máxima	No	No	No	No	No	Baja	Baja	No	No
SOP	Jerárquico	No	N/A	No	No	No	No	No	Baja	Baja	No	No
HPAR	Jerárquico	No	N/A	No	No	No	No	No	Baja	Buena	No	No

P	C	M	PU	CP	BN	AD	L	QoS	Cj	E	M	BC
VGA	Jerárquico	No	N/A	No	Sí	Sí	Sí	No	CHs	Buena	Sí	No
Sensor aggregate	Jerárquico	Limitada	N/A	No	No	Sí	No	No	Baja	Buena	No	Posible
TTDD	Jerárquico	Sí	Limitada	Sí	No	No	No	No	Mod-erada	Baja	Posible	Posible
EDETA	Jerárquico	BS fijo	Máxima	No	No	Sí	Sí		CHs	Alta		No
GAF	Localización	Limitada	Limitada	No	No	No	No	No	Baja	Buena	No	No
GEAR	Localización	Limitada	Limitada	No	No	No	No	No	Baja	Limitada	No	No
SPAN	Localización	Limitada	N/A	No	Sí	No	No	No	Baja	Limitada	No	No
MFR, GEDIR	Localización	No	N/A	No	No	No	No	No	Baja	Limitada	No	No
GOAFR	Localización	No	N/A	No	No	No	No	No	Baja	Buena	No	No
SAR	QoS	No	N/A	No	Sí	Sí	No	Sí	Mod-erada	Limitada	No	Yes
SPEED	Qos	No	N/A	No	No	No	No	Sí	Mod-erada	Limitada	No	Yes

**Nota:** P: Protocolo; C: Clasificación; M: Movilidad; PU; Power Usage; CP: Conocimiento de la posición; BN: Basado en Negociación; AD: Agragación de Datos; L: Localización; Cj: Complejidad; E: Escalabilidad; M: Multiruta; BC: Basado en Consultas.

Fuente: El autor, 2014.

#### IV. CONCLUSIÓN GENERAL

Resultado de la descripción cualitativa de los protocolos de enrutamiento basados en la topología de red jerárquica, se concluye que, a pesar del resultado positivo que cada método aporta a nivel energético, no existe un equilibrio total entre desempeño general de la red y desempeño energético deseado, lo que evidencia futuro campo de investigación abierto a nuevas propuestas derivadas de los logros que cada protocolo propone. Este artículo se pretende consolidar como un punto de partida para el desarrollo de proyectos que generen impacto en el desempeño de las redes de sensores inalámbricos.

#### REFERENCIAS

[1] J. Capella, R. Ors, A. Bonastre, and J. Serrano, “New challenges in wireless sensor networks: fault tolerance and real time, in Industrial Technology”, ICIT 2005, IEEE In-

ternational Conference on, 2005, pp. 1385-1390.

[2] V. Rajaravivarma, Y. Yang, and T. Yang, “An overview of wireless sensor network and applications”, in System Theory, Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on, 2003, pp. 432-436.

[3] M. Patil, and R. Biradar, “A survey on routing protocols in wireless sensor networks”, in Networks (ICON), in 18th IEEE International Conference on, 2012, pp. 86-91.

[4] N. Mitton, and R. Wolhuter, “Energy harvesting in wireless sensor networks”, in Rechargeable Sensor Networks: Technology, Theory, and Application - Introducing Energy Harvesting to Sensor Networks, World Scientific Publishing Company, 2014, p. 370.

- [5] M. Tubaishat, and S. Madria, "Sensor networks: an overview, Potentials", IEEE, vol. 22, no. 2, pp. 20-23, 2003.
- [6] D. Culler, D. Estrin, and M. Srivastava, Guest editors', "Introduction: Overview of sensor networks", Computer, vol. 37, no. 8, pp. 41-49, 2004.
- [7] G. Muller, T. Rittenschober, and A. Springer, "A wireless sensor network using energy harvesting for agricultural machinery", *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 127, no. 3, pp. 39-46, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s00502-010-0719-0>
- [8] R. Dahiya, A. Arora, and V. Singh, "Modelling the energy efficient sensor nodes for wireless sensor networks", *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, pp. 1-5, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s40031-014-0149-1>
- [9] N. Praveena, and H. Prabha, "An efficient multi-level clustering approach for a heterogeneous wireless sensor network using link correlation", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 1, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1186/1687-1499-2014-168>
- [10] N. Pantazis, S. Nikolidakis, and D. Vergados, "Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey", *Communications Surveys Tutorials*, IEEE, vol. 15, no. 2, pp. 551-591, 2013.
- [11] H. Tian, H. Shen, and Y. Sang, "Maximizing network lifetime in wireless sensor networks with regular topologies", *The Journal of Supercomputing*, vol. 69, no. 2, pp. 512-527, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11227-013-0987-7>
- [12] S. Zairi, B. Zouari, and E. Niel, "Configuration of sensor networks by energy minimization", in *Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM'08, Second International Conference on*, 2008, pp. 141-146.
- [13] V. Rosello, J. Portilla, and T. Riesgo, "Ultra low power fpga-based architecture for wake-up radio in wireless sensor networks", in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2011, pp. 3826-3831. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2011.6119933>
- [14] L. Wang, Y. Yang, and W. Zhao, "Network coding-based multipath routing for energy efficiency in wireless sensor networks", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 1, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1186/1687-1499-2012-115>
- [15] W. Khan, N. Saad, and M. Aalsalem, "An overview of evaluation metrics for routing protocols in wireless sensor networks", in *Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 4th International Conference on*, 2012, vol. 2, pp. 588-593.
- [16] D. Apiletti, E. Baralis, and T. Cerquitelli, "Energy-saving models for wireless sensor networks", *Knowledge and Information Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 615-644, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s10115-010-0328-6>
- [17] A. Sharma, and P. Lakkadwala, "Performance comparison of reactive and proactive routing protocols in wireless sensor network", in *Reliability, Infocom Technologies and Optimization (ICRITO) (Trends and Future Directions)*, in *3rd International Conference on*, 2014, pp. 1-6.
- [18] S. Barfunga, P. Rai, and H. Sarma, "Energy efficient cluster based routing protocol for wireless sensor networks", in *Computer and Communication Engineering (ICCCE), International Conference on*, 2012, pp. 603-607.

- [19] J. Al-Karaki, and A. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey", *Wireless Communications*, IEEE, 2004, vol. 11, no. 6, pp. 6-28.
- [20] S. Ehsan, and B. Hamdaoui, "A survey on energy-efficient routing techniques with qos assurances for wireless multimedia sensor networks", *Communications Surveys Tutorials*, IEEE, 2011, vol. 99, pp. 1-14.
- [21] J. Capella, A. Bonastre, J. Serrano, and R. Ors, "A new robust, energy-efficient and scalable wireless sensor networks architecture applied to a wireless fire detection system", in *Wireless Networks and Information Systems, WNIS '09, International Conference on*, 2009, pp. 395-398.
- [22] J. Capella, A. Bonastre, R. Ors, and S. Clement, "A new energy-efficient, scalable and robust architecture for wireless sensor networks", in *New Technologies, Mobility and Security (NTMS), in 3rd International Conference on*, 2009, pp. 1-6.
- [23] Anjali, Shikha, and M. Sharma, "Wireless sensor networks: Routing protocols and security issues", in *Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), in International Conference on*, 2014, pp. 1-5.
- [24] J. Capella, A. Bonastre, and R. Ors, "Industrial applications of wireless networks: a bridge crane distributed control system based on Bluetooth", in *Industrial Technology, IEEE ICIT '04, IEEE International Conference on*, 2004, vol. 2, pp. 824-829.
- [25] J. Lotf, and S. Ghazani, "Overview on routing protocols in wireless sensor networks", in *Computer Engineering and Technology (ICCET), 2nd International Conference on*, 2010, vol. 3, pp. 610-614.
- [26] X. Ma, Y. Fang, and X. Bai, "A balanced energy consumption clustering algorithm for heterogeneous energy wireless sensor networks", in *Wireless Communications, Networking and Information Security (WC-NIS), IEEE International Conference on*, 2010, pp. 382-386.
- [27] M. Ahmadi, H. Faraji, and H. Zohrevand, "Clustering algorithm to reduce power consumptions for wireless sensor networks", *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 433-440. [Online]. Available: <http://www.scientific.net/AMR.433-440.5228>
- [28] H. Chen, C. Tse, and J. Feng, "Impact of topology on performance and energy efficiency in wireless sensor networks for source extraction", *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 2009, vol. 20, no. 6, pp. 886-897.
- [29] M. Zhang, Y. Lu, C. Gong, and Y. Feng, "Energy-efficient maximum lifetime algorithm in wireless sensor networks", in *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), International Conference on*, 2008, vol. 2, pp. 931-934.
- [30] C. Xie, and J. Zhang, "Analysis and improvement of LEACH routing algorithm", *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 457-458. [Online]. Available: [https://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-24728-6\\_10](https://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-24728-6_10)
- [31] M. Liao, and H. Zhang, "A clusters algorithm based on the threshold for wireless sensor network", *Advances in Intelligent and Soft Computing*, 2012, p. 114. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03718-4\\_130](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03718-4_130)
- [32] R. Vidhyapriya, and P. Vanathi, "Energy aware routing for wireless sensor networks", in *Signal Processing, Communications and Networking, ICSCN '07, International Conference on*, 2007, pp. 545-550.
- [33] J. Bo, J. Zhong-qiu, and Y. Shu, "Wave energy supplying for wireless sensor nodes", in *Computer Application and System Modeling (ICCASM), International Conference on*, 2010, vol. 5, pp. 123-126.



- [34] C. Singh, O. Vyas, and M. Tiwari, "An overview of routing protocols of sensor networks", in *Computational Intelligence for Modelling Control Automation*, International Conference on, 2008, pp. 873-878.
- [35] R. Yueqing, and X. Lixin, "A study on topological characteristics of wireless sensor network based on complex network", in *Computer Application and System Modeling (ICCASM)*, in International Conference on, 2010, vol. 15, pp. 486-489.
- [36] A. Akbulut, C. Parmaksizoglu, A. Zaim, and G. Yilmaz, "Energy and distance factor based routing protocol for wireless sensor networks using mobile agents", in *Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, in 5th International Conference on, 2011, pp. 399-402.
- [37] N. Pantazis, and D. Vergados, "A survey on power control issues in wireless sensor networks", *Communications Surveys Tutorials*, IEEE, 2007, vol. 9, no. 4, pp. 86-107.
- [38] G. Raghunandan, and B. Lakshmi, "A comparative analysis of routing techniques for wireless sensor networks", in *Innovations in Emerging Technology (NCOIET)*, National Conference on, 2011, pp. 17-22.
- [39] K. Pavai, A. Sivagami, and D. Sridharan, "Study of routing protocols in wireless sensor networks", in *Advances in Computing, Control, Telecommunication Technologies, ACT'09*. International Conference on, 2009, pp. 522-525.
- [40] L. Raicu, L. Schwiebertt, S. Fowlert, and S. Gupta, "e3d: an energy efficient routing algorithm for wireless sensor networks", in *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference*, 2004, pp. 25-30.
- [41] W. Liu, and J. Yu, "Energy efficient clustering and routing scheme for wireless sensor networks", in *Intelligent Computing and Intelligent Systems*, ICIS 2009, IEEE International Conference on, 2009, vol. 3, pp. 612-616.
- [42] G. Yin, G. Yang, W. Yang, B. Zhang, and W. Jin, "An energy-efficient routing algorithm for wireless sensor networks", in *Internet Computing in Science and Engineering, ICICSE'08*. International Conference on, 2008, pp. 181-186.
- [43] M. Shemshaki, and H. Shahhoseini, "Energy efficient clustering algorithm with direct path supports", in *2009 International Conference on Signal Processing Systems*, 2009, pp. 277-281.
- [44] K. C. Huang, Y. S. Yen, and H. C. Chao, "Tree-clustered data gathering protocol (tcd-gp) for wireless sensor networks", in *Future Generation Communication and Networking (FGCN 2007)*, 2007, vol. 2, pp. 31-36.
- [45] A. H. Mohajerzadeh, M. H. Yaghmaee, and Z. Eskandari, "Tree based energy efficient and congestion aware routing protocol for wireless sensor networks", in *11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, ICCS 2008*, 2008, pp. 1707-1711. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICCS.2008.4737472>
- [46] N. Mitton, T. Razafindralambo, D. Simplot-Ryl, and I. Stojmenovic, "Hector is an energy efficient tree-based optimized routing protocol for wireless networks", in *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, MSN 2008, The 4th International Conference on*, 2008, pp. 31-38.
- [47] G. Huang, X. Li, and J. He, "Dynamic minimal spanning tree routing protocol for large wireless sensor networks", M. S. thesis, 2006.
- [48] N. Zaman, T. J. Low, and T. Alghamdi, "Energy efficient routing protocol for wireless sensor network", in *Advanced Communication Technology (ICACT)*, 16th International Conference on, 2014, pp. 808-814.

- [49] S. Boulfekhar, and M. Benmohammed, “A novel energy efficient and lifetime maximization routing protocol in wireless sensor networks”, *Wireless Personal Communications*, 2013, vol. 72, no. 2, pp. 1333–1349. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11277-013-1081-4>
- [50] D. Upadhyay, P. Banerjee, and A. Rao, “Critical performance comparison of on demand routing protocols for optimal application in wireless sensor network”, in *Confluence The Next Generation Information Technology Summit (Confluence)*, 5th International Conference , 2014, pp. 462-466.
- [51] Y. Shen, Q. Pei, N. Xi, J. Ma, Q. Xu, and H. Yin, “Hgrp: Hybrid grid routing protocol for heterogeneous hierarchical wireless networks”, in *Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS)*, Third International Conference on, 2011, pp. 320-327.
- [52] J. Gnanambigai, N. Rengarajan, and K. Anbukkarasi, “Q-leach: An energy efficient cluster based routing protocol for wireless sensor networks”, in *Intelligent Systems and Control (ISCO)*, 7th International Conference on, 2013, pp. 359-362.